

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.791.927

СОСНОВСКИЙ Алексей Валерьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ
НА ПОВЕРХНОСТИ ПРУЖИННЫХ ЗУБЬЕВ
РОТОРНЫХ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности
05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

Минск, 2011

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» и БНТУ.

Научный руководитель

Белявин Климентий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор Белорусского национального технического университета, заведующий кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением»

Официальные оппоненты:

Девойно Олег Георгиевич, доктор технических наук, профессор Белорусского национального технического университета, главный научный сотрудник НИЧ НИИЛ плазменных и лазерных технологий;

Радченко Александр Адамович, кандидат технических наук, заместитель директора ОХП «Институт сварки и защитных покрытий» ГНУ «Институт порошковой металлургии»

Оппонирующая организация

ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Защита состоится «28» октября 2011 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. учёного секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Учёный секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор

Девойно О.Г.

© Сосновский А.В., 2011

© БНТУ, 2011

ВВЕДЕНИЕ

В сельском хозяйстве для предпосевной обработки почв используют роторные почвообрабатывающие машины, основным элементом которых являются пружинные зубья, предназначенные для дробления почвы.

Пружинные зубья роторных почвообрабатывающих машин, годовой выпуск которых в Республике Беларусь составляет 9000 шт., относятся к быстроизнашиваемым деталям. В процессе эксплуатации пружинных зубьев ударно-абразивному изнашиванию подвергается только 10% от общего объема изделия, при наработке менее одного полевого сезона. В связи с этим десятки тонн стали (65Г, 60С2) ежегодно попадают в отходы. Одним из наиболее эффективных и экономичных путей повышения сопротивления изнашиванию, является нанесение на рабочие поверхности пружинных зубьев износостойких покрытий. Использование известных методов (намораживание, индукционная наплавка, газотермическое напыление и др.) восстановления и упрочнения деталей, работающих в условиях интенсивного ударно-абразивного изнашивания, не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к их эксплуатационным и физико-механическим свойствам по прочности сцепления покрытия с основой, износостойкости, экономичности и др.

Проведенный анализ методов нанесения покрытий показал, что перспективным представляется метод электроконтактного оплавления (ЭО), где расплавление присадочного материала происходит в результате теплообмена с наплавляемой частью заготовки, а нагрев заготовки осуществляется электрическим током. Данные об использовании метода ЭО в промышленности для наплавки покрытий в источниках научно-технической информации отсутствуют. В этой связи, проведение теоретических и экспериментальных исследований для разработки технологии нанесения износостойких покрытий методом ЭО на рабочую часть пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин является актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнялась в рамках следующих заданий:

- ГНТП "Сварка" задание 3.14 № ГР 19992180 "Разработать технологию наплавки порошков самофлюсующихся железо-хром-бор-кремний-содержащих сплавов и их композиций на быстроизнашивающиеся поверхности деталей рабочих органов почвообрабатывающих, мелиоративных и дорожно-строительных машин, обеспечивающую повышение их срока службы в условиях Республики Беларусь. Организовать участок в ИНДМАШ НАНБ по выпуску режущих деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин и внедрить технологию наплавки на экспериментальном заводе БелНИИМСХ". 1999 – 2001 гг.

- ГПФИ “Надежность и безопасность”, задание Н 19-18 (Н21-31) № ГР 20024728 «Разработка методов создания слоистых деталей узлов трения с требуемым уровнем долговечности». 2001 – 2005 гг.

Цель и задачи исследования

Цель работы – разработать технологию нанесения износостойких покрытий методом ЭО на пружинные зубья роторных почвообрабатывающих машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания и внедрить в производство.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- провести анализ условий работы и характера изнашивания пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин и определить возможность применения ЭО для наплавки покрытия на их рабочие поверхности с целью повышения износостойкости;

- разработать математическую модель взаимосвязи технологических режимов процесса наплавки с физическими параметрами материала заготовки и наплавляемой порошковой шихты для получения покрытия заданной толщины на рабочей поверхности пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин;

- исследовать влияние технологических режимов ЭО на физико-механические свойства покрытий;

- исследовать работоспособность пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин с износостойким покрытием, полученным методом ЭО;

- разработать и внедрить в производство технологический процесс нанесения износостойких покрытий на рабочие поверхности пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин методом ЭО.

Объектом исследования является процесс нанесения износостойких покрытий методом ЭО на рабочую часть пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин.

Предметом исследования являются физико-механические и триботехнические характеристики износостойких покрытий, наносимых методом ЭО на рабочую часть пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин.

Положения выносимые, на защиту:

- теоретическая и экспериментальная модели формирования покрытия методом ЭО, учитывающие изменение физических свойств наплавляемой заготовки (электропроводность, теплопроводность, температуропроводность) и присадочного материала в процессе их разогрева позволяющие определить оптимальные силу тока и время его пропускания через наплавляемую деталь для получения покрытия заданной толщины из шихты самофлюсующихся порошков на основе железа и никеля;

- методика расчета необходимой прочности сцепления покрытия с рабочей поверхностью пружинного зуба, учитывающая упругие свойства материалов покрытия и основы, а также их геометрические параметры и режимы эксплуатации, позволяю-

щая определить эквивалентные напряжения в зоне контакта покрытия и основы в процессе их эксплуатации;

- результаты экспериментальных исследований влияния структуры и фазового состава покрытия, сформированного методом ЭО, на его триботехнические свойства в условиях ударно-абразивного изнашивания, позволяющие осуществить обоснованный выбор присадочного материала для наплавки покрытий, обеспечивающих повышение ресурса пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин;

- результаты экспериментальных исследований твёрдости, прочности сцепления и износостойкости покрытий из самофлюсующихся порошков на железной и никелевой основе в зависимости от технологических режимов наплавки покрытия методом ЭО, позволяющие определить оптимальное значение температуры нагрева присадочного материала для получения покрытия, удовлетворяющего условиям работы при ударно-абразивном изнашивании.

Личный вклад соискателя

Автор осуществил постановку и предложил направления решения научных задач, участвовал в теоретических и экспериментальных исследованиях, формулировке общих подходов к проблеме повышения износостойкости пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин. Выявил зависимости физико-механических свойств покрытий от технологических параметров наплавки, разработал технологические схемы наплавки, провёл теоретические и экспериментальные исследования, позволяющие обосновать и разработать технологию наплавки износостойких покрытий методом ЭО.

Белявин К.Е. сформулировал цель и задачи исследований, оказывал консультации и практическую помощь на всех этапах выполнения работы. Гафо Ю.Н., Широкий И.В., Худолей А.Л., Кузнечик О.О., Бабушкин И.В., Баран О.А., Кашицин Л.П. принимали участие в совместном проведении ряда экспериментов.

Апробация результатов диссертации

МНТК «Ресурсосберегающие экотехнологии: возобновление и экономия энергии, сырья и материалов» (Гродно, 2000); МНТК «Надёжность машин и технических систем» (Минск, 2001); МНТК «[Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия](#)» (Минск, 2002); [Республиканская конференция молодых ученых НАН Беларуси «Молодежь в науке](#)» (Минск, 2003); Международный конгресс по порошковой металлургии «PM2004 World Congress» (Вена, 2004); Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективные технологии. Образование. Наука. Практика» (Минск 2010); Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (Витебск 2011).

Опубликованность результатов диссертации

Основные положения диссертации изложены в 20 публикациях, в том числе 1 монографии, 9 статьях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь (общим объемом

3,12 а.л.), 3 статьях в материалах конференций, 2 статьях в сборниках научных трудов, 4 тезисах докладов, 1 патенте на изобретение и 1 патенте на полезную модель.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа представлена на страницах, которые включают в себя рисунков, таблиц, список использованной литературы (наименований, изложенный на с.) и приложений (с.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу конструктивных особенностей и условий эксплуатации роторных почвообрабатывающих машин, используемых для предпосевной обработки почвы. Проанализированы условия работы пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин и материалы, используемые для их изготовления.



Рисунок 1 – Пружинный зуб роторной почвообрабатывающей машины

Пружинный зуб роторной почвообрабатывающей машины (рисунок 1) осуществляет измельчение почвы и представляет собой стержень с витой пружиной на конце, который изготавливается из стали 65Г или 60С2 и подвергается стандартной термической обработке. Выход из строя пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин происходит в результате интенсивного ударно-абразивного изнашивания рабочих поверхностей при контакте с почвой и камнями. Основной причиной износа являются минеральные частицы кварца и гранита (HV 7–11 ГПа), составляющие примерно 36,6...70,8 % почвы. Затем по степени распространения идут полевой шпат, слюда и другие минералы (HV 6–7,2 ГПа). Помимо этого имеется засорённость пахотных полей Беларуси крупными валунами около 15 %, средними и мелкими камнями 5–60 % и 25–30 % соответственно. Интенсивность изнашивания определяется сочетанием давления со стороны почвы и скорости скольжения ее частиц по поверхности зубьев, а также ударным воздействием камней, причём максимальный износ наблюдается по длине рабочей части пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин и вызван микрорезанием под воздействием абразивного зерна и выкрашиванием в результате ударов о камни.

Проанализированы различные материалы и способы нанесения покрытий для повышения износостойкости пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин. Из анализа работ Ткачёва Ф.И., Патона Б.Е., Хрущёва М.М., Дорожкина Н.Н., Ярошевича В.К., Бетени Г.Ф., Хасуй А, Пантелеенко Ф. И. и др. установлено, что покрытия, полученные различными способами напыления, обладают недостаточной прочностью сцепления (40–80 МПа) и экономически не выгодны для повышения из-

носостойкости рабочих поверхностей пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин. Также неприемлемо использование электродуговой наплавки на пружинные стали, так как это приводит к трещинообразованию в материале основы.

Установлено, что из известных способов наплавки, наиболее предпочтительным для повышения износостойкости пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин является метод намораживания из расплава, обеспечивающий прочность сцепления покрытия с основой 160–190 МПа, при этом в качестве присадочного материала могут использоваться сплавы на железной и никелевой основе. Однако, этот способ имеет ряд недостатков: длительное время пребывания присадочного материала в расплавленном состоянии, требующее дополнительных энергозатрат; необходимость обеспечения разности температур расплава и наплавляемой детали порядка 300–500 °С, в результате чего в материале покрытия возникают остаточные напряжения II и III рода, снижающие физико-механические свойства покрытия и прочность его сцепления с основой. Исходя из анализа материалов, используемых для нанесения износостойких покрытий, установлено, что наиболее приемлемыми для наплавки на рабочие поверхности пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин являются самофлюсующиеся порошки на железной основе. На основании анализа условий работы пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин установлено, что одним из наиболее эффективных и экономичных путей повышения износостойкости является метод наплавки, основанный на расплавлении порошковой шихты путём теплопередачи от наплавляемой поверхности детали, разогреваемой электрическим током. В результате анализа литературных источников были определены цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава содержит описание объектов, оборудования и методик исследований.

Исследование процесса нанесения покрытий на образцы методом ЭО проводилось на машинах точечной сварки МТ-2201 (мощность – 60 кВт) и шовной сварки МШ-100 (мощность – 100 кВт).

В качестве материала покрытия использовались порошки на железной основе ПР-Х4Г2Р4С2Ф (ТУ 14-22-18) и никелевой ПГ – СР4 (ГОСТ 21448), а также шихта состава 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ-СР4. Состав композиций выбирали исходя из условия обеспечения высокой износостойкости покрытия в условиях ударно-абразивного нагружения. В процессе работы проводили исследования образцов с покрытием для определения оптимальных режимов упрочнения.

Экспериментальные образцы исследовались на прочность сцепления покрытия с основой на сдвиг на прессе ОКС 1671М (ТУ 10.16.0001.045–88) с использованием специальных приспособлений по ГОСТ 9.304–87.

Для изучения структуры, твёрдости, микротвёрдости, пористости покрытий изготавливались шлифы по ГОСТ 9.302–88. Исследование микроструктуры покрытий проводилось на металлографическом микроскопе «POLIVAR–MET» фирмы Raichet-

Jung (Германия). Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометрическом комплексе D8 ADVANCE фирмы “BRUKER” (Германия). Микротвёрдость определялась по методу Виккерса в соответствии с ГОСТ 9459–87 с помощью прибора ПМТ–3 при нагрузке $P=0,981$ Н (100 г). Пористость покрытий определялась в соответствии с ГОСТ 25281-82.

Испытания на ударно-абразивное изнашивание проводили на экспериментальной установке, разработанной в ГНУ ИПМ, в которой осуществляется трение испытуемых образцов контртелом в присутствии абразива с одновременной ударной нагрузкой на образцы. В качестве испытуемых образцов использовались пластины из стали 45 толщиной 5 мм, длиной 10 мм и шириной 5 мм с покрытием толщиной 3 мм. В качестве контртела использовали диски диаметром 97–100 мм и толщиной 20 мм, изготовленные из стали 45, термообработанные до твердости HRC 40–45. В процессе испытания определяли объёмный износ испытуемых образцов.

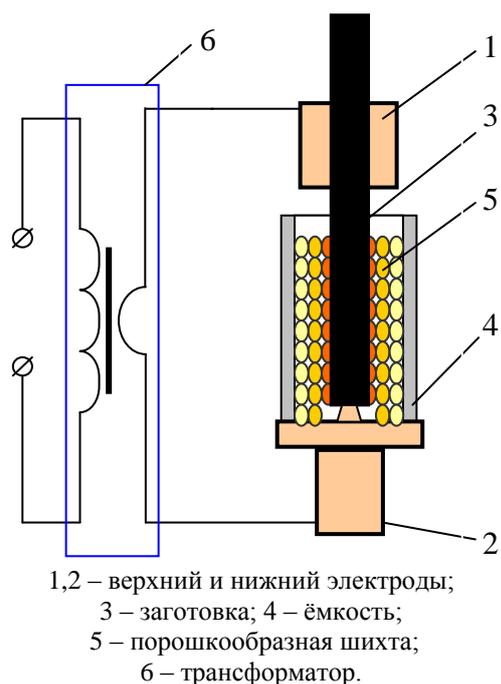
Определение остаточных напряжений покрытия производили на рентгеновской установке ДРОН–3 (Россия) с использованием специального пакета программ гармонического анализа профиля рентгеновской линии, позволяющий автоматизировать рентгенодифрактометрические исследования параметров тонкой структуры. Определение сравнительной величины внутренних напряжений производили путём вычисления величины относительной среднеквадратичной микродеформации в кристаллической решётки покрытий.

Полевые испытания пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин, изготовленных из стали 65Г и 60С2 и подвергнутых стандартной термической обработки, проводились на опытном поле отдела испытаний и обеспечения исследований РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства». Испытанию подвергались пружинные зубья с покрытием, нанесённым методом ЭО, в сравнении с пружинными зубьями без покрытия. Испытуемые детали работали в дерново-подзолистой суглинистой почве с влажностью 14–20% в слое на глубине 20 см и твердостью 0,8–1,7 МПа. Засоренность почвы камнями в пахотном слое до 20 т/га. Глубина вхождения зубьев в почву до 15 см. Рабочая скорость роторной почвообрабатывающей машины составляла 3,0–5,6 км/ч.

Для измерения температуры на поверхности заготовки и в порошковом слое в процессе нанесения покрытия методом ЭО использовали систему контроля, состоящую из ПЭВМ, аналого-цифрового преобразователя ADC 100K/12–8/DAC/12, операционного усилителя АМР–8 и хромель-алюмелевых термоэлектрических преобразователей. Данная система позволяет определять температуру в порошковом слое с точностью до 5 % и отображать данную информацию в цифровом виде на ПЭВМ для её дальнейшей обработки.

Обработку экспериментальных данных проводили методами математической статистики при помощи пакета математических программ MathCAD.

В третьей главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по выбору технологической схемы и режимов наплавки покрытий методом ЭО.



1,2 – верхний и нижний электроды;
3 – заготовка; 4 – ёмкость;
5 – порошкообразная шихта;
6 – трансформатор.

Рисунок 2 – Схема наплавки покрытий методом ЭО

тия.

Для расчёта технологических режимов наплавки покрытий методом ЭО была разработана математическая модель распределения температурного поля в порошковой шихте, при следующих допущениях: стержень, на который наносится покрытие, является бесконечно длинным; тепловыделение в теле стержня происходит равномерно по всей его длине.

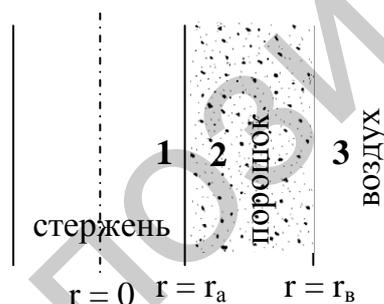


Рисунок 3 – Система стержень – порошок для расчёта температурного распределения при наплавке покрытий методом ЭО

методом ЭО.

Для нанесения покрытий методом ЭО была использована модернизированная установка для электроконтактной сварки со специальной технологической оснасткой, реализующая следующую технологическую схему наплавки (рисунок 2). Упрочняемая заготовка устанавливается в ёмкость с порошковой шихтой между электродами электроконтактной установки. Затем электрический ток пропускается через заготовку разогревая её до температуры T_d , которая выше температуры плавления порошковой шихты $T_{ш}$, но ниже температуры плавления материала заготовки T_3 :

$$T_{ш} < T_d < T_3 \quad (1)$$

В результате порошок расплавляется и на поверхности заготовки образуется слой покрытия.

На первом этапе расчёта рассматривался нагрев порошковой шихты до её плавления, при этом решалось уравнение теплопроводности для системы стержень – порошковая шихта (рисунок 3):

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{q_{v_1}}{c_{\gamma_1}}; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где a_1 – температуропроводность стержня, m/c^2 ; a_2 – температуропроводность порошка, m/c^2 ; q_{v_1} – объёмная плотность внутренних источников тепла; c_{γ_1} – удельная теплоёмкость материала стержня, $Дж/(кг \cdot К)$; T_1 – температура стержня, $К$; T_2 – температура порошка, $К$; t – время нагрева, $с$; r – текущий радиус заготовки, $м$.

Граничные условия на границе стержня с порошком – условие сопряжения (условие IV рода) запишем в виде

$$T_1|_{r=r_a} = T_2|_{r=r_a}, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=r_a} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_a}, \quad (4)$$

где λ_1 – теплопроводность материала стержня, Вт/(м·К); λ_2 – теплопроводность материала порошка, Вт/(м·К); r_a – радиус заготовки, м.

Граничные условия на границе порошок – воздух зададим как условия III го рода в виде:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_a} = \alpha(T_2 - T_0) \Big|_{r=r_b}, \quad (5)$$

где α – средний коэффициент теплоотдачи с поверхности заготовки излучением и конвекцией, Вт/(м·К); r_b – внутренний радиус ёмкости с порошковой шихтой, Вт/(м·К); T_0 – температура окружающей среды, К.

Принимаем $\Theta_i = T_i - T_0$, где $i = 1, 2$. Тогда в уравнениях (2)– (4) T_i заменяется на Θ_i , а (5) примет вид:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=r_a} = \alpha \Theta_2 \Big|_{r=r_b}. \quad (6)$$

Решение уравнения (2) осуществлялось численно с помощью метода Рунге-Кутты с использованием функций Бесселя и Неймана. Для решения использовались следующие уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_1 = \sum_{k=0}^{\infty} C_k^{(1)}(t) J_0(\mu_k r); \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_2 = \sum_{k=0}^{\infty} C_{k_1}^{(2)}(t) J_0(\mu_k r) + C_{k_2}^{(2)}(t) N_0(\mu_k r), \end{array} \right. \quad (8)$$

где $J_0(r)$ – функция Бесселя 0-го порядка, $N_0(r)$ – функция Неймана 0-го порядка. Коэффициенты μ_k (где $k = 0, 1, \dots, \infty$) определяются из граничных условий.

На втором этапе решалась задача Стефана (движение фронта плавления в зависимости от времени при постоянной температуре нагрева). На основании экспериментальных исследований было установлено, что движение фронта плавления можно описать следующим уравнением:

$$2R^2 \ln\left(\frac{R}{r}\right) - R^2 + r^2 = \frac{4\lambda_p T_n t_n \beta}{g\rho}, \quad (10)$$

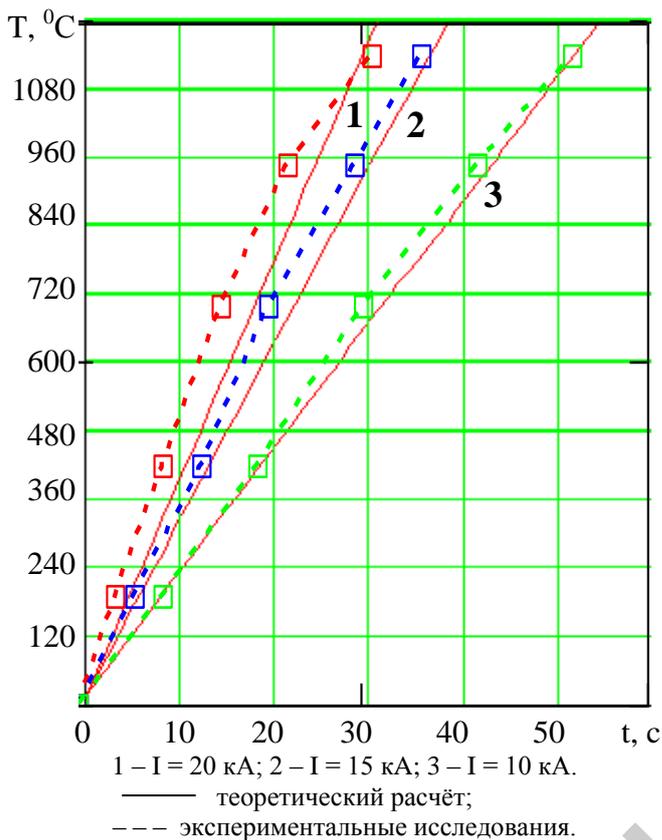


Рисунок 4 – Зависимость температуры (T) порошковой шихты от времени (t) нагрева, при наплавке порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф на центральную часть стального стержня диаметром 20 мм и длиной 100 мм на расстоянии 1 мм от поверхности заготовки при разном токе наплавки

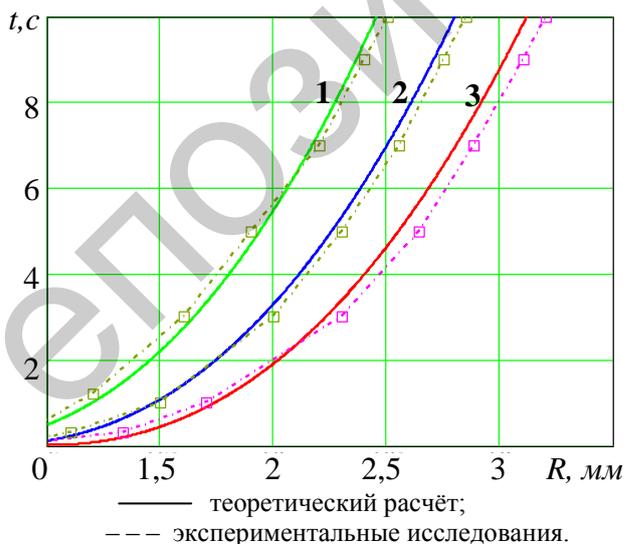


Рисунок 5 – Зависимость времени выдержки (t) от толщины (R) наплавляемого покрытия: 1 – $r_a = 5$ мм; 2 – $r_a = 7,5$ мм; 3 – $r_a = 10$ мм

где R – глубина расплавленного слоя, м; λ_p – коэффициент теплопроводности порошка, Вт/(м·К); T_n – температура плавления порошка, К; t_n – время плавления порошка, с; ρ – плотность материала порошковой шихты, кг/м³; g – удельная теплота плавления порошка, Дж/кг, β – безразмерный поправочный коэффициент.

В качестве граничных условий принимаем следующие дополнения:

$$T_1|_{r_a} = const, \quad T_1|_{r_a} = T_n \quad (11)$$

Расчёт технологических режимов в рамках разработанной модели производился с помощью ПЭВМ в среде MathCad. На основании результатов расчёта были получены зависимости распределения температуры по толщине порошкового слоя и движение фронта плавления в процессе ЭО (рисунки 4 и 5). Данные расчёты позволяют определить время пропуска электрического тока для наплавки

покрытия необходимой толщины. Так, покрытие толщиной 3 мм можно наносить в течении 54 с на рабочую поверхность пружинного зуба диаметром 20 мм и длиной 100 мм при силе тока на вторичном контуре электроконтактной установки $I = 16.6$ кА.

Проведенные экспериментальные исследования распределения температурных полей по сечению порошкового слоя в процессе наплавки методом ЭО, показали сходимость 8–10 %, при этом наибольшие отклонения связаны с интенсивным повышением температуры на начальной стадии нагрева в зоне контакта заготовки с электродами, что объясняется

значительным начальным контактным сопротивлением и соответствующим повышенным тепловыделением. Наибольшая величина температурного перепада в порошковом слое наблюдается между зонами у торца заготовки и её серединой, при температуре нагрева 400–700 °С и составляет 100–230 °С. В то же время, благодаря специально разработанной технологической оснастке, при достижении температуры нагрева 1000–1150 °С наибольшая температура порошкового материала смещается ближе к центральной зоне, при этом перепад температур составляет 20–40 °С. При движении фронта плавления температура постепенно выравнивается. Установлено, что степень неравномерности нагрева порошковой шихты тем больше, чем меньше время нагрева и больше сила тока.

Технологическими параметрами, определяющими толщину получаемого покрытия при наплавке, являются сила тока на вторичном контуре электроконтактной установки, и время нагрева заготовки. Однако данные параметры независимы друг от друга и при расчёте технологических режимов могут выбираться произвольно. В то же время произвольное соотношение этих параметров может привести к неравномерности получаемого покрытия из-за перепада температуры между торцом и серединой заготовки. В этой связи на основании экспериментальных исследований были получены уравнения регрессии по модели полного факторного эксперимента с планом 2^2 для толщины наплавляемого слоя h и отклонения профиля покрытия y . В результате расчётов были получены уравнения регрессии:

$$h = 1,9 + 0,25X_1 + 0,6X_2, \quad y = 0,31 + 0,043X_1 + 0,058X_2 + 0,02X_1X_2,$$

где h – толщина покрытия, мм; y – отклонение профиля покрытия, мм; X_1 – сила тока, кА; X_2 – время нагрева заготовки, с.

Оптимальные значения режимов наплавки определяли в результате нахождения условного минимума функции y при ограничениях, налагаемых функцией h . Эту задачу решали с помощью метода неопределённых множителей Лагранжа, в результате чего были получены оптимальные значения технологических режимов нанесения покрытия различной толщины методом ЭО на заготовку диаметром 20 мм и высотой 100 мм (таблица 1).

При выборе метода и режимов наплавки на рабочую часть детали путём формирования износостойкого слоя необходимо учитывать, что в случае недостаточной прочности сцепления при столкновении упрочнённого пружинного зуба роторной почвообрабатывающей машины с камнем возможен скол покрытия, приводящий к преждевременному износу. Для расчёта необходимой прочности сцепления покрытия с основой в процессе эксплуатации, была разработана методика, основанная на обобщённом законе Гука и теории Мора, при этом была решена задача Ламе с условиями равенства перемещений на границе разно-

Таблица 1 - Оптимальные режимы наплавки для различных толщин покрытия.

h , мм	X_1 , кА	X_2 , с
1	4.7	74.4
2	11.6	61.3
3	16.6	54.4
4	21.4	42.4
5	26.5	36.3

родных материалов покрытия и основы. Предложенная методика позволяет рассчитать величину эквивалентных напряжений возникающих на границе покрытие – основа (цилиндрический стержень) при контакте с камнем в зависимости от их упругих свойств и геометрических размеров (рисунок 6). Эквивалентные напряжения приводят к отрыву покрытия и определяют величину необходимой прочности сцепления. Из рисунка 6 видно, что с увеличением толщины покрытия и модуля упругости материала покрытия, эквивалентные напряжения увеличиваются, а с увеличением модуля упругости материала основы и радиуса основы – снижаются. Исходя из полученных результатов, данная методика позволяет выбрать материал покрытия и метод его наплавки в зависимости от условий эксплуатации упрочняемого изделия. Расчёт по предложенной методике для пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машины показал, что необходимая прочность сцепления покрытия с основой в процессе эксплуатации с учётом коэффициента запаса $n = 1,4$ составляет 180–200 МПа. Исходя из этого, режимы наплавки выбирались такие, чтобы практическая прочность сцепления покрытия с основой превышала расчётные значения.

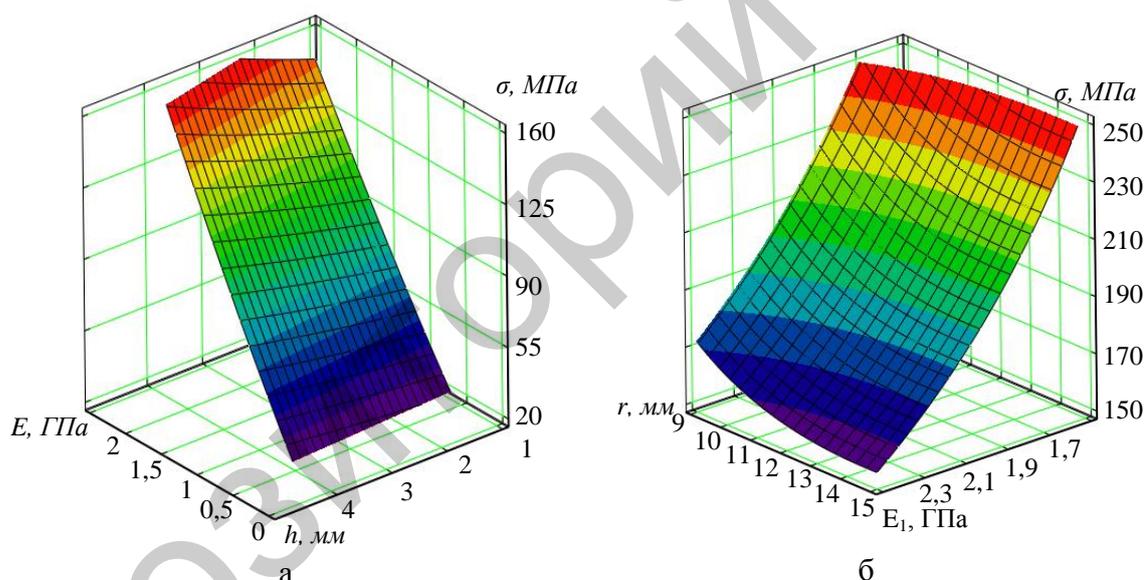


Рисунок 6 – Зависимость напряжений σ , возникающих при ударе на границе покрытие-основа (рабочая поверхность пружинного зуба роторной почвообрабатывающей машины): а – от толщины покрытия h и модуля упругости материала покрытия E ; б – радиуса основы r и модуля упругости материала основы E_1

В четвёртой главе представлены результаты исследования физико-механических и триботехнических свойств покрытий, полученных методом ЭО, в зависимости от режимов наплавки.

Были проведены испытания, полученных методом ЭО, образцов с покрытиями составов: ПР – Х4Г2Р4С2Ф, ПГ – СР4 и шихты состава 70 % ПР – Х4Г2Р4С2Ф +30 % ПГ– СР4 на твёрдость, прочность сцепления покрытия с основой и ударно-абразивное

изнашивание, а так же проведен фазовый анализ покрытия. Структура покрытия из порошка ПР – Х4Г2Р4С2Ф, наплавленного при температуре 1150–1170 °С, представ-

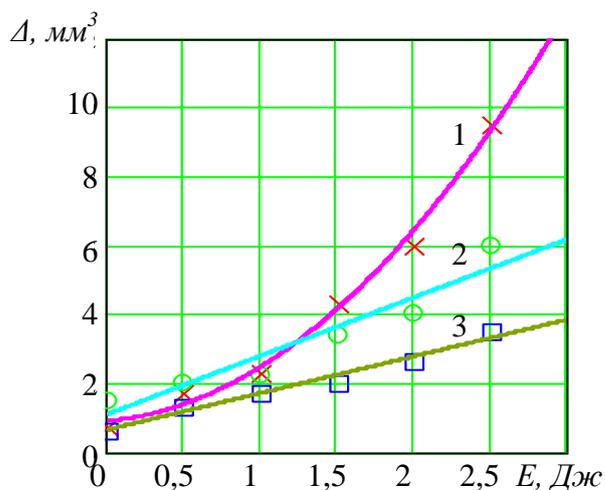


Рисунок 7 – Зависимость величины износа Δ наплавленного покрытия от энергии удара E следующих составов: 1– ПР-Х4Г2Р4С2Ф; 2– ПГ – СР4; 3 – 70% ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30% ПГ – СР4

при увеличении ударной нагрузки. Износостойкостью в 1,5–2 раза большей обладает покрытие, наплавленное при температуре 1050 – 1080 °С, из порошка марки ПГ – СР4 (см. рисунок 7) при ударных нагрузках от 1,5 до 3 Дж. В то же время при ударной нагрузке от 0,5 до 1,2 Дж износостойкость покрытия на 15–30 % ниже, чем у порошка на железной основе. Структура покрытия состоит из никелевой аустенитной матрицы и включений в виде боридов (Me_2B) и карбидов хрома CrC.

Наибольшую износостойкость в условиях ударно-абразивного изнашивания показало покрытие из шихты 70 % ПР – Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ – СР4, наплавленное при температуре 1150 – 1170 °С (рисунок 7). Структура данного сплава состоит из твердого раствора на основе γ -Fe и никеля, а также эвтектики $Me_3(SiB)$ и твёрдых включений в виде боридов Me_2B и карбидов Me_3C . Сочетание твёрдых (10560–15638 МПа) включений и мягкой матрицы обеспечивает высокую стойкость при ударно-абразивном изнашивании. При этом износ покрытия при увеличении ударной нагрузки увеличивается в 1,5–2 раза. Установлено, что все покрытия имеют наибольшую износостойкость при температуре наплавки равной температуре плавления порошкового материала. При увеличении температуры наплавки износостойкость покрытия не меняется. Исследования твёрдости покрытия показали, что наибольшей твёрдостью (64–66 HRC) обладает покрытие, полученное из порошка марки ПР-Х4Г2Р4С2Ф благодаря карбидам и боридам железа. Наличие никеля в порошковой шихте 70% ПР-Х4Г2Р4С2Ф +30% ПГ-СР4 приводит к снижению твёрдости покрытия до величины 61–63 HRC. Наименьшая твёрдость (54–56 HRC) у покрытия из порошка ПГ – СР4 из-за никелевой основы. С увеличением температуры наплавки твёрдость покрытия практически не меняется.

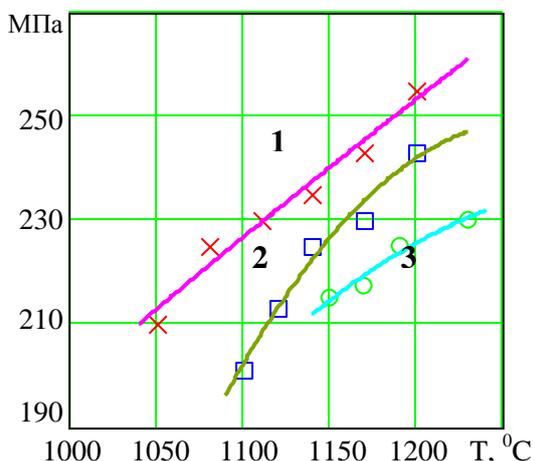


Рисунок 8 – Зависимость прочности сцепления покрытия толщиной 3 мм с основой от температуры наплавки следующих составов: 1 - ПГ – СР4; 2 - 70%ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30%ПГ – СР4; 3 - ПР-Х4Г2Р4С2Ф

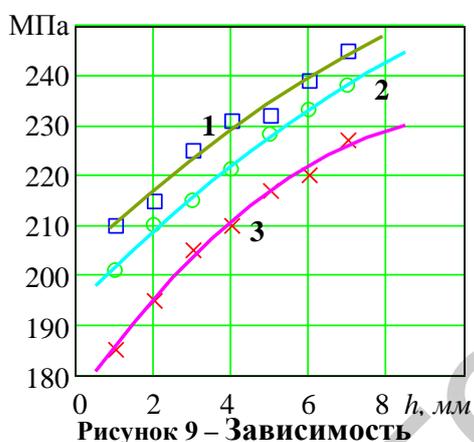


Рисунок 9 – Зависимость прочности сцепления покрытия с основой от толщины покрытия наплавленного при температуре плавления порошковой шихты: 1 - 70%ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30%ПГ – СР4; 2 - ПР-Х4Г2Р4С2Ф; 3 - ПГ – СР4.

Испытания на прочность сцепления показали, что прочная диффузионная связь (185 – 245) МПа между покрытием и основой формируется при температуре плавления присадочного материала, а наибольшее влияние на прочность сцепления оказывает температура наплавки и время выдержки присадочного материала в расплавленном состоянии.

Установлено, что с увеличением температуры наплавки прочность сцепления возрастает на 8–16 % (рисунок 8), а при одинаковой температуре наплавки 1150 °С у покрытия из шихты 70 % ПР – Х4Г2Р4С2Ф +30 % ПГ – СР4 прочность сцепления на 7–12% выше, чем у покрытия из порошка ПР – Х4Г2Р4С2Ф. Это можно объяснить присутствием в шихте более легкоплавкого порошка ПГ – СР4, благодаря чему уже при температуре 1050 °С образуется жидкая фаза способствующая образованию прочной диффузионной связи покрытия с основой. Низкая температура плавления порошка ПГ – СР4 (1050 °С) способствует большему времени диффузии материала покрытия в материал основы, в результате чего прочность сцепления на 5–10% выше, чем у покрытия из шихты 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф +30 % ПГ– СР4 при одинаковой температуре наплавки.

Установлено, что увеличение толщины покрытия, полученного при температуре плавления присадочного материала, приводит к увеличению прочности сцепления материала покрытия с основой (рисунок 9). Наибольшей прочностью сцепления (210–245 МПа) при одинаковой толщине обладает покрытие, наплавленное из шихты 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф +30 % ПГ-СР4. Результаты рентгеновских исследований показали наличие в поверхностных слоях покрытия сжимающих напряжений. Расчетные значения напряжений в поверхностном слое составили 150–160 МПа.

Полевые испытания пружинных зубьев с покрытием, полученным методом ЭО из порошковой шихты 70% ПР-Х4Г2Р4С2Ф +30% ПГ-СР4 показали, что износостойкость в 2,1 раза выше по сравнению с пружинными зубьями без покрытия (рисунок 10).

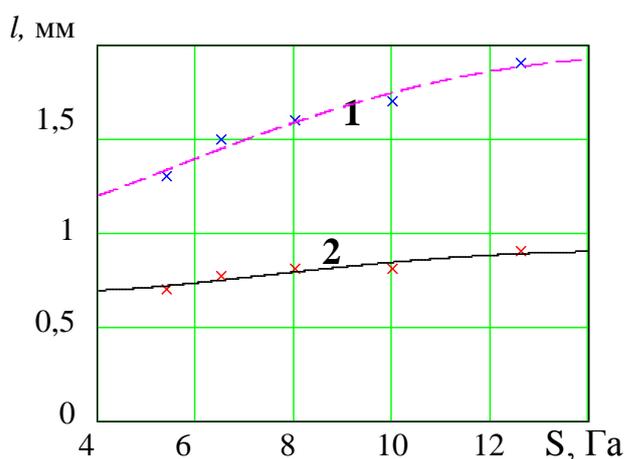


Рисунок 10 – Зависимость износа зубьев по длине (l) от площади обработанного грунта (S): 1 – не наплавленных; 2 – наплавленных ЭО

На основании проведенных исследований была разработана технология и спроектирована технологическая оснастка для наплавки износостойкого покрытия из шихты 70 % ПР – Х4Г2Р4С2Ф +30 % ПГ–СР4 методом ЭО на рабочую поверхность пружинного зуба роторной почвообрабатывающей машины с использованием установок электроконтактной сварки МШ – 100 и МТП-75-11. Разработанный технологический процесс ТП № 03.00.000 внедрён на ГП «Экспериментальный завод» РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук

Беларуси по механизации сельского хозяйства». В результате внедрения разработанной технологии износостойкость упрочнённых деталей выросла в 1,9–2,1 раза и был получен годовой экономический эффект 95,6 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе разработанной математической модели, описывающей закономерности формирования покрытия при оплавлении порошковой шихты в результате её теплообмена с поверхностью заготовки, разогреваемой электрическим током и учитывающей изменение физических свойств (теплопроводность, температуропроводность, электрическое сопротивление) заготовки и порошковой шихты с изменением их температуры, определены характер распределения температуры в порошковом слое, а также движение фронта плавления по слою порошковой шихты при ЭО. Установлено, что при нагреве в порошковом материале наблюдается температурный перепад вдоль оси заготовки, который можно уменьшить за счёт снижения силы тока и увеличения времени его пропускания через заготовку. Используя разработанную методику и экспериментальные результаты, были рассчитаны оптимальные значения силы тока ($I = 4.5–26.5$ кА) и времени ($t = 34–74$ с) его пропускания через наплавляемую деталь, позволяющие получить качественное покрытие толщиной $h = 1–5$ мм и исключают неравномерное оплавление порошкового материала на поверхности заготовки [1, 3, 4, 9, 11, 14].

2. На основе разработанной методики расчёта величины эквивалентных напряжений, стремящихся к отрыву покрытий, возникающих на границе покрытие – основа (цилиндрический стержень) при ударе, учитывающей упругие свойства и геометриче-

ские размеры рассматриваемых объектов, установлено, что с увеличением толщины покрытия и модуля упругости материала покрытия, эквивалентные напряжения увеличиваются, а с увеличением модуля упругости материала стержня и радиуса стержня эквивалентные напряжения снижаются. Установлено, что прочность сцепления материала покрытия, наплавленного из порошков на основе железа и никеля на рабочую поверхность пружинного зуба роторных почвообрабатывающих машин при соударении с камнем, должна быть не менее 180–200 МПа [1, 5, 10].

3. В результате экспериментальных исследований установлены зависимости твёрдости и прочности сцепления покрытия, полученного методом ЭО, от режимов наплавки, показывающие, что прочная диффузионная связь покрытия с основой образуется при полном расплавлении порошкового материала. При этом увеличение температуры наплавки на 10–20 % позволяет увеличить прочность сцепления покрытия с основой на 8–16 %, а увеличение толщины покрытия от 1 до 5 мм приводит к увеличению прочности сцепления на 15–20 %, что вызвано интенсификацией диффузионных процессов массопереноса в жидком слое материала покрытия.

Установлено, что твёрдость наплавленных покрытий зависит от его химического состава и, практически, не зависит от температуры наплавки, при этом наибольшую твёрдость (64–66 HRC) показало покрытие из порошка на железной основе ПР-Х4Г2Р4С2Ф, что связано с преобладанием карбидов и боридов железа, в то же время введение в шихту 30% порошка ПГ – СР4 приводит к снижению твёрдости до 61–63 HRC из-за большого содержания никеля.[1, 4, 7, 10, 12, 15, 16].

4. В результате триботехнических исследований установлено, что износостойкость покрытия, наплавленного методом ЭО из шихты 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ – СР4, в условиях ударно-абразивного изнашивания в 1,5–3 раза выше по сравнению с покрытиями из порошков ПР – Х4Г2Р4С2Ф и ПГ – СР4 благодаря структуре состоящей из мягкой матрицы на основе γ -Fe и никеля, а также твёрдых (10560...15638 МПа) включений в виде карбидов типа Me_3C и боридов типа Me_2B . С увеличением ударной нагрузки от 0,5 до 3 Дж величина износа покрытия увеличивается в 2–3 раза.

Покрытие из порошка ПР-Х4Г2Р4С2Ф состоящее преимущественно из карбидов и боридов железа, имеет на 15–30 % выше износостойкость в условиях ударно-абразивного изнашивания при ударных нагрузках 0,5–1,5 Дж по сравнению с покрытием из порошка ПГ – СР4 состоящего из мягкой никелевой матрицы, а так же карбидов хрома и боридов никеля. Однако из-за наличия хрупких окислов и преобладания твёрдых включений в виде боридов и карбидов железа, износостойкость в 1,5 – 2 раза меньше при ударных нагрузках от 1,5 до 3 Дж.

Установлено, что наибольшей износостойкостью обладает покрытие из шихты 70 % ПР – Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ – СР4, формируемое при температурных режимах, обеспечивающих полное расплавление порошкового материала. При увеличении температуры наплавки износостойкость покрытия практически не меняется. Результаты

рентгеновских исследований показали наличие в поверхностных слоях покрытия сжимающих напряжений равных 150–160 МПа [2, 4, 6, 7, 8, 10, 17].

Рекомендации по практическому использованию результатов

На основании проведенного анализа методов нанесения износостойких покрытий разработан новый способ нанесения покрытий ЭО (патент № 6720), позволяющий получать покрытия твёрдостью 54–66 HRC и прочностью сцепления 185–245 МПа из самофлюсующихся сплавов на железной и никелевой основе на детали стержневого типа путём оплавления порошковой шихты заготовкой разогреваемой электрическим током, используя модернизированное оборудование для электроконтактной сварки [1, 2, 4, 10, 13, 17, 18, 19].

На основании проведенных исследований была разработана технология и спроектирована технологическая оснастка для наплавки износостойкого покрытия из шихты 70% ПР-Х4Г2Р4С2Ф +30% ПГ-СР4 методом ЭО на рабочую поверхность пружинного зуба роторной почвообрабатывающей машины с использованием установок электроконтактной сварки МШ – 100 и МТП-75-11. Разработанный технологический процесс ТП № 03.00.000 внедрён на ГП «Экспериментальный завод» РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства». В результате проведения полевых испытаний было установлено, что износостойкость пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин с покрытием полученным методом ЭО в 1,9–2,1 раза выше по сравнению с пружинными зубьями без покрытия. Для реализации предлагаемой технологии можно применять стандартное оборудование для электроконтактной сварки (машины точечной, шовной и рельефной сварки) с использованием специальной технологической оснастки, при этом использование предлагаемой технологии позволяет исключить нагрев неупрочняемой части заготовки. Годовой экономический эффект от внедрения составил 95,6 млн. руб. [5, 10, 13, 16, 18, 19, 20].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Белявин, К.Е. Нанесение покрытий методом электроконтактного оплавления из порошков на основе Fe-Ni-Cr-B-Si / К.Е. Белявин, А.В. Сосновский // Современные перспективные материалы / под редакцией В. В. Клубовича. – Витебск, 2011.– Гл.10.– С. 260–293.

Статьи в научных журналах и сборниках, входящих в перечень ВАК

2. Нанесение износостойких покрытий путём оплавления порошковой шихты разогретой заготовкой / Ю.Н. Гафо, И.В. Широкий, А.В. Сосновский, И.А. Сосновский // Сварка и родственные технологии. – 2000. – №3. – С. 109–110.

3. Кузнечик, О.О. Автоматизация процесса нанесения порошковых покрытий / О.О. Кузнечик, А.Л. Худолей, А.В. Сосновский // Машиностроитель. – 2002. – № 7. – С. 26–28.

4. Оплавление порошкового материала при теплообмене с деталью, нагреваемой электрическим током / Ю.Н. Гафо, Л.П. Кашицин, И.В. Широкий, А.В. Сосновский // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2002. – № 4. – С. 48–50.

5. Технология упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин / А.В. Сосновский, Ю.Н. Гафо, С.Н. Кот, И.В. Широкий // Мир техники и технологий. – 2003. – № 5. – С. 30–31.

6. Сосновский, А.В. Металлографические исследования структуры покрытий на основе Fe-Cr-B-Si сплавов, полученных методом оплавления порошковой шихты заготовкой, разогреваемой электроконтактным способом / А.В. Сосновский, И.В. Широкий, Ю.Н. Гафо // Сварка и родственные технологии, сбор. науч. тр. / ред. В.К. Шелег [и др.]. – Минск, 2003. – №5. – С. 80–82.

7. Исследование износостойкости покрытий из самофлюсующихся сплавов, полученных методом оплавления порошковой шихты заготовкой, разогреваемой электроконтактным способом / Ю.Н. Гафо, А.А. Дмитриевич, И.В. Широкий, А.В. Сосновский, О.О. Кузнечик // Порошковая металлургия: Республ. межведомст. сб. науч. трудов; ред. П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2006. – № 29 – С. 324–327.

8. Белявин, К.Е. Исследование триботехнических свойств покрытий, полученных методом электроконтактного оплавления / К.Е. Белявин, А.В. Сосновский // Вестник БНТУ. – 2009. – №5. – С 49–53.

9. Белявин, К.Е. Определение оптимальных параметров наплавки покрытий методом электроконтактного оплавления / К.Е. Белявин, А.В. Сосновский // Вестник БНТУ. – 2009. – №6. – С 9–14.

10. Белявин, К.Е. Расчёт допустимой прочности сцепления износостойких покрытий зубьев роторных почвообрабатывающих машин при соударении с камнем / К.Е. Белявин, А.В. Сосновский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – №1. – С 53–56.

Статьи в сборниках научных трудов

11. Сосновский, А.В. Экспериментальное исследование температурных особенностей нагрева порошковой шихты заготовкой, разогреваемой электроконтактным способом / А.В. Сосновский // Сборник трудов молодых учёных НАН Беларуси. Отделен. физ.-техн. наук. Отделен. физики, математики и информатики. Отделение химии и наук о земле; ред. Ю.М. Плескачевский [и др.]. – Минск, 2003. – Т. 3 – С.51–54.

12. Белявин, К.Е. Металлографические исследования покрытий наплавленных методом электроконтактного оплавления из порошков на основе Fe-Ni-Cr-B-Si / К.Е. Белявин, А.В. Сосновский // Перспективные материалы и технологии: сборник

статей международного симпозиума, Витебск, 24 - 26 мая 2011 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2011. – с. 134–135.

Материалы конференций

13. Повышение долговечности деталей машин наплавкой износостойких покрытий на основе Fe-Cr-B-Si – сплавов / Ю.Н. Гафо, А.В. Сосновский, И.В. Широкий, Л.П. Кашицин // Надёжность машин и технических систем: материалы Международной научно-технической конференции в 3 т., Минск, 16 – 17 октября 2001 г. / Институт технической кибернетики НАН Беларуси; под общей ред. О.В. Берестнева. – Минск, 2001. – Т.2. – С. 127–128.

14. Наплавка износостойких порошковых покрытий с использованием электроконтактного нагрева / Ю.Н. Гафо, А.В. Сосновский, И.В. Широкий, Л.П. Кашицин // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия: материалы докл. 5-й Междунар. науч.-техн. конф., – Минск, 22–24 ноября, 2002 г / БНТУ; ред. Л.Э. Ляшенко. – Минск, 2002. – С. 34 – 35.

15. Modelling of a process for applying a wear resistant coating / A.V. Sosnovsky, I. V. Babushkin, I.V. Shirokij, A.A. Vitiaz // PM2004 World Congress Proceedings, Vienna, Austria, 17-21 October 2004.: V.5. Full Density & Alternative Consolidation; Tools for Improving PM; PM Applications. – Vienna 2004. – pp. 285-290.

16. Белявин, К.Е. Использование электроконтактного нагрева для нанесения износостойких покрытий на детали стержневого типа / К.Е. Белявин, А.В. Сосновский. // Энергоэффективные технологии. Образование, наука, практика: материалы Международной научно-практической конференции: в 2 т. – Минск, 20–21 мая 2010 г. / БНТУ. – Минск, 2010. – Т. 2. – С. 97-100.

Тезисы докладов на конференциях

17. Гафо, Ю.Н. Ресурсосберегающие технологии и материалы для наплавки износостойких покрытий на основе железа на рабочие органы почвообрабатывающих машин // Ю.Н. Гафо, И.В. Широкий, А.В. Сосновский // Ресурсосберегающие экотехнологии: возобновление и экономия энергии и материалов: тез. докл. 4-й науч.-техн. конф., Гродно, 11 – 13 окт. 2000 г. / Гродненское отделение Белорусской инженерно-технологической академии, редкол.: А.И. Свириденок [и др.]. – Гродно, 2000. – С.59.

18. Прогрессивная технология наплавки износостойких покрытий на основе Fe-Cr-B-Si на рабочие органы сельскохозяйственных и мелиоративных машин / Ю.Н. Гафо, И.В. Широкий, А.В. Сосновский, И.А. Сосновский // Сварка и родственные технологии: мировой опыт и достижения: Сб. докл. II Междун. симпозиума – М., 2001. – С.167–168.

Патенты и заявки на изобретения

19. Способ нанесения металлических покрытий на детали машин: патент №6720 Респ. Беларусь, МПК 7 C23C26/02 / А.В. Сосновский, Ю.Н. Гафо, И.В. Широкий, Л.П. Кашицин; заявитель Институт надёжности машин НАН Беларуси. – № а 20010430; заявл. 08.05.2001; Опубл. 30.12.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 4. - С. 155-156.

20. Устройство для получения покрытий на наружные цилиндрические поверхности: патент № 883 Респ. Беларусь, МПК7 B22F 7/00 / А.Л. Худолей, О.О. Кузнечик, И.В. Широкий, А.В. Сосновский, Л.П. Кашицин; заявитель Институт надёжности машин НАН Беларуси. – № и 20020242; заявл. 20.08.2002; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. - № 37. - С. 240-241.

РЭЗІЮМЭ

Сасноўскі Аляксей Валер’евіч

Тэхналогія фарміравання зносаўстойлівых пакрыццяў на паверхні спружынных зубцоў ротарных глебаапрацоўваючых машын электракантактным абплаўленнем.

Ключавыя словы: спружынныя зубцы ротарных глебаапрацоўваючых машынаў, самафлюсавальныя парашкі, тэхналагічныя рэжымы, фізіка-механічныя якасці, эксплуатацыйныя характарыстыкі, тэхналагічны працэс.

Мэта работы: распрацаваць тэхналагічны працэс нанясення зносаўстойлівых пакрыццяў метадам ЭА на спружынныя зубцы РПМ, якія працуюць ва ўмовах інтэнсіўнага абразіўнага зношвання і ўкараніць у вытворчасць.

Метады даследавання і апаратура: пры выкананні работы былі выкарыстаны пакеты праграм: Компас 3D, MathCAD. У якасці спецыяльных метадаў даследавання прымяняліся метады матэматычнага мадэлявання, рэнтгенаструктурнага, метаграфічнага, спектральнага аналізу (дыфрактаметр D8 ADVANCE).

Выкарыстаны мікрацвярдамер ПМТ-3, машына трэння круцільнага і зваротна-паступальнага руху.

Распрацаваны новы спосаб наплаўкі пакрыццяў метадам электракантактнага абплаўлення (ЭА), які дазваляе наносіць зносаўстойлівыя пакрыцці з самафлюсавальных парашкоў на дэталі стрыжневага тыпу. Прапанавана матэматычная мадэль, якая апісвае заканамернасці фарміравання пакрыцця пры абплаўленні парашковай шыхты ў выніку яе цеплаабмену з паверхняй загатоўкі, якая разграецца электрычным токам і ўлічвае змяненне фізічных якасцяў (цеплаправоднасць, тэмператураправоднасць, электрычнае супраціўленне) загатоўкі парашковай шыхты са змяненнем іх тэмпературы.

Атрыманая мадэль дазваляе разлічыць аптымальнае значэнне сілы тока ($I = 4.5\text{--}26.5$ кА) і часу ($t = 34\text{--}74$ с) яго прапускання праз наплаўляемую дэталю, якая дазваляе атрымаць якаснае пакрыццё таўшчынёй $h = 1\text{--}5$ мм на дэталі стрыжневага тыпу. Эксперыментальна ўстаноўлены асноўныя заканамернасці ўздзеяння тэхналагічных рэжымаў наплаўлення ЭА і складу прысадачнага матэрыялу з самафлюсавальных парашкоў на жалезнай і нікелевай аснове на фазавы склад, цвёрдасць, трыбатэхнічныя характарыстыкі і моцнасць счাপлення пакрыцця з асновай.

Распрацаваны тэхналагічны працэс і тэхналагічнае забеспячэнне для наплаўлення зносаўстойлівых пакрыццяў метадам электракантактнага абплаўлення на рабочую частку спружыннага зубца РПМ, што дазволіла павысіць зносаўстойлівасць дэталю ў 1,9–2,1 разы. Вынікі работы укаранены на ГП “Эксперыментальны завод” РУП “Навукова-практычны цэнтр Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі і механізацыі сельскай гападаркі” з гадавым эканамічным эфектам 98 млн. руб.

РЕЗЮМЕ

Сосновский Алексей Валерьевич

Технология формирования износостойких покрытий на поверхности пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин (РПМ) электроконтактным оплавлением (ЭО)

Ключевые слова: пружинные зубья роторных почвообрабатывающих машин, самофлюсующиеся порошки, технологические режимы, физико-механические свойства, эксплуатационные характеристики, технологический процесс.

Цель работы: разработать технологический процесс нанесения износостойких покрытий методом ЭО на пружинные зубья РПМ, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания и внедрить в производство.

Методы исследования и аппаратура: при выполнении работы использовались пакеты программ: Компас 3D, MathCAD. В качестве специальных методов исследования применены методы математического моделирования, рентгеноструктурного, металлографического, спектрального анализа (дифрактометр D8 ADVANCE). Используются микротвердомер ПМТ – 3, машина трения вращательного и возвратно-поступательного движения.

Разработан новый способ наплавки покрытий методом ЭО, позволяющий наносить износостойкие покрытия из самофлюсующихся порошков на детали стержневого типа. Предложена математическая модель, описывающая закономерности формирования покрытия при оплавлении порошковой шихты в результате её теплообмена с поверхностью заготовки, разогреваемой электрическим током и учитывающая изменение физических свойств (теплопроводность, температуропроводность, электрическое сопротивление) заготовки и порошковой шихты с изменением их температуры. Полученная модель позволяет рассчитать оптимальные значения силы тока ($I = 4.5–26.5$ кА) и времени ($t = 34–74$ с) его пропускания через наплавляемую деталь, позволяющие получить качественное покрытие толщиной $h = 1–5$ мм на детали стержневого типа. Экспериментально установлены основные закономерности влияния технологических режимов наплавки ЭО и состава присадочного материала из самофлюсующихся порошков на железной и никелевой основе на фазовый состав, твёрдость, триботехнические характеристики и прочность сцепления покрытия с основой.

Разработан технологический процесс и технологическая оснастка для наплавки износостойких покрытий методом электроконтактного оплавления на рабочую часть пружинного зуба РПМ, что позволило повысить износостойкость деталей в 1,9–2,1 раза. Результаты работы внедрены на ГП «Экспериментальный завод» РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства» с годовым экономическим эффектом 98 млн. руб.

SUMMARY

Sosnovsky Alexey Valerevich

Technology of wear-resistant coating shaping on surface of spring harrows of Rotor Tillage Machine (RTM) by Electrocontact Burn-off (EB)

Keywords: spring harrows of Rotor Tillage Machine, self-fluxing powders, operating practices, physical-mechanical properties, operating characteristics, the process.

Aim of the work: To develop a manufacturing process of applying of wear-resistant coatings by EB method on the RTM spring harrows working in the conditions of intensive abrasive wearing and to commission.

Methods of the research and equipment: while fulfillment of the work the following software packages have been used: Compass 3D, MathCAD. Mathematical model approaches, X-ray diffraction, metallographic and spectrum analyses (D8 ADVANCE diffractometer) are applied as special research methods. PMT-3 microhardness gauge, rotational and back-and-forth motion friction machine are used.

A new method of surface coating by EB method has been developed that enables to apply wear-resistant coatings from self-fluxing powders on the rod type parts. The mathematical model showing regularity of coating shaping at the burn-off of blend powder material as a result of its heat exchange with the bar surface, heated up by electric current and considering physical property modification (thermal conduction, thermal diffusivity, electrical resistance) of the bar and powdered mix material with modification of their temperature is offered. The gained model allows to calculate an optimum value of the current strength ($I = 4.5 - 26.5 \text{ kA}$) and its time of gating ($t = 34-74$) through a surfaced part that makes it possible to gain a qualitative coating of $h = 1-5 \text{ mm}$ thickness on the rod type part. Basic regularity of EB surfacing technological regime influence and composition of adding material from self-fluxing powders based on iron and nickel on phase composition, hardness, tribotechnical characteristics, and cohesive resistance of coverage with a blank have been experimentally determined.

The manufacturing process and machining attachments have been developed for surfacing of wear-resistant coatings by EB method on a working part of the RTM spring harrows that enables to raise wear resistance of parts by 1.9–2.1 times. Results of the work have been implemented at State Enterprise «Experimental Factory» of the Republican Unitary Enterprise «Scientific-Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization» with an annual economic benefit of 98 million belarusian roubles.

Научное издание

СОСНОВСКИЙ Алексей Валерьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ
НА ПОВЕРХНОСТИ ПРУЖИННЫХ ЗУБЬЕВ
РОТОРНЫХ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

Подписано в печать 19.09.2011

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 60. Заказ 924.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ №02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.