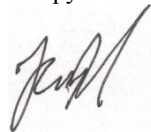


На правах рукописи



КУЗНЕЦОВ Иван Сергеевич

**ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
РЕЖУЩЕГО АППАРАТА ЖАТОК ЭЛЕКТРОДАМИ ИЗ АМОРФНЫХ
И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саранск - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Орловский государственный аграрный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Коломейченко Александр Викторович

Официальные оппоненты – **Мачнев Валентин Андреевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная сельскохозяйственная академия», профессор
кафедры «Основы конструирования механизмов и машин»

Ионов Павел Александрович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева», доцент
кафедры «Технического сервиса машин»

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени профессора И. И. Иванова»

Защита состоится «25» апреля 2013 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.117.06 при ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева» по адресу: 430904, РМ, г. Саранск, п. Ялга, ул. Российская д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. М. Бахтина ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва» и на сайтах: www.mrsu.ru и vak2.ed.gov.ru.

Автореферат разослан « » 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С.А. Величко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одними из часто изнашиваемых деталей сельскохозяйственной техники являются пальцы режущего аппарата жаток зерноуборочных комбайнов. Исследования надежности современных зерноуборочных машин показывают, что эти детали работают в тяжелых условиях абразивного износа и на них приходится 10-20 % отказов. Для повышения их износостойкости необходимо на изнашивающихся поверхностях создавать упрочненные слои или покрытия с высокими физико-механическими свойствами. Существующие методы создания таких слоев или покрытий, применяющиеся как на стадии изготовления, так и при ремонте, не лишены недостатков, ограничивающих область применения той или иной технологии. Перспективным способом формирования упрочняющих покрытий на рабочих поверхностях деталей машин, в значительной мере лишённым многих недостатков и получившим в последнее время широкое распространение, является электроискровая обработка (ЭИО). Одним из путей увеличения производительности ЭИО и повышения износостойкости электроискровых покрытий (ЭИП) является создание в них нанокристаллической и аморфной структур. Получение таких ЭИП возможно при использовании соответствующих электродных материалов. В настоящее время большое количество таких материалов производится в виде лент толщиной 50 мкм, получаемых быстрой закалкой из жидкого состояния. Данный способ изготовления аморфных сплавов (АС) и нанокристаллических сплавов (НКС) дает возможность получать в них свойства, которые по многим показателям превосходят традиционные сплавы. Применение АС и НКС в качестве электродных материалов позволит повысить производительность процесса ЭИО, износостойкость упрочняемых рабочих поверхностей деталей и, в частности, ресурс упрочненных ЭИО пальцев жаток зерноуборочных комбайнов. При этом не произойдет увеличения энергозатратности. Однако в научной литературе применение АС и НКС в качестве электродных материалов для ЭИО практически не рассматривается.

В связи с этим использование АС и НКС в качестве электродных материалов для ЭИО и получение с их помощью на режущих поверхностях пальцев жаток зерноуборочных комбайнов износостойких ЭИП является актуальной научной и производственной проблемой.

Цель работы – повышение износостойкости пальцев жаток зерноуборочных комбайнов за счет упрочнения режущих поверхностей ЭИО с использованием электродов из АС и НКС.

Объект исследования – технология повышения износостойкости режущих поверхностей деталей ЭИО с использованием электродов из аморфных и нанокристаллических сплавов.

Предмет исследования – показатели массопереноса электродных материалов, числовые значения толщины, микротвердости, шероховатости и сплошности ЭИП, триботехнические характеристики ЭИП, эксплуатационные свойства деталей машин с ЭИП, нанесенными экспериментальными электродами из АС и НКС.

На защиту выносятся:

- результаты расчетов значений и зависимости средних скоростей дрейфа заряженных частиц, диаметра канала искрового разряда, начальных боковых ско-

ростей заряженных частиц, средней концентрации заряженных частиц в разряде и доли тепловой энергии, выделяемой на катоде во время ЭИО, а так же, полученная с их помощью математическая модель ЭИО, позволяющая рассчитывать массу материала, переносимого с анода на катод за один контакт электрода, и управлять ею путем изменения технологических режимов ЭИО;

- результаты исследований структуры ЭИП, полученных электродами из сплавов марок 84КХСР, 2НСР, 82Н7ХСР, 5БДСР;

- эмпирические зависимости и параметры массопереноса при ЭИО электродами из сплавов марок 84КХСР, 5БДСР, 2НСР, 82Н7ХСР.

- результаты исследований толщины, микротвердости, шероховатости, сплошности, износостойкости и эксплуатационных испытаний ЭИП, имеющих аморфную и нанокристаллическую структуры, полученных электродами из сплавов марок 84КХСР, 2НСР, 82Н7ХСР 5БДСР;

- типовой технологический процесс упрочнения ЭИО пальцев жаток зерноуборочных комбайнов электродами из АС марки 84КХСР и конструкция электрода.

Научная новизна работы:

- разработана математическая модель, позволяющая на основании рассчитанных значений средней скорости дрейфа заряженных частиц, диаметра канала искрового разряда, начальных боковых скоростей заряженных частиц, средней концентрации заряженных частиц в разряде и доли тепловой энергии, выделяемой на катоде, рассчитывать массу материала, переносимого на деталь и управлять ею за счет изменения режимов ЭИО;

- получены ЭИП электродами из АС марок 84КХСР, 2НСР, 82Н7ХСР с рентгеноаморфной структурой и электродом из НКС марки 5БДСР с нанокристаллической структурой, представляющей собой аморфную матрицу с кристаллами α -Fe;

- установлены эмпирические зависимости массы электродного материала, переносимого с анода на катод, от начального напряжения процесса и параметры массопереноса, позволяющие определять режимы ЭИО при использовании АС и НКС.

Методы исследования. Теоретические исследования строились на основных положениях теории искры, физики газового разряда и электротермической теории эрозии. Экспериментальные исследования проводили с использованием известных, отработанных методов, современных приборов и оборудования с допустимыми величинами ошибок вычислительных операций. Обработка результатов исследований проведена с использованием методов теории вероятности и математической статистики, с помощью пакета прикладных программ «PТC Mathcad 15», «Excel 2007».

Практическая значимость работы заключается в разработке типового технологического процесса упрочнения ЭИО режущих поверхностей пальцев жаток зерноуборочных комбайнов, повышающего их износостойкость в 1,7-2,2 раза, и конструкции электрода, позволяющей наносить износостойкие ЭИП с аморфной и нанокристаллической структурами.

Реализация результатов исследований. Типовой технологический процесс упрочнения ЭИО пальцев жаток зерноуборочных комбайнов принят к вне-

дрению на трех предприятиях АПК Орловской области. Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Орел ГАУ».

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на:

- международных научно-технических и научно-практических конференциях: Орел, ОрелГАУ, 2009, 2010, 2011, 2012; УНПК, 2008; С.-Петербург, Институт оптики атмосферы РАН, 2008; Москва, Rusnanotech09, 2009; ГОСНИТИ, 2009, 2010, 2011, 2012; МГАУ 2012; Севастополь, Донецк НТУ, 2010; Белгород, ГСХА, 2010, 2012;

- Всероссийских научно-практических конференциях: Курск, ГСХА, 2009; Орел, ОрелГАУ 2012;

- заседаниях кафедры надежности и ремонта машин ФГБОУ ВПО ОрелГАУ 2009, 2010, 2011, 2012.

Результаты работы представлялись на выставках и конкурсах: Москва, Rusnanotech 09, 2009, НТТМ-2011, 2011; AGROTECH, 2011, 2012; AGROSALON, 2012; Саратов, СГАУ, 2010.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 27 печатных работ, в том числе 11 в изданиях, входящих в перечень ВАК. Получено 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Изложена на 163 страницах машинописного текста, включает 42 рисунка, 21 таблицу. Библиографический список из 184 наименований. Приложения содержат 38 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, приведена ее общая характеристика и научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния вопроса, определению цели и задач исследования. Для проведения исследований были выбраны пальцы P230.21.000, DQ11499, H213405, KG 35 379720 жаток зерноуборочных комбайнов. Проведен анализ их технического и износного состояния. Определен минимальный, средний и максимальный износ режущих поверхностей, который колеблется от 1,21 мм до 1,5 мм. На основании анализа способов поверхностного упрочнения для режущих поверхностей пальцев выбран метод ЭИО.

По работам таких отечественных ученых, как Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко, Г.В. Самсонов, Б. Н. Золотых, Ф. Х. Бурумкулов, А.Д. Верхотуров, И.А. Бакуто, А.Е. Гитлевич, В.И. Иванов и ряда других, внесших большой вклад в создание, развитие и совершенствования ЭИО, был осуществлен обзор физических основ и известных моделей процесса.

Обзор электродных материалов, применяемых для ЭИО, показал, что данные по использованию АС и НКС и получению с их помощью ЭИП в открытых источниках научно-технической информации отсутствуют. Поэтому представляется целесообразным провести комплекс научных исследований по данному направлению. В связи с этим для проведения экспериментов были выбраны наиболее изученные сплавы на основе: железа – НКС марки 5БДСР и АС марки 2НСР; кобальта – АС марки 84КХСР; никеля – АС марки 82Н7ХСР.

Анализ научных работ в области ЭИО и предлагаемых электродных материалов позволил сформулировать следующие задачи научного исследования:

1. Определить средние скорости дрейфа заряженных частиц, диаметр канала искрового разряда, начальные боковые скорости заряженных частиц, среднюю концентрацию заряженных частиц в разряде и долю тепловой энергии, выделяемой на катоде во время ЭИО, и на основании этих параметров разработать математическую модель ЭИО, позволяющую прогнозировать массу материала, переносимого с анода на катод, и управлять ею путем изменения технологических режимов ЭИО.

2. Исследовать структуру ЭИП, образованных электродами из АС и НКС.

3. Исследовать параметры и зависимости массопереноса при ЭИО.

4. Определить толщину, микротвердость, шероховатость и сплошность ЭИП, полученных электродами из АС и НКС.

5. Оценить износостойкость ЭИП, имеющих аморфную и нанокристаллическую структуры.

6. Провести эксплуатационные испытания упрочненных ЭИП и неупрочненных пальцев жаток зерноуборочных комбайнов.

7. Разработать типовой технологический процесс и конструкцию электрода для упрочнения ЭИО аморфными и нанокристаллическими сплавами режущих поверхностей пальцев жаток зерноуборочных комбайнов и рассчитать экономическую эффективность результатов научного исследования.

Во второй главе представлены теоретические исследования, направленные на разработку математической модели ЭИО, которые основаны на положениях теории искры, физики газового разряда, электротермической теории эрозии.

При разработке модели вводились следующие допущения:

- колебания вибратора являются гармоническими;
- амплитуда колебаний вибратора больше расстояния пробоя;
- в нижней точке колебаний вибратор контактирует с катодом без значительного усилия нажима;
- в расчетах принимали атмосферное давление;
- начальная длина искрового промежутка равна расстоянию пробоя.

При установлении зависимостей скоростей дрейфа принималось, что движение электрода представляет собой непрерывные периодические колебания. Установлена средняя скорость дрейфа электронов V_{de} и ионов V_{di} :

$$V_{de} = \frac{1}{r_i} \sqrt{\frac{eE_{np}}{2\pi m_e N_{eo}}}, \quad (1)$$

где r_i – радиус иона, м; m_e – масса электрона, кг; e – заряд электрона, Кл; E_{np} – напряженность пробоя, В/м; N_{eo} – начальная концентрация электронов, $1/\text{м}^3$.

$$V_{di} = \frac{1}{r_i} \sqrt{\frac{eE_{np}}{2\pi m_i N_i}}, \quad (2)$$

где m_i – масса иона, кг; N_i – начальная концентрация электронов, $1/\text{м}^3$.

Для начальной концентрации $N_{eo}=N_{io}=0,5 \cdot 10^{26} \text{ 1/м}^3$ были рассчитаны оценочные значения $V_{de}=1,2 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ и $V_{di}=0,75 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

Средний диаметр искрового разряда определяли из уравнения баланса энергий в разряде. Оно показывает, что энергия разряда между электродами затрачивается на диссоциацию молекул азота W_N и кислорода W_O , ионизацию атомов воздуха W_u и на увеличение кинетической энергии заряженных частиц W_{σ} :

$$\frac{\varepsilon_0 S U_0^2}{2h_{cp}} = \frac{\pi D^2}{4} h_{cp} (W_N + W_O + W_u + W_{\sigma}), \quad (3)$$

где D – диаметр искрового разряда, м; ε_0 – диэлектрическая постоянная, Кл²/Н·м²; S – площадь сечения электродов (анода), м²; U_0 – начальное напряжение генератора; h_{cp} – среднее расстояние за время от начала пробоя до контакта электрода, м.

Из уравнения (3) была получена формула для расчета среднего диаметра искрового разряда:

$$D = 1,27 \cdot 10^7 \cdot \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 S}{\pi \cdot e \cdot \left[\frac{E_{np}}{2\pi_i^2} + n(0,78 \cdot V_N + 0,21 \cdot V_O \cdot 2 \cdot V_u) \right]}}, \text{ м}, \quad (4)$$

где n – количество молекул воздуха в единице объема; V_u – потенциал ионизации, эВ; V_O – потенциал ионизации молекул кислорода, эВ; V_N – потенциал диссоциации молекул азота, эВ.

При искровом разряде на величину массы переносимого материала существенное влияние оказывает снижение в разряде концентрации заряженных частиц за счет их выносных боковых скоростей. Из системы уравнений массообмена в разряде были получены зависимость концентрации заряженных частиц от времени:

$$(N_i)_{cp} = N_{i0} \left(\frac{D}{w_{i0} \tau_p} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

где N_{i0} – начальная концентрация ионов, 1/м³; w_{i0} – начальная боковая скорость ионов, м/с; τ_p – средняя длительность разряда, (по данным Д.В. Яркова $\tau_p \approx 3,2 \cdot 10^{-5}$ с).

$$(N_e)_{cp} = N_{e0} \left(\frac{D}{w_{e0} \tau_1} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где N_{e0} – начальная концентрация электронов, 1/м³; w_{e0} – начальная боковая скорость электронов, м/с; τ_1 – длительность тока ионизации, с.

Для оценки средних концентраций ионов и электронов в разряде была получена формула для определения начальных боковых скоростей заряженных частиц:

$$w_0 = 2,76 \cdot \sqrt{\frac{kT_0}{m_0}}, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где m_0 – масса заряженной частицы, кг; T_0 – начальная температура среды, °К.

Расчетом по формуле (7) получены оценочные значения начальной боковой скорости электронов $w_{e0} = 1,86 \cdot 10^5$ м/с и начальной боковой скорости ионов $w_{i0} = 1,15 \cdot 10^3$ м/с. Расчетом по формуле (5) установлена средняя концентрация электронов в разряде $(N_e)_{cp} \approx 0,5 \cdot 10^{25}$ 1/м³.

Из сопоставления полученных зависимостей тепловой мощности электронного тока ионизации q_1 и тепловой мощности от термоэмиссионных электронов q_2 следует – $q_1 \gg q_2$. Доля тепловой энергии, выделяемой на катоде – $\eta_k = 0,34$. Данный параметр рассчитывался по формуле (8), и согласуется с общепринятыми положениями:

$$\eta_k \approx \frac{q_k}{q_k + q_1} = \frac{1}{1 + \frac{q_1 \tau_1}{q_k \tau_p}}, \quad (8)$$

где q_k – тепловая мощность, выделяемая на катоде, Вт.

Для определения зависимости массы электродного материала, переносимого с анода на катод, от режимов ЭИО определяли снижение напряжения за время искрового пробоя. Для этого по формуле Ромпе и Вайцеля, с учетом вычисленных средних концентраций заряженных частиц и диаметра искрового разряда, провели расчет, который показал, что сопротивление искры находилось в интервале 640 – 800 Ом. При таком сопротивлении искрового канала и емкости конденсаторного блока C , равной 56 мкФ, напряжение на электродах за время разряда снизится на 2 – 4 %, т.е. разряд конденсатора будет происходить преимущественно только при контакте электродов. Это позволяет нам утверждать, что при ЭИО импульсами тока малых энергий перенос материала с анода на катод происходит преимущественно при контакте электродов.

За время контакта снижение напряжения на аноде составит 65%. При относительно невысоком нагреве анода его энергия будет расходоваться в основном на нагрев электрода, плавление и испарение материала в зоне контакта. Тогда формула для расчета массы материала M_T , осаждаемого на катоде за время одного контакта электрода:

$$M_T = \frac{\left[0,44U_0^2 C \frac{R_A}{R_q} - \frac{C_A m_A (t_H - t_0)}{f \tau_n} \right] \cdot (1 - \beta)}{C_{II} (t_{II} - t_0) + L_{II} + \beta \cdot [C_{II} (t_{II} - t_{II}) + L_{II}]} \cdot n \cdot v, \quad (9)$$

где n – коэффициент, учитывающий массу расплавленного материала, оставшегося на аноде при размыкании электродов; v – коэффициент, учитывающий массу материала, потерянного на разбрызгивание и испарение при взрыве металлического мостика; β – коэффициент, характеризующий отношение между массой испарившегося и плавного материала; C_{II} – удельная теплоемкость материала в процессе плавления, Дж/(кг·°C); C_{II} – удельная теплоемкость материала в процессе испарения, Дж/(кг·°C); t_{II} – температура плавления, °C; t_H – температура испарения, °C; L_{II} – теплота плавления, Дж/кг; L_{II} – теплота испарения, Дж/кг; C_A – удельная теплоемкость материала анода, Дж/(кг·°C); m_A – масса анода, кг; t_H – температура нагрева анода, °C; t_0 – начальная температура анода, °C; f – частота подачи импульса тока, Гц; τ_n – длительность обработки, с; R_q – сопротивление цепи при контакте электродов, Ом; R_A – сопротивление электрода, Ом.

Сопротивление цепи R_q принимаем как сумму сопротивлений: электрода, проводов контактной цепи, зоны плавления и сопротивления стягивания. Используя работы В.М. Куляпина, коэффициент β можно представить в виде:

$$\beta = 0,405 \cdot \left\{ 1 - 2,5 \left[\frac{L_{II} + C_{II} \cdot (t_{II} - t_0)}{L_{II} + C_{II} \cdot (t_{II} - t_{II})} \right] \right\}, \quad (10)$$

Таким образом, для разработки математической модели (формула 9) были рассчитаны средние скорости дрейфа заряженных частиц, диаметр канала искрового разряда, начальные боковые скорости заряженных частиц, средние концентрации заряженных частиц в разряде, доля тепловой энергии, выделяемой на катоде. Модель позволяет прогнозировать один из важнейших параметров ЭИО – массу материала, переносимого с анода на катод, и управлять ею посредством изменения начального напряжения, емкости конденсаторного блока и частоты подачи импульса.

В третьей главе приведены программа, оборудование и методы экспериментальных научных исследований. В качестве электродных материалов для проведения исследований были выбраны АС марок 84КХСР, 2НСР, 82Н7ХСР и НКС марки 5БДСР. Нанесение ЭИП осуществляли установкой UR-121 на образцы из стали марки 65Г ГОСТ 14959 - материал, из которого изготавливаются большинство режущих деталей сельскохозяйственных машин.

Элементный состав АС и НКС, используемых в качестве электродных материалов, определяли атомно-эмиссионным спектрометром IСAP-6300 Duo.

Структуру полученных ЭИП исследовали сканирующим электронным микроскопом Hitachi TM – 1000 и рентгеновским излучением на дифрактометре XMD-300. Съемку дифрактограмм осуществляли в интервале углов $2\theta=20^\circ-100^\circ$.

Зависимость массы электродного материала, переносимой с анода на катод, от начального напряжения, выявляли измерением геометрических параметров единичных эрозионных следов, оставленных электродом. Измерения производили на микротвердомере ПМТ-3М, оснащенный окулярным винтовым микрометром МОВ 16^х и объективом ОЭ-25, по среднему диаметру валика эрозионного следа (рис. 1). Толщину эрозионных следов измеряли на поперечных шлифах. После измерений рассчитывали средний объем эрозионного кратера. Учитывая дефектность эрозионных следов, используя значения плотности АС и НКС, вычисляли массу электродного материала, перенесенного с анода на катод за один контакт электрода с поверхностью. Гравиметрическим методом с помощью весов Sartorius Competence CP 64 выявляли порог хрупкого разрушения, критический порог хрупкого разрушения и средний коэффициент массопереноса.

Нагрев электрода измеряли инфракрасным термометром Opttris MiniSight. Исследования проводили при ЭИО с различным начальным напряжением. Удельное время обработки составляло $t_{уд}=1$ мин/см².

Толщину экспериментальных ЭИП измеряли на поперечных шлифах. Измерения проводили на микроскопе МИМ-8. Базовой поверхностью служила граница раздела ЭИП и подложки. Микротвердость измеряли при нагрузке 50 г методом вдавливания

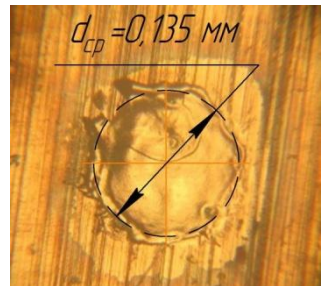


Рис. 1 – Эрозионный след, оставленный электродом из сплава марки 2НСР, при напряжении $U_0=73$ В

алмазных наконечников по ГОСТ 9450 на компьютеризированном микротвердомере ПМТ-3М-01. Отпечатки от индентора исследовали на микроскопе Hitachi TM – 1000. Исследование шероховатости ЭИП осуществляли на профилометре модели 171621. Измерялись ЭИП, полученные ЭИО с различным удельным временем обработки. Для исследований сплошности ЭИП использовали цифровую лупу Highraq MS-K007. В качестве сравнения использовали ЭИП, полученные наиболее применяемым для упрочнения режущих поверхностей сплавом ВК6-ОМ.

Испытания на износостойкость проводили на машине трения МТУ-01 ТУ 4271-001-29034600-2004, оснащенной измерительным комплексом ZetLab. Износ образцов определяли гравиметрическим методом с использованием весов Sartorius Competence CP 64.

На эксплуатационные испытания устанавливали пальцы P230.21.000, DQ11499, H213405, KG 35 с комбайнов Дон-1500Б (жатка ЖУ-6), John Deere 1175 (жатка 319), John Deere WTS 9560 (жатка 625R), New Holland CX 840 (жатка Varifeed). Измерения износа проводили электронным штангенциркулем ШЦЦ-I 0-300-0,01 ГОСТ 166 после каждого гектара наработки режущих поверхностей.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований. Проведен качественный и количественный элементный анализ АС и НКС, применяемых для нанесения ЭИП. Было выявлено более 30 химических элементов в составе используемых АС и НКС. По результатам элементного анализа можно утверждать, что химический состав, применяемых в качестве электродных материалов АС и НКС, будет способствовать образованию ЭИП с аморфной и нанокристаллической структурами, высокой микротвердостью и повышению производительности ЭИО.

Сканирующая электронная микроскопия позволила констатировать, что ЭИП, полученные обработкой стальной подложки электродами из АС и НКС, имеют гомогенную структуру до уровня 1 мкм. Однако, в переходной зоне между покрытием и подложкой имеются микрокристаллические включения материала подложки (рис. 2). Исследования рентгеновским излучением показали, что ЭИП, полученные из сплавов марок 84КХСР, 2НСР, 82Н7ХСР, рентгеноаморфны (рис. 3 а). Покрытие из сплава 5БДСР имеет нанокристаллическую структуру, представляющую собой аморфную матрицу с нанокристаллами α – Fe. Это видно из рисунка 3 б, на котором имеется отражение от кристаллических фаз α –Fe.

Для всех исследуемых сплавов были выявлены зависимости массы переносимого электродного материала от начального напряжения – одного из основных технологических параметров ЭИО. На рисунке 4 представлена регрессионная степенная зависимость для электрода из АС марки 84КХСР, описывающая массив экспериментальных данных и совмещенная с теоретической зависимостью, полученной вычислениями по формуле (9). Теоретические расчеты по разработанной

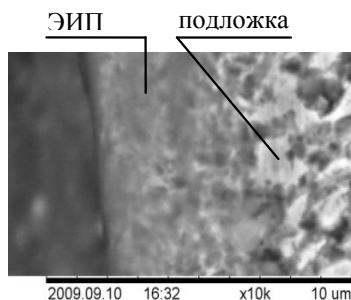


Рис. 2 - Структура ЭИП, полученного электродом из НКС марки 5БДСР

математической модели (формула 9) и экспериментальные исследования показали, что максимальная масса переносимого электродного материала и толщина ЭИП за один контакт электрода обеспечивается режимом обработки: энергия импульса - $W=0,16$ Дж, сила тока - $I=17,5$ А, $U_0=73$ В, $f=100$ Гц. Расхождение расчетных и экспериментальных данных по исследуемым электродным материалам составило в среднем не более 5%.

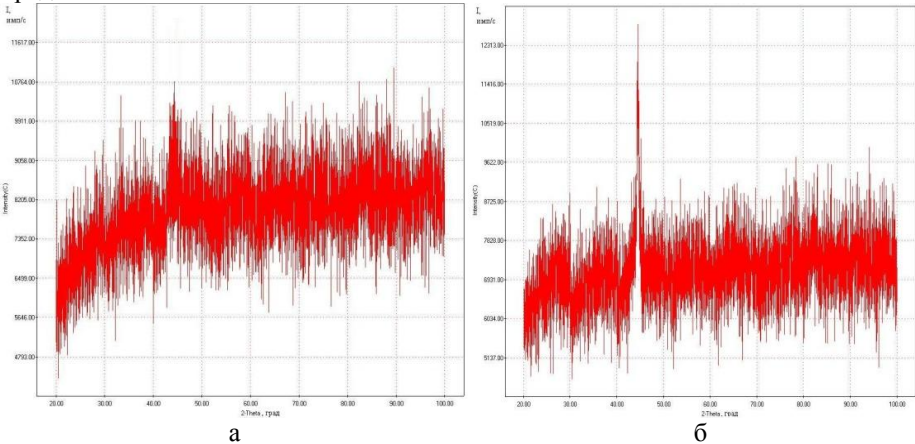


Рис. 3 - Дифрактограммы ЭИП, полученных обработкой стальной подложки (сталь 65Г) электродами из сплавов марок: а – 2НСР; б – 5БДСР

На основании экспериментальных исследований установлен ряд эрозивной стойкости исследуемых сплавов, увеличение которой происходит в следующем порядке 82Н7ХСР → 5БДСР → 84КХСР → 2НСР → ВК6-ОМ.

С помощью гравиметрического метода определены средний коэффициент массопереноса K , порог хрупкого разрушения t_x , критический порог хрупкого разрушения $t_{кр}$, которые для исследуемых сплавов имеют следующие значения: 84КХСР - $K = 0,71$, $t_x = 6,0$ мин/см², $t_{кр} = 8,9$ мин/см²; 5БДСР - $K=0,54$, $t_x = 4,0$ мин/см², $t_{кр}=6,5$ мин/см²; 2НСР - $K=0,61$, $t_x=5,6$ мин/см², $t_{кр}=8,6$ мин/см²; 82Н7ХСР - $K=0,77$, $t_x=6,2$ мин/см², $t_{кр} = 9,4$ мин/см². Сравнением коэффициентов массопереноса исследуемых электродных материалов с аналогичным коэффициентом для сплава

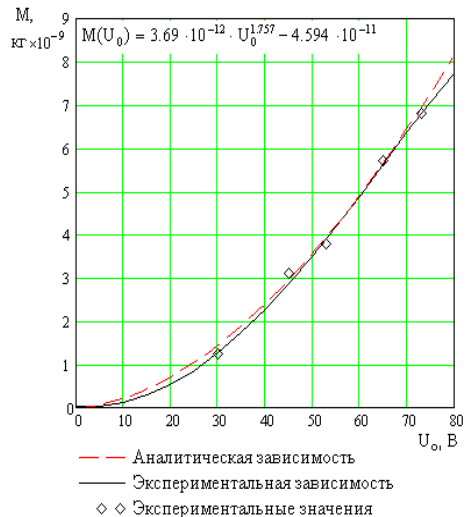


Рис. 4 – Зависимость массы сплава 84КХСР, перенесенного с анода на катод, от начального напряжения

ВК6-ОМ установлено, что для экспериментальных материалов он в 1,1 – 1,3 раза выше. Исключение составляет НКС марки 5БДСР. При оценке расхода энергии на нагрев электрода было установлено, что он зависит, главным образом, от начального напряжения. Результаты исследований нагрева представлены на рисунке 5.

При исследовании толщины и сплошности ЭИП было выявлено, что при равных условиях предлагаемые электродные материалы позволяют получать ЭИП максимальной сплошности 95-98% и толщиной в 1,5 – 2 раза большей, чем сплав ВК6-ОМ (рис. 6). Микротвердость ЭИП составила: из сплава 5БДСР – 10,2 ГПа; из сплава 84КХСР – 8,0 ГПа; из сплава 2НСР – 7,3 ГПа; из сплава 82Н7ХСР – 5,4 ГПа.

По мере увеличения удельного времени обработки после образования первого сплошного слоя ЭИП, его шероховатость практически не изменяется, а при наступлении порога хрупкого разрушения – незначительно уменьшается. В среднем параметр R_a снижается на 0,5 мкм. Шероховатость полученных ЭИП была следующая: 5БДСР – R_a 3,22÷3,57 мкм; 84КХСР – R_a 3,29÷3,52 мкм; 2НСР – R_a 3,11÷4,01 мкм; 82Н7ХСР – R_a 3,04÷4,07 мкм.

Для каждого из исследуемых ЭИП сравнительными испытаниями на износостойкость установлены экспериментальные зависимости износа от продолжительности испытаний, представленные в виде функции логарифмической регрессии. После их дифференцирования были получены зависимости скорости изнашивания от времени (рис. 7). Используя их для периода установившегося изнашивания, были получены триботехнические характеристики ЭИП из АС и НКС. Установлено, что износостойкость ЭИП, в сравнении с образцом $K_{отн.}$ и контрольным $K_{зап.изн.}$ изготовленных из стали 65Г, составила: 5БДСР – $K_{отн.}$ 1,73,

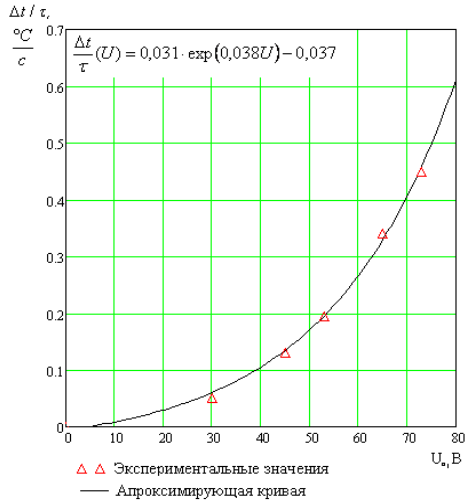


Рис. 5 – Зависимость скорости нагрева электрода от начального напряжения

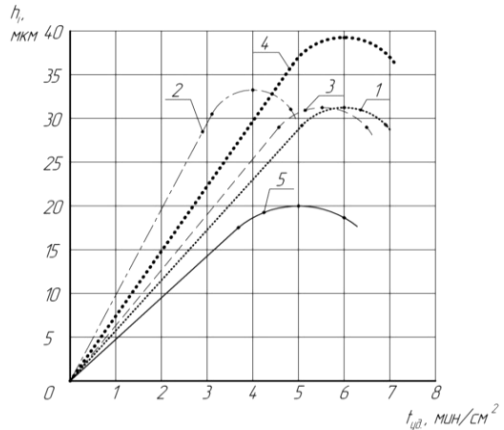


Рис. 6 – Зависимость толщины ЭИП от удельного времени ЭИО: 1 – 84КХСР, 2 – 5БДСР, 3 – 2НСР, 4 – 82Н7ХСР, 5 – ВК6-ОМ

$K_{\text{зап.изн}}=4,52$; 84КХСР – $K_{\text{отн.}}=1,64$,
 $K_{\text{зап.изн}}=7,83$; 2НСР – $K_{\text{отн.}}=1,45$,
 $K_{\text{зап.изн}}=0,53$; 82Н7ХСР – $K_{\text{отн.}}=1,1$,
 $K_{\text{зап.изн}}=2,6$. По результатам испытаний на износостойкость для упрочнения режущих поверхностей пальцев выбран АС марки 84КХСР. ЭИП из этого сплава обладают высокой износостойкостью и наибольшим $K_{\text{зап.изн}}$. Поэтому, в течение приработки деталь с таким ЭИП будет получать наименьший износ. Кроме этого период приработки сократится за счет скорейшего установления рабочего зазора соединения «палец-сегмент».

Эксплуатационные испытания позволили определить эмпирические регрессионные зависимости износа режущих поверхностей серийных изделий и экспериментальных деталей с ЭИП из сплава 84КХСР от продолжительности испытаний (рис. 8). Для наработки пальцев 6,5 га, с помощью полученных зависимостей, определена износостойкость режущих поверхностей с ЭИП. Установлено, что в зависимости от марки пальцев жаток зерноуборочных комбайнов, нанесение на режущие поверхности ЭИП из сплава 84КХСР позволяет повысить их износостойкость в 1,7-2,2 раза. При этом для различных марок пальцев ресурс объектов наблюдения, упрочненных ЭИП из сплава 84КХСР, увеличивается в 1,4–2 раза (рис. 9).

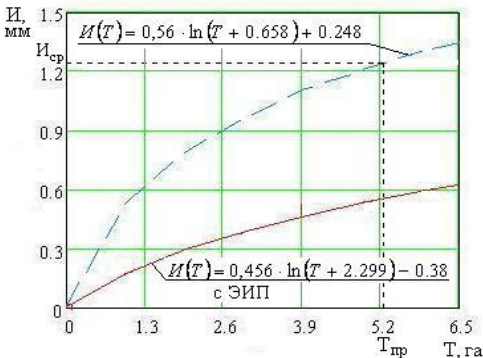


Рис. 8 – Зависимости износа режущих поверхностей пальца P230.21.000 от продолжительности эксплуатационных испытаний

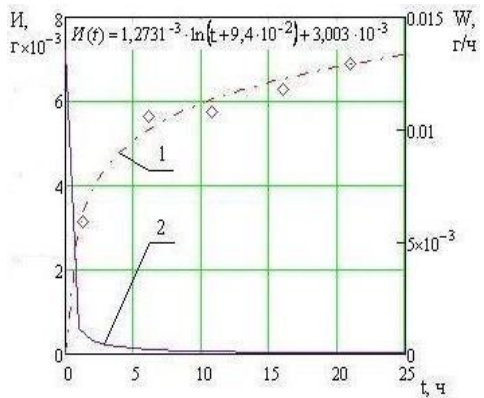


Рис. 7 – Зависимости износа (1) и скорости изнашивания (2) ЭИП из сплава 5БДСР от продолжительности трибо-технических испытаний

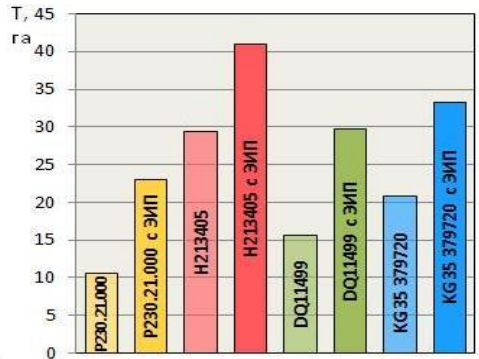


Рис. 9 – Ресурс объектов наблюдения, участвующих в эксплуатационных испытаниях

В пятой главе на основе комплекса научных исследований разработан типовой технологический процесс упрочнения ЭИО режущих поверхностей пальцев жаток зерноуборочных комбайнов (рис. 10), а также конструкция электрода для его осуществления (рис. 11).

Нанесение ЭИП электродами из аморфных и нанокристаллических сплавов производится следующим образом. В процессе ЭИО с пластин 1, происходит перенос электродного материала на упрочняемую режущую поверхность. Твердая фаза продуктов эрозии оседает на упрочняемой поверхности, сохраняя исходную аморфную структуру пластин. Одновременно происходит застывание жидкой фазы со скоростью охлаждения 10^6 °К/с, которая обеспечивается незначительной толщиной наносимого покрытия 25–35 мкм, небольшой площадью отпечатка электрода и температурой детали. Высокая скорость охлаждения способствует сохранению исходной структуры электродного материала. Рациональные технологические режимы ЭИО при упрочнении деталей электродом из сплава 84КХСР: $W=0,16$ Дж, $I=17,5$ А, $U_0=73$ В, $f=100$ Гц, удельное время упрочнения - $t_{удм}=6$ мин/см².

Расчетная экономическая эффективность от внедрения разработанной технологии и оснастки, за счет повышения износостойкости режущих поверхностей деталей, составит свыше 1,4 млн. руб.

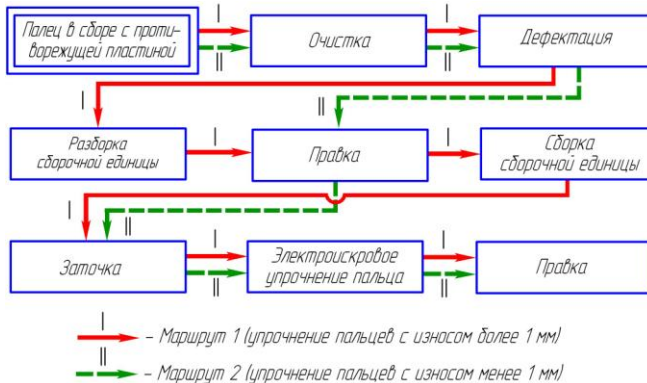


Рис. 10 – Структурная схема типового технологического процесса упрочнения ЭИО пальца (на примере пальца марки Р230.21.000)

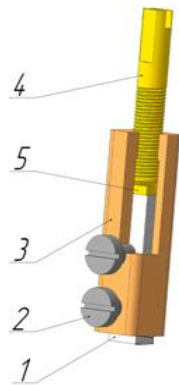


Рис. 11 – Сборный электрод для ЭИО: 1-пластина; 2-винт; 3- оправка; 4 – винт; 5 – шайба

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель, позволяющая на основании полученных зависимостей и рассчитанных значений средних скоростей дрейфа заряженных частиц $(V_{de})_0 = 1,2 \cdot 10^5$ м/с, $(V_{di})_0 = 0,75 \cdot 10^3$ м/с, диаметра канала искрового разряда $D \approx 5 \cdot 10^{-6}$ м, начальных боковых скоростей заряженных частиц $w_{i0} = 1,1 \cdot 10^3$ м/с, $w_{e0} = 1,8 \cdot 10^5$ м/с, средней концентрации заряженных частиц в раз-

ряде ($N_e)_{cp} \approx 0.5 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$, доли тепловой энергии, выделяемой на катоде $\eta_k=0,34$ рассчитывать массу материала переносимого с анода на катод, и управлять этим параметром посредством изменения начального напряжения, емкости конденсаторного блока, амплитуды, частоты вибрации и электродных материалов.

2. ЭИП, нанесенные сплавами марок 84КХСР, 2НСР, 82Н7ХСР – рентгеноаморфны, а ЭИП из сплава 5БДСР имеет нанокристаллическую структуру, которая представляет собой аморфную матрицу с нанокристаллами α -Fe.

3. Теоретические расчеты по разработанной математической модели и экспериментальные исследования показали, что максимальная масса переносимого электродного материала и толщина ЭИП за один контакт обеспечивается режимом обработки: $W=0,16 \text{ Дж}$, $I=17,5 \text{ А}$, $U_0=73 \text{ В}$, $f=100 \text{ Гц}$. Расхождение расчетных и экспериментальных зависимостей массы электродного материала, переносимого с анода на катод, от начального напряжения составило не более 5%. Получены значения среднего коэффициента массопереноса, порога хрупкого разрушения, критического порога хрупкого разрушения для ЭИО сплавами марок 84КХСР, 5БДСР, 2НСР, 82Н7ХСР.

4. Установлено, что ЭИП из АС и НКС, в зависимости от марки используемого сплава, имеют: микротвердость 5,4-10 ГПа; сплошность 95-98%; шероховатость R_a 3,52-4,07; толщину 30-40 мкм, которая в 1,5 раза больше ЭИП из сплава ВК6-ОМ.

5. Триботехнические испытания позволили рекомендовать для пар трения, работающих: при высоких скоростях относительного перемещения и низких контактных нагрузках ЭИП из сплава 82Н7КХСР, обладающие $K_{отн.}=1,1$, $K_{зап.изн.}=2,6$; при знакопеременных нагрузках, ЭИП из сплава 2НСР, имеющие $K_{отн.}=1,45$, $K_{зап.изн.}=0,53$; в среде свободного абразива ЭИП из сплавов 84КХСР $K_{отн.}=1,64$, $K_{зап.изн.}=7,83$ и 5БДСР $K_{отн.}=1,73$, $K_{зап.изн.}=4,52$.

6. Эксплуатационные испытания показали, что нанесение на режущие поверхности пальцев жаток зерноуборочных комбайнов ЭИП электродами из АС марки 84КХСР позволяет повысить их износостойкость в 1,7-2,2 раза.

7. Разработан типовой технологический процесс упрочнения ЭИО режущих поверхностей пальцев жаток зерноуборочных комбайнов (Пат. №2410211) и электрод (Пат. №2416499), позволяющий повысить их ресурс в 1,4-2 раза. Экономическая эффективность от внедрения предлагаемого технологического процесса в масштабах Орловской области составит свыше 1,4 млн. рублей на программу 1900 штук.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ

1. Кузнецов И.С. Результаты эксплуатационных испытаний деталей режущего аппарата зерноуборочных машин, упрочненных электроискровой обработкой электродом из аморфного сплава 84КХСР / А.В. Коломейченко, И.С. Кузнецов // Тр. ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 111. – Ч. 1. – С. 91 – 94.

2. Кузнецов И.С. Оценочные показатели электроискровой обработки при упрочнении и восстановлении деталей. Скорость дрейфа заряженных частиц /

В.З. Павлов, А.В. Коломейченко, И.С. Кузнецов // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 6. – С. 52 – 53.

3. Кузнецов И.С. О движении заряженных частиц между электродами при электроискровой обработке / А.В. Коломейченко, В.З. Павлов, И.С. Кузнецов // Тр. ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 110. – Ч. 2. – С. 128 – 134.

4. Кузнецов И.С. Электроискровая обработка электродами из аморфных и нанокристаллических сплавов режущих деталей / И.С. Кузнецов // Тр. ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 108. – С. 230–233.

5. Кузнецов И.С. Исследования износостойких электроискровых покрытий с нанокристаллической и аморфной структурами / В.Н. Хромов, И.С. Кузнецов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 12. – С. 18–21.

Статьи в других изданиях, включая труды всероссийских и международных НТК

6. Кузнецов И.С. Расчет размера искровых разрядов при электроискровой обработке деталей сельскохозяйственных машин / В.З. Павлов, И.С. Кузнецов, А.В. Коломейченко // Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences. – 2012. – Т. 7. – № 7. – С. 13–15.

7. Кузнецов И.С. Повышение износостойкости пальцев жаток зерноуборочных машин / И.С. Кузнецов, Т.С. Прокошина // Материалы межрегиональной выставки-конференции «Энергосберегающие технологии и техника в сфере АПК», 17-19 нояб. 2010г. – Орел, 2011. – С. 192–196.

8. Упрочнение и восстановление деталей автотракторной техники и сельскохозяйственных машин с использованием наноструктурированных покрытий / И.С. Кузнецов, В.Н. Коренев, Н.В. Титов [и др.] // Материалы второго международного конкурса научных работ молодых ученых в области нанотехнологий «Rusnanotech 09», 2009. – Москва, 2009. – С. 419-420.

Авторские свидетельства и патенты

9. Электрод для электроискровой обработки: пат. 2416499 Рос. Фед.: МПК В23Н 1/04, В82В 1/00 / И.С. Кузнецов, В.Н. Хромов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет». – № 2009138810/020, заявл. 20.10.2009; опубл. 20.04.2011, Бюл. №11.– 4с.

10. Способ упрочнения режущих кромок противорежущей пластины сельскохозяйственной машины: пат. 2410211 Рос. Фед.: МПК В23Н 9/00 / В.Н. Хромов, И.С. Кузнецов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет». – № 2009118085/02, заявл. 12.05.2009; опубл. 27.01.2011, Бюл. №3. – 5с.

Подписано в печать 21.03.2013 г.

Формат 60x90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,0. Заказ 36. Тираж 100 экз.

Отпечатано в издательстве Орел ГАУ, 2013, Орел, бульвар Победы, 19