

На правах рукописи



ВУ ВАН ГЮИ

**ЦЕМЕНТАЦИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА
ГРАФИТОСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ СРЕД**

Специальность

05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «**Иркутский национальный исследовательский технический университет**» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: **Балановский Андрей Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Официальные оппоненты: **Коротков Владимир Александрович**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Нижнетагильский филиал Уральского федерального университета, г. Нижний Тагил

Лончаков Сергей Зиновьевич, к.т.н. доцент кафедры Материаловедения и технологии новых материалов, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования: **Новосибирский государственный технический университет**, г. Новосибирск

Защита состоится «25» июня 2018 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на официальном сайте организации по адресу www.knastu.ru

Автореферат разослан « » 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Евстигнеев Алексей
Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Повышение износостойкости деталей машин и инструментов с целью увеличения срока службы, снижения эксплуатационных затрат является важнейшей задачей современного машиностроения. Для решения этой задачи используют различные способы объёмной термообработки и химико-термической обработки деталей машин и инструментов.

Технологический процесс насыщения поверхностного слоя металла углеродом (цементация), являясь разновидностью химико-термических способов обработки, получил широкое распространение. Основными недостатком этого способа является длительность процесса, энергоёмкость, трудоёмкость, ограничение по габаритам изделия.

В последние годы появилась возможность применения новых источников нагрева – концентрированных источников (лазер, плазма, электронный луч) для упрочнения поверхности металлов и сплавов. Использование данных типов источников нагрева позволяет получить уникальную структуру и свойства поверхностного слоя, которые недостижимы для ранее известных способов термической обработки. В результате этого удается улучшить механические и другие важные для техники свойства материалов.

В работах Л.И. Миркина, Н.Н. Рыкалина, И.В. Зуева, А.А. Углова, М.А. Криштала, Л.А. Жукова, А.Н. Кокоры, В.С. Коваленко, В.С. Крапошина, А.Г. Григорьянца, А.Н. Сафонова, В.М. Андрияхина, В.С. Майорова, В.П. Якунина, Г.И. Бровера, О.В. Чудиной, А.Ф. Вайсмана, С.Б. Вассермана, М. Голковского, Л.И. Тушинского, В.А. Батаева, В.Г. Бурова, С.С. Самоутугина, Л.К. Лещинского, А.Е. Балановского, А.В. Короткова, В.Ю. Щицина и др. авторов показана возможность применения высококонцентрированных источников нагрева для поверхностной термообработки, а также насыщения поверхности углеродом и другими элементами.

Степень разработанности темы исследования. На основе анализа работ по лазерному и электронно-лучевому нагреву металлов установлено, что насыщение стали углеродом при использовании различных типов углеродосодержащих покрытий возможно только в жидкой фазе, т.е. процесс насыщения поверхностного слоя металла углеродом становится достаточно интенсивным при достижении температуры плавления. При этом цементация происходит по механизму диффузии в жидкой фазе и конвективного перемешивания фаз. Необходимо учитывать, что, после поверхностной цементации с использованием данных источников нагрева, как правило, высота наплавов на поверхности равна 100–1000 мкм и при последующей обработке поверхности значительная часть поверхностного слоя должна быть сошлифована.

В работах по плазменному поверхностному упрочнению используются два способа цементации: угольным электродом дугой обратной полярности или с нанесением покрытий (в виде паст, обмазок) на поверхность металла. Процесс цементации осуществляется с оплавлением поверхностного слоя на глубину 1,5–3 мм с образованием жидкометаллической ванны. В работах А.А. Скрипкина, В.П. Токмакова, А.В. Петухова были предприняты попытки цементации без

оплавления стали 20 с использованием углеродосодержащих покрытий в режиме плазменной струи. В результате проведенных работ авторы пришли к выводу о невозможности насыщения поверхностного слоя металла углеродом без оплавления. В дальнейшем эти авторы провели работы по газовой плазменной цементации стали 20 без оплавления в режиме плазменной струи с использованием смешанного состава плазмообразующего газа (аргон, углекислый газ, азот), и был сделан вывод о невозможности насыщения поверхности металла углеродом без образования жидкометаллической ванны.

Таким образом, вопрос о насыщении поверхности металла углеродом с использованием высококонцентрированных источников в твердой фазе (без оплавления поверхности) остается нерешенным, т.к. не исследованы другие плазмообразующие и насыщающие среды и режимы плазменного нагрева. В литературе остался не освещенным вопрос формирования цементированного слоя в процессе плазменного нагрева. Сказанное выше определяет актуальность постановки настоящих исследований.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является исследование процессов плазменно-инициированной диффузии углерода из графитсодержащих технологических сред для повышения износостойкости и поверхностной прочности конструкционных сталей.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Выбор и оптимизация состава углеродосодержащего покрытия для проведения поверхностной цементации с применением плазменной дуги;
2. Определение диаметра пятна нагрева при плазменной обработке и технологических параметров при плазменной цементации;
3. Проведение структурных исследований и химического анализа поверхностных слоев, полученных после плазменной цементации;
4. Проведение триботехнических исследований цементированных слоев при абразивном изнашивании. Проведение исследования теплостойкости цементированных слоев;
5. Разработка технологии плазменной поверхностной цементации деталей машин и инструментов.

Содержание диссертации соответствует областям исследований паспорта научной специальности 05.16.09 Материаловедение (по отраслям): п. 1 «Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий»; п. 4 «Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой»; п. 10 «Разработка покрытий различного назначения (упрочняющих, износостойких и других) и методов управления их качеством».

Научная новизна работы

1. Установлена возможность применения плазменного источника нагрева для цементации с получением различных агрегатных состояний поверхности

металла (без оплавления, микроплавление, с оплавлением) в зависимости от технологических параметров процесса.

2. Выявлены закономерности формирования структуры и свойств цементированных слоев в зависимости от температурно-временных режимов плазменного поверхностного нагрева низкоуглеродистых сталей. Показано, что при тепловой мощности в режиме плазменной струи от 1,1 до 1,3 кВт и длительности воздействия 0,2–0,35 с происходит насыщение поверхностного слоя углеродом без оплавления, а в качестве плазмообразующей и насыщающей среды используются смеси ароматических углеводородных соединений. Установлено, что в режиме плазменной дуги при мощности от 2,5 до 3 кВт и длительности воздействия 0,07–0,2 с с использованием углеродосодержащих покрытий (имеющих в составе графит, жидкое стекло и др.), цементация происходит с микроплавлением поверхности. При мощности свыше 3 кВт цементация осуществляется через жидкую фазу с образованием жидкометаллической ванны.

3. При формировании цементированного слоя в режиме микроплавления поверхности выявлена градиентность изменения структур и фаз в связи со снижением концентрации углерода по мере удаления от поверхности. Установлено, что основными структурными составляющими в цементруемых слоях являются высокоуглеродистый мартенсит, аустенит, ледебуритная эвтектика, цементит.

4. Определены закономерности формирования структуры цементированного слоя, включающей ледебуритную эвтектику, аустенит, мартенсит. Это позволяет путем оптимизации технологических параметров повышать в 1,5 раза износостойкость при абразивном изнашивании сталей 20, Ст3 по сравнению со сталями таких же марок, но цементруемых в печи. При испытаниях на теплоустойкость (выдержка в течение 2 ч при 600 °С), такой тип структуры цементированного слоя позволяет сохранить значения микротвердости поверхностного слоя в диапазоне 5000–7000 МПа.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1. Разработана методика определения диаметра пятна нагрева при плазменной обработке.

2. Разработаны технологические основы высокоскоростной плазменной цементации, обеспечивающей формирование науглероженных слоев толщиной от 20 мкм до 2 мм за время 0,07 до 0,35 с.

3. Результаты исследований прошли промышленные испытания:

– при изготовлении разделительного штампа из стали 20 вместо стали Х12Ф1 получен положительный результат при внедрении на АО «Иркутском релейном заводе» (г. Иркутск);

– при восстановлении наплавкой изношенной детали типа втулка, входящей в состав фрикционного гасителя колебания железнодорожной тележки типов КВЗ-5, КВЗ-ЦНИИ, ТВЗ-ЦНИИ-М пассажирских вагонов, с последующей плазменной цементацией.

4. Показана возможность повышения поверхностной твердости деталей машин и инструментов до 7000–11000 МПа, восстановленных наплавкой низкоуглеродистыми наплавочными материалами, при помощи последующей плазменной цементации.

5. Результат диссертационной работы используется в учебном процессе на кафедре «Машиностроительных технологий и материалов» Иркутского национального исследовательского технического университета при преподавании учебных курсов «Методы повышения износостойкости деталей машин»; «Упрочняющие и восстановительные технологии».

Методы исследования

При выполнении диссертационной работы применялись следующие методы исследования: металлографический, рентгено-флуоресцентный и опико-эмиссионный; испытание на износостойкость и теплостойкость; измерение микротвердости. Для определения скорости нагрева и охлаждения при плазменной цементации и оптимизации технологических параметров процесса нагрева использовались современные методы численного моделирования. Исследования проводились с применением современного аналитического и технологического оборудования, лабораторных установок и соответствующих методик проведения экспериментов, дающих достоверные результаты.

Достоверность результатов работы

Достоверность результатов исследования обеспечивается согласованностью и воспроизводимостью результатов, полученных с использованием различных методов, не противоречащим существующим научным представлениям. Все эксперименты проведены с необходимым количеством повторных испытаний с использованием статистических методов оценки погрешности измерения. Экспериментальные исследования сопровождались оценкой изменений фазового состава в поверхностном слое с использованием лицензионного программного пакета *SYSWELD* для математического моделирования. Структуру и фазовый состав материалов изучали с использованием взаимодополняющих методов. Полученные результаты анализировались и сравнивались с аналогичными результатами, полученными другими способами в исследованиях других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты влияния параметров плазменного нагрева на степень оплавления поверхности металла, глубину и ширину, структуру и свойства цементированного слоя;
- расчетно-экспериментальный метод определения истинного размера пятна нагрева плазменной дугой в процессе цементации, учитывающий закономерность радиального распределения температур и плотности теплового потока;
- результаты определения геометрических размеров пятна нагрева при плазменной поверхностной обработке с применением расчетно-экспериментального метода;
- результаты исследования структуры цементированного слоя, полученного при использовании плазменной струи и дуги;
- результаты экспериментальных исследований теплостойкости и износостойкости цементированного слоя, влияния фактора перекрытия на величину микротвердости.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертации были представлены на следующих научных мероприятиях: 1. V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Жизненный цикл конструкционных материалов

(от получения до утилизации)» (г. Иркутск, НИ ИрГТУ, 2014 г.). 2. VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск: НИ ИрГТУ, 2015 г.). 3. VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, НИ ИрГТУ, 2016 г.). 4. XI междунар. науч.-техн. конф. «Сварка и родственные технологии» (г. Екатеринбург, 2016 г.). 5. LI междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в науке» (г. Новосибирск, 2015 г.). 6. Первая междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в науке, производстве и образовании» (г. Калининград, 2015 г.). 7. Междунар. науч.-практ. конф. «Новые решения в области упрочняющих технологий: взгляд молодых специалистов» (г. Курск, 2016 г.). 8. Междунар. науч.-практ. конф. «ИнМаш 2017» (г. Новосибирск, 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано в журналах и в сборниках научных конференций 25 научных работ, из них 3 статьи входят в международную систему SCOPUS, 3 статьи в журналах, которые входят в базу данных Russian Science Citation index (RSCI), 4 статьи в журналах, которые входят в перечень ВАК; 15 докладов в сборниках трудов конференций.

Личный вклад состоял в формулировании задач исследования, подготовке исходных материалов, анализе составов и изготовлении углеродосодержащего покрытия, проведении математического моделирования, структурных исследований и испытаний на износостойкость, обобщении экспериментальных данных и сопоставлении их с известными литературными данными, формулировании выводов по результатам исследований, подготовке материалов для публикаций в открытой печати.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений. Содержит 185 стр. машинописного текста, 109 рисунков и 17 таблиц. Библиография включает 161 наименование.

Краткое содержание диссертации:

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследований, определена научная новизна работы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору методов цементации и постановке задач исследований. Проведенный литературный обзор показал, что цементация с использованием высококонцентрированных источников нагрева (электронный луч, лазер, плазменная струя) позволяет существенно сокращать длительность процесса вплоть до долей секунд. В работах зарубежных и российских авторов процесс цементации происходит только с оплавлением поверхности, т.е. с образованием жидкой металлической ванны. Используемые в данных работах углеродосодержащие обмазки не обеспечивают возможность применения для целей цементации плазменной дуги, которая получила широкое применение в промышленности (сварка, наплавка, закалка и т.д.). Плазменная дуга имеет более высокий коэффициент полезного действия (КПД), как источник нагрева в сравнении с плазменной струей. Высокий КПД плазменной дуги обеспечивает большое количество теплоты, которое может выделяться и повышать эффективность процесса теплопередачи. Проанализированы возможности плазменной

дуги и плазменной струи при нагреве металлов. Показано, что практически не исследован вопрос применения плазменной дуги для насыщения поверхности углеродом. Обозначены проблемы, связанные с формированием цементированных слоев, сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию оборудования и методов исследования. Изучение микроструктуры осуществлялось с помощью оптического микроскопа MET-2, электронного микроскопа JIB-4500, оснащенного анализатором EDS. Химический анализ определен с помощью анализаторов EDS и ARC-MET 8000. Для исследования изменения топографии поверхности после действия плазменной дуги применены контактный профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200 и оптический профилометр Bruker Contour GT-K1. Значения микротвердости измерены на приборе ПМТ-3М и Shimadzu HNV-2Т в соответствии с ГОСТ 9750-76. Фазовый анализ при исследовании структур проведен с помощью рентгеновского дифрактометра ShimadzuXRD-7000. Эксперименты на износостойкость проведены на основе ГОСТ 17367-71. В качестве источника плазмы использованы МУЛЬТИПЛАЗ 3500, Kempі PSS5000. Схема процесса плазменной обработки приведена на рис. 1.

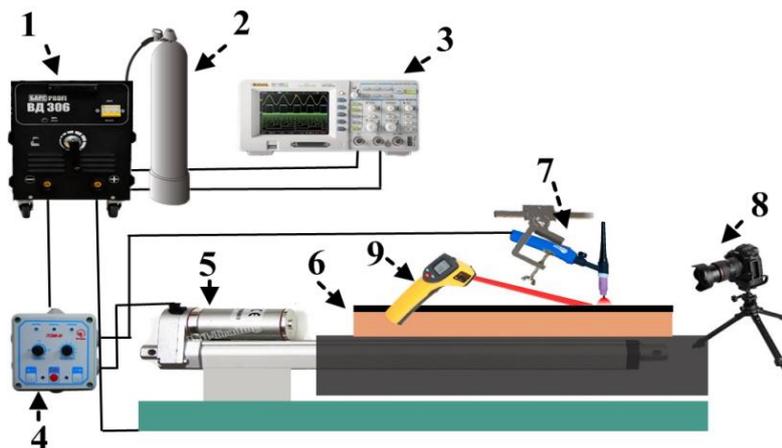


Рисунок 1 – Схема процесса плазменной обработки:

- 1 – источник питания; 2 – баллон с аргоном; 3 – осциллограф; 4 – блок управления; 5 – электрический двигатель; 6 – образец с покрытием; 7 – горелка; 8 – фотоаппарат; 9 – инфракрасный термометр

Сделано обоснование выбора состава углеродосодержащего покрытия (обмазки). Проведенный анализ работ показал, что главными компонентами обмазок являются: углеродосодержащие материалы (бондюжский карбюризатор, древесный уголь, полукокс), активаторы (NH_4Cl , HCl , BaCO_3 и др.) и связующие материалы (органические, органоминеральные и неорганические клеи – гидролизованный этилсиликат, лак, карбоксиметилцеллюлоза). У таких типов обмазок нет способности обеспечивать стабильное горение плазменной дуги между срезом сопла плазмотрона и поверхностью покрытия, поскольку низкая электропроводность и выгорание связующих материалов вызывают нестабильность привязки анодного пятна. Нами на основе проведенных экспериментов разработана графитовая обмазка, состоящая из графита, жидкого стекла, воды, СОЖ (смазочно-охлаждающие жидкости). Данный тип обмазки дает хорошее механическое сцепление с поверхностью и обеспечивает стабильность горения

плазменной дуги. Для проведения эксперимента по плазменной цементации использованы образцы сталей СтЗсп и 20.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию влияния энергетических параметров процесса плазменной цементации на формирование различных агрегатных состояний поверхностного слоя.

Раздел 3.1. Значения микротвердости цементированных слоев (МПа) в зависимости от расстояния от поверхности приведены на рис. 2. В ходе исследования, что использование плазмообразующего газа, состоящего из 40–42 % этилового спирта, 40–42 % бензола и 16–20 % воды, позволяет насыщать поверхность металла углеродом без оплавления (рис. 2, а). Глубина цементированного слоя зависит от длительности нагрева, которая регулируется скоростью перемещения плазмотрона. При снижении скорости обработки от 5 мм/с до 3 мм/с глубина цементированного слоя повышается с 17 мкм до 60 мкм. При использовании дополнительно нанесенного на поверхность металла углеродосодержащего покрытия на поверхности образуется тонкая жидкая пленка толщиной от 5 до 100 мкм, что существенно ускоряет процесс цементации. Косвенным подтверждением этого факта является большая глубина цементированного слоя. Данный режим, минимизирующий оплавление поверхности, называется микроплавлением. В наших экспериментах в режиме плазменной струи, максимальная глубина цементации составляет 90–100 мкм (рис. 2, б), а в режиме плазменной дуги – 170–200 мкм. При повышении мощности плазменной дуги или времени воздействия поверхность металла оплавляется с образованием большой жидкой металлической ванны. Цементация в режиме с оплавлением поверхности позволяет получать глубину цементации до 1–2 мм и более.

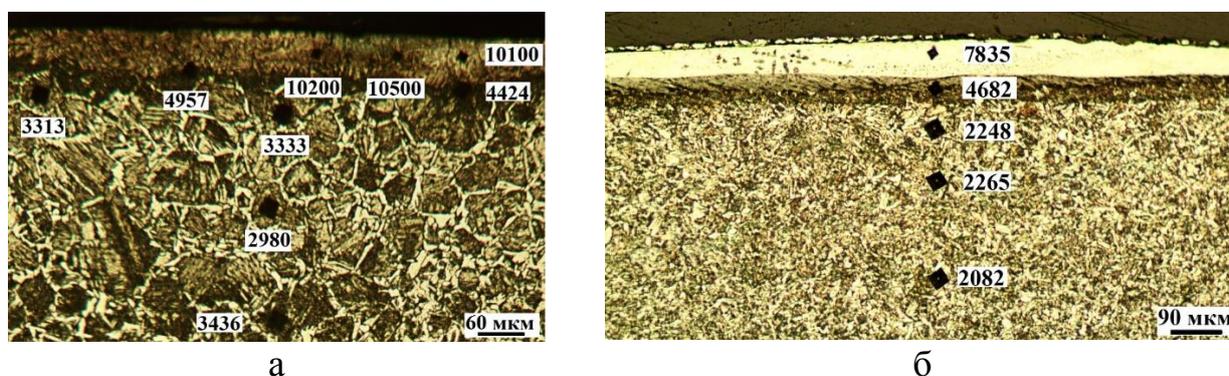


Рисунок 2 – Результаты плазменной цементации с применением плазмы из смеси ароматический углеводородных соединений:

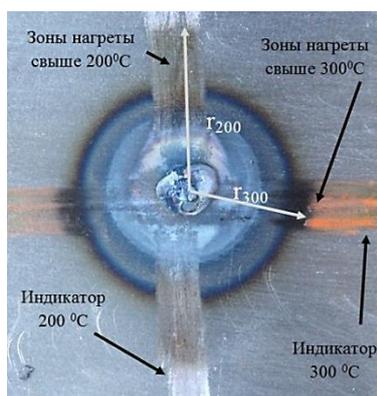
а – без оплавления; б – с микроплавлением

Раздел 3.2. Определение диаметра пятна нагрева. Локальная зона, через которую тепло от плазменной дуги вводится в металл изделия, называется пятном нагрева. Размер пятна нагрева существенно влияет на скорость нагрева и охлаждения металла. В настоящий момент отсутствует методика определения размера пятна нагрева применительно для случая плазменного поверхностного упрочнения. При решении уравнения теплопроводности, разработанного Н.Н. Рыкалиным для описания процесса распространения температуры на пластине от нормально-кругового источника, получили уравнение зависимости

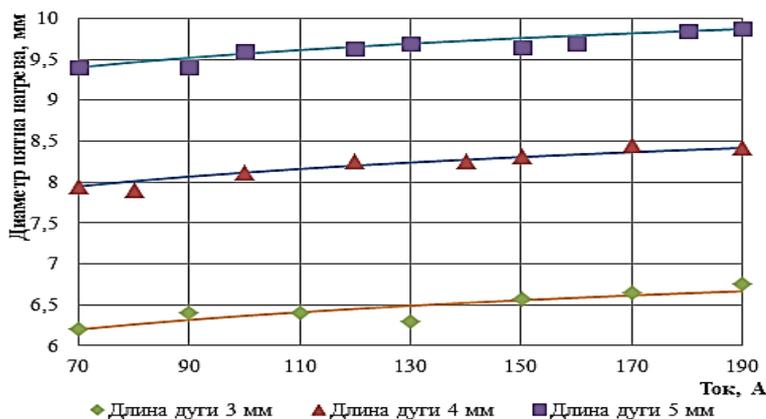
температуры от постоянного времени t_0 :

$$T(x, y, t) = \frac{q}{4\pi\lambda\delta} \left(Ei\left(-\frac{x^2 + y^2}{4at_0}\right) - Ei\left(-\frac{x^2 + y^2}{4a(t_0 + t)}\right) \right) \quad (1)$$

где q – мощности дуги, Вт; a – коэффициент температуропроводности, $\text{см}^3/\text{К}$; см^{-2} ; δ – толщина пластины, см; x, y – координаты произвольной точки А; λ – коэффициент теплопроводности $\text{Вт}/(\text{см} \cdot \text{К})$; t_0 – постоянное время. При использовании уравнения (1) проведены эксперименты для определения постоянного времени и диаметра пятна нагрева для плазменного нагрева. На рис. 3 показаны след от дуги на обратной стороне пластины при нагреве и диаметр пятна нагрева в зависимости от длины дуги и силы тока дуги.



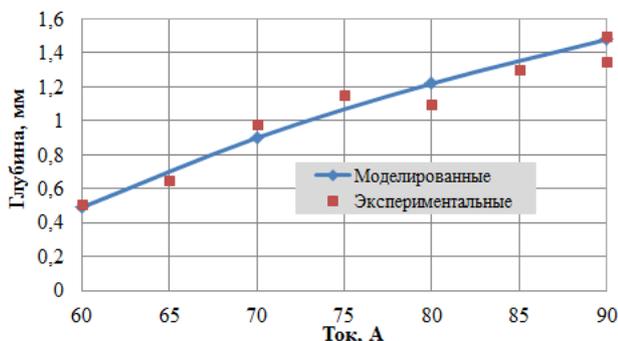
а



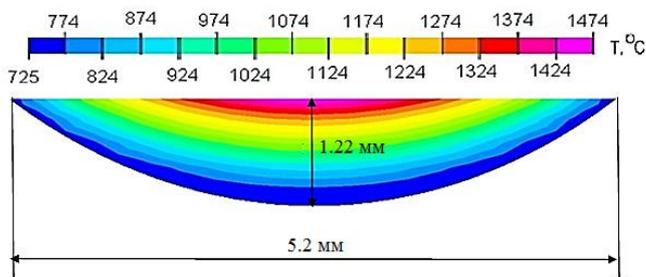
б

Рисунок 3 – Определение диаметра пятна нагрева при плазменной обработке: а – след от дуги; б – зависимость диаметра пятна нагрева от силы тока для разной длины дуги

В разделе 3.3 представлены результаты моделирования процесса плазменного поверхностного нагрева в программе Visual Environment 8.6 на основе использования полученного диаметра пятна нагрева (рис. 4). Использование результатов моделирования позволяет контролировать режим обработки при цементации (стадии микроплавления и оплавления), определять скорость нагрева и охлаждения при использовании плазменного нагрева.



а



б

Рисунок 4 – Результаты моделирования при плазменной обработке: а – зависимость глубины упрочения от силы тока; б – распределение температуры в поперечном сечении пятна нагрева ($I = 80\text{A}$)

В разделе 3.4 определены зависимости глубины цементации от силы тока плазменной дуги.

Режим микроплавления (рис. 5, а, б). Показано, что после обработки часть покрытия остается на поверхности, т.е. нагрев поверхностных слоев выполняется через графитовую обмазку. Каждое значение толщины покрытия δ (мм) соответствует определенному значению силы тока дуги, при котором поверхность металла не оплавляется (микроплавнение), при этом глубина цементации достигает максимального значения для данного режима. Зависимость глубины цементации от тока плазменной дуги приведена на рис. 5, в, г (покрытие с толщиной 0,25 мм). Данный режим формирования цементированных слоев характеризуется отношением толщины цементированного слоя к общей глубине упрочненного слоя $K = 0,1-0,13$.

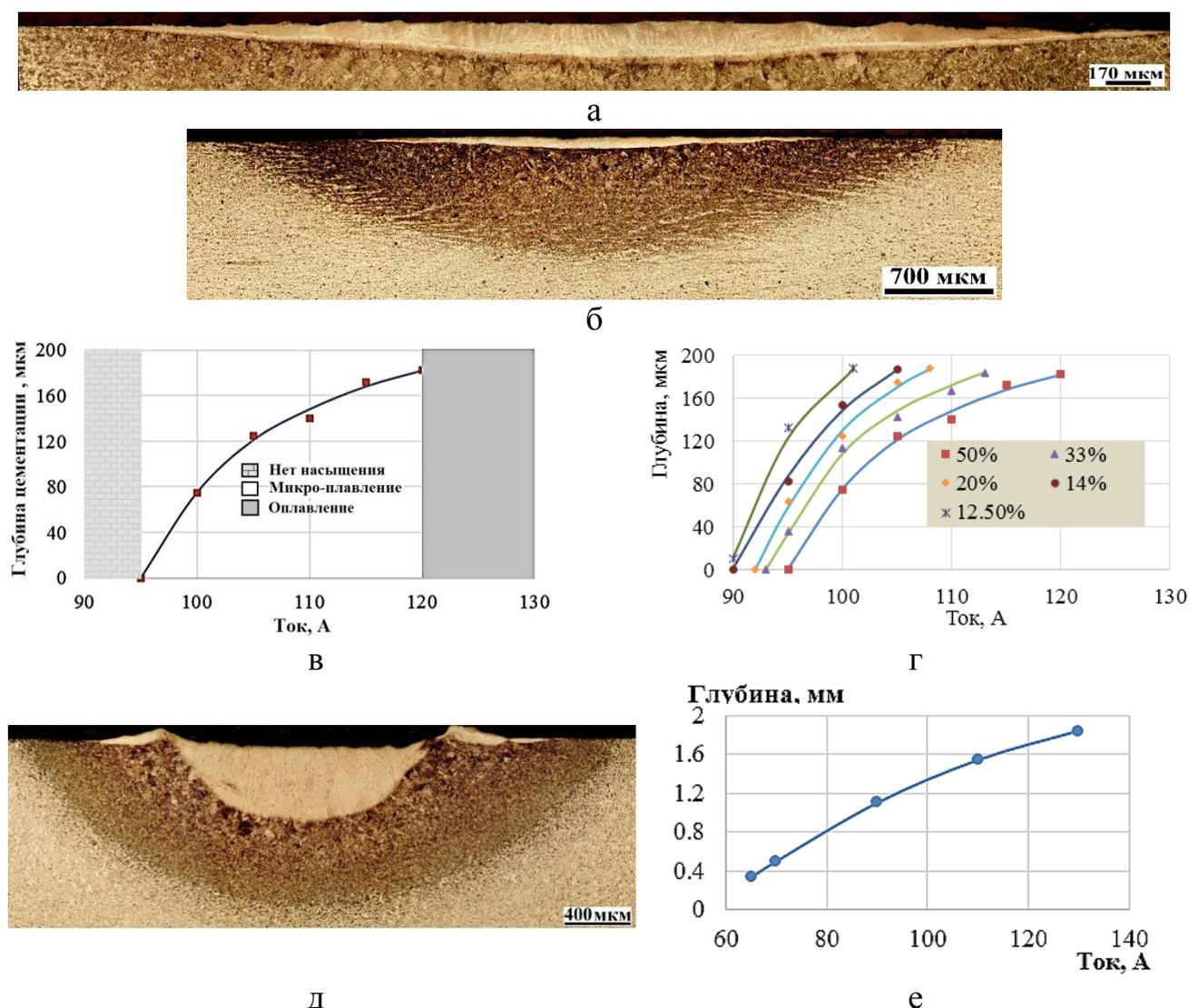


Рисунок 5 – Микроструктура и глубина цементированного слоя при различных режимах:

а, б – режим микроплавления; в – зависимость глубины цементации от силы тока при покрытии с содержанием 33 % графита; г – зависимость глубины цементации от силы тока при других содержаниях графита; д – режим оплавления; е – зависимость глубины упрочнения от силы тока при оплавлении

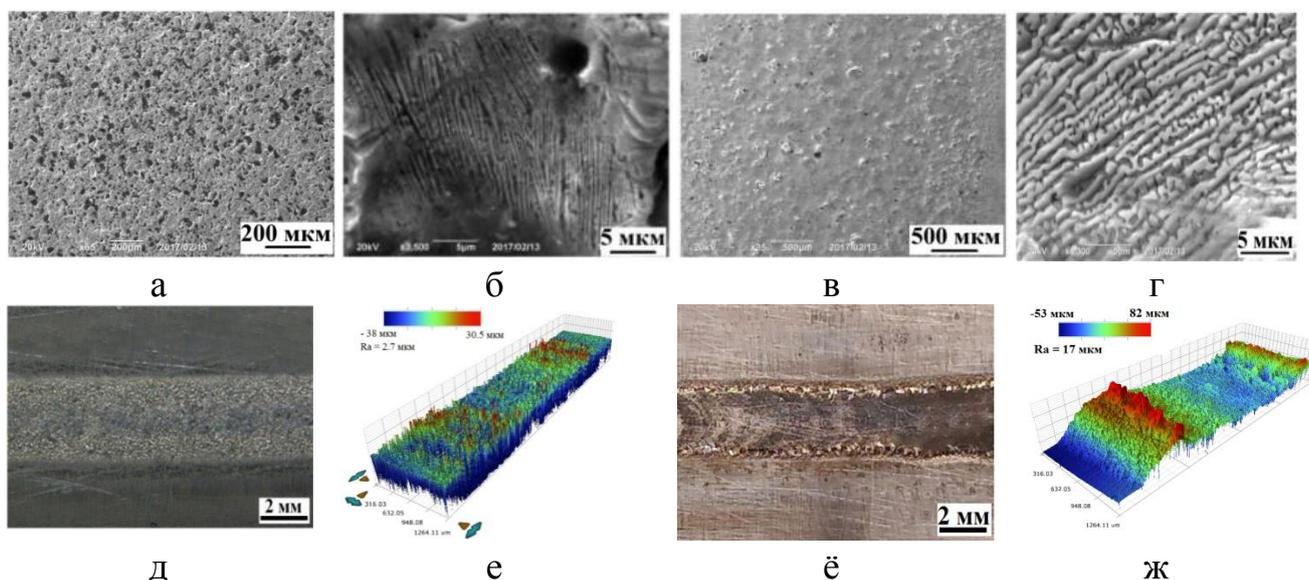
Режим оплавления (рис. 5, д). При повышении силы тока дуги или снижении скорости обработки процесс цементации происходит с образованием жидкой металлической ванны. При режиме оплавления отсутствует остаток покрытия на поверхности, оно полностью растворяется в жидкой ванне. На рис. 5, е показаны зависимости глубины зоны оплавления от силы тока при толщине покрытия $\delta = 0.25\text{ мм}$, $v = 5\text{ мм/с}$, $l_d = 3\text{ мм}$ (покрытие с содержанием 50% графита). Данный режим формирования цементированных слоев характеризуется отношением толщины цементированного слоя к общей глубине упрочненного слоя $K = 0,4-0,7$.

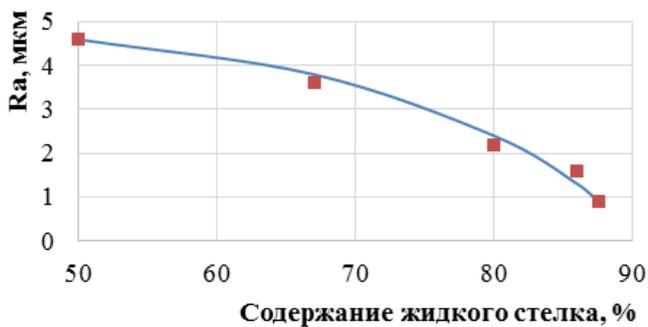
В четвертой главе приведены результаты исследования: описаны параметры поверхности после обработки, приведены результаты определения концентрации углерода в цементируемых слоях, представлены описания микроструктуры цементированного слоя.

Раздел 4.1 посвящен излучению параметров шероховатости поверхности после цементации.

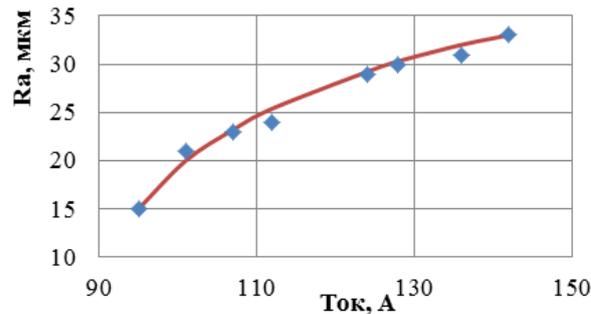
Режим микроплавления. На рис. 6, а–г показаны поверхности обработанного образца при различных составах покрытия. После обработки на поверхности образуются микрорельеф, имеющий впадины и выступы, где размещаются цементитные пластины и блоки (рис. 6, б, г). На рис. 6, д, е показана поверхность в 3D-изображении. Степень микронеровности упрочнённой дорожки снижается от центра к краям. Это соответствует распределению температуры катодного пятна нагрева дуги в процессе горения. В процессе плазменного нагрева в центре пятна нагрева температура максимальна, тогда процесс образования жидкой пленки (Fe_3C , SiO_2 и Na_2O) происходит более интенсивно. Жидкость смачивает и растекается по поверхности металла, при кристаллизации образуется гладкая однородная поверхность в середине упрочнённой поверхности, шероховатость данной зоны меньше, чем на границе. Степень микронеровностей снижается с увеличением количества жидкого стекла в покрытии. Шероховатость (R_a) поверхности находится в пределах $0,7-5\text{ мкм}$ (рис. 6, з).

Режим оплавления. Образование большой ванны расплавленного металла приводит к полному изменению топографии поверхности (рис. 6, ё, ж). При режиме оплавления шероховатость поверхности значительно повышается – $R_a > 10\text{ мкм}$.





3



и

Рисунок 6 – Поверхность стали после плазменной обработки с использованием покрытия, содержащего 33% графита (а, б), 14% графита (в, г); поверхность и 3D-изображение при микроплавлении (д, е), оплавлении (ё, ж); изменение Ra поверхности при микроплавлении (з), при оплавлении (и)

На рис. 6, и приведена зависимость Ra поверхности от силы тока при постоянной скорости и длине дуги (длина дуги $l_d = 3$ мм, скорость – 5 мм/с). С увеличением силы тока плазменной дуги объем жидкого металла увеличивается, давление плазменной дуги увеличивается, вызывая оттеснение жидкого металла на края ванны, формирование углубления в центральной части идет сильнее, значения Ra повышается.

Раздел 4.2 посвящен изучению концентрации углерода в цементированном слое рентгенофлуоресцентным (РФА) и оптико-эмиссионным искровым анализом.

Режим микроплавления. На рис. 7, а показаны изменения концентрации углерода в зависимости от содержания графита в покрытии. Концентрация углерода в цементированном слое достигает значения, соответствующего составу белого чугуна. С увеличением количества графита в покрытии до 50 % концентрация углерода достигает 3,83 %, при дальнейшем повышении графита прочность сцепления покрытия с поверхностью металла значительно снижается, что не позволяет качественно осуществить процесс цементации. При повышении количества жидкого стекла концентрация углерода в цементированном слое снижается до 0,8–1 %, что соответствует составу высокоуглеродистых сталей. На рис. 7, б, в показано распределение углерода по глубине (содержание графита в покрытии 33 %, $v = 5$ мм/с), углерод распределяется по глубине неравномерно. Можно выделить три зоны: 1 – зона с высокой концентрацией углерода (верхний слой); 2 – переходная зона, где концентрация значительно снижается по сравнению с зоной 1, но больше концентрации в основном металле; 3 – основной металл.

Режим оплавления. При режиме оплавления концентрация углерода в цементированной зоне находится в пределах 0,5–2 % (при толщине покрытия $\delta = 0,25$ мм, содержание графита в покрытии – 50 %) в зависимости от величины силы тока плазменной дуги. При данном режиме использовано покрытие с высоким содержанием графита 50%. Кроме зоны насыщения в жидком состоянии также наблюдается зона диффузии углерода в твердом состоянии металла. Толщина данной зоны не превышает 20–50 мкм. На рис. 7, г показаны зависимость глубины цементации, полученной твердости и концентрации углерода от силы тока дуги при $\delta = 0,25$ мм, $v = 5$ мм/с, $l_d = 3$ мм.

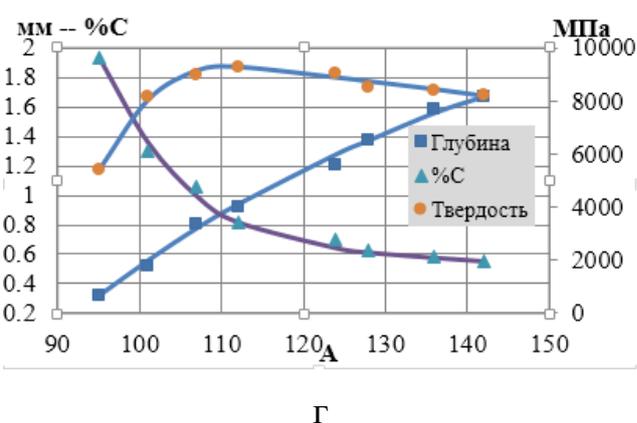
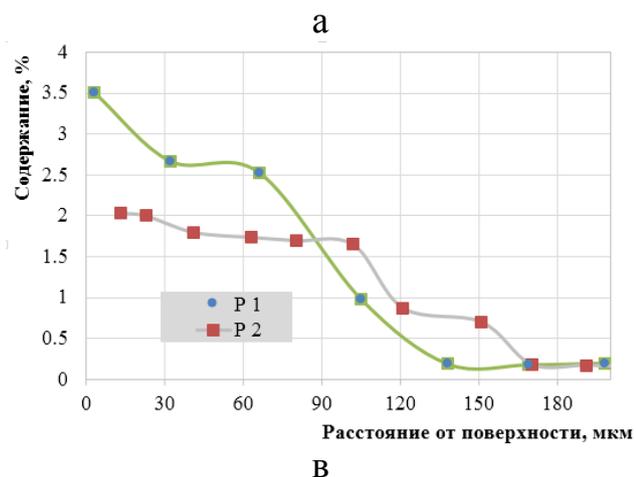
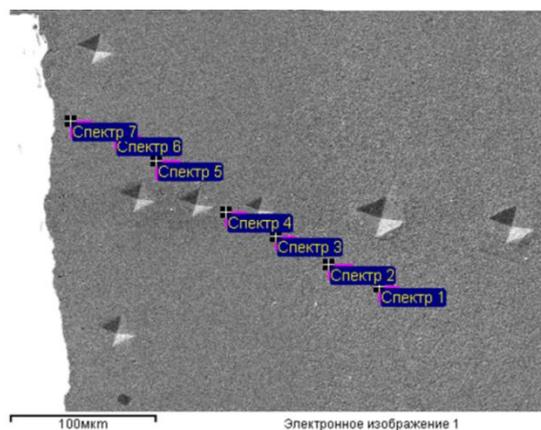
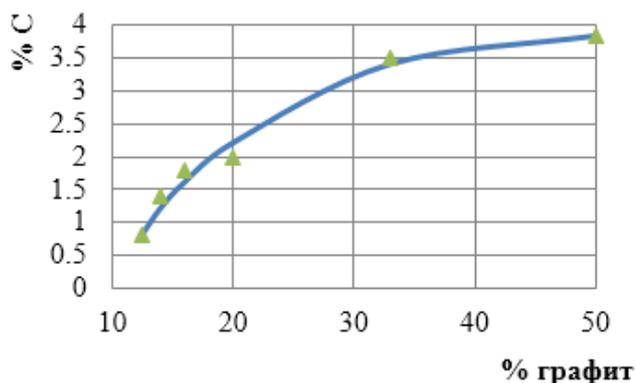


Рисунок 7 – Изменение концентрации углерода в цементированном слое: а – зависимость концентрации углерода от содержания графита в покрытии; б – спектр химического анализа; в – распределение углерода по глубине после цементации с покрытием, содержащим 33% графита (P1) и 20% графита (P2);

г – влияние силы тока на основные параметры при оплавлении

Раздел 4.3 посвящен изучению структуры цементированного слоя, полученного после плазменной цементации. Результат моделирования показал, что в режиме микроплавления при скорости обработки 5 мм/с, длине дуги 5 мм, скорость охлаждения равна 1300 °C/с, что выше критической скорости закалки для стали (%C ≥ 0,8 %). Установлено, что упроченный слой состоит из трех зон: 1 – цементированный слой (белый цвет, твердость до 11000 МПа); 2 – зона термического влияния (ЗТВ – темный цвет, твердость – до 4500 МПа); 3 – переходный слой к основному металлу (твердость до 2000 МПа) (рис. 5, а). При покрытии с содержанием 50 % графита после обработки ($v = 5$ мм/с, $l_d = 5$ мм) получается отбеленный слой, состоящий из двух слоев: 1 – эвтектическая пластинчатая структура (ледебуритная эвтектика – аустенит и цементит); 2 – остаточный аустенит и мартенсит. Концентрация углерода первого слоя достигает 3,83 % (рис. 7, а). Микроструктура показана более подробно на рис. 8, б. Эвтектическая структура имеет пластинчатое строение и состоит из очень тонкого пластинчатого цементита шириной 0,5 мкм и длиной 2–10 мкм. Этот тип структуры подобен микроструктуре, полученной после лазерного упрочнения чугуна, лазерной цементации или после закалки чугуна электрической дугой. За-

фиксировано образование волокнисто-пластинчатой эвтектики, состоящей из столбчатых твердых выделений цементита, остаточного аустенита, мартенсита. Отличие ледебуритной эвтектики, полученной в данной работе, в размерах пластин цементита, которые более тонкие и короткие, чем те, которые получены после закалки чугуна. Пластинки цементита растут в направлении, обратном направлению отвода тепла (рис. 8). Первый слой, формирующийся на поверхности, имеет высокую твердость 10000–11000 МПа, второй слой толщиной 10–15 мкм, твердость находится в пределах от 6000 – 8000 МПа.

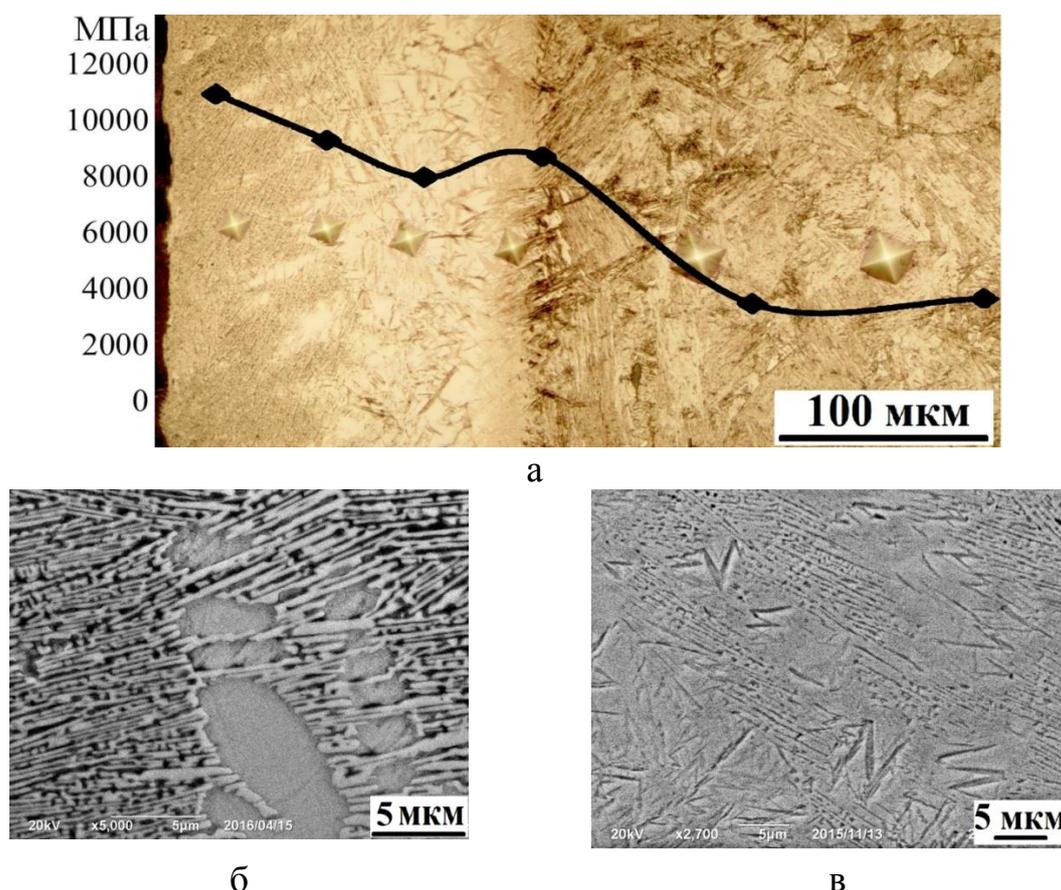


Рисунок 8 – Микроструктура цементированного слоя:

а – общий вид поверхностного цементированного слоя и распределение микротвердости по глубине; б – ледебуритная эвтектика; в – ледебуритная эвтектика, аустенит и мартенсит

При снижении концентрации графита до 33% при обработке ($I = 120\text{A}$, $v = 5\text{ мм/с}$, $l_d = 5\text{ мм}$) образуется отбеленный слой (рис. 8, а), состоящий из трех подслоев: 1 – содержит большое количество пластинчатого цементита, остаточный аустенит и мартенсит (рис. 8, в); 2 – остаточный аустенит, пластинчатый мартенсит и цементит; 3 – реечный и пластинчатый мартенсит. Ниже эвтектической структуры появляются остаточный аустенит и мартенсит пластинчатого типа. Дендриты аустенита вытянуты в направлении теплоотвода. Распределение микротвердости по глубине представлено на рис. 8, а. При данных режимах цементации частично наблюдается формирование первичного цементита, когда максимальная концентрация углерода цементированного слоя достигает 3,5%, что меньше состава эвтектики. Это объясняется тем, что при вы-

соких скоростях нагрева и охлаждения углерод не успевает распределиться равномерно по объему цементированного слоя, и в тех областях, где концентрация углерода больше 4 %, образуется первичный цементит с пластинами шириной 1,2–1,6 мкм и длиной больше 10 мкм.

Проведен послойный рентгеноструктурный анализ цементированных слоев (покрытие, содержащее 33 % графита) на рентгеновском дифрактометре ShimadzuXRD-7000. Как показано на рис. 9, на поверхности цементированного слоя присутствуют α -Fe, γ -Fe, FeC, Fe₂C, Fe₃C, Si и SiO₂ т. д. Содержание остаточного аустенита изменяется экстремально. Максимальное количество аустенита 55–65 % зафиксировано на глубине слоя 140–160 мкм (слой со структурой аустенита, мартенсита, цементита).

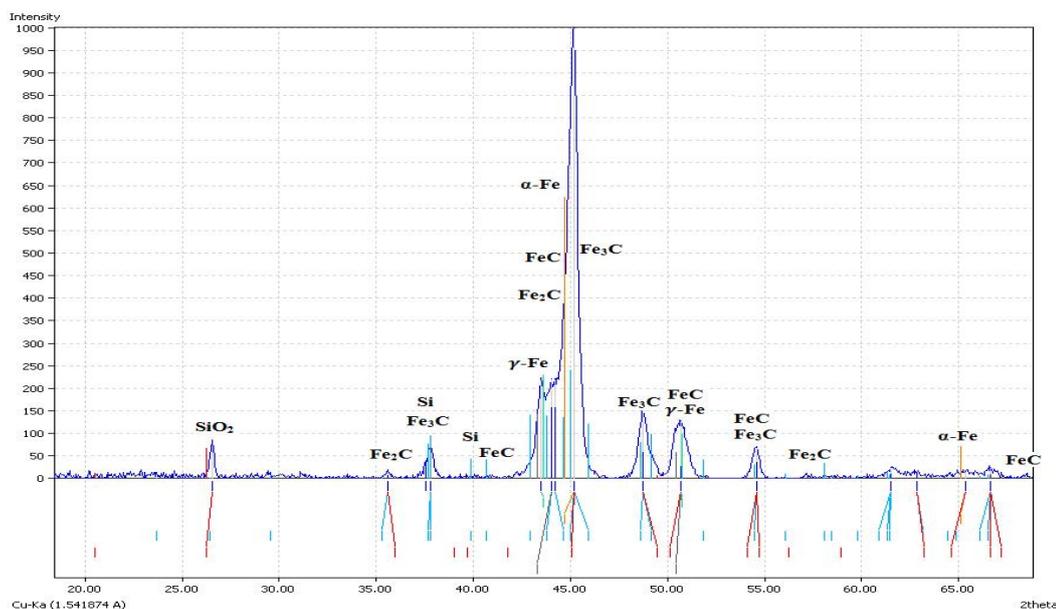


Рисунок 9 – Рентгенограмма на поверхности цементированного слоя стали 20

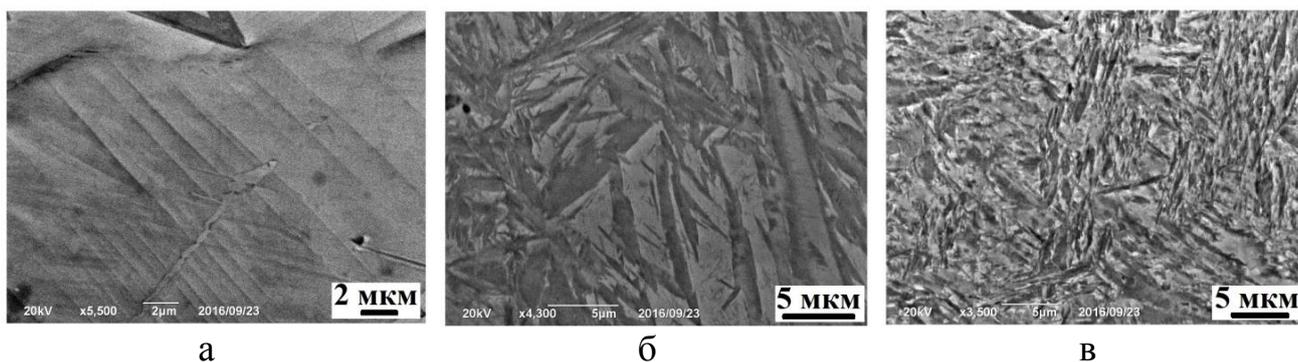


Рисунок 10 – Микроструктура цементруемого слоя после цементации с использованием покрытия, содержащего а – 20 % графита; б – 14 % графита; в – 12,5 % графита

При уменьшении количества графита в покрытии до 20 % образуется отбеленный слой, состоящий из двух слоев: остаточный аустенит и мартенсит (рис. 10, а). Первый слой не травится и имеет низкую микротвердость - 4000–5500 МПа, т.к. содержит большое количество остаточного аустенита. Это указывает на высокую концентрацию углерода в цементированном слое на этапе

нагрева, тогда температура начала мартенситного превращения снижается до отрицательных температур. На рис. 10, б показана микроструктура науглероженного слоя после обработки плазмой при содержании графита в покрытии 14 %. Микротвердость слоя составляет 5000–7500 МПа. При снижении концентрации графита до 12,5 % упроченный слой состоит из пластинчатого и реечного мартенсита с высокой твердостью 9000–11000 МПа (рис. 10, в).

При режиме оплавления поверхности образование жидкой ванны позволяет значительно увеличить глубину цементации. Микроструктура состоит из смеси остаточного аустенита и мартенсита. Главными факторами, влияющими на твердость стали, являются скорость охлаждения и концентрация углерода. В данном случае (при скорости обработки больше 5 мм/с) плазменная дуга обеспечивает высокую скорость нагрева и охлаждения, что необходимо для получения закаленной структуры, микротвердость которой зависит в основном от концентрации углерода, т.е. при постоянной толщине покрытия существенное влияние оказывает объем расплавленного металла. В качестве практической рекомендации для такого режима формирования цементированных слоев концентрация углерода в объеме жидкометаллической ванны должна находиться в пределах 0,7–0,9 %, при этом микротвердость цементированного слоя достигает максимального значения. На рис. 11 показаны микроструктуры пластинчатого мартенсита и остаточного аустенита в цементированном слое с содержанием углерода 1,2–1,5 %.

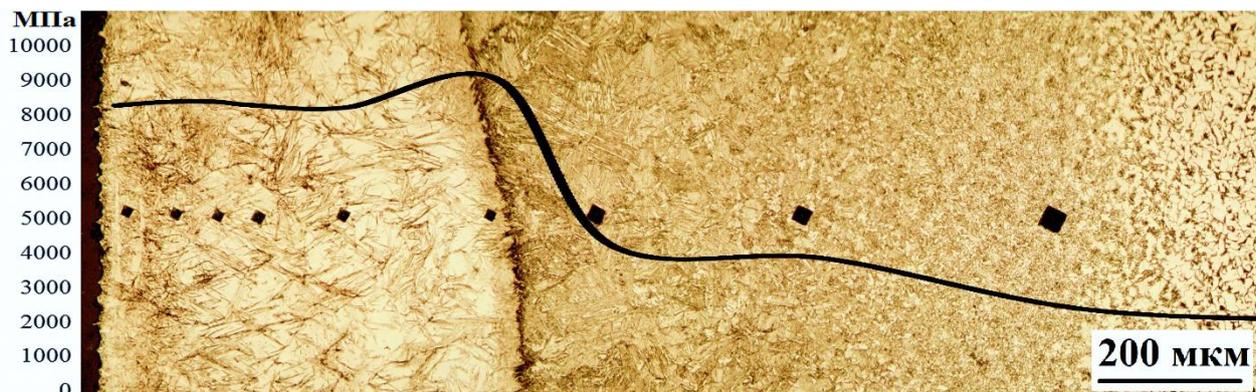


Рисунок 11 – Общий вид поверхностного цементированного слоя и распределение микротвердости по глубине, режим оплавления

Проведенный анализ экспериментальных данных позволил сформулировать несколько положений. На макроуровне цементированный слой состоит из двух зон, где **первая зона** со значительным пересыщением по углероду формируется за счет фронтальной диффузии углерода (структура слоя: ледебурит, аустенит, мартенсит). **Вторая зона** более протяженная, формирующаяся за счет интенсивной, или реакционной диффузии, в которой концентрация углерода постепенно приближается к исходной. Аустенит в цементированном слое имеет две морфологические разновидности. Первая морфологическая составляющая – это свободные зерна аустенита, образующиеся в зоне внутренней цементации. Вторая морфологическая составляющая – это прослойки и островки зерен аустенита различной формы и размеров, присутствующих в структуре мартенсита или, наоборот, разделенные расположенными кристаллами мартенсита (в зависимости от соотношения объемных долей аустенита и мартенсита). Цемен-

тит присутствует как в цементируемой зоне в виде крупных длинных пластин первичного цементита и тонких пластин, соединяющихся аустенитом (эвтектическая структура), так и в матрице аустенита.

Раздел 4.4. Теплостойкость цементированного слоя. В разделе рассмотрена способность работы цементированных деталей при повышенных температурах. Оценку теплостойкости проводили по изменению твердости металла после выдержки в печи в течение 2 ч при температурах 200, 400, 600 °С. На образцах для испытания были сформированы науглероженные слои, отличающиеся друг от друга различными типами микроструктур: ледебуритная эвтектика (цементит и аустенит) и пластинчатый мартенсит; речный мартенсит, аустенит и пластинчатый мартенсит. При выдержке в печи в результате диффузии углерода происходит распад мартенсита и образуются карбиды. Интенсивность данного процесса в основном зависит от температуры выдержки. При выдержке 200 °С микротвердость у всех образцов снижается незначительно, наблюдается потемнение мартенситных игл. При выдержке 400 °С процесс диффузии углерода идет более интенсивно, мартенсит превращается в феррит, а выделившийся из мартенсита углерод образует устойчивый карбид железа. Микротвердость образца с речным мартенситом снижается на 1000–1500 МПа. Микротвердость образца с аустенитно-мартенситной структурой повышается на 500–1000 МПа. У образца, в структуре которого большое количество цементита, твердость снижается на 2000–2500 МПа (до 8000–8500 МПа), визуально структура остается без изменения. При выдержке 600 °С микротвердость цементированного слоя со структурой мартенсит или, аустенит и мартенсит снижается до 3000 МПа, поскольку процесс распада этих структур завершился. Микротвердость цементированного слоя с большими количествами цементита снижается до 5000–7000 МПа. Таким образом, наличие большого количества карбидов (Fe_3C , Fe_2C , FeC) в цементированном слое позволяет значительно повысить теплостойкость упроченного слоя (вплоть до температуры 600 °С). Формирование цементированного слоя с наличием большого количества карбидов позволит существенно повысить работоспособность деталей машин и узлов при повышенных температурах.

Раздел 4.5 Влияние фактора перекрытия при обработке поверхности с большой площадью. Поскольку плазменная дуга имеет ограниченный размер пятна нагрева, то при обработке большей площади, чем пятно нагрева, необходимо использовать несколько проходов. Дорожки, сформированные предыдущими проходами, повторно нагреваются, и имеющийся в структуре мартенсит превращается в отпущенный мартенсит, имеющий меньшую твердость. Это особенность известна при поверхностной закалке концентрированными источниками нагрева. Для исследования влияния степени перекрытия на структуру поверхности при цементации были проведены эксперименты с двумя проходами при различных степенях перекрытия. Результат показал, что эффект снижения микротвердости не наблюдается у цементированного слоя с наличием большого количества цементита в верхних слоях. При перекрытии 25 и 50 % твердость поверхностного слоя со структурой ледебуритной эвтектики остается в пределах 8000–9000 МПа. У нижнего слоя с исходной структурой мартенсит и аустенит зафиксиро-

ровано присутствие троостита и сорбита, что характерно для отпуска, и это приводит к понижению микротвердости. При режиме оплавления поверхности эффект снижения микротвердости происходит более интенсивно. В зоне перекрытия твердость снижается от 7000–10000 до 4000–5500 МПа.

Раздел 4.6. Оценка износостойкости цементированного слоя при абразивном изнашивании. Для оценки способности цементированных слоев сопротивляться абразивному изнашиванию был проведено испытание цементированных образцов с использованием абразивных шкурок. Для сравнения использовали понятие относительной износостойкости ε , равной отношению потери массы эталонного образца к потере массы испытуемого образца. В качестве эталонного образца использован образец после цементации в печи со структурой речного мартенсита, твердость 6000–7000 МПа, глубина цементации – 800 мкм. Образцы, прошедшие плазменную поверхностную цементацию со структурой ледебуритная эвтектика, мартенсит и аустенит имеют более высокую износостойкость в начале процесса испытания ($\varepsilon \approx 1,5$), т.е. скорость изнашивания в 1,5 раза меньше по сравнению с эталонным образцом. При дальнейшем испытании относительная износостойкость снижается ($\varepsilon < 1$). Это объясняется тем, что при режиме микроплавления глубина цементации составляет 170–190 мкм. При испытании свыше 10 мин упроченный слой полностью истирается абразивом. Образцы, полученные после цементации в режиме оплавления со структурой речного мартенсита имеют износостойкость в 1,1–1,2 раза выше, чем у эталонного образца во всех случаях. Этот факт показывает важную роль глубины цементированного слоя.

В **пятой главе** представлены результаты промышленной реализации результатов проведенных исследований.

Раздел 5.1 Технология упрочнения штампов. Штамповый инструмент широко применяется в заготовительном производстве на АО «Иркутский релейный завод». Основными причинами выхода из строя штамповой оснастки являются: выкрашивание режущей кромки, смятие режущей кромки, износ по задней поверхности, объемное разрушение пуансонов. На АО «Иркутский релейный завод» используются разделительные штампы, изготавливаемые в составной конструкции из дорогостоящих легированных инструментальных сталей типа X12Ф1. Обойма матрицы изготавливается из стали У8, вставка матрицы из X12Ф1. В данной работе вместо использования для матрицы штампа обрубки и зачистки отверстий основания реле РЭС-48 дорогостоящих легированных инструментальных сталей предложено изготавливать матрицы из низкоуглеродистой стали 20 (рис. 12, а). Матрица, изготовленная цельной, подвергается плазменной цементации. Это позволяет снизить трудоёмкость изготовления матрицы и применять более дешёвые стали. Средняя стойкость штампа из дорогостоящих легированных инструментальных сталей составляет от 2000 до 6000 деталей до перезаточки. В результате испытаний штампа, прошедшего плазменное упрочнение, было изготовлено 5675 годных деталей основания реле РЭС-48 до выхода из строя пуансона. Таким образом, матрица, изготовленная из стали 20 и упрочнённая выше изложенным методом, позволяет существенно снизить себестоимость процесса изготовления деталей.

Раздел 5.2. Технология восстановления втулки шпинтона тележки.

Фрикционные втулки шпинтонов изготовлены из стали 45, ГОСТ 1050-88, закаленной до твердости 45 HRC. Изношенные втулки восстанавливают наплавкой проволокой Св-08Г2С диаметром 0,8 мм. Поверхностная твердость после наплавки составляет 10–15 HRC, что делает срок службы такой детали ниже нормативного. С целью устранения этого недостатка мы предлагаем насыщать поверхностный слой углеродом при помощи плазменной цементации. На рис. 12, б показаны образцы до и после восстановления.

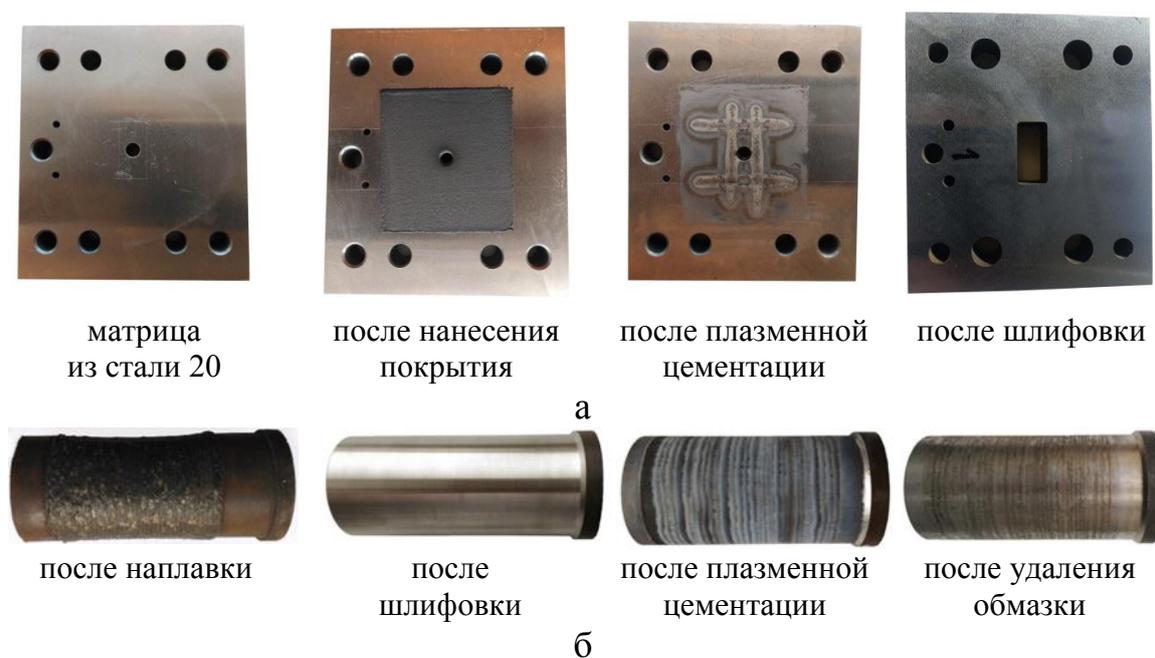


Рисунок 12 – Внешний вид деталей

а – матрица штампа обрубки и зачистки отверстий; б – втулка шпинтона

В настоящее время экспериментальная партия упрочнённых втулок шпинтонов после обработки плазменной поверхностной цементацией проходит испытание на подвижном составе пассажирского депо г. Иркутск.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Доказана принципиальная возможность высокоскоростного науглероживания поверхностных слоев заготовок из низкоуглеродистых сталей с использованием плазменного нагрева, исключая оплавление поверхности металла. Применение смеси этанола (40–42 %), бензола (40–42 %) и воды (16–20 %) в качестве плазмообразующего вещества позволяет насыщать поверхности стали углеродом без оплавления поверхности в течение нескольких долей секунд (0,2–0,3 с), глубина цементации достигает 60 мкм, микротвердость цементированного слоя составляет 7000–10000 МПа.

2. При использовании дополнительно нанесенного на поверхность металла углеродосодержащего покрытия, в режиме плазменного нагрева, минимизирующего оплавление поверхности (микроплавление), глубина цементиро-

ванного слоя достигает 170–190 мкм, шероховатость поверхности (Ra) в пределах 0,7–5 мкм. Концентрации углерода в цементируемом слое составляет 0,8–3,8 % и зависит от технологических параметров. Микроструктура сформированных слоев представлена следующими структурными составляющими: тонкая ледебуритная эвтектика; смесь ледебуритной эвтектики с аустенитом и мартенситом; мартенсит и остаточный аустенит; мартенсит. Микротвердость цементированного слоя составляет 5000–11000 МПа в зависимости от параметров процесса цементации. Это позволяет повышать износостойкость в 1,5 раза по сравнению с образцом, цементируемым в печи.

3. В режиме оплавления глубины цементации достигает 2 мм и более, шероховатость поверхности (Ra) в пределах 10–35 мкм. Концентрации углерода находится в пределах 0,5–2 %. Микроструктура цементированного слоя, состоящего из мартенсита и аустенита, микротвердость 5000–10000 МПа, повышает износостойкость в 1,1–1,2 раза по сравнению с образцами, цементируемыми в печи.

4. Разработанное графитовое покрытие, имеющее в составе порошок графита, жидкое стекло, СОЖ и воду, позволяет применить плазменную дугу в качестве источника нагрева для насыщения поверхности стали углеродом.

5. Разработана расчетно-экспериментальная методика, которая позволяет определить диаметр пятна нагрева при плазменной обработке. Длина плазменной дуги оказывает большое влияние на диаметр пятна нагрева – при ее увеличении от 3 до 5 мм диаметр пятна нагрева повышается 1,5 раза. Использование значений диаметра пятна, рассчитанных по предложенной методике, при моделировании процесса плазменного нагрева дает высокую согласованность с результатами экспериментов.

6. Смешанная структура цементированного слоя (состоящая из ледебуритной эвтектики, аустенита и мартенсита) позволяет сохранить микротвердость 5000–7000 МПа при выдержке 600 °С в течение 2 ч.

7. При обработке деталей большой площади степень перекрытия более 50% дает хороший результат с точки зрения равномерности распределения микротвердости цементированного слоя.

8. Разработана новая технология восстановления втулки шпинтона железнодорожной тележки. Предложено изготавливать матрицу штампа обрубки и зачистки отверстий основания реле РЭС-48 из стали 20 с последующей плазменной цементацией. Новая матрица внедряется в производстве на заводе АО «Иркутский релейный завод».

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в систему SCOPUS:

1. Balanovskii A.E., V.H. Vu. Plasma surface carburizing with graphite paste // Letters on materials. – 2017. – Vol. 7. – № 2. – pp. 175–179.
2. Balanovskii A E, Grechneva M V, Vu Van Huy, Zhuravlev D A. New plasma carburizing method // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. 092003.

3. Balanovskii A E, Grechneva M V, Vu Van Huy, Zhuravlev D A. Plasma surface modification in liquid environment // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. 092004.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Балановский А.Е., Ву Ван Гюи. К вопросу определения размера пятна нагрева при плазменной поверхностной обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 2 (146). С. 82–91.

2. Ву Ван Гюи, Балановский А.Е., Кондратьев В.В. О поверхностном модифицировании стальных литых заготовок при плазменно-дуговом переплаве // Металлургия машиностроения. 2017. № 1. С. 9–15.

3. Балановский А.Е., Ву Ван Гюи. Технологическое повышение качества поверхности деталей с плазменной цементацией // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 3(69). С. 16–24.

4. Балановский А.Е., Гречнева М.В., Ву Ван Гюи. Исследование структуры рельсовой стали после плазменного поверхностного упрочнения // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 11 (131). С. 23–32.

5. Балановский А.Е., Ву Ван Гюи. Насыщение поверхности металла углеродом при плазменной поверхностной обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 9 (153). С. 82–91.

6. Ву Ван Гюи, Балановский А.Е. Исследование износостойкости поверхности стали после плазменной цементации с использованием углеродосодержащей пасты // Вестник ИрГТУ. – 2017. – Т. 21. – № 4. – С. 10–21.

7. Ву Ван Гюи, Балановский А.Е. физические основы технологии плазменной поверхностной цементации деталей на примере втулки шпинтона пассажирского вагона // Вестник ИрГТУ. – 2017. – Т. 21. – № 3. – С. 10–22.

Статьи и материалы конференций:

1. Ву Ван Гюи. Формирование упроченного слоя с высокой твердостью в низкоуглеродистых сталях с помощью плазменной поверхностной цементации / Ву Ван Гюи, А. Е. Балановский // сб. мат. межд. научн-практ. конф. под ред. Х.М. Рахимянова. – Новосибирск, 2017. – С. 341–349.

2. Ву В. Г., Балановский А.Е. Пароводяная плазменная цементация в твердой фазе на установке MULTIPLAZ 3500 // Инновации в науке. 2015. № 51 . С. 95–102.

3. Ву Ван Гюи. Плазменная цементация углеродистых сталей с использованием паст в твердой фазе // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 205–211.

4. Ву В.Г. Распределение остаточных напряжений при плазменной закалке / Ву В.Г, Козлов В.А., Мухомедзянов С.И., Балановский А.Е // сб. мат. V всероссийской научн-практ. конф. с межд. участием: «Жизненный цикл конструкционных материалов - ЖЦКМ». – Иркутск, 2015. – С. 297–304.

5. Ву В.Г. Моделирование остаточных напряжений в стали после поверхностного упрочнения плазменной дугой / Ву В.Г, Козлов В.А., Мухомедзянов С.И., Балановский А.Е: сб. материалов V Всер. научн.-практ. конф. с межд. участием «ЖЦКМ». – Иркутск, 2015. – С. 324–331.

6. Ву В.Г. Исследование зависимости параметров упроченной дорожки от скорости перемещения при плазменной закалке в среде VISUAL-

ENVIRONMIENT 8.6 / Ву В.Г, Козлов В.А., Мухомедзянов С.И., Балановский А.Е: сб. мат. V Всер. научн.-практ. конф. с междунар. участием «ЖЦКМ». – Иркутск, 2015. – С. 338–344.

7. Ву В.Г. Насыщение поверхности деталей углеродом при использовании электрической плазменной дуги / Ву В.Г., Балановский А.Е., Прокопьев С.С.: сб. мат. VI Всероссийской научн.-практ. конф. с междунар. участием «ЖЦКМ». – Иркутск, 2016. – С. 169–176.

8. Балановский А.Е. К вопросу определения пятна нагрева при плазменной поверхностной обработки (Часть1) / Балановский А.Е., Ву В.Г: сб. мат. VI Всероссийской научн.-практ. конф. с междунар. участием «ЖЦКМ». – Иркутск, 2016. – С. 105–113.

9. Балановский А.Е. К вопросу определения пятна нагрева при плазменной поверхностной обработке (Часть2) / Балановский А.Е., Ву В.Г: сб. мат. VI Всероссийской научн.-практ. конф. с междунар. участием «ЖЦКМ». – Иркутск, 2016. – С. 113–122.

10. Гюи В.В. Рассуждения о погонной энергии при плазменной поверхностной обработке / Гюи В.В., Балановский А.Е: сб. мат. VII Всероссийской научн.-практ. конф. с междунар. участием «ЖЦКМ». – Иркутск, 2017. – С. 31–38.

11. Гюи В.В. Влияние скорости обработки и состава покрытия на глубину плазменной цементации / Гюи В.В., Балановский А.Е.: сб. мат. VII Всер. научн.-практ. конф. с междунар. участием «ЖЦКМ». – Иркутск, 2017. – С. 111–118.

12. Гюи В.В. Расчетный способ определения концентрации углерода в цементированной зоне при плазменной цементации / Гюи В.В., Балановский А.Е: сб. мат. VII Всероссийской научн.-практ. конф. с междунар. участием «ЖЦКМ». – Иркутск, 2017. – С. 123–132.

13. Ву В.Г. Новый метод насыщения поверхности углеродом в среде плазмы с использованием графитовой пасты / Ву В.Г: сб. материалов междунар. научн.-практ. конф. «Новые решения в области упрочняющих технологий: взгляд молодых специалистов». – Курск, 2016. – С. 224–232.

14. Ву Ван Гюи. Новый метод насыщения поверхности углеродом при плазменной обработке / Ву Ван Гюи, А. Е. Балановский, М. В. Гречнева: сб. материалов междунар. научн.-практ. конф. в рамках Форума «Сварка и диагностика». – Екатеринбург, 2016. – С. 212–221.

15. Ву Ван Гюи, Балановский А.Е. Определение плотности энергии при плазменной поверхностной обработке // Вестник стипендиатов ДААД. – 2017. – № 1. – С. 87-94.