



**Доронин Олег Николаевич**

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ПРОКАТНЫХ  
ВАЛКОВ ИЗ БЕЛОГО ЧУГУНА**

Специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2013

**Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» на кафедрах «Порошковой металлургии и функциональных покрытий» НИТУ «МИСиС» и «Металлургии и металловедения им. С.П. Угаровой» СТИ НИТУ «МИСиС»**

**Научный руководитель**

Левашов Евгений Александрович

доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

Санин Владимир Николаевич

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Жидкофазных СВС-процессов и литых материалов» ФГБУН ИСМАН

Иванов Валерий Игоревич

кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Ремонта деталей и узлов электроискровыми методами» ГНУ ГОСНИТИ

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

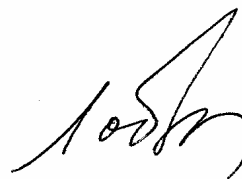
Защита диссертации состоится «18» декабря 2013 года в 14<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д. 212.132.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д.3, ауд.212

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС».

Отзывы на автореферат направлять по адресу 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, НИТУ «МИСиС», ученому секретарю диссертационного совета д.т.н. профессору Лобовой Т.А.

Автореферат разослан «8» ноября 2013 г.

**Ученый секретарь диссертационного совета**



**Лобова Т.А.**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность работы.* Эксплуатационная стойкость прокатных валков является одним из определяющих факторов экономической эффективности прокатного производства. Подавляющее большинство валков сортопрокатных станов сегодня изготавливается из белых износостойких чугунов. Применение традиционных методов термической и химико-термической обработки для упрочнения рабочей поверхности, ввиду неизбежного отпуска и преобразования исходной ледебуритной структуры белого чугуна, не позволяет добиться заметного повышения эксплуатационной стойкости валков. Применение твердых сплавов обеспечивает повышение стойкости инструмента и стабилизирует износ, но в значительной степени усложняет процесс и оборудование, используемое для подготовки и ремонта валков.

В связи с этим особую актуальность приобретает применение методов поверхностной обработки с использованием высокоэнергетических источников мгновенного нагрева, которые выгодно отличаются независимостью от масштабного фактора, возможностью проведения локальной обработки и применения традиционного вальцетокарного оборудования. Наиболее технологически доступным для организации упрочнения прокатных валков является метод электроискрового легирования (ЭИЛ), который характеризуется, прежде всего, высокой адгезией нанесенного материала, сравнительно низкой стоимостью оборудования, экологичностью, достаточно низкими требованиями к предварительной подготовке обрабатываемой поверхности. Несмотря на большой опыт применения данного метода для обработки стальных изделий, его использование на практике для белых чугунов чрезвычайно ограничено, поскольку обработка с использованием высококонцентрированных потоков энергии в ряде случаев может приводить к существенному изменению фазового состава и структуры поверхности изделий из белых чугунов.

Высокую эффективность ЭИЛ-упрочнения стального инструмента для горячей обработки металлов давлением показывают разработанные в НУЦ СВС НИТУ «МИСиС» новые безвольфрамовые СВС-электродные материалы, позволяющие повысить его эксплуатационную стойкость до 10 раз, снизить шероховатость покрытий и повысить производительность процесса. Однако специфика формирования структуры и фазового состава ЭИЛ-покрытий на белых чугунах в условиях воздействия высококонцентрированных потоков энергии не позволяет непосредственно использовать ранее установленные известные закономерности их нанесения на стали без проведения дополнительных исследований. Актуальность этих исследований обусловлена их важностью для понимания сущности процессов взаимодействия материалов электродов (анода и катода) на границе

«покрытие-подложка» и влияния условий их нанесения на структуру и фазовый состав, что обеспечивает получение заданного комплекса свойств и повышение стойкости валков.

Работа выполнялась в соответствии тематическими планами университета на НИР и ОКР по хозяйственным договорам с ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (г. Старый Оскол).

**Цель работы.** Разработка технологии электроискрового упрочнения поверхности валков горячей прокатки, изготовленных из белого чугуна, с использованием СВС-электродных материалов на основе карбида и диборида титана.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовать кинетику массопереноса и механизм формирования покрытий при электроискровой обработке подложек из белого чугуна с использованием СВС-электродных материалов систем TiC-NiAl, TiC-Ni-Mo, TiC-Ni, TiB<sub>2</sub>-TiAl, TiB<sub>2</sub>-NiAl;
- исследовать влияние условий электроискровой обработки белого чугуна электродными материалами марки СТИМ на фазовый состав, структуру и свойства формируемых покрытий. Выбрать состав СВС-электродных материалов и энергетические режимы электроискровой обработки для упрочнения прокатных валков, изготовленных из белого чугуна, обеспечивающие наиболее высокую износостойкость покрытий;
- разработать технологическую оснастку, позволяющую производить электроискровую обработку тел вращения со сложной формой боковой образующей (калибров прокатных валков) в условиях ремонтных подразделений современных прокатных станов и сокращение времени обработки;
- провести опытно-промышленные испытания разработанных технологии и технологической оснастки для электроискрового упрочнения валков прокатных станов;
- разработать метод неразрушающего контроля толщины тонких электроискровых покрытий на основе СВС-электродных материалов, нанесенных методом электроискрового легирования на белый износостойкий чугун.

**Методы исследований.** Работа выполнена с применением современных методик и методов исследований: гравиметрического; металлографического (электронной и оптической микроскопии); микрорентгеноспектрального энергодисперсионного (с использованием анализатора «TEAM EDS», EDAX, США) и волнового WDS-LEXS (с использованием приставки «Trident», США); рентгеноспектрального (на автоматизированном дифрактометре ДРОН, Россия); послойного элементного анализа (на оптическом эмиссионном спектрометре тлеющего разряда «PROFILER-2», HORIBA Jobin Yvon, Франция); трибологического исследования (на высокотемпературной машине трения «High-temperature Tribometer» фирмы «CSM Instruments», Швейцария, по стандартам ASTM G 99-959 и DIN 50324 по схеме

«шарик-диск»). Измерение магнитных характеристик поверхности проводили с применением измерителя концентрации напряжений магнитометрического ИНК-1М-4 (Россия).

#### ***Научная новизна.***

1. Предложен механизм формирования покрытий на подложках из белого чугуна СПХН-60 при использовании СВС-электродных материалов СТИМ-20Н (TiC – Ni); СТИМ-20НМ (TiC-Ni-Mo); СТИМ-9/20А (TiB<sub>2</sub>-TiAl); СТИМ-40НА (TiC-NiAl); СТИМ-11 (TiB<sub>2</sub>-NiAl). На начальной стадии в широком диапазоне значений энергий единичного импульса, частоты и времени следования импульса в присутствии кислорода воздуха определяющую роль играет химическое взаимодействие цементита подложки с электродным материалом, что приводит к интенсивному газовыделению и обезуглероживанию зоны термического влияния.

2. Установлена зависимость концентрации вторичной фазы карбида титана в покрытии, образующейся в результате высокотемпературного взаимодействия диборида титана электродного материала с белым чугуном, от энергии единичного импульса, заключающаяся в том, что при увеличении энергии более 0,4 Дж наблюдается монотонное снижение её концентрации вплоть до полного исчезновения при 3,0 Дж, что может служить ограничением при выборе энергетических режимов обработки.

#### ***Практическая значимость.***

1. Разработана технология электроискрового упрочнения инструмента и деталей промышленного оборудования, изготовленных из белого чугуна, с использованием СВС-электродных материалов на основе систем TiC-NiAl, TiC-Ni-Mo, TiC-Ni, TiB<sub>2</sub>-TiAl, TiB<sub>2</sub>-NiAl, которая апробирована на ОАО «ОЭМК», ООО «ОЗНГМ», ООО «Ресурс». Установлен рост эксплуатационной стойкости инструмента в 1,7 - 4 раза.

2. Разработана и изготовлена новая конструкция многоэлектродного инструмента с независимой подвеской электрододержателей для механизированной обработки деталей, имеющих форму тел вращения со сложной геометрией боковой образующей, позволяющая производить самопозиционирование рабочих электродов относительно обрабатываемой поверхности.

3. Разработаны рекомендации по применению метода магнитной памяти для неразрушающего «in situ» контроля толщины ЭИЛ-покрытий при нанесении и эксплуатации прокатных валков.

4. Разработаны и апробированы на ОАО «ОЭМК» технология и технологическая оснастка для механизированной электроискровой обработки валков для горячей прокатки, изготовленных из белого чугуна, что позволяет повысить их эксплуатационную стойкость более чем в 4 раза.

***На защиту выносятся:***

- результаты исследований кинетики формирования электроискровых покрытий на основе СВС-электродных материалов систем TiC-NiAl, TiC-Ni-Mo, TiC-Ni, TiB<sub>2</sub>-TiAl, TiB<sub>2</sub>-NiAl на белых чугунах;
- выявленные закономерности влияния состава материала катода и энергетических режимов обработки на структуру и фазовый состав электроискровых покрытий;
- разработанная конструкция модульной технологической оснастки для электроискровой обработки тел вращения со сложной формой боковой образующей;
- предложенная методика магнитного неразрушающего контроля толщины электроискровых покрытий на основе СВС-электродных материалов.

***Апробация работы.*** Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития процессов и машин обработки давлением в металлургии и машиностроении» (Украина, г. Краматорск, 2009 г.); Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов» (г. Белгород, 2009 г.); Международной научно-технической конференции «Электроэрозионные и электрохимические технологии в производстве наукоемкой продукции» (г. Москва, 2010 г.); Международной научно-практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» (г. Санкт-Петербург, 2011, 2012 гг.); 12-ой Международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий», (Украина, г. Ялта, 2012 г.); Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ 2012)» (г. Санкт-Петербург, 2012 гг.); XV Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии» (г. Орел, 2012 г.); 10-й международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии» (СММТ'13) (г. Санкт-Петербург, 2013 г.), а также на научно-технических семинарах профессорско-преподавательского состава Старооскольского технологического института в 2008-2013 гг.

***Публикации.*** Содержание диссертационной работы отражено в 17 публикациях. Из них 3 статьи в рецензируемых журналах рекомендованных ВАК, 13 статей в сборниках трудов конференций, 1 тезисы доклада, зарегистрировано 1 know-how.

***Структура и объем диссертации.*** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и трех приложений. Работа изложена на 206 страницах, включая 81 рисунок, 34 таблицы. Список литературы содержит 152 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены условия работы прокатных валков на современных сортовых станах горячей прокатки. Показано, что применение валков из белых чугунов позволяет обеспечить гибкость технологического процесса, но их эксплуатационная стойкость сильно зависит от марки прокатываемой стали. Применение твердосплавного инструмента в значительной степени позволяет повысить его стойкость и стабилизировать износ, но сопряжено со значительными техническими трудностями и финансовыми затратами. Для повышения стойкости валков на практике применяются различные методы поверхностного упрочнения рабочего инструмента, позволяющие минимизировать изменения в структуре существующей системы ведения валкового хозяйства прокатного цеха.

Приведен обзор и сравнительный анализ современных методов поверхностного упрочнения с применением высокоэнергетических источников мгновенного нагрева. Показано, что при сверхскоростном нагреве и охлаждении в условиях воздействия лазерного излучения, искрового разряда и электронного луча в высокоуглеродистых сплавах железа и чугунах могут происходить заметные фазовые и специфические структурные превращения, приводящие к формированию в поверхностном слое дальнодействующих полей напряжений, которые приводят к образованию микротрещин и слоистой структуры.

Описаны физические и химические особенности формирования электроискровых покрытий на поверхности изделий из высокоуглеродистых сталей с применением различных электродных материалов. Исследования по ЭИЛ-упрочнению поверхности прокатных валков из белого чугуна с применением электродов из феррохрома, проведенные Рудюком А.С. показали сравнительно низкое повышение их стойкости до 2 раз. Отмечено, что практическое применение СВС-электродных материалов на основе карбида и диборида титана (марки СТИМ), осуществленное в Научно-учебном центре СВС НИТУ «МИСиС» Кудряшовым А.Е. и Погожевым Ю.С., показывает повышение эксплуатационной стойкости стального инструмента для горячей обработки металлов давлением до 10 раз и дает значительное повышение эффективности применения технологии ЭИЛ.

В литературе отсутствуют сведения о закономерностях формирования ЭИЛ-покрытий на основе СВС-электродных материалов на белых чугунах, что приводит к необходимости подробного их исследования. Результаты исследования позволят существенно расширить сферу их практического применения.

На основе критического анализа технической литературы сформулированы задачи, требующие решения для достижения поставленной в работе цели – разработки технологии и технологической оснастки для электроискрового упрочнения поверхности валков горячей прокатки, изготовленных из белого чугуна, позволяющих повысить их эксплуатационные характеристики.

Во второй главе приведена характеристика материалов и методов, использованных в ходе исследований.

В качестве материала катода при проведении электроискровой обработки использовались образцы с размерами 10×10×5...15 мм из белого низколегированного центробежнолитого чугуна с составом: 3,43-3,53% С, 0,53-0,67% Si, 0,51-0,74% Mn, 0,79-0,86% Cr, 1,62-1,96% Ni, до 93,5% Fe применяемого для производства прокатных валков.

Для нанесения покрытий в производственных и лабораторных условиях применяли установки для электроискрового легирования с транзисторно-тиристорным генератором импульсов совместного производства НИТУ «МИСиС» (Россия) и фирмы SCINITI (Молдова) моделей «Alier 31-Metal» и «Alier G53-Metal». Каждая установка позволяет реализовывать 35 энергетических режимов обработки (таблица 1). Покрытия наносили на воздухе без синхронизации частоты импульсов генератора с частотой вибрации инструмента.

Таблица 1. Технические характеристики установок для ЭИЛ-обработки

Напряже- ние U, В	Сила тока I, А	Мощность импульсного разряда Р, Вт	Длитель- ность τ, мкс	Энергия единичного разряда Е, Дж	Частота f, Гц	Суммарная энергия за 1 мин. обработки ΣЕ, кДж×мин
установка «Alier 31-Metal»						
20	125-175	2250-3150	16-1000	0,036-3,150	8-1200	0,5-7,56
установка «Alier G53-Metal»						
20	125-200	2500-4000	25-1500	0,0625-6,0	8-1200	0,9-15,36

Для нанесения покрытий применялись стержневые СВС-электродные материалы марки СТИМ, отобранные на основании проведенных ранее в НУЦ СВС НИТУ «МИСиС» промышленных испытаний по упрочнению штамповой оснастки, сечением 4×4...6×6 мм и длиной до 60 мм. Для сравнения свойств использовались твердосплавные электроды ВК6 и Т15К6 (таблица 2).

Кинетику массопереноса (удельную эрозию анода  $\Delta A_i$  и удельный привес катода  $\Delta K_i$ ) изучали гравиметрическим методом, на весах «OHAUS Exploer» с точностью  $10^{-4}$  г.

Металлографические исследования покрытий проводили на металлографических световых микроскопах «ЛОМО ПОЛАМ Р-312», «Neophot-32», «Versamet-2 (Union)»,



Ериquant, и с увеличением  $150^X$ ,  $200^X/500^X$ ,  $400^X$ ,  $800^X$  соответственно.

Таблица 2. Составы электродных материалов

№	Электродный материал	Состав шихты, % (вес.)	Примечание
1	СТИМ-20Н (TiC–Ni)	64,0 Ti – 16,0 С – 20,0 Ni	ТУ 1984-012-11301236-2008
2	СТИМ-20НМ (TiC–Ni–Mo)	48,0 Ti – 12,0 С – 28,0 Ni – 12,0 Mo	ТУ 1984-012-11301236-2008
3	СТИМ-9/20А (TiB <sub>2</sub> –TiAl)	59,1 Ti – 11,8 В – 17,7 Al–11,4ZrO <sub>2</sub>	ТУ 1984-012-11301236-2008
4	СТИМ-40НА (TiC–NiAl)	48,00 Ti – 12,00 С–12,60 Al–27,40 Ni	ТУ 1984-012-11301236-2008
5	СТИМ-11 (TiB <sub>2</sub> –NiAl)	41,4 Ti – 18,6 В – 12,6 Al – 27,4 Ni	-
6	ВК6	94,0 WC– 6,0 Co	ГОСТ 3882-74
7	T15K6	79 WC– 15 TiC - 6,0 Co	ГОСТ 3882-74

Анализ распределения химических элементов в покрытиях проводили на растровом электронном микроскопе «Quanta Inspect» (Нидерланды) с приставкой для энергодисперсионного анализа «TEAM EDS», Edax (США). Получаемые спектры обрабатывали по программе «Correction ZAF». Для исследования распределения углерода в структуре покрытия использовали растровый электронный микроскоп Quanta 200 3D (Нидерланды) с интегрированной системой волнового низкоэнергетического WDS-LEXS элементного микроанализа «Trident», «Edax» (США).

Фазовый состав полученных электроискровых покрытий определяли съемкой рентгеновских спектров на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 с использованием монохроматического Co-K<sub>α</sub> и Cu-K<sub>α</sub> излучения.

Послойный элементный анализ электроискровых покрытий изучали на оптическом эмиссионном спектрометре тлеющего разряда PROFILER-2 (HORIBA Jobin Yvon, Франция), который позволяет одновременно количественно определять широкий спектр элементов, в т.ч. газовые (N, O, H, Cl, F) и щелочные (Na, Li, K, Cs).

Трибологические свойства покрытий определяли в соответствии с международными стандартами ASTM G 99-959 и DIN 50324 на высокотемпературной машине трения «High-temperature Tribometer», «CSM Instruments» (Швейцария) по схеме «шарик-диск» (шарик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 6 мм, диск – испытываемый образец), скорость скольжения - 10 см/с, нагрузка - 5,0 Н, температура - 500 °С и 700 °С. Величину износа покрытий измеряли на оптическом профилометре Veeco WYKONT NT 1100 (США) по глубине канавки износа.

Шероховатость покрытий измеряли по ГОСТ 2789-73 на оптическом профилометре Veeco WYKONT 1100 (США) с построением 3D рельефа поверхности.

Исследования микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3М по всей ширине шлифа при нагрузке 50 г по ГОСТ 9450.

Измерение магнитных характеристик покрытий осуществляли методом магнитной памяти с применением измерителя концентрации напряжений магнитометрического ИНК-1М-4 с регистрирующим устройством на базе микропроцессора с трехкомпонентным феррозондовым датчиком, позволяющим определять изменения компонентов вектора напряженности магнитного поля  $H_i$  в диапазоне  $\pm 2000$  А/м с шагом 1/128 мм. Измерения компонентов вектора напряженности магнитного поля проводились в трех точках представляющих двумерный базис, полученные данные усреднялись по результатам трех замеров.

Опытно-промышленные испытания проводили в условия сортопрокатного цеха №2 ОАО «ОЭМК» при прокатке профиля круг 23 мм из стали 55С2А, температура нагрева заготовки 1200 °С. Во время испытаний зазор между валками оставался постоянным, прокатка осуществлялась без изменения температурного режима. Динамику процесса износа поверхности калибра в зависимости от объема прокатанной партии металла оценивали по изменению размеров готового профиля путем отбора каждые 20 тонн технологических проб. Локальную стойкость покрытия на отдельных участках поверхности вала  $\eta$  рассчитывали, исходя из массы прокатанного в калибре металла  $G$ , по формуле (1):

$$\eta = \frac{\lambda}{G}, \text{ мкм/т} \quad (1)$$

где  $\lambda$  - толщина покрытия, мкм;  $G$  - масса прокатанного в калибре металла, т.

**В третьей главе** представлены результаты лабораторных исследований по изучению кинетики массопереноса, особенностей формирования фазового состава структуры и свойств электроискровых покрытий из СВС-электродных материалов на подложках из белого чугуна СПХН-60.

На основании анализа общих требований к процессу ЭИЛ-обработки валков для горячей сортовой прокатки в исследовании были приняты следующие ограничения параметров получаемых покрытий: шероховатость поверхности не должна превышать  $Ra=7$  мкм; покрытия должны иметь максимальную толщину (до 200 мкм) и максимальное содержание износостойкой фазы. Для обеспечения стабильности механизированной электроискровой обработки необходимо минимизировать схватывание анода и катода на высокоэнергетических режимах и при длительной непрерывной работе.

Изучение кинетики формирования электроискровых покрытий при применении стандартных твердых сплавов на основе карбида вольфрама ВК6 и Т15К6 показало, что вид кривых привеса катода и убыли массы анода хорошо согласован между собой и имеет классический характер, когда при увеличении расхода анода соответственно увеличивается масса катода (рисунок 1). Однако уже на низкоэнергетических режимах при энергии

единичного импульса  $E \geq 0,18$  Дж процесс массопереноса становится нестационарным, на поверхности подложки образуются бугры, значительно увеличивается шероховатость (Таблица 3).

Изучение кинетики массопереноса при применении СВС-электродных материалов систем TiC-NiAl, TiB<sub>2</sub>-TiAl, TiB<sub>2</sub>-NiAl показало, что в общем случае при энергии единичного импульса  $E=0,06-0,8$  Дж при стабильном снижении веса электрода (анода) наблюдается убыль массы подложки (катода) на протяжении всего периода обработки (рисунок 2), что не отмечено ни при обработке сталей, титановых и никелевых сплавов теми же СВС-электродными материалами, ни при обработке белого чугуна электродными материалами ВК6 (рисунок 1б), Т15К6 и феррохромом.

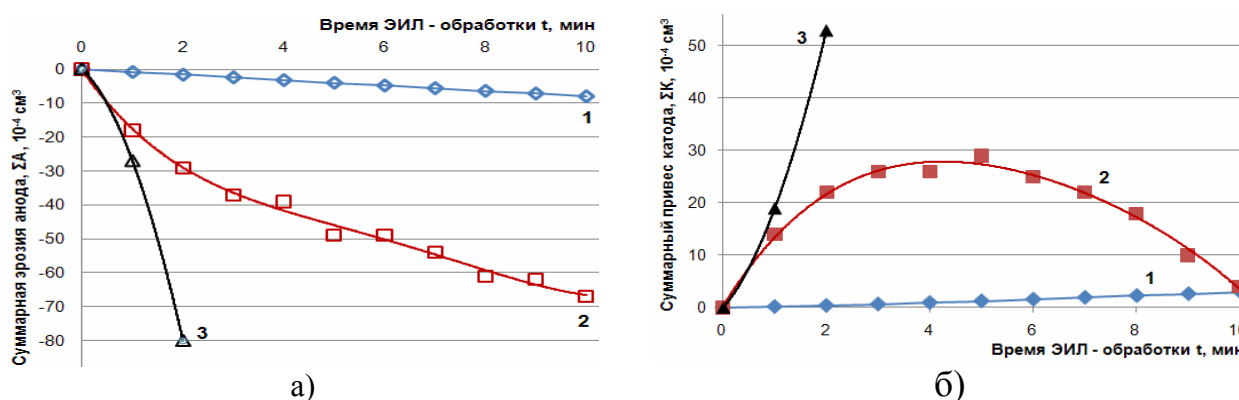


Рисунок 1. Зависимость суммарной эрозии анода  $\Sigma \Delta A_i$  (а) и суммарного привеса катода  $\Sigma \Delta K_i$  (б) от времени ЭИЛ-обработки. Электрод – ВК6. 1 -  $E=0,06$  Дж; 2 -  $E=0,18$  Дж; 3 –  $E=0,8$  Дж

При этом увеличение энергии импульсных разрядов способствует большей убыли массы и подложки и электрода. Такой характер изменения массы катода не позволяет использовать данные гравиметрического анализа для оценки толщины покрытий, и может быть следствием активного взаимодействия на границе раздела «покрытие-подложка».

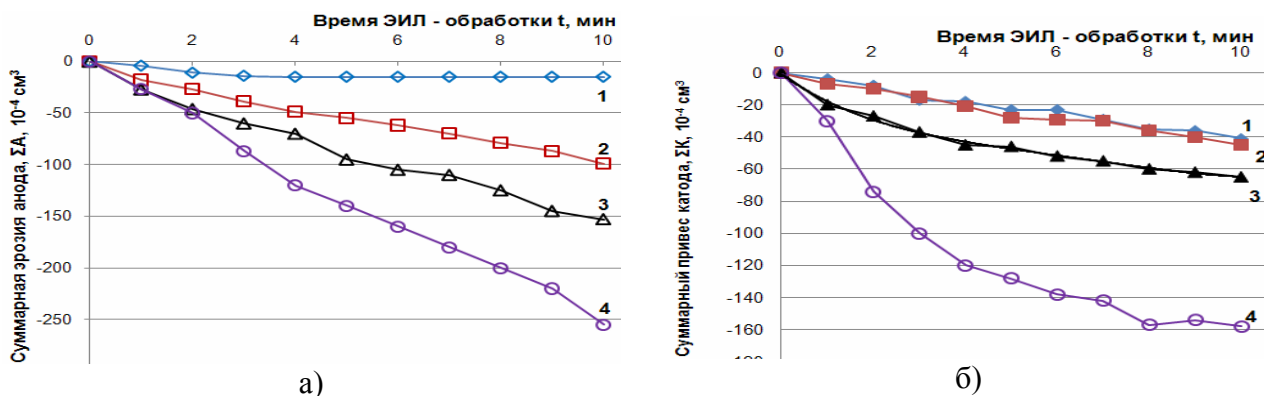


Рисунок 2. Зависимость суммарной эрозии анода  $\Sigma \Delta A_i$  (а) и суммарного привеса катода  $\Sigma \Delta K_i$  (б) от времени ЭИЛ-обработки. Электрод – СТИМ-40НА. 1 –  $E=0,4$  Дж; 2 –  $E=0,8$  Дж; 3 –  $E=1,6$  Дж; 4 –  $E=3,0$  Дж

На высокоэнергетических режимах  $E > 0,8$  Дж для материалов систем TiC-NiAl и TiB<sub>2</sub>-NiAl заметно снижения скорости изменения массы катода при  $t > 3$  мин/см<sup>2</sup>, что может быть объяснено появлением на его поверхности достаточно толстого сплошного покрытия. Для материала TiB<sub>2</sub>-TiAl при  $E = 0,8$  Дж наблюдаются согласованные колебания эрозии анода и привеса катода, которые, очевидно, являются следствием обратного массопереноса. Для всех трех электродных материалов систем TiC-NiAl, TiB<sub>2</sub>-TiAl и TiB<sub>2</sub>-NiAl увеличение энергии обработки от  $E = 1,6$  до  $E = 6,0$  Дж приводит к резкому ухудшению качества покрытий, происходит интенсивный нагрев и схватывание электродов, что способствует появлению крупных, до 1,5 мм, сглаженных выступов. Происходит резкое огрубление поверхности.

Важно отметить, что шероховатость покрытий на основе СТИМ-40НА заметно ниже шероховатости покрытий на основе других материалов (таблица 3), примененных в исследовании, на всех использованных режимах обработки и не превышает  $R_a = 23,74$  мкм даже при  $E = 3,0$  Дж. Процесс массопереноса достаточно стабилен в диапазоне энергий единичного импульса  $0,06 \leq E \leq 1,6$  Дж.

Таблица 3. Свойства электроискровых покрытий при  $E = 0,4$  Дж

Электродный материал (система)	Сплошность, %	Шероховатость $R_a$ , мкм	Толщина, мкм	Твердость, ГПа	Весовой показатель окисления $K_{\text{масс}}$ , г/м <sup>2</sup> при $t = 33,5$ ч
СТИМ-40НА (TiC-NiAl)	до 100	5,6	35	9,5	77,8
СТИМ-20НМ (TiC-Ni-Mo)		12,3	55	9,0	59,2
СТИМ-9/20А (TiB <sub>2</sub> -TiAl)		6,8	60	9,8	16,2
СТИМ-11 (TiB <sub>2</sub> -NiAl)		6,6	45	9,9	12,7
ВК6		18,4	45	9,6	65,2
Т15К6		24,5	55	9,1	58,9
Без покрытия	-	до 3,1	-	2,3	110,7

При проведении электроискровой обработки белого чугуна с применением СВС-электродного материала системы TiC-Ni-Mo на низкоэнергетических режимах ( $E = 0,06-0,18$  Дж) происходит рост массы подложки. При увеличении энергии импульса до  $E = 0,4$  Дж происходит убыль массы катода на первом этапе ( $t = 0-4$  мин) обработки. После образования сплошного поверхностного слоя, наблюдается рост массы подложки. Аналогичное явление при обработке сталей, никелевых и титановых сплавов электродными материалами марки СТИМ, описанное в работах Кудряшова А.Е. и Погожева Ю.С. объясняется особым характером взаимодействия материалов анода и катода, которое имеет место перед образованием промежуточного слоя, и сгоранием легких элементов и окислов на поверхности катода. Схожая кинетика формирования покрытий характерна для СВС-

электрода системы TiC-Ni, однако, рост массы катода наблюдается на всех режимах обработки. Оба состава СВС-материалов склонны к сильному нагреву и схватыванию, что приводит к хрупкому разрушению анода и преимущественной твердофазной эрозии. При этом качественное покрытие с шероховатостью  $R_a < 7$  мкм при применении электродных материалов систем TiC-Ni и TiC-Ni-Mo возможно получить только при самых низкоэнергетических режимах ( $E=0,06$  Дж,  $\Sigma E=3,6$  кДж×мин).

Исследование фазового состава покрытий на основе стандартных твердых сплавов ВК6 и Т15К6 показало, что уже при  $E=0,4$  Дж содержание в покрытии износостойкой фазы WC пренебрежимо мало, а содержание оксидных включений достигает 52% и 58% соответственно, что, очевидно, негативно сказывается на стойкости покрытий.

Рентгенофазовый анализ покрытий на основе СВС-материала системы TiC-NiAl (Таблица 4) показал, что их состав наиболее стабилен на всех режимах обработки при  $E$  от 0,4 до 3,0 Дж, содержание износостойкой и жаростойкой фаз составляет 19-27% TiC и 18-24% NiAl, соответственно, что положительно сказывается на стойкости покрытий. Необходимо отметить, что даже при  $E=0,8$  Дж количество оксидных фаз в покрытиях на основе систем TiC-NiAl и TiB<sub>2</sub>-NiAl не превышает 6% и 13%, соответственно. По сравнению с покрытиями на основе систем TiB<sub>2</sub>-TiAl содержащими до 56 % оксидных фаз.

Таблица 4. Фазовый состав ЭИЛ-покрытия. Электродный материал СТИМ-40НА (TiC-NiAl)

Энергия импульса, Дж	Фаза, вес. доля, %							
	TiC	Ni <sub>x</sub> Al <sub>y</sub>	γ-Fe	Fe <sub>x</sub> Al <sub>y</sub>	Al <sub>3</sub> (O,N) <sub>4</sub>	TiFe <sub>2</sub>	Fe <sub>12</sub> N <sub>5</sub>	Fe <sub>x</sub> Ti <sub>y</sub> O <sub>z</sub>
0,4	27	18	9	35	4	-	7	-
0,8	17	1	3	73	6	-	-	-
1,6	21	24	1	51	3	-	-	-
3,0	19	21	-	52	3	1	-	4

Рентгенофазовый анализ покрытий на основе системы TiB<sub>2</sub>-TiAl (Таблица 5), сформированных при  $E=0,06-1,6$  Дж, показал, что при увеличении энергии импульса содержание первичной износостойкой фазы диборида титана (TiB<sub>2</sub>) снижается с 23 до 5%.

Вместе с этим, содержание образующейся при ЭИЛ вторичной износостойкой фазы карбида титана (TiC) увеличивается с 7 до 19 %. Однако, дальнейшее увеличение энергии импульсов приводит к снижению содержания, как первичной, так и вторичной износостойкой фаз. Аналогичный максимум содержания вторичной фазы TiC до 13% наблюдается при  $E=0,4$  Дж и для материала системы TiB<sub>2</sub>-NiAl, что может служить ограничением для назначения энергетических режимов обработки СВС-электродными материалами на основе диборида титана до  $E \leq 0,4$  Дж. Образование вторичной фазы TiC можно объяснить взаимодействием в

процессе электроискровой обработки компонентов электрода и подложки в ходе протекания одной из следующих химических реакций:

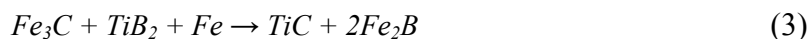
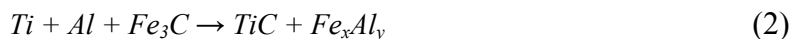


Таблица 5. Фазовый состав ЭИЛ-покрытия. Электродный материал СТИМ-9/20А (TiB<sub>2</sub>-TiAl)

Энергия импульса, Дж	Фаза, вес. доля, %							
	TiC	TiB <sub>2</sub>	Fe (α+γ)	Fe <sub>x</sub> Al <sub>y</sub>	Al <sub>x</sub> O <sub>y</sub> N <sub>z</sub>	Fe <sub>3</sub> C	Fe <sub>2</sub> B	Fe <sub>x</sub> Ti <sub>y</sub> O <sub>z</sub>
0,0625	7	23	-	54	16	-	-	-
0,175	11	11	-	58	16	4	-	-
0,4	19	5	37	-	26	-	13	-
0,8	-	-	21	13	-	-	22	44
1,6	-	-	30	-	-	11	3	56

С увеличением энергии импульса от  $E \geq 0,8$  Дж суммарное содержание оксинитридных и оксидных фаз Al<sub>3</sub>(O,N)<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> в покрытии СТИМ-9/20А стабильно увеличивается с 16 до 56%, что значительно ухудшает стойкость покрытий.

О хрупком разрушении СВС-электродов систем TiC-Ni и TiC-Ni-Mo при схватывании с подложкой свидетельствует резкое увеличение в 4,4 раза содержания фазы TiC с одновременным сокращением в 4,8 раза содержания оксидных включений при увеличении энергии единичного импульса  $E$  с 0,06 до 0,4 Дж.

Несмотря на отрицательный привес, исследование микроструктуры показало, что при применении СВС-электродных материалов систем TiC-NiAl, TiB<sub>2</sub>-TiAl и TiB<sub>2</sub>-NiAl на всех режимах на поверхности катода формируются сплошные покрытия. Очевидно, что потеря массы катода свидетельствует о том, что в условиях эрозионного разрушения материалов анода и катода под действием искрового разряда может происходить взаимодействие углерода цементита чугуна с межэлектродной средой и часть его может сгорать в виде СО и СО<sub>2</sub>. Данное предположение косвенно подтверждается при исследовании микроструктуры электроискровых покрытий на основе СВС-электрода системы TiC-NiAl (рисунок 3), исходя из которого предложен следующий механизм их формирования: структура слоев, полученных при удельном времени обработки до  $\tau=3$  мин/см<sup>2</sup>, имеет значительное количество (от 10% объема) глобулярных дефектов, равномерно распределенных по толщине, которые из-за высокого содержания железа не могут являться только результатом хрупкого разрушения анода (рисунок 3а). При времени 3-5 мин/см<sup>2</sup> наблюдается уплотнение покрытия и исчезновение большей части дефектов (рисунок 3б), что объясняется прекращением фазы интенсивного газовыделения при истощении зоны термического влияния по углероду. При  $\tau=5$  мин/см<sup>2</sup> и более - толщина покрытия монотонно

увеличивается вплоть до достижения порога хрупкого разрушения, структура не изменяется. О том же свидетельствует увеличение глубины зоны термического влияния на катоде в 1,3-1,6 раза при увеличении энергии импульсов с 0,4 до 0,8 Дж.

Согласно данным Химухина С.Н., аналогичное явление наблюдается при электроискровой обработке катода из титанового сплава анодом из белого синтетического чугуна, где обезуглероживание покрытий вызывает интенсивное выделение газов – оксидов углерода при взаимодействии с межэлектродной средой, приводящее к образованию глобулярных дефектов структуры.

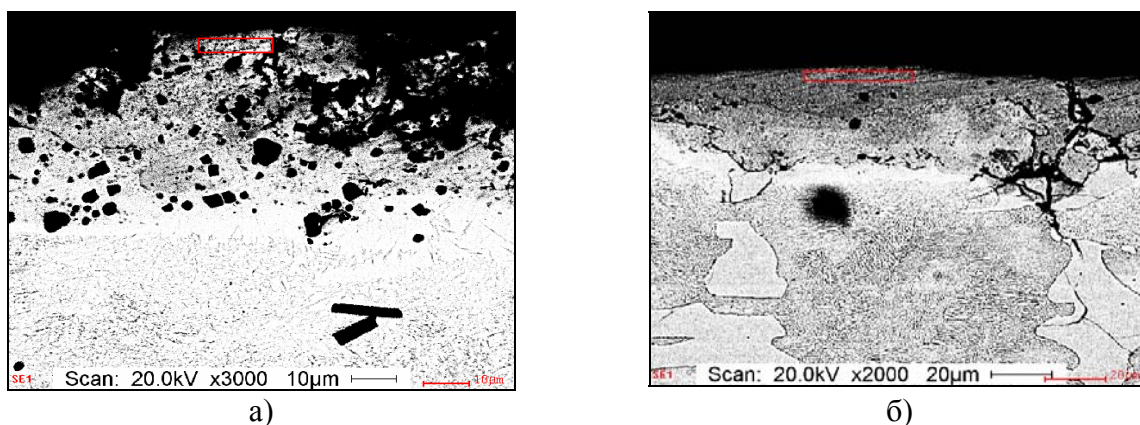
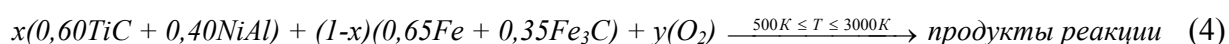


Рисунок 3. Микроструктура электроискровых покрытий системы TiC-NiAl, E=0,4 Дж, а -  $\tau=3$  мин/см<sup>2</sup>; б -  $\tau=5$  мин/см<sup>2</sup>

Термодинамическое моделирование микрометаллургических процессов по схеме (4) в программном комплексе Thermo-Calc показывает, что при ЭИЛ-обработке большая часть химических превращений происходит при температуре выше 1500К, при которой наиболее термодинамически выгодно образование СО.



Анализ поперечного шлифа образца покрытия на основе СТИМ-40НА ( $\tau=1,5$  мин/см<sup>2</sup>, E=0,8 Дж) с использованием рентгеноспектрального WDS-LEXS анализа (рисунок 4) показал, что, по содержанию углерода поверхностный слой образца можно разделить на три зоны. Верхний слой толщиной до 15 мкм представляет собой достаточно неоднородную структуру с крупными дефектами глобулярной формы диаметром от 1 до 5 мкм. Следующий слой – зона термического влияния, на глубине 15-28 мкм представляет собой однородный по структуре, светлый не травящийся участок, имеющий четкую границу с поверхностным слоем. Ниже 28 мкм расположены слои с характерной для материала подложки структурой белого чугуна (ледебурит). Качественный анализ распределения углерода показал, что содержание углерода во втором слое на 40-50% ниже, чем в третьем (основе).

Послойный элементный анализ на спектрометре с тлеющим разрядом электроискрового покрытия на основе электродного материала системы TiC-TiAl показал аналогичный результат, что однозначно свидетельствует о выгорании углерода из зоны термического влияния на катоде при электроискровой обработке белого чугуна СВС-электродными материалами.

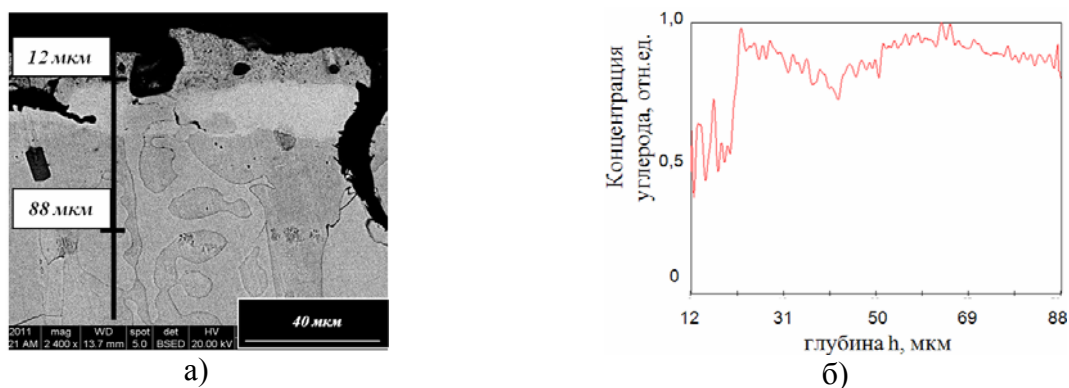


Рисунок 4. Покрытие TiC-NiAl: а - общий вид и б – распределение углерода по глубине

Аналитическая оценка глубины зоны термического влияния на катоде, проведена с использованием экспериментальных данных о коэффициенте массопереноса, полученных в работе Кудряшова А.Е. при упрочнении анодом СТИМ-40НА стали Р6М5. С учетом 2-х кратного обезуглероживания зоны термического влияния её расчетная глубина в 10-12 раз превышает реально наблюдаемую в эксперименте. Эти результаты говорят о том, что при ЭИЛ с использованием электродного материала СТИМ-40НА при  $E=0,06-0,8$  Дж кроме обезуглероживания может происходить частичное сгорание или испарение других компонентов материала катода.

По результатам поэлементного картирования показано, что титан практически не диффундирует в основу, а железо из основы активно диффундирует в покрытие, что можно объяснить тем, что карбид титана более тугоплавкое соединение и кристаллизуется раньше, чем железо. Характер распределения основных элементов по толщине покрытия СТИМ-40НА, полученный микрорентгеноспектральным энергодисперсионным анализом, представлен на рисунке 5.

Трибологические испытания образцов, упрочненных с использованием электродных материалов СТИМ-9/20А, СТИМ-40НА и СТИМ-11 при  $E=0,4$  Дж показали, что электроискровая обработка повышает коэффициент трения ( $f=0,67$ ) по сравнению с необработанной поверхностью ( $f=0,49$ ). Сопоставление профилей дорожек износа образцов с покрытием и образца без покрытия показали следующее увеличение стойкости: для СТИМ-40НА – в 1,7 раза; для СТИМ-9/20А – в 2,5 раза; для СТИМ-11 – в 1,8 раза; для СТИМ-20НМ – в 1,6 раз; для Т15К6 – в 1,5 раз.



Комплексный анализ проведенных исследований позволил рекомендовать для упрочнения прокатных валков электродные материалы СТИМ-40НА, СТИМ-9/20А, СТИМ-11. Учитывая, что при увеличении энергии единичного импульса и времени обработки увеличивается толщина покрытий, и то, что наименьшие значения шероховатости на высокоэнергетических режимах показывают покрытия на основе СТИМ-40НА, применение данного материала для обработки прокатных валков наиболее целесообразно.

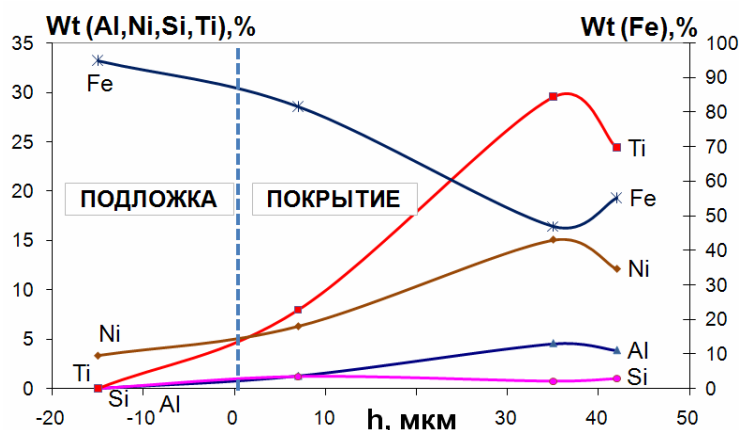


Рисунок 5. Распределение элементов по толщине покрытия при  $\tau=5$  мин/см<sup>2</sup>

**В четвертой главе** представлены результаты опытно-промышленных испытаний разработанной технологии и многоэлектродной оснастки при ЭИЛ-упрочнении валков из белого чугуна сортопрокатного стана 350 ОАО «ОЭМК».

Для исследования возможности применения разработанной технологии были проведены производственные испытания валков чистовой клетки № 24В среднесортно-мелкосортного стана 350 на ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (ОАО «ОЭМК») прошедших электроискровое упрочнение с использованием СВС-электродного материала СТИМ-40НА. Валки были калиброваны для производства профиля круг 23 мм.

Одна из проблем обеспечения качества покрытий заключается в том, что прокатный валок представляет собой цилиндрический вал переменного сечения, имеющий кольцевые выступы и углубления на поверхности бочки, формирующие калибр. В связи с тем, что неотъемлемой частью технологии электроискрового легирования является механическое воздействие расходуемого электрода на обрабатываемый участок катода, для обеспечения равномерности свойств покрытий необходимо обеспечить равномерность механического и электрического воздействия электрода. Данное требование может быть обеспечено за счет применения схемы ориентации продольной оси электрода перпендикулярно касательной к периметру обрабатываемой поверхности. Тогда позиционирование технологической оснастки для обработки тел вращения со сложной геометрией боковой образующей может

быть осуществлено за счет регулировки продольной  $x_i$  и поперечной  $y_i$  подач токарного станка, а также угла наклона электрода к оси симметрии обрабатываемого ручья  $\gamma_i$ .

Для интенсификации процесса нанесения электроискровых покрытий на поверхность калибра предложена принципиально новая многоэлектродная технологическая оснастка модульного типа, позволяющая значительно сократить время обработки за счет увеличения количества одновременно работающих электродов (рисунок 6).

Рабочие электроды независимо друг от друга подвешены в двухэлектродных кассетах, что позволяет значительно сократить габариты исполнительных механизмов оснастки. Для обеспечения механического воздействия в условиях независимой подвески электродов была применена схема с индивидуальным инерционным электромагнитным вибратором, схема исполнения кассеты (рисунок 7а) и внешний вид экспериментального образца (рисунок 7б) представлены ниже.

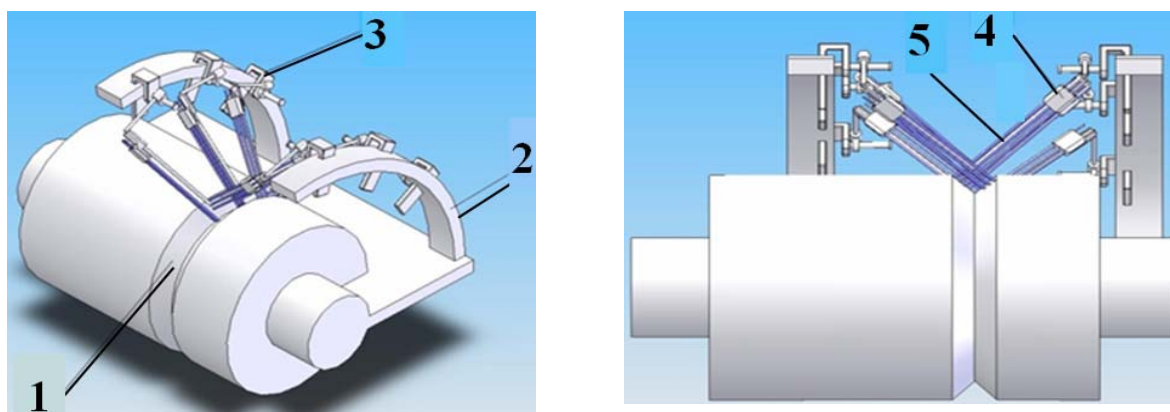


Рисунок 6. Схема механической многоэлектродной оснастки.

1 – ручей валка; 2 – суппорт оснастки; 3 – направляющая радиальная; 4 – многоэлектродная кассета; 5 – электрод

Опытно-промышленные испытания разработанной четырехэлектродной модульной технологической оснастки показали, что применение такой схемы позволяет снизить время электроискровой обработки пропорционально количеству одновременно работающих электродов без снижения качества получаемых покрытий.

По результатам испытаний показано, что стойкость упрочненного с применением материала СТИМ-40НА (TiC-NiAl) калибра чистовой клетки стана 350 ОАО «ОЭМК», согласно формуле (1) составила: минимальная стойкость покрытия, полученного с удельным временем обработки  $\tau=3$  мин/см<sup>2</sup> -  $\eta_{\min}=0,404$  мкм/т; максимальная стойкость покрытия, полученного с удельным временем обработки  $\tau=5$  мин/см<sup>2</sup> -  $\eta_{\max}=0,2135$  мкм/т. Принимая допустимый износ калибра равным половине поля допуска на прокат по ГОСТ 2590, базовая стойкость поверхности валка из отбеленного чугуна  $\eta_{\text{валка.ст}}=0,6429$  мкм/т. Стойкость

материала валка в ходе испытаний составила  $\eta_{\text{валка}}=0,883$  мкм/т. Следует отметить, что подробные исследования динамики износа показали, что стойкость зоны термического влияния заметно ниже стандартной стойкости материала валка. Таким образом, повышение стойкости поверхности калибра за счет применения электроискровой обработки с использованием материала СТИМ-40НА (TiC-NiAl) может достигать 3,0 - 4,1 раза.



Рисунок 7. Двухэлектродная кассета многоэлектродной оснастки

а - схема подвески электродов в кассете, б) – внешний вид экспериментального образца.

1 – электрод; 2 – электрододержатель; 3 – втулка направляющая; 4 – элементы кассеты; 5 – крепеж; 6 – вибратор

Для контроля толщины покрытий, были проведены исследования по возможности оценки толщины полученных электроискровых покрытий за счет регистрации изменения магнитных характеристик поверхности. Важно отметить резкий скачок показателя  $/H_i/$  на первом этапе обработки с 50 А/м при  $\tau=0$  мин/см<sup>2</sup>, до 75 А/м при  $\tau=2$  мин/см<sup>2</sup>, который характеризует высокую чувствительность предложенного метода к изменению магнитной проницаемости поверхностного слоя, полученного электроискровой обработкой. По результатам микроскопического исследования была построена кривая увеличения толщины электроискровых покрытий в зависимости от удельного времени нанесения  $t$  мин/см<sup>2</sup>. Изменение напряженности магнитного поля на поверхности образца с покрытием  $/H_i/$  удовлетворительно согласуется с характером изменения толщины покрытия при  $\tau=0-3$  мин/см<sup>2</sup> и  $\tau=7-9$  мин/см<sup>2</sup>. Учитывая, что прибор ИНК-1М-4, с помощью которого осуществлялись замеры магнитных характеристик, является программируемым микропроцессорным устройством, результаты калибровочных замеров могут быть использованы без дополнительной математической обработки. Основной вклад в появление погрешностей измерений магнитным методом вносит его структурная чувствительность в условиях постоянно меняющейся структуры и свойств покрытий при электроискровом нанесении. Резкое увеличение отклика на начальном этапе обработки при  $\tau=0-2$  мин/см<sup>2</sup>,

которое достигает 25% может быть использовано для определения наличия покрытия без калибровки прибора для контроля толщины.

**В пятой главе** представлено технико-экономическое обоснование эффективности внедрения разработанной технологии электроискрового упрочнения прокатных валков из белого чугуна.

Расчет потребного количества валков произведен исходя из годового объема производства 1100 000 тонн проката в год. Для прокатки профиля круг 23 мм. В условиях применения технологии электроискрового упрочнения валков количество переточек возрастает с 5 до 11, а общая стойкость комплекта валков повыситься с 5856 т до 64416 т, что позволяет парк валков для данного профиля с 36 до 6 штук.

При этом для чистовой группы клетей уменьшение удельного расхода валков на тонну проката составило 0,0012 кг/т. Увеличение затрат на расточку и переточку валков в условиях стана 350 ОАО «ОЭМК» составило 288 250,6 руб./год.

Анализ стойкости калибров чистовой группы клетей для производства круглых профилей проката показал, что она уменьшается пропорционально диаметру прокатываемой заготовки. На рисунке 8 приведены зависимости стойкости поверхности калибра без покрытия и с покрытием от диаметра проката и прогнозируемая, на основании производственных испытаний, стойкость упрочненных калибров. С учетом выше приведенного расчета, и анализа стойкости поверхности калибра примем среднее сокращение парка валков чистовой группы в 4 раза со 128 до 32 штук.

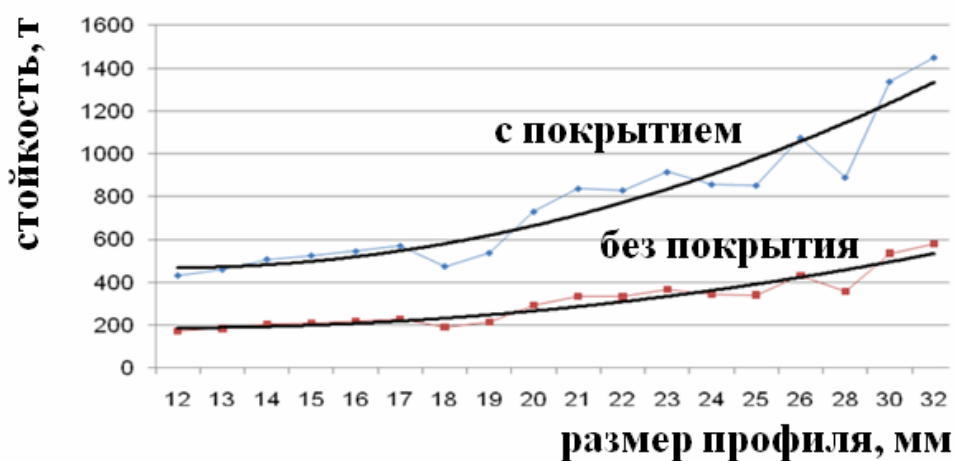


Рисунок 8. Зависимость стойкости поверхности калибра от профилиразмера

Принимая стоимость чугунного валка чистовой группы 112334,8 руб., полагая сокращение затрат на приобретение валков на 10784140,8 руб. в год (сокращение парка валков со 128 до 32 штук), и увеличение затрат на переточку и расточку валков на 288250,6 руб. в год, - годовая экономия от применения технологии составит 10 495 890,2 руб.

С учетом необходимости закупки 18 установок «Alier G53-Metal» для нанесения ЭИЛ покрытия на общую сумму 2 520 000 руб. и амортизационные отчисления 8% в год, - итоговый годовой экономический эффект от внедрения технологии составит 10 294 290,2 руб., а срок окупаемости капитальных затрат составит 35,3 месяца или 2,9 года.

### **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Установлено снижение массы катода и повышенная дефектность ЭИЛ покрытий на первых этапах электроискровой обработки белого чугуна на воздухе электродами марки СТИМ-40НА, СТИМ-9/20 и СТИМ-11, обусловленные обезуглероживанием зоны термического влияния и частичным выгоранием элементов подложки. Поэтому по зависимостям изменения массы подложки нельзя судить о приросте толщины наносимых покрытий.

2. Показано, что оптимальными режимами ЭИЛ обработки белых чугунов электродами марки СТИМ являются - энергия единичного импульса 0,4-0,8 Дж при частоте следования импульсов 300-400 Гц. Увеличение энергии приводит к росту шероховатости поверхности выше  $Ra = 7$  мкм.

3. Высокотемпературные трибологические исследования образцов из белого чугуна с ЭИЛ- покрытиями в паре с шариком из  $Al_2O_3$  при нагрузке 5 Н, скорости скольжения 10 см/с, температуре до  $700^{\circ}C$  показали повышение износостойкости в 1,7 раз при использовании электрода СТИМ-40НА, в 2,5 раза - СТИМ-9/20А и в 1,8 раза - СТИМ-11.

4. Предложен метод косвенного определения толщины электроискровых покрытий по изменению напряженности  $H_i$  собственного магнитного поля рассеяния, что позволило рекомендовать его для «in situ» контроля толщины покрытия в процессе работы прокатного стана.

5. Разработан и изготовлен многоэлектродный инструмент новой конструкции для механизированной обработки цилиндрических деталей, позволяющий производить самопозиционирование рабочих электродов относительно обрабатываемой поверхности, проведены его производственные испытания.

6. На основании опытно-промышленных испытаний в условиях стана 350 ОАО «ОЭМК» показано, что электроискровая обработка электродами марки СТИМ-40НА позволяет повысить стойкость поверхности калибра валков горячей прокатки стали 55С2А более 4 раз. Экономический расчет внедрения электроискровой технологии упрочнения прокатных валков из белого чугуна показал, что, с учетом сокращения парка валков в 4 раза и приобретения 18 установок «AlierG53-Metal», окупаемость капитальных затрат составит 2,9 года.

**Основные положения диссертации изложены в следующих работах:**

1. Доронин О.Н. Особенности электроискровой обработки белого чугуна электродными материалами марки СТИМ.// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012.- №3- с.58-64.
2. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Доронин О.Н., Крахт В.Б. О применении СВС-электродных материалов для электроискрового упрочнения валков стана горячей прокатки // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.- 2013.- №1- с.64-72.
3. А.Е. Кудряшов, О. Н. Доронин, Е. И. Замулаева, Е. А. Левашов, Н. В. Швындина Перспективы применения электродных СВС-материалов и технологии электроискрового легирования для упрочнения прокатных валков.// Черные металлы. – 2013.- № 10- с.61-68.
4. Доронин О.Н., Кудряшов А.Е., Крахт В.Б. О применении технологии электроискрового легирования для обработки прокатных валков из износостойкого (белого) чугуна при применении электродных материалов СТИМ (система Ti-C-Ni-Al)»// Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов № 2 (21)-2009. Основатель Донбасская государственная машиностроительная академия. Свидетельство про государственную регистрацию серия КВ № 13770-2744Р от 17.03.2008, ISBN 978-966-379-339-9, 2009г. – с. 391-396.
5. Доронин О.Н., Крахт В.Б. Апробация технологии электроискрового упрочнения валков стана горячей прокатки с применением электродных материалов марки СТИМ// Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 13-ой МНПК. Санкт-Петербург, 2011, Ч 2, - с.111-117.
6. Доронин О.Н. К вопросу контроля толщины тонких электроискровых покрытий// Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня. Материалы 14-ой МНПК. Санкт-Петербург, 2012, Ч 2, - с.116-122.
7. Доронин О.Н., Смирнов В.П., Боев А.И., Петруша А.А. Технологическая оснастка для электроискровой обработки поверхности калибров прокатных валков// Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 12-ой Международной научно-технической конференции, 04-08 июня 2012г., г.Ялта.-Киев: АТМ Украины, 2012.- с.92-94.
8. Кудряшов А.Е., Хартюк Д.А., Доронин О.Н., Левашов Е.А. Особенности формирования многофункциональных электроискровых покрытий с применением СВС-электродных

- материалов// Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 12-ой Международной научно-технической конференции, 04-08 июня 2012г., г. Ялта.-Киев: АТМ Украины, 2012.- с.156-159.
9. Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Доронин О.Н., Хартюк Д.А., Абсатаров С.Х. СВС-электродные материалы для упрочнения поверхности белого чугуна// Труды международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов» (НФМ 2012), 27-29 июня 2012, СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та.- с.429-435.
  10. Доронин О.Н. Особенности электроискровой обработки белого чугуна электродными материалами марки СТИМ.// Ф 94 Фундаментальные проблемы техники и технологии – Технология 2012. Сборник тезисов и аннотаций научных докладов XV международной научно-технической конференции/ под ред. А.В. Киричека и А.В. Морозовой/ Технологический институт им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК», г. Орел, 5-8 июня 2012. – Москва-Орел.: Издательский дом «Спектр», 2012.- с. 148-149.
  11. Доронин О.Н., Крахт В.Б. Оценка стойкости покрытия на поверхности прокатных валков, полученного электроискровым легированием с использованием электродных материалов СТИМ-Ж, в производственных условиях// Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов: материалы всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи (16-20 ноября 2009 года, БелГУ) – Белгород: Изд-во БелГУ 2009г.- с.231-233
  12. Доронин О.Н., Крахт В.Б. К вопросу определения кинетики процессов массопереноса при электроискровом легировании износостойкого чугуна// Сборник научных и научно-методических докладов международной научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов. – Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2009.- Т.1. – с.234-238
  13. Давтян Г.В., Крахт В.Б., Доронин О.Н. Кинетика массопереноса при упрочняющей обработке поверхности чугунных валков электроискровым легированием с использованием электродов марки СТИМ// Материалы третьей научно-технической конференции ОАО «ОЭМК» 25 марта 2010 года. – Старый Оскол 2010 год – с.179-182
  14. Анисимова М.И., Крахт В.Б., Доронин О.Н., Яковлев А.А. Предварительные результаты применения технологии ЭИЛ для повышения эксплуатационной стойкости деталей основного оборудования СПЦ-2 ОАО ОЭМК// Материалы третьей научно-технической конференции ОАО «ОЭМК» 25 марта 2010 года. – Старый Оскол 2010 год – с.173-176
  15. Анисимова М.И., Давтян Г.В., Крахт В.Б., Доронин О.Н. Исследование покрытия нанесенного методом ЭИЛ на валки стана 350 СПЦ-2 ОАО ОЭМК// Сборник научных

трудов шестой научно-практической конференции студентов и аспирантов (20-21 апреля 2010г.). Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2010-Т.2.- с.6-8

16. Анисимова М.И., Доронин О.Н., Яковлев А.А. Исследование причин возникновения трещин в переходном слое «металл-основа при ЭИЛ// Сборник научных трудов пятой научно-практической конференции студентов аспирантов и соискателей (9-10 апреля 2009 г.). Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2009-Т.1.- с.243-245
17. Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Доронин О.Н., Хартюк Д.А. Электроискровое упрочнение поверхности белого чугуна СПХН-60 твердосплавными СВС-электродными материалами // Современные металлические материалы и технологии (СММТ'2013):труды международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та. 2013 – с.89-91.
18. Know-How № 62-340-2013ОИС от 24.09.2013 г «Способ электроискровой наплавки двухслойных многофункциональных покрытий для повышения сроков службы прокатных валков из белого чугуна».



Формат 60х90  $\frac{1}{16}$ . Тираж 100 экз. Объем 1,5 п.л. Заказ 4019

Печать офсетная

Отпечатано с готовых оригинал-макетов в типографии

Издательского Дома МИСиС,

119049, Москва, Ленинский пр-т, 4

Тел. (499) 236-76-17, тел./факс (499) 236-76-35

