

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.9.048

**НЕРОДА**  
**Михаил Владимирович**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА  
ПОВЕРХНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ  
УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ  
ШЛИФОВАНИЕМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Минск, 2010

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Спиридонов Николай Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Акулович Леонид Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии металлов Белорусского государственного аграрного технического университета;

**Лебедев Владимир Яковлевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией физики поверхностных явлений Физико-технического института НАН Беларуси

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения» НАН Беларуси

Защита состоится «04» июня 2010 г. в 14 часов 00 минут на заседании совета Д 02.05.03 по защите диссертаций в Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп.1, ауд. 202, тел. ученого секретаря: 292 24 04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «04» мая 2010 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, профессор

О.Г. Девойно

© Нерода М.В., 2010

© БарГУ, 2010

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время широкое распространение в промышленном и ремонтном производствах получили технологии нанесения упрочняющих покрытий газотермическими методами и методами наплавки, позволяющие повышать эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин и экономить материальные и трудовые ресурсы. Для формирования покрытий используются материалы, содержащие соединения никеля, хрома, сормайта, которые характеризуются высокими физико-механическими свойствами (твердостью, вязкостью), что затрудняет их последующую механическую обработку. Представляется перспективным для их обработки применить комбинированный метод магнитно-электрического шлифования (МЭШ), использующий в зоне обработки электрическую и магнитную энергии. Однако в литературе отсутствуют сведения о механизме процессов, происходящих в зоне обработки МЭШ, и их влиянии на качество упрочняющих покрытий и производительность обработки, что требует проведения научных исследований.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами, темами**

Работа выполнялась в соответствии с темой «Разработка и исследование процессов финишной обработки поверхностей деталей машин, упрочненных газотермическими защитными покрытиями путем воздействия механических, электрических и магнитных энергий» (с 2007 по 2009 гг., № госрегистрации 20071700, дата регистрации 06.07.2007) по заданию Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Отдельные этапы работы велись в соответствии с Государственной программой ориентированных фундаментальных научных исследований «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии» по договору ГБ 06-27 на тему: «Разработка технологии лазерного легирования направляющих роликов и бандажей оборудования для производства кабельной продукции» (с 2006 по 2010 гг.).

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки газотермических и наплавленных упрочняющих покрытий магнитно-электрическим шлифованием. Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

1) проанализировать существующие методы шлифования поверхностей деталей машин, использующие в зоне обработки механическую, электрическую и электромагнитную виды энергий, по критериям производительности процесса обработки и качества поверхности и обосновать возможность применения спо-

соба МЭШ для обработки поверхностей деталей машин с упрочняющими покрытиями на основе никеля и хрома, а также сормайта;

2) выявить физические закономерности механических, термических, электроконтактных и электромагнитных процессов, происходящих в зоне обработки МЭШ, и определить механизмы их влияния на формирование качественных показателей поверхностей деталей машин с упрочняющими покрытиями, а также на производительность обработки;

3) исследовать влияние режимов МЭШ (технологического тока, магнитной индукции, продольной подачи, скорости на периферии абразивного круга, глубины шлифования) на физико-механические свойства материала (структуру, твердость) для обеспечения прочности сцепления покрытия с основой и повышения эксплуатационных (износостойкость) свойств упрочняющих покрытий;

4) оптимизировать режимы МЭШ с целью повышения производительности обработки и обеспечения требуемого качества (шероховатости поверхности, прочности сцепления с основой) упрочненных газотермическими покрытиями из самофлюсующихся порошковых материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2 (УГТП СМ) и наплавленных сормайтом ГН1 (НС) поверхностей деталей машин;

5) разработать и внедрить в производство технологические процессы МЭШ деталей машин с УГТП СМ, позволяющие производить их одновременную упрочняющую (оплавление) и механическую (шлифование) обработку и сократить технологическое время на выполнение операции шлифования.

Объектом исследования являются поверхности деталей с упрочняющими покрытиями из материалов на основе никеля и хрома, а также поверхности, наплавленные сормайтом, предметом – способ магнитно-электрического шлифования.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты математического моделирования процесса влияния режимов МЭШ на величину электромагнитной силы, которая действует на электрические разряды, образующиеся в зоне обработки при прохождении технологического тока через стружку и микровыступы на поверхности упрочняющего покрытия, позволившие установить механизм электроэрозионного действия технологического тока на поверхность упрочняющего покрытия, заключающийся в смещении электрических разрядов в сторону действия электромагнитной силы, что приводит к увеличению площади электроэрозионного воздействия и повышению объема электроэрозионных лунок в 2–2,5 раза и позволяет повысить производительность обработки упрочняющих газотермических покрытий из самофлюсующихся материалов и наплавов сормайтом в 2,5 раза по сравнению с алмазным шлифованием.

2. Физические зависимости влияния режимов МЭШ на тепловые процессы в зоне обработки, учитывающие теплофизические свойства материала упроч-

няющего покрытия (температуру плавления, плотность, удельную теплоемкость), а также геометрические размеры зоны обработки, что позволило определить распределение температуры в поверхностном слое напыленного упрочняющего газотермического покрытия, связанное с образованием тепла в основе под действием электромагнитного поля и термическим влиянием электроискровых и электродуговых разрядов на поверхностный слой упрочняющего покрытия, и установить режимы, обеспечивающие его оплавление на заданную глубину.

3. Эмпирические модели, связывающие режимы МЭШ с шероховатостью поверхности и производительностью обработки, позволившие оптимизировать значения режимов и обеспечить максимальную производительность обработки (до 2 700 мм<sup>3</sup> / мин), при заданных качественных показателях газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов и наплавов сор-майтом (шероховатости поверхности, прочности сцепления с основой).

4. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов МЭШ на свойства и структуру напыленных газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов, позволившие установить оптимальные режимы, при которых формируется мелкодисперсная структура с равномерным распределением карбидо-боридной фазы в пересыщенном растворе никеля, что обеспечивает повышение износостойкости в 2,5–3,0 раза и прочности сцепления покрытия с основой в 3,3–3,6 раза по сравнению с необработанным МЭШ напыленным упрочняющим покрытием.

#### **Личный вклад соискателя**

Автор проанализировал и сравнил по критериям производительности обработки и качества получаемой поверхности основные методы шлифования поверхностей деталей машин с наложением на зону обработки дополнительных источников энергии, а также обосновал применение нового способа магнитно-электрического шлифования упрочняющих покрытий.

Основными соавторами по опубликованным работам являются: профессор Н. В. Спиридонов, профессор В. М. Благодарный, доцент Э. И. Дмитриченко. Основные научные исследования, представленные в диссертационной работе, выполнялись под руководством Н. В. Спиридонова. Консультационную помощь в проведении экспериментов оказывал В. М. Благодарный. Внедрению результатов исследования в производство содействовал Э. И. Дмитриченко.

#### **Апробация результатов диссертации**

Основные материалы диссертации представлены и обсуждены на Международной научно-технической конференции в ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» (Могилев, 2004), Международной научно-практической конференции молодых исследователей (Барановичи, 22 февраля 2005), научно-практической студенческой конференции (Барановичи, 27 апреля

2006), Международной научно-практической конференции «Становление современной науки–2006» (Днепропетровск, 2006), VII Международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов (Гомель, 3–4 мая 2007 г.), Международной молодежной научной конференции «XXXIII Гагаринские чтения» (Москва, 2007), 60-й научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БНТУ (Минск, 2007), Международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Молодежь – производству» (Витебск, 22 ноября 2006 г.), VII Международной научно-технической конференции «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» ПГУ (Новополоцк, 29–30 апреля 2009 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По теме диссертации опубликовано 29 научных работ. Из них 3 научные статьи, входящие в перечень ВАК (0,96 а. л.), 2 научные статьи в периодических зарубежных изданиях (0,65 а. л.), 23 публикации в сборниках научных трудов и материалов конференций, 1 патент на изобретение Республики Беларусь.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация общим объемом 212 страниц состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения и приложений. Работа изложена на 99 листах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 23 таблицы, список использованных источников из 129 наименований, в том числе 29 публикаций соискателя.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит обоснование актуальности темы исследования, которая определяется нерешенностью ряда научных проблем в области обработки твердых материалов и перспективностью применения нового способа магнитно-электрического шлифования упрочняющих покрытий, обеспечивающего их требуемое качество и повышающего производительность обработки.

**Первая глава** посвящена анализу существующих методов шлифования покрытий, использующих в зоне обработки механическую, электрическую и электромагнитную энергии для повышения производительности обработки твердых материалов, в том числе упрочняющих покрытий.

На современном этапе развития технологии шлифования упрочняющих покрытий актуальным является использование в зоне обработки дополнительных источников энергии (механической, электрической, электромагнитной), что обеспечивает повышение производительности обработки и достижение высоких эксплуатационных свойств обработанных поверхностей.

Магнитно-электрическое шлифование – метод обработки поверхностей деталей машин, в зоне обработки которого используются дополнительные источники энергии технологического тока и электромагнитного поля, что позволяет значительно повысить производительность обработки (по сравнению с традиционным шлифованием в 1,5–2 раза). Преимущества МЭШ по сравнению с аналогичными методами шлифования (электроалмазным, электроабразивным, электроэрозионным) заключаются также в применении более дешевого (по сравнению с электроалмазным в 2–3 раза) инструмента, возможности обеспечения процесса МЭШ на станках шлифовальной группы путем их модернизации. Важным является и то, что, управляя режимами МЭШ, можно изменять физико-механические свойства упрочняющих покрытий (повышать твердость, уменьшать шероховатость поверхности, повышать прочность сцепления покрытий с основой). Представляется перспективным применение способа МЭШ к упрочняющим покрытиям, полученным наиболее распространенными методами: газопламенным напылением и наплавкой. Сформулирована цель и определены задачи исследования, намечены пути их решения.

**Вторая глава** содержит выбор материалов покрытий, применяемого оборудования и методик проведения исследований.

Объектом исследования выбраны напыленные УГТП СМ марок ПГ-СР4, ПГ-СР2, а также поверхности, наплавленные сормайт ГН1. Материалы покрытий выбраны из условий их наиболее широкого применения на машиностроительных предприятиях при восстановлении и упрочнении поверхностей деталей машин, а также трудностей, связанных с их последующей механической обработкой. Исследовались наиболее твердый 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 схожим по физико-механическим и эксплуатационным свойствам с оплавленными УГТП СМ. Наплавленное сормайт ГН1 упрочняющее покрытие имеет достаточно прочную адгезионную связь с основой, однако высокая твердость (до 62 *HRC*) усложняет его последующую механическую обработку. Необходимо исследовать процесс МЭШ наплавки типа сормайт ГН1 с целью повышения производительности обработки при обеспечении требуемого качества поверхности.

Для реализации процесса МЭШ упрочняющих покрытий были модернизированы под опытно-промышленные установки станки моделей НГФ-100 и ЗЕ642Е. Инструментом являлся абразивный круг на токопроводящей связке марки ПП 250 × 25 × 32 – 5С25СТ6КАЛ.

Влияние режимов МЭШ на шероховатость поверхности упрочняющих покрытий изучали по профилограммам, полученным с помощью профилографа-профилометра модели АБРИС-ПМ7.

Структура поверхностного слоя упрочняющих покрытий изучалась с помощью оптических микроскопов моделей *Stemi 2000C* и *МЕТАМ ЛВ-32* (Ю-33.25.416), максимальное увеличение которых составляет 250 и 1 000 соответственно.

Измерения температуры в зоне обработки МЭШ проводили дистанционным методом с применением пирометра модели *Raynger MX4* с точностью фиксирования показаний температуры в пределах  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ .

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

При определении прочности сцепления газотермических упрочняющих покрытий с основой использовали штифтовой метод.

Обработку экспериментальных данных проводили методами математической статистики с использованием стандартного пакета *Microsoft Office*.

**Третья глава** посвящена исследованию закономерностей физических процессов магнитно-электрического шлифования упрочняющих покрытий. К процессам МЭШ, влияющим на формирование качества упрочняющих покрытий и производительность обработки, относятся: механическое резание и пластическое оттеснение материала упрочняющего покрытия зернами абразивного круга; электроконтактные и электромагнитные явления, возникающие при прохождении технологического тока через стружку и микровыступы на поверхности упрочняющего покрытия в зоне обработки.

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

$$Q_{\text{мех}} = HtS, \quad (1)$$

где  $H$  – ширина шлифуемой поверхности (или высота абразивного круга), мм;  $t$  – глубина шлифования, мм;  $S_{\text{пр}}$  – продольная подача, мм / мин.

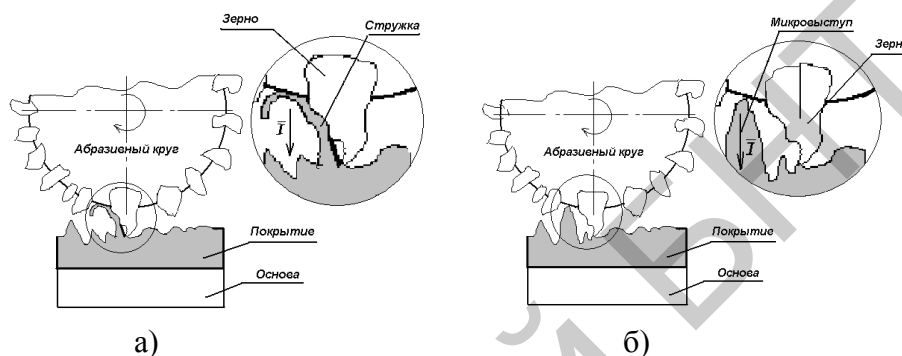
Расчетное значение минимальной и максимальной производительности обработки для исследуемых режимов МЭШ упрочняющих покрытий находится в пределах  $Q = 198 - 1\,404 \text{ мм}^3 / \text{мин}$ . Шероховатость поверхности упрочняющего покрытия формируется за счет одновременного действия на него множества абразивных зерен, хаотически расположенных в связке абразивного круга, и находится в пределах  $Ra\ 1,5-3,2 \text{ мкм}$ .

Установлено, что действие технологического тока при МЭШ на поверхностный слой упрочняющего покрытия проявляется в результате термического



и электроэрозионного влияния искровых и электродуговых разрядов. Электроискровые разряды происходят в зоне обработки в результате короткого замыкания продуктами шлифования (стружкой либо через микровыступы) цепи «токопроводящая связка абразивного круга – поверхность упрочняющего покрытия» (рисунок 1).

В месте короткого замыкания стружкой цепи «токопроводящая связка абразивного круга – поверхность упрочняющего покрытия» из-за прохождения тока высокой плотности интенсивно выделяется теплота.



а) через стружки, снимаемые абразивными зернами;

б) через микровыступы поверхностного слоя защитного покрытия

**Рисунок 1 – Схемы короткого замыкания цепи «токопроводящая связка абразивного круга – поверхность упрочняющего покрытия»**

Стружка нагревается до температуры плавления и между электродами возникает электрический разряд, приводящий к электроэрозионному разрушению и оплавлению поверхности упрочняющего покрытия.

Производительность обработки  $Q_{эр}$ , мм<sup>3</sup> / мин, происходящей за счет электроэрозионного разрушения поверхности упрочняющих покрытий при МЭШ, можно определить по полученной зависимости

$$Q_{эр} = \frac{\pi D_k H n i_p R^3}{6}, \quad (2)$$

где  $D_k$  – диаметр абразивного круга, мм;  $H$  – высота абразивного круга, мм;  $n$  – частота вращения абразивного круга, мин<sup>-1</sup>;  $i_p$  – количество режущих зерен на единице площади периферии абразивного круга, шт / мм<sup>2</sup>;  $R$  – радиус электроэрозионной лунки, мм.

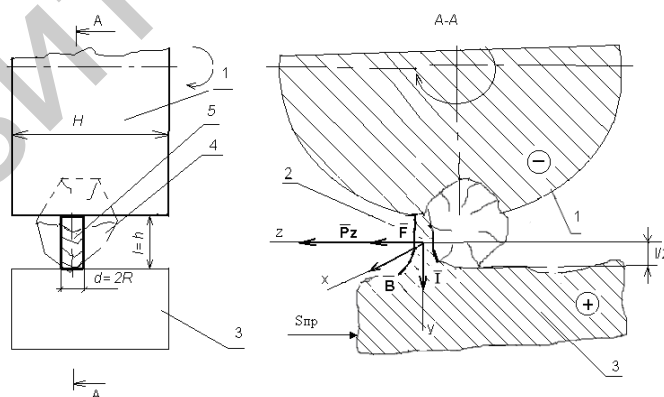
Рассчитаны максимальные значения производительности обработки  $Q_{эр}$  за счет электроэрозионного разрушения поверхностей с напыленными УГТП СМ марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 для исследуемых режимов МЭШ, которые равны 155,7 мм<sup>3</sup> / мин и 205,8 мм<sup>3</sup> / мин соответственно. Для сормайта ГН1 макси-

мальное расчетное значение производительности обработки  $Q_{\text{эр}}$  равно  $240,6 \text{ мм}^3 / \text{мин}$ . Формула (2) является идеализированной и может служить для приблизительной оценки производительности обработки.

В процессе МЭШ наложение на зону обработки электромагнитного поля при определенном расположении векторов технологического тока и магнитной индукции создает силу  $F$ , влияющую на каналы искровых разрядов в момент прохождения тока через стружки или микровыступы поверхности и действующую в одном направлении с главной силой резания  $P_z$  (рисунок 2). Сила  $F$ , действующая на единичный искровой разряд, определяется по разработанной физико-математической модели, учитывающей режимы МЭШ

$$F = \frac{IBl}{H \left( 1 \pm \frac{S_{\text{пр}}}{60v_k} \right) \sqrt{D_k t i_p}}, \quad (3)$$

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;  $v_k$  – скорость на периферии абразивного круга, м / с;  $D_k$  – диаметр абразивного круга, м;  $t$  – глубина шлифования, м;  $i_p$  – количество режущих зерен на единице площади, ограниченной длиной дуги контакта и высотой абразивного круга, шт / м<sup>2</sup>.



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

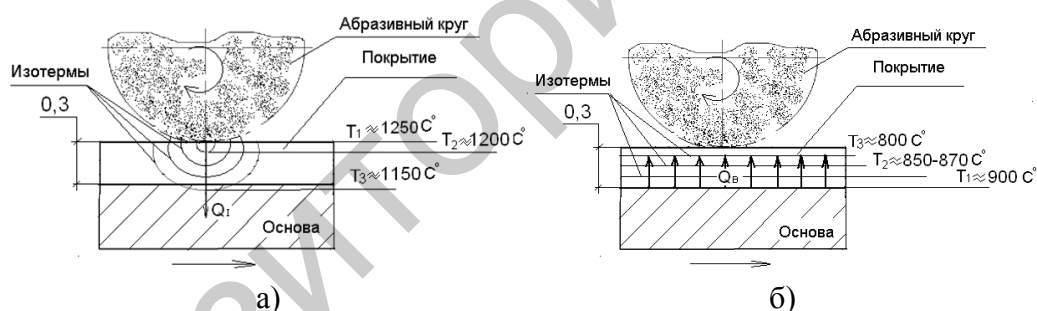
**Рисунок 2 – Схема векторов сил, действующих на стружку, снимаемую единичным режущим зерном в процессе МЭШ**

В результате действия силы  $F$  на канал единичного искрового разряда происходит его смещение и на поверхности упрочняющего покрытия образуется электроэрозионный след в форме продолговатой лунки, оказывающий влияние на шероховатость поверхности. При этом рассчитанное по формуле (2) значе-

ние производительности обработки  $Q_{\text{эп}}$  за счет электроэрозионного разрушения поверхности УГТП СМ (для исследуемых режимов МЭШ) достигает значений 400–600 мм<sup>3</sup>/мин, что в 2,5 раза выше, чем при алмазном шлифовании. Это связано с увеличением площади электроэрозионного действия искрового разряда и, соответственно, объема удаляемого материала.

В результате термического влияния электроискровых и электродуговых разрядов на поверхность упрочняющего покрытия происходит оплавление микровыступов. Образующийся при этом расплав растекается по поверхности и под действием электромагнитного поля заполняет микровпадины, что способствует уменьшению шероховатости поверхности  $Ra$  с 2,5–3,2 мкм до 0,5–1,25 мкм. При МЭШ наплавленного упрочняющего покрытия из сормаита ГН1 шероховатость поверхности уменьшается до значений 0,3–0,4 мкм.

В процессе МЭШ поверхностный слой упрочняющего покрытия подвергается температурным воздействиям. 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, передается за счет теплопроводности от основы к покрытию (рисунок 3).



- а) при преобразовании механической и электрической энергий в процессе МЭШ;  
 б) при преобразовании электромагнитной энергии в процессе МЭШ

**Рисунок 3 – Схемы распределения температурных полей в поверхностном слое напыленного газотермического упрочняющего покрытия**

Для УГТП СМ одним из качественных показателей является обеспечение прочности сцепления покрытия с основой. Прочная металлическая связь напыленного газотермического упрочняющего покрытия с основой образуется при значении температуры на границе «упрочняющее покрытие – основа», равной температуре плавления материала покрытия (для УГТП СМ марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2  $T_{\text{пл1}} = 990^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{пл2}} = 1\ 050^\circ\text{C}$  соответственно). При МЭШ напыленных УГТП СМ на первых проходах необходимо обеспечить максимальную производительность обработки. При этом толщина нанесенного слоя газотермического упрочняющего покрытия должна находиться в пределах, учитывающих

величину допуска на износ  $\delta_{и}$  (для МЭШ  $\delta_{и} = 0,3-0,4$  мм), величину погрешности установки детали  $\delta_{уст}$ , величину дефектного слоя припуска  $\delta_{д}$ , величину усадки покрытия  $\delta_{ус}$ .

Значения режимов МЭШ напыленных УГТП СМ, обеспечивающие максимальную производительность обработки на первых проходах, должны находиться в пределах:  $I = 2,5-5,0$  А,  $B = 0,1-0,2$  Тл,  $S = 750-936$  мм / мин,  $t = 0,1-0,15$  мм,  $v = 13,2-21$  м/с. При достижении значения припуска 0,4 мм на предпоследнем проходе обработку МЭШ необходимо вести на режимах ( $I = 15-20$  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  $\Delta$ , равную величине допуска на износ  $\Delta = \delta_{и} = 0,4$  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:  $S = 750-936$  мм / мин;  $t = 0,005$  мм;  $v = 35-42$  м / с.

В связи со сложностью экспериментальных исследований тепловых процессов, связанных с малыми размерами зон термического влияния электрических разрядов, необходимые сведения для выяснения механизма распределения температуры в поверхностном слое упрочняющих покрытий были получены расчетным путем. В результате решения уравнения теплового баланса разработана физическая модель, учитывающая связь технологического тока с теплофизическими свойствами материала упрочняющего покрытия и длиной дуги контакта абразивного круга с поверхностью упрочняющего покрытия

$$I = \sqrt{\frac{\rho H L_{к} [0,1 f_{с} c T_{пл} - T_{дет} + 0,12 f_{пов} \lambda] + c_{к} m \Delta T}{\eta R t}}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала упрочняющего покрытия, кг / м<sup>3</sup>;  $H$  – высота абразивного круга, м;  $L_{к}$  – длина дуги контакта поверхности абразивного круга с деталью, м;  $f_{с}$  – средняя высота стружки, м;  $c$  – удельная теплоемкость материала упрочняющего покрытия, Дж / (кг · К);  $T_{пл}$  – температура плавления материала упрочняющего покрытия, К;  $T_{дет}$  – температура поверхности детали до обработки, К;  $f_{пов}$  – средняя высота микронеровностей поверхности в пределах длины дуги контакта, м;  $\lambda$  – удельная теплота плавления материала упрочняющего покрытия, Дж / кг;  $c_{к}$  – удельная теплоемкость материала связки абразивного круга, Дж / (кг · К);  $m$  – масса нагретого материала связки абразивного круга, кг;  $\Delta T = T_{пл} - T_0$  – разность температуры плавления и начальной температуры мате-

риала связки круга, К;  $\eta$  – КПД;  $R$  – электрическое сопротивление микронеровностей покрытия, Ом;  $\tau$  – время обработки поверхности, с.

Распределение температуры в поверхностном слое упрочняющего покрытия определяли с учетом разработанной физической модели (4) по уравнению теплопередачи

$$T = T_0 + \frac{\Theta \eta_{\text{и}} \rho H L_{\text{к}} [0,1 f_{\text{с}} c T_{\text{пл}} - T_{\text{дет}} + 0,12 f_{\text{пов}} \lambda] + c_{\text{к}} m \Delta T}{c \rho r^3}, \quad (5)$$

где  $T$  – температура в расчетной 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;  $\eta_{\text{и}}$  – КПД энергии импульса;  $r$  – расстояние от источника теплоты до точки, в которой рассчитывается температура, м;  $c$  – удельная теплоемкость 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 (4).

Теплота, образующаяся в объеме материала основы при влиянии электромагнитного поля, определяется по формуле

$$Q_{\text{м.п}} = \left( \frac{\mu_1 \mu_0 H^2}{2} - \frac{\mu_2 \mu_0 H^2}{2} \right) V, \quad (6)$$

где  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – магнитные проницаемости ферромагнетика (основы) и парамагнетика (газотермического упрочняющего покрытия из самофлюсующегося материала) соответственно;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $H$  – величина напряженности магнитного поля, А / м;  $V$  – объем нагреваемого материала (основы), м<sup>3</sup>.

На основании расчетов, проведенных по формулам (5) и (6) для исследуемых режимов МЭШ ( $I = 15\text{--}20$  А,  $B = 0,3\text{--}0,4$  Тл,  $S = 391\text{--}681$  мм / мин,  $t = 0,05$  мм,  $v = 8,4\text{--}13,2$  м / с), были построены схемы распределения температурных полей (изотермы) в поверхностном слое УГТП СМ (см. рисунок 3, а, б). Температура на границе «упрочняющее покрытие – основа» составляет  $T_3 \approx 1\ 150^\circ\text{C}$  (рисунок 3, а). Материал упрочняющего покрытия при этом находится в жидкой фазе, что способствует образованию диффузионной связи УГТП СМ с основой. Для образования прочной диффузионной связи важным условием является также длительность контакта жидкой и твердой фаз. Длительность процесса контакта жидкой и твердой фаз при МЭШ можно задавать значениями продольной подачи. Экспериментально установлено, что значения продольной подачи  $S$ , исключаящие перегрев материала упрочняющего покрытия при максимальной глубине оплавления, должны находиться в пределах

391–681 мм / мин. Длительность и мощность электрических разрядов в зоне обработки и глубина оплавленного слоя напыленного УГТП СМ зависят также от значения технологического тока  $I$ , которые должны находиться в пределах 15–20 А, так как экспериментально определено, что увеличение значения технологического тока  $I$  более 25 А приводит к перегреву материала напыленного газотермического упрочняющего покрытия и его разрушению.

При значениях магнитной индукции  $B = 0,3–0,4$  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 к упрочняющему покрытию (рисунок 3, б), что способствует более длительному протеканию диффузионных процессов в подслое УГТП СМ и повышению его адгезии.

Таким образом, важным преимуществом МЭШ перед другими способами обработки УГТП СМ является возможность управления процессами, протекающими на границе «упрочняющее покрытие – основа» и, как следствие, уровнем механических свойств путем изменения режимов обработки, задающих температуру нагрева.

**Четвертая глава** посвящена исследованию и оптимизации влияния режимов МЭШ на производительность обработки и качество упрочняющих покрытий.

В качестве параметров оптимизации процесса были приняты: шероховатость поверхности  $Ra(Y_1)$ , мкм, и производительность обработки  $Q(Y_2)$ , мм<sup>3</sup>/мин. Независимыми переменными являлись следующие факторы: 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.

Влияние режимов МЭШ на производительность обработки  $Q$  УГТП СМ определяли по полученному уравнению регрессии

$$Y_2=Q = 360 + 95IB - 23S / IB + 11,5IB / S^2vH^3 - 31,3HS + 5I^2B^2 / H^2S^3. \quad (7)$$

Установлено, что с изменением значения технологического тока  $I$  от 10 до 25 А при фиксированном значении магнитной индукции  $B = 0,2$  Тл производительность обработки  $Q$  достигает 1 400–1 500 мм<sup>3</sup>/мин для поверхностей, напыленных УГТП СМ. Производительность обработки поверхностей, наплавленных сормайтотом ГН1, достигает 2 500–2 700 мм<sup>3</sup>/мин.

Значение максимальной производительности обработки УГТП СМ под воздействием механического резания зернами абразивного круга и электроэрозионного разрушения поверхности  $Q$ , рассчитанное по формулам (1) и (2), составляет  $1\,404 + 155,7 = 1\,559,7$  мм<sup>3</sup>/мин, а при введении в зону обработки энергии магнитного поля – 1 700 мм<sup>3</sup>/мин, что подтверждает адекватность разработанных моделей. При увеличении значений технологического тока  $I$

до 20–25 А при величинах магнитной индукции  $B = 0,35–0,5$  Тл электроискровые разряды в зоне обработки переходят в более мощные – электродуговые. Электроэрозионное воздействие на поверхность упрочняющего покрытия при этом резко возрастает, что приводит к появлению на ней значительных впадин и углублений (электроэрозионных лунок). Значение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  возрастает до 2,5–3,2 мкм.

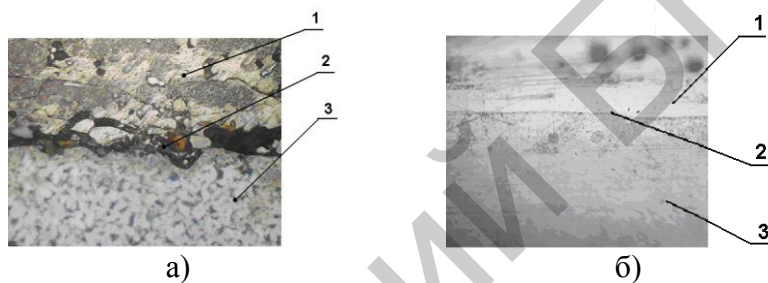
Полученная на основании результатов исследования регрессионная зависимость шероховатости поверхности УГТП СМ от режимов МЭШ имеет вид

$$Y_I = Ra = 0,474 + 0,206I^2 Bv - 0,307IB / vt + 0,16I^3 / vS + 0,066BS^{0,5} / t^{0,5} . \quad (8)$$

С увеличением скорости на периферии абразивного круга  $v$  (с 15–20 м / с до 30–42 м / с) и значений магнитной индукции  $B$  (с 0,25–0,3 Тл до 0,4–0,5 Тл) шероховатость поверхности находится в пределах  $Ra$  1,5–2,5 мкм. Микрорельеф поверхности в этом случае формируется в основном зернами абразивного круга. Это связано со срывом канала электрического разряда и уменьшением времени его термического и электроэрозионного действия на обрабатываемую поверхность. При малых скоростях на периферии абразивного круга, равных 3–5 м / с технологический ток, проходящий через микронеровности и стружку, разогревает их до температуры плавления материала упрочняющего покрытия. Материал УГТП СМ, находящийся в жидкой фазе, под влиянием внешнего магнитного поля растекается по поверхности, заполняя микровпадины, значения шероховатости поверхности  $Ra$  при этом уменьшаются до 0,5–1,25 мкм.

Важной задачей является исследование структурных изменений в поверхностном слое упрочняющих покрытий при различных режимах МЭШ. Исследовалась структура УГТП СМ марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2. Из результатов исследования шлифов поверхностей с упрочняющими покрытиями можно сделать вывод, что режимы МЭШ ( $I = 15–20$  А,  $B = 0,3–0,4$  Тл,  $S = 391–681$  мм / мин,  $t = 0,05$  мм,  $v = 8,4–13,2$  м / с), оказывают влияние на формирование структуры трех зон образца (рисунок 4). Зона 1 представляет собой материал самого покрытия, зона 3 – основной материал образца, зона 2 – диффузионная (граничная), расположена между зоной 1 и 3. На фотографии поперечного шлифа образца с газотермическим упрочняющим покрытием из самофлюсующегося порошкового материала ПГ-СР2 (рисунок 4, а) показана структура до обработки МЭШ. На ней видно, что покрытие имеет сквозную пористость, крупнозернистую структуру (толщина покрытия  $\delta = 0,5$  мм). После обработки МЭШ в результате оплавления поверхностных слоев напыленных УГТП СМ образуется практически беспористая структура, типичная для компактных материалов. Образуемая за счет термического влияния электрических разрядов (при значениях технологического тока  $I = 15–20$  А) жидкая фаза создает условия для про-

текания поверхностной и объемной диффузии, рекристаллизации и десорбции газов. При этом уменьшается пористость, исчезают границы между напыленными частицами, а развитие диффузионных процессов способствует образованию граничной зоны 2 «упрочняющее покрытие – основа» (рисунок 4, б). На границе разделения зон 1 и 3 после обработки МЭШ наблюдается светлая зона (линия сварки), образуемая в результате контакта жидкой и твердой фаз и представляющая собой твердый раствор железа в никеле. Наличие светлой зоны свидетельствует о том, что между упрочняющим покрытием и основой образовалась прочная металлическая связь. Толщина линии сварки зависит от режимов МЭШ. При значениях режимов МЭШ, приводящих к оплавлению упрочняющего покрытия на глубину до 0,4 мм, толщина линии сварки находится в пределах от 3 до 5 мкм.



а) до обработки МЭШ;

б) после обработки МЭШ

**Рисунок 4 – Структура УГТП СМ  
(толщина оплавленного слоя  $\Delta = 0,3$  мм (увеличение 500))**

В результате оплавления поверхностного слоя упрочняющих покрытий происходит образование мелкодисперсных структур с равномерным распределением боридов никеля ( $\text{Ni}_3\text{B}$ ), боридов хрома ( $\text{CrB}$ ,  $\text{Cr}_2\text{B}$ ), а также карбидов ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) в пересыщенном растворе никеля. 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. После обработки МЭШ твердость УГТП СМ марок ПГ-СР2 и ПГ-СР4 составляет 40–45 *HRC* и 58–62 *HRC* соответственно.

Экспериментально определены режимы МЭШ напыленных УГТП СМ, обеспечивающие повышение прочности сцепления покрытий с основой в 3,3–3,6 раза (от 50–65 МПа до 180–200 МПа):  $I = 15\text{--}20$  А,  $V = 0,3\text{--}0,4$  Тл,  $S = 391\text{--}681$  мм / мин,  $t = 0,05$  мм,  $v = 8,4\text{--}13,2$  м / с.

Для оценки эксплуатационных свойств упрочненных поверхностей исследовали износ УГТП СМ марки ПГ-СР4, нанесенного на рабочую поверхность



детали «Упор направляющей ленточной пилы». Установлено, что износостойкость напыленных УГТП СМ после МЭШ повысилась в 2,5–3,0 раза.

**Пятая глава** посвящена разработке и внедрению в производство технологических процессов МЭШ поверхностей деталей с упрочняющими покрытиями. По полученным результатам исследований были разработаны три технологии МЭШ упрочняющих покрытий: 1) технология МЭШ напыленных УГТП СМ марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2, позволяющая проводить одновременно термическую (оплавление) и механическую (шлифование) обработку, что сокращает технологическое время на выполнение операции шлифования в 1,5–2 раза; 2) технология МЭШ оплавленных УГТП СМ, позволяющая повысить производительность обработки в 1,5 раза по сравнению с традиционным шлифованием; 3) технология МЭШ НС поверхностей, при которой производительность обработки повышается в 1,5–2 раза по сравнению с традиционным шлифованием.

Разработаны технологические процессы, включающие операцию МЭШ, на БСЗ ЗАО «Атлант» при обработке деталей «Упор направляющей ленточной пилы» (№ТП Т2510.00.00) и «Плита» (№ТП С7602–7012.01).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

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 объема электроэрозионных лунок в 2–2,5 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 [1-А, 4-А, 8-А, 12-А, 16-А, 17-А, 21-А, 24-А, 29-А].

2. На основании анализа тепловых полей, полученных при численной реализации разработанных физических моделей, учитывающих теплофизические свойства материала упрочняющего покрытия (температуру плавления, плотность, удельную теплоемкость), а также геометрические размеры зоны обработки, установлены режимы МЭШ напыленных УГТП СМ марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 ( $I = 15–20$  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  $\Delta = 0,3 – 0,4$  мм [2-А, 5-А, 15-А, 18-А, 20-А, 22-А, 25-А].

3. В результате экспериментальных исследований зависимости шероховатости поверхности и производительности обработки упрочняющих покрытий от режимов МЭШ и оптимизации полученных эмпирических моделей установ-

лены режимы для черновой ( $I = 15\text{--}20$  А,  $B = 0,3\text{--}0,4$  Тл,  $S = 1\ 400$  мм / мин,  $t = 0,05$  мм,  $v = 26\text{--}32$  м / с) и чистовой ( $I = 5\text{--}10$  А,  $B = 0,15\text{--}0,2$  Тл,  $S = 2800$  мм / мин,  $t = 0,005\text{--}0,025$  мм,  $v = 26\text{--}32$  м / с) обработки УГТП СМ марок ПГ-СР4, ПГ-СР2, а также режимы обработки наплавов сормайтотом (НС) ( $I = 15\text{--}20$  А,  $B = 0,25\text{--}0,3$  Тл,  $S = 1400\text{--}2800$  мм / мин,  $t = 0,025\text{--}0,05$  мм,  $v = 26\text{--}32$  м / с). Режимы МЭШ обеспечивают уменьшение шероховатости поверхности  $Ra$  до значений  $0,5\text{--}1,25$  мкм (для УГТП СМ) и  $0,3\text{--}0,4$  мкм (для НС) при достижении производительности обработки  $Q = 1500\text{--}1700$  мм<sup>3</sup> / мин и  $2\ 500\text{--}2\ 700$  мм<sup>3</sup> / мин соответственно. Уменьшение шероховатости поверхности происходит в результате оплавления микровыступов на поверхности покрытия и заполнения образующимся расплавом микровпадин [6-А, 7-А, 9-А, 10-А, 11-А, 13-А, 14-А, 19-А, 23-А].

4. В результате экспериментальных исследований влияния режимов МЭШ на структуру и свойства напыленных УГТП СМ установлено, что при значениях технологического тока  $I = 15\text{--}20$  А износостойкость повышается в  $2,5\text{--}3,0$  раза по сравнению с необработанным МЭШ напыленным упрочняющим покрытием, что объясняется формированием в поверхностном слое при таких режимах мелкодисперсной структуры с равномерным распределением карбидоборидной фазы в пересыщенном растворе никеля. При этом за счет формирования сварной переходной зоны, образующейся в результате контакта жидкой и твердой фаз и представляющей собой твердый раствор железа в никеле обеспечивается повышение прочности сцепления покрытия с основой в  $3,3\text{--}3,6$  раза по сравнению с необработанным МЭШ напыленным УГТП СМ [3-А, 26-А, 27-А, 28-А].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанная технология МЭШ напыленных 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  $1,5\text{--}2,0$  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. бел. р. в ценах на 2009 год.

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

# СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

## Статьи в научных журналах

1. Спиридонов, Н. В. Особенности магнитно-электрического шлифования газотермических покрытий / Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода // Вестник БНТУ. – 2007. – № 4. – С. 31–34.

2. Спиридонов, Н.В. Теплофизические особенности процесса магнитно-электрического шлифования газотермических упрочняющих покрытий / Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода, И. О. Соколов // Вестник БНТУ. – 2008. – № 3. – С. 26–29.

3. Спиридонов, Н. В. Влияние технологических режимов магнитно-электрического шлифования на микроструктуру газотермических Ni-Cr-B-Si покрытий / Н. В. Спиридонов [и др.] // Вестник БНТУ. – 2009. – № 4. – С.16–19.

## Статьи в зарубежных журналах

4. Blagodarny, V. Electromagnetic Grininding of Gas-Termal Sprayed Coating V. Blagodarny, M. Niaroda // Manufacturing engineering. – 2006. – Vol .79, № 3. – P. 9–12.

5. 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.

## Статьи в сборниках научных трудов

6. Нерода, М. В. Оптимизация режимов магнитно-электрического шлифования упрочненных поверхностей деталей / М. В. Нерода // Машиностроение: Республиканский межведомственный сборник научных трудов / / под ред. Б. М. Хрусталева. – Минск, 2007. – Вып. 22. – С. 37 – 42.

## Материалы конференций

7. Дмитриченко, Э. И. Влияние электрофизических параметров магнитно-электрического шлифования на производительность при обработке покрытий / Э. И. Дмитриченко, М. В. Нерода // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы международной науч.-технич. конф., Могилев, / ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2004. – Ч.1. – С. 163 – 165.

8. 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 февраля 2005 г. : в 2 ч. / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В. И. Кочурко (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2005. – Ч. 2. – С. 289 – 291.

9. 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 февраля 2005 г. : в 2 ч. / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В.И. Кочурко (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2005. – Ч. 2. – С. 279–281.

10. Дмитриченко, Э. И. Исследование влияния технологических режимов магнитно-электрического шлифования на качество упрочненных поверхностей / Э. И. Дмитриченко, М. В. Нерода // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21-22 апреля 2005 г. в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол.: И. С. Сазонов [и др.] – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2005. – Ч.1. – С. 150–151.

11. 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., Могилев, 2006 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2006. – С. 60.

12. Нерода, М. В. Физическая сущность процесса магнитно-электрического шлифования (МЭШ) защитных газотермических покрытий / М. В. Нерода : сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. «Молодежь производству», Витебск, 2006 г. / УО «ВГТУ» – Витебск.;, 2006. – С.208 – 210.

13. Гончарик, Д. В. Магнитная система для магнитно-электрического шлифования / Д. В. Гончарик, М. В. Нерода // Содружество наук. Барановичи-2006 : материалы науч.-практ. студ. конф., Барановичи, 27 апреля 2006 г. / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В. В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2006. – С. 351 – 352.

14. Майоров, С. А. Методика исследования влияния режимов магнитно-электрического шлифования при обработке упрочненных поверхностей / С. А. Майоров, М. В. Нерода // Содружество наук. Барановичи-2006 : материалы науч.-практ. студ. конф., Барановичи, 27 апреля 2006 г. / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В. В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2006. – С. 353 – 354.

15. 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. студ. конф., Барановичи, 27 апреля 2006 г. / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В. В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2006. – С. 356 – 357.

16. Спиридонов, Н. В. Способ магнитно-электрического шлифования газотермических покрытий / Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода // Материалы 1 Международной науч.-практ. конф. «Становление современной науки – 2006, Днепрпетровск, 2006. – Т. 1. – С. 68 – 71.

17. 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. молод. ученых, Могилев, 2007 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию Бел.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2007. – С. 31.

18. 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. студ. конф., Барановичи, 24-25 мая 2007 г., / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В. Н. Зуев, В. В. Таруц (главные ред.). – Барановичи, 2007. – С. 68 – 69.

19. 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. студ. конф., 24-25 мая 2007г., Респ. Беларусь / редкол. В. Н. Зуев, В. В. Таруц (главные ред.). – Барановичи: РИО БарГУ, 2007. – С. 75–76.

20. Нерода, М. В. Термическое влияние основных параметров 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. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2007. – С. 97 – 100.

21. 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 školy. – Olomouci, 2007. – DÍL 2. – P. 734–737.

22. Нерода, М. В. Влияние технологических факторов магнитно-электрического шлифования на теплообразование в зоне обработки / М. В. Нерода // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч. техн. конф., Могилев, 2007 г. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агентство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Бел.-Рос. ун-т; редкол. И. С. Сазонов (гл.ред.) [и др.]. – Могилев, 2007. – Ч.1. – С. 211 – 212.

23. Нерода, М. В. Влияние электрофизических параметров магнитно-электрического шлифования на съем материала и микрогеометрию поверхностного слоя твердых покрытий / М. В. Нерода // Техника и технологии инновации и качество [Текст] : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 23-24 ноября 2007 г. / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В. В.Таруц (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2007. – С. 21–25.

24. 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 [Текст] : материалы IV Междунар. науч.-практ. студ. конф., Барановичи, 21-25 мая 2008 г. : в 2 ч. / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В. Н. Зуев, (гл. ред.), В. В. Таруц. – Барановичи, 2008. – Ч.1. – С.68 – 69.

25. 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 : сб. науч.-техн. конф., Новополоцк, 2009 г. В 3-х т. Т.Ш / под общ. ред. П. А. Витязя, С. А. Астапчика. – Новополоцк , 2009. – С. 3 – 6.

26. Спиридонов, Н. В. Сравнительный анализ методов упрочнения напыленных покрытий / Н. В.Спиридонов, И. О. Соколов, А. А. Баркун // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч.-техн. конф., Новополоцк, 2009 г. В 3-х т. Т.Ш / под общ. ред. П. А. Витязя, С. А. Астапчика. – Новополоцк, 2009. – С. 6 – 9.

27. Высоцкий, В. А. Влияние основных технологических факторов МЭШ на микротвердость поверхностного слоя газотермических покрытий ПГ-СР4, ПГ-СР2 / В. А.Высоцкий, М. В. Нерода // Содружество наук. Барановичи-2009 [Текст] : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, Барановичи, 21-22 мая 2009 г. : в 2 ч. / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В. Н. Зуев, (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи, 2009. – Ч.1. – С. 11–12.

28. Коновалик, А. В. Оценка износостойкости поверхностного слоя газотермического упрочняющего покрытия ПГ-СР4 после МЭШ / А. В. Коновалик, М. В. Нерода // Содружество наук. Барановичи-2009 [Текст] : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, Барановичи, 21-22 мая 2009 г. : в 2 ч. / Барановичский гос. ун-т; редкол.: В. Н. Зуев, (гл. ред.) [и др.], – Барановичи, 2009. – Ч.1. – С. 18 – 19.

### Патенты

29. Способ шлифования газотермического защитного покрытия: пат. 10934 Респ. Беларусь, МПК В 24В 1/00 / М. В. Нерода; заявитель Учреж. образов. Ба-

рановичский гос. ун-т. – № а 20070071; заявл. 26.01.2007; опубл. 30. 08.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – №4 – С. 72.

Репозиторий БНТУ

## РЭЗІЮМЭ

Нярода Міхаіл Уладзіміравіч

### **Тэхналагічнае забеспячэнне якасці паверхні і прадукцыйнасці апрацоўкі ўмацоўваючых пакрыццяў магнітна-электрычным шліфаваннем**

**Ключавыя словы:** ўмацоўваючыя пакрыцці, газополымнае напыленне, магнітна-электрычнае шліфаванне, прадукцыйнасць апрацоўкі, вопытна-прамысловая ўстаноўка, шліфаванне.

**Мэтай работы** з'яўляецца тэхналагічнае забеспячэнне якасці паверхні і прадукцыйнасці апрацоўкі ўмацоўваючых пакрыццяў магнітна-электрычным шліфаваннем.

**Метады даследавання.** 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 зносастойкасці пакрыццяў, даследаванне цвёрдасці пакрыццяў, даследаванне тэмпературных змяненняў у зоне апрацоўкі, даследаванне ўплыву тэхналагічных рэжымаў МЭШ на шурпатасць паверхні па атрыманых прафілаграмах.

Спраектаваны і выраблены вопытна-прамысловыя ўстаноўкі, што рэалізуюць тэхналагічныя працэсы МЭШ на базе гарызантальна-фрэзернага станка НГФ-100 і універсальна-заточнага станка ЗЕ642Е. Атрыманы вопытныя 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, сармаіта. Уздзеянне тэхналагічнага току і магнітнай індукцыі на апрацоўваемую паверхню газатэрмічных ўмацоўваючых пакрыццяў павялічвае прадукцыйнасць апрацоўкі ў 1,5–2 разы. Узаемадзеянне электрафізічных і кінематычных рэжымаў МЭШ дазваляе дасягнуць шурпатасці паверхні 0,4–0,5 мкм.

Распрацаваны і выкарастаны спосаб МЭШ для апрацоўкі рабочых паверхняў дэталей «Упор накіравальнай стужачнай пілы» і «Палета» з газатэрмічным ўмацоўваючым пакрыццём ПГ-СР4, што дазволіла павысіць іх даўгавечнасць у 3 разы.



## РЕЗЮМЕ

Нерода Михаил Владимирович

### **Технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки упрочняющих покрытий магнитно-электрическим шлифованием**

**Ключевые слова:** упрочняющие покрытия, газопламенное напыление, магнитно-электрическое шлифование, производительность обработки, опытно-промышленная установка, шлифование.

**Целью работы** является технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки упрочняющих покрытий магнитно-электрическим шлифованием.

**Методы исследования.** 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 твердости 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 сормайта. Воздействие технологического тока и магнитной индукции на обрабатываемую поверхность газотермических упрочняющих покрытий увеличивает производительность обработки в 1,5–2 раза. Взаимодействие электрофизических и кинематических режимов при МЭШ позволяет достигать шероховатости поверхности 0,4–0,5 мкм.

Разработан и внедрен способ МЭШ для обработки рабочих поверхностей деталей «Упор направляющей ленточной пилы» и «Плита» с газотермическим упрочняющим покрытием из материала ПГ-СР4, что позволило повысить долговечность в 3 раза.

## SUMMARY

Niaroda Mikhail Vladimirovich

### **Technological guaranteeing of finish and productivity of processing strengthening coatings by magnetic-electric grinding**

**Keywords:** Strengthening coatings, gas-thermal spray coating, magnetic-electric grinding, productivity of processing, trial industrial installation, grinding.

**The purpose** of the work is technological guaranteeing of finish and productivity of processing strengthening coatings by magnetic-electric grinding.

**Investigation techniques.** The modern mathematical apparatus is used while carrying out the work: the package of the mathematical programs MathCad, built-in statistical system Microsoft ECXEL, 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 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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ И  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ  
МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ШЛИФОВАНИЕМ

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

по специальности  
05.02.08 «Технология машиностроения»

Подписано в печать 27.04.2010  
Формат 60 × 84 1 / 16. Бумага офсетная.  
Гарнитура Таймс. Отпечатано на ризографе.  
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,60.  
Заказ 152. Тираж 60 экз.

ЛИ 02330 / 0552803 от 09.02.2010

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Барановичский государственный университет»,  
225404 г. Барановичи, ул. Войкова, 21