

На правах рукописи



Лосинская Анна Андреевна

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ
ВНЕВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ
УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ**

Специальность: 05.16.09 – материаловедение (в машиностроении)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Батаев Владимир Андреевич

Официальные оппоненты: Хараев Юрий Петрович,
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»,
доцент кафедры «Технология машиностроения, металлообрабатывающие станки и комплексы»

Худорожкова Юлия Викторовна,
кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, руководитель отдела содействия научным исследованиям

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Защита состоится «26» декабря 2013 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 в Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Иванцовский В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Проблема повышения износостойкости металлических материалов конструкционного назначения, в первую очередь углеродистых сталей, является одной из наиболее актуальных для современного материаловедения. Обусловлено это тем, что большой объем деталей машин и элементов конструкций выходит из строя по причине их изнашивания. Одним из наиболее экономически эффективных решений данной проблемы является цементация. Изучению процессов науглероживания сталей посвящено большое количество работ. Экспериментально оптимизированы режимы цементации многих сталей в газовых и жидких средах, а также в твердых засыпках.

Нанесение защитных покрытий или модифицирование поверхностных слоев существенным образом сказывается на эксплуатационных свойствах изделий, изготовленных из сталей. Цементация низкоуглеродистых сталей позволяет значительно повысить их поверхностную твердость и стойкость в различных условиях изнашивания. Исследования, посвященные разработке и оптимизации технологических процессов модифицирования поверхностных слоев металлических материалов, являются перспективными и актуальными.

Анализ широко используемых в промышленности процессов цементации свидетельствует о том, что их основным недостатком является большая длительность. Обусловлено это тем, что углерод диффузионным путем должен быть перенесен из внешней среды на большую глубину в стальную заготовку. Вторая проблема заключается в том, что при реализации стандартных технологических процессов цементации сталей практически невозможно обрабатывать особо крупные изделия.

Эффективным решением отмеченной проблемы является применение технологии вневакуумного электронно-лучевого поверхностного легирования сталей. Оборудование для реализации данной технологии – промышленные ускорители электронов – разработано отечественными специалистами из Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. В сравнении с другими высокоэнергетическими методами поверхностного упрочнения предложенная обработка имеет ряд важных технологических и экономических преимуществ: высокая мощность (до 100 кВт) и КПД теплового источника, вывод пучка электронов воздушную атмосферу, высокая производительность процесса.

Специалистами Института ядерной физики СО РАН, Новосибирского государственного технического университета, Института физики прочности и материаловедения СО РАН и южнокорейскими специалистами проведен ряд исследований по поверхностному легированию металлов и сплавов с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки. Результаты этих работ свидетельствуют о высокой эффективности процессов электронно-лучевого легирования материалов с использованием пучков релятивистских электронов, выпущенных в воздушную атмосферу. В то же время возможности использования этого процесса для насыщения поверхностных слоев сталей углеродом практически не изучены. Решению данной проблемы посвящена представленная диссертационная работа.

Диссертационная работа выполнялась в рамках федерально-целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы».

Степень разработанности темы исследования

В настоящее время высокоэнергетические методы обработки широко используются в промышленности при реализации процессов резки, сварки, плавления материалов, а также при формировании на деталях поверхностно упрочненных слоев. Насыщение поверхностных слоев сталей углеродом осуществляют методами лазерной и плазменной наплавки, электроконтактной химико-термической обработки. Как правило, для наплавки используют углерод в форме графита. Исследования по вневакуумной электронно-лучевой наплавке углеродсодержащих порошковых смесей не выполнялись ни в российских, ни в зарубежных лабораториях. В работах, выполненных ранее, для легирования сталей и цветных сплавов с использованием пучков релятивистских электронов применяли порошковые смеси, содержащие хром, бор, кремний, титан, ванадий, ниобий, молибден, тантал.

Цель диссертационной работы заключается в повышении износостойкости сталей путем их поверхностного легирования углеродом с использованием метода вневакуумной электронно-лучевой наплавки.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Выбор рациональных технологических режимов вневакуумной электронно-лучевой наплавки углеродсодержащих порошковых материалов на стальную основу, обеспечивающих высокое качество поверхностно упрочненных слоев. Оптимизация состава порошковой смеси и концентрации в ней насыщающего элемента.

2. Проведение структурных исследований поверхностных слоев и переходных зон, полученных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки углеродсодержащих порошковых смесей на заготовки из низкоуглеродистой стали.

3. Исследование структуры наплавленных высокоуглеродистых слоев после проведения термической обработки (закалки и отпуска) с использованием ускорителя электронов.

4. Проведение триботехнических исследований высокоуглеродистых наплавленных слоев, а также слоев после наплавки с закалкой и отпуском (в условиях трения скольжения и при воздействии закрепленных и нежестко закрепленных частиц абразива). Анализ ударной вязкости низкоуглеродистой стали с наплавленными слоями.

Научная новизна

1. Выявлены закономерности формирования поверхностных слоев на низкоуглеродистой стали 20 с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых железо-графитовых смесей. Показано, что мощность теплового источника, зависящая от значения тока пучка электронов, определяет глубину упрочненного слоя, его структуру и механические свойства. При изменении тока пучка от 20 до 26 мА на стальных заготовках

сформированы высокоуглеродистые слои (1,57...2,55 % C) толщиной от 1,2 до 2,6 мм. Твердость наплавленного материала составляет 5,7...4,5 ГПа.

2. Экспериментально установлено, что при наплавке порошковой смеси по режиму со сканированием электронного пучка по поверхности стальных заготовок толщиной 10 мм скорость охлаждения материала поверхностного слоя меньше критической, что не позволяет получать структуру мартенсита. Основными структурными составляющими в наплавленных слоях являются ледебурит, вторичный цементит видманштеттова типа и перлит. На основании проведенных исследований с целью формирования структуры высокоуглеродистого мартенсита, обладающего высоким уровнем твердости и износостойкости, обосновано последовательное выполнение операций насыщения углеродом и закалки наплавленного слоя с использованием одного и того же ускорителя электронов. Микротвердость поверхностно закаленных и отпущенных слоев стали и чугуна, сформированных в процессе электронно-лучевой наплавки, достигает 7 и 8 ГПа.

3. Изучено влияние наплавленных слоев на триботехнические и механические свойства стали 20. В условиях воздействия закрепленных и нежестко закрепленных частиц абразива интенсивность изнашивания наплавленных и закаленных электронным пучком поверхностных слоев заэвтектидной стали (1,57 % C) и доэвтектического чугуна (2,19 % C) ниже, чем низкоуглеродистой стали, цементованной в твердом карбюризаторе с последующей закалкой и низким отпуском. При испытании по схеме трения скольжения наибольшей износостойкостью обладает слой наплавленного чугуна после электронно-лучевой закалки и отпуска.

4. Установлено, что закалка наплавленных слоев, имеющих структуру белого доэвтектического чугуна, сопровождается ростом внутренних напряжений. С целью предотвращения образования сетки трещин слои белого чугуна рекомендовано использовать без закалки.

5. Показано, что при электронно-лучевой закалке предварительно наплавленных высокоуглеродистых слоев, уменьшение мощности теплового источника приводит к измельчению аустенитного зерна и образующихся в нем мартенситных кристаллов за счет присутствия нерастворившихся пластин вторичного цементита.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Рекомендации по созданию высокоуглеродистых слоев на сталях были использованы при разработке технологии упрочнения деталей типа "втулка" для ОАО «Сибэлектротерм» (г. Новосибирск). Методом электронно-лучевого оплавления углеродного волокна была упрочнена партия втулок, входящих в секцию прикатывающих валков сеялки СЗП – 3,6. Полевые испытания показали, что уровень износа втулок с разработанным покрытием в 1,6 раза ниже по сравнению с втулками, упрочненными по заводской технологии.

2. С использованием результатов диссертационной работы разработан процесс поверхностного упрочнения детали типа «винт», входящей в конструкцию станка для намотки щеток (ООО НПП «ГЕФЕСТ», г. Новосибирск). Предло-

женный процесс позволяет на 40 % повысить износостойкость винта по сравнению с упрочнением по технологии объемной закалки.

3. Результаты проведенных исследований использованы при разработке защитных покрытий, предназначенных для упрочнения рабочих поверхностей лопаток установки горизонтального бурения (ООО «ЭкспертНефтеГаз», г. Новосибирск).

4. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе на механико-технологическом факультете Новосибирского государственного технического университета при чтении лекций и выполнении лабораторных работ в учебных курсах «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов».

Методология и методы исследования

Подходы к решению задач, поставленных в работе, основаны на использовании уникального технологического оборудования (промышленного ускорителя электронов типа ЭЛВ-6) и современного аналитического оборудования, характеризующегося высокой точностью и надежностью методик.

В ходе выполнения диссертационной работы проводились экспериментальные исследования, направленные на подбор рациональных режимов электронно-лучевой наплавки углеродсодержащей порошковой смеси. Исследовалось влияние мощности теплового источника на структуру и свойства поверхностных слоев, формирующихся при наплавке порошковых железо-графитовых смесей. При проведении экспериментальных исследований выполнена оценка эффективности процессов электронно-лучевой закалки и отпуска предварительно наплавленных высокоуглеродистых слоев. Целью данного эксперимента являлось увеличение твердости и износостойкости полученных покрытий.

Оценка эффективности разработанных материалов осуществлялась на основании экспериментальных данных, полученных при проведении триботехнических и механических испытаний. Реализованы различные условия абразивного изнашивания, моделирующие реальные условия эксплуатации поверхностно упрочненных изделий.

В рамках диссертационной работы проведена оценка охрупчивания основного металла, вызванного нанесением твердого покрытия. В качестве критерия степени охрупчивания использована величина ударной вязкости поверхностно упрочненных материалов.

На защиту выносятся:

1. Результаты структурных исследований высокоуглеродистых слоев, полученных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых железо-графитовых смесей на низкоуглеродистую сталь 20.

2. Результаты исследования градиентной структуры материалов после комбинированной обработки, включающей наплавку, закалку и последующий отпуск с использованием промышленного ускорителя электронов ЭЛВ-6.

3. Результаты исследования поведения композиции «высокоуглеродистый слой – сталь 20» в различных условиях изнашивания и при динамическом нагружении.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов экспериментальных исследований достигнута использованием статистических методов обработки полученных данных, применением современного аналитического оборудования, соответствием выводов по работе и современных представлений о природе процессов, происходящих при реализации методов поверхностного упрочнения металлических материалов. Исследования, выполненные другими авторами, прямо и косвенно подтверждают данные, полученные при выполнении работы.

Основные результаты и положения работы докладывались на научной конференции молодых ученых «*Progress through innovative technologies*» (г. Новосибирск, 2012); на всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (г. Новосибирск, 2012, 2013); на всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (г. Новосибирск, 2012, 2013); на всероссийской школе–семинаре с международным участием «Новые материалы. Создание, структура, свойства» (г. Томск, 2012); на XIII международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов-молодых ученых (г. Екатеринбург, 2012); на IX российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (г. Москва, 2012); на всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2012); на международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2013).

По результатам исследований опубликовано 16 научных работ, из них 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ; 11 – в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, приложения. Работа изложена на 190 страницах основного текста, включая 63 рисунка и 6 таблиц, библиографический список из 159 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена характеристика области исследования и обоснована актуальность темы диссертационной работы.

В первой главе «Модифицирование поверхностных слоев стальных заготовок введением углерода и термической обработкой» проведен аналитический обзор научных работ по проблемам формирования упрочненных слоев на стальных изделиях с использованием различных технологических процессов. Проанализированы возможности высокоэнергетических методов упрочнения металлических материалов. Обозначены проблемы, связанные с формированием износостойких высокоуглеродистых слоев, сформулированы задачи исследования.

Во второй главе «Материалы и методы исследования» изложены сведения о материалах и методах исследования их структуры и свойств. В качестве основного материала в работе была использована низкоуглеродистая конструк-

ционная сталь 20. Упрочняющими материалами, предназначенными для формирования высокоуглеродистых слоев, в работе являлись порошки терморасширенного графита марки ГЛ1 (ГОСТ 5279-74) и углеродсодержащего термообработанного материала марки МГ (0-2) (ТУ 1914-00194042-026-01).

Наплавка износостойких высокоуглеродистых покрытий производилась на промышленном ускорителе электронов ЭЛВ-6 производства Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск). Обработка осуществлялась с применением электромагнитной развертки электронного пучка. Энергия пучка электронов составляла 1,4 МэВ, скорость перемещения заготовок относительно выпускного отверстия $V = 10$ мм/с, расстояние от выпускного окна до заготовки $H = 90$ мм, гауссов диаметр пучка $d = 12$ мм. Силу тока пучка электронов изменяли в диапазоне от 20 мА до 26 мА. Электронно-лучевые закалка и отпуск проводились при скорости обработки $V = 70$ мм/с. Сила тока пучка электронов составляла 32 мА и 34 мА, для закалки, 9,5 мА – для отпуска. Расстояние от выпускного отверстия до обрабатываемой поверхности 90 мм для закалки и 120 мм – для отпуска.

Для проведения анализа структуры сталей на различных масштабных уровнях применялись методы оптической металлографии, просвечивающей и растровой электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа.

Микротвердость исследуемых покрытий оценивали в соответствии с ГОСТ 9450-76. Для оценки влияния упрочненных слоев на низкоуглеродистую сталь были проведены испытания на ударную вязкость. С целью определения влияния морфологии наплавленных слоев на интенсивность и характер изнашивания стали были проведены триботехнические испытания по схеме трения скольжения, трения о нежестко закрепленные и закрепленные абразивные частицы.

В третьей главе «Математическое моделирование процессов нагрева и охлаждения при вневакуумной электронно-лучевой наплавке железоуглеродистых порошковых материалов на сталь 20» представлен расчет температурных полей и проведен анализ остаточных напряжений после наплавки. Расчеты осуществлены с использованием специализированного программного обеспечения *SYSWELD*.

Расчетная область представляла собой параллелепипед размерами 30x50x10 мм. Расчет температурных полей производился с использованием метода конечных элементов. Уровень фазовых напряжений рассчитывали с использованием модели упруго-вязкопластического поведения материалов. Для моделирования вязкопластического поведения использовалась модель Пирса.

По данным расчетов максимальный уровень температур при воздействии электронного луча на пластину составил 1850 °С. Максимальная скорость охлаждения материала наблюдается на начальном этапе остывания ванны расплава и достигает 6000 °С/с, к концу обработки скорость снижается до 20 °С/с. Максимальный уровень остаточных напряжений (580 МПа) зафиксирован при обработке материала с использованием дорожечного режима. Применение электромагнитной развертки электронного пучка позволяет снизить остаточные напряжения до 360 МПа.

Четвертая глава «Модифицирование поверхностных слоев сталей методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки углеродсодержащих порошковых смесей» посвящена исследованию структурных преобразований, происходящих при наплавке порошковой железуграфитовой смеси на сталь 20, а также оценке триботехнических свойств модифицированных слоев.

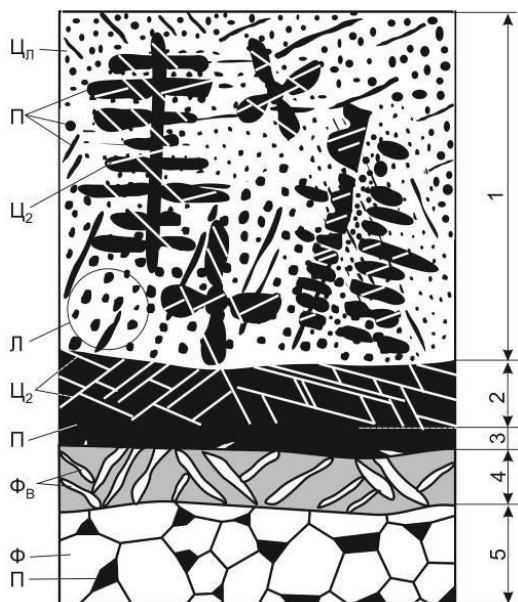


Рисунок 1 – Схема строения поверхностного слоя стальной пластины после наплавки порошковой железуграфитовой смеси пучком электронов, выведенным в воздушную атмосферу:

1 – зона доэвтектического белого чугуна; 2 – зона заэвтектоидной стали; 3 – зона со структурой перлита; 4 – зона термического влияния; 5 – исходная структура стали

Одним из технологических параметров, в наибольшей степени определяющим строение, а, следовательно, и свойства наплавленных слоев, является ток пучка электронов. Увеличение его значения приводит к возрастанию толщины слоя, что в свою очередь ведет к снижению в нем концентрации углерода. Максимальная концентрация углерода (2,55 %) наблюдается в слое, наплавленном при $I = 20$ мА (1,2 мм); минимальная 1,57 % – при 26 мА (2,6 мм).

При наплавке формируются слои со сложной структурой гетерофазного типа. Дефектов в виде трещин, отслоений и крупных пор методами структурного анализа не обнаружено. Слои, наплавленные при $I = 20 \dots 24$ мА (толщина слоев 1,2...2 мм), можно разделить на несколько зон (рисунок 1). Основными структурными составляющими первой зоны являются перлит, ледебурит и цементит видманштеттова типа. Характерным является формирование построений в виде крупных дендритов с осями первого и второго порядка. Кристаллы цементита видманштеттова типа хаотично располагаются внутри дендритов

(рисунок 2 б). Вторая зона представляет собой слой заэвтектоидной стали. Здесь можно наблюдать перлит и вторичный цементит видманштеттова типа. Третья зона соответствует стали эвтектоидного типа и состоит из перлита. В зоне подложки, граничащей с наплавленным материалом, формируется грубая феррито-перлитная структура с кристаллами феррита видманштеттова типа. Образование ее обусловлено перегревом в результате контакта с расплавленным материалом. Исходная структура стали имеет феррито-перлитное строение.

Повышение уровня вводимой энергии оказывает существенное влияние на строение упрочненного слоя. При обработке стальных заготовок с током пучка 26 мА в расплавленное состояние переходит больший объем поверхностного слоя. В результате этого формируются слои толщиной 2,6 мм. В результате растворения углерода в ванне жидкого расплава формируется структура, соответствующая стали заэвтектоидного типа (рисунок 2 в). Благодаря высоким

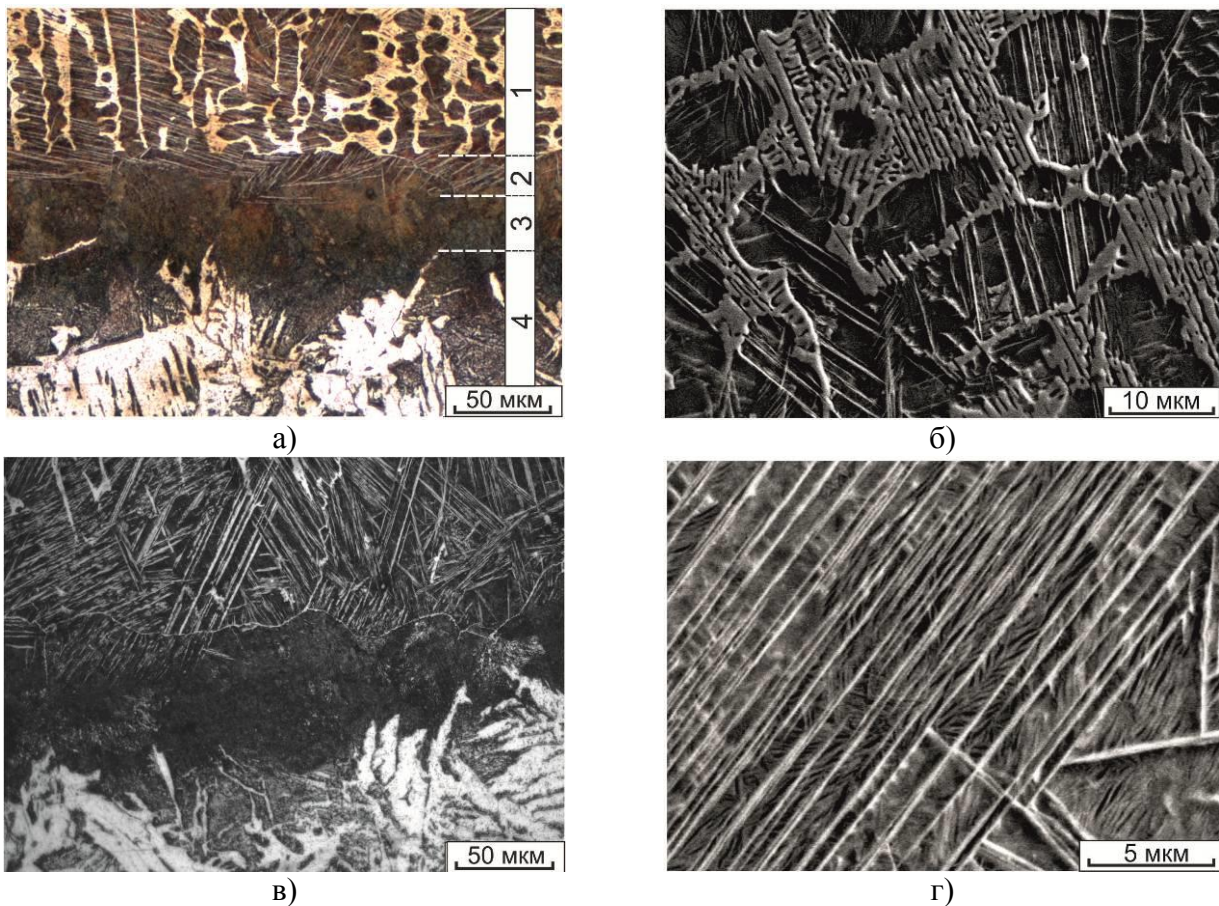


Рисунок 2 – Строение наплавленных поверхностных слоев: а, б – $I = 20$ мА; в, г – $I = 26$ мА

скоростям охлаждения материала возникают колонии мелкодисперсного перлита. Пластины видманштеттова цементита растут от границ аустенитных зерен, параллельно друг другу. Между ними располагаются перлитные колонии, размер которых ограничен межпластинчатым расстоянием (рисунок 2 г).

Структурные исследования не выявили наличия закалочных структур в наплавленных слоях. Рентгеноструктурный анализ также подтвердил отсутствие мартенсита в полученных покрытиях (рисунок 3).

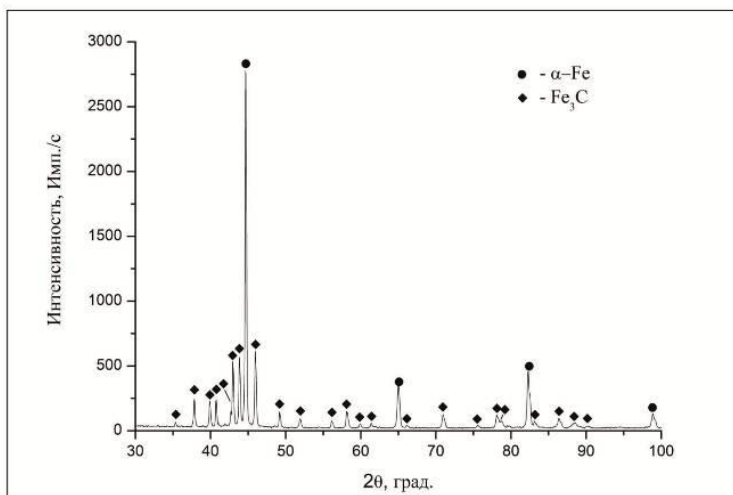


Рисунок 3 – Дифракционные картины, снятые с поверхностных слоев, полученных электронолучевой наплавкой железо-графитовой смеси $I = 20$ мА

Для изучения особенностей тонкого строения кристаллов видманштеттова цементита использовалась просвечивающая электронная микроскопия (рисунок 4 а). В ходе исследований установлено, что пластины состоят из слоев толщиной ~ 200 нм. Количество слоев в пластинах варьируется от одного до десяти. Перлит, образующийся при электронно-лучевой наплавке углеродсодержащей порошковой смеси, имеет пластинчатую морфологию (рису-

нок 4). Во многих колониях встречаются дефектные (прерывистые) пластины цементита (рисунок 4 б). Это явление связано с напряжениями, возникающими на межфазной границе во время охлаждения материала.

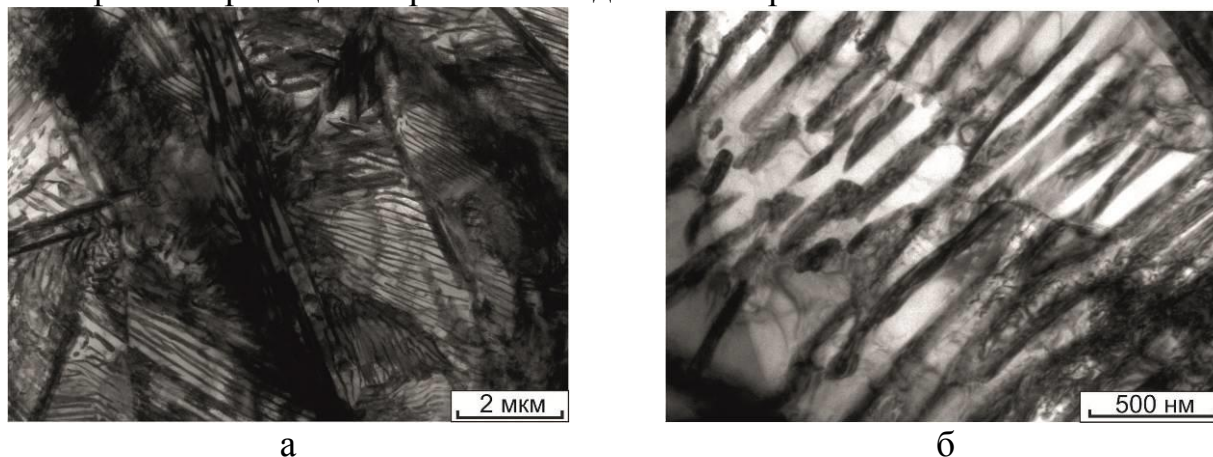


Рисунок 4 – Тонкая структура наплавленных высокоуглеродистых покрытий

Одним из параметров, позволяющих оценить износостойкость материалов, является микротвердость. При выполнении диссертационной работы изучался характер распределения микротвердости в направлении от наплавленной поверхности к основному материалу. Данная зависимость позволяет оценить глубину наплавленных слоев и максимальный уровень их твердости. Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что глубина высокоуглеродистых слоев находится в пределах от $\sim 1,2$ мм (при токе 20 мА) до $\sim 2,6$ мм (при токе 26 мА).

Максимальным уровнем микротвердости (5,7 ГПа) обладают слои, сформированные при наплавке с током пучка электронов 20 мА. При повышении тока пучка до 24 мА микротвердость покрытия снижается до 5,1 ГПа. Среднее значение микротвердости при обработке с током пучка 26 мА составляет 4,5 ГПа.

Важным показателем качества поверхностно легированных материалов является их сопротивление разрушению при динамическом нагружении. В этой связи были проведены испытания образцов с V-образными надрезами на ударный изгиб. Наибольшим уровнем ударной вязкости обладают образцы из исходной стали 20 с феррито-перлитной структурой ($KCV 164$ Дж/см²) (рисунок 5). Как и ожидалось, высокоуглеродистые наплавленные слои оказывают охрупчивающее воздействие на низкоуглеродистую сталь. Экспериментально установлено, что ударная вязкость исследуемых материалов в большей степени зависит не от содержания углерода в покрытии, а от его толщины. Минимальной ударной вязкостью (98 Дж/см²) обладают материалы с наплавленным слоем толщиной 2,6 мм (1,57 % C). Уменьшение толщины наплавленного слоя до 1,2 мм сопровождается ростом ударной вязкости на 60 Дж/см². Фрактографические исследования показали, что разрушение основного материала носит смешанный характер. Наплавленные покрытия разрушаются хрупко.

С целью определения влияния структуры наплавленных слоев на интенсивность и характер изнашивания поверхностно упрочненной стали были проведены триботехнические испытания в различных условиях изнашивания. Испытания по схеме трения скольжения проводились на машине трения СМТ-1. Критериями поведения анализируемых материалов являлись значения относительной износостойкости и коэффициента трения. В качестве контрольных были использованы образцы, полученные по технологии цементации в твердом карбюризаторе с последующей закалкой и отпуском. В условиях трения скольжения лучшими показателями износостойкости обладают контрольные образцы (рисунок 6). Образцы со слоем наплавленного чугуна обладают минимальным коэффициентом трения (0,18), тем не менее по износостойкости они уступают контрольному материалу. Наплавленные слои, имеющие структуру заэвтектоидной стали, обладают коэффициентом трения, равным 0,185 и еще более низким уровнем износостойкости.

В условиях воздействия закрепленных и нежестко закрепленных абразивных частиц поведение разработанных материалов существенно не отличается от контрольных образцов. На основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что наиболее предпочтительный режим формирования покрытия реализуется при токе пучка электронов, равном 24 мА.

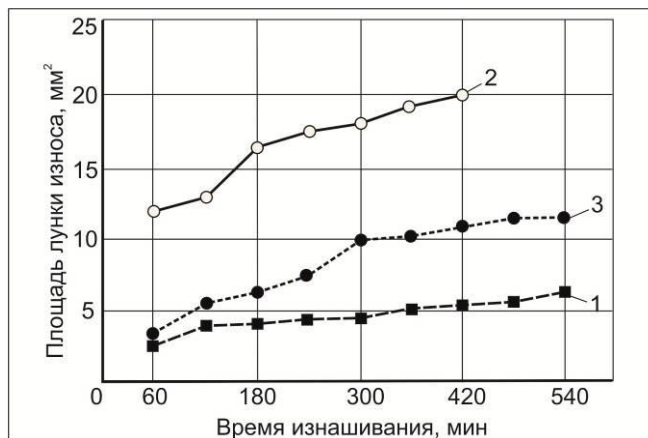


Рисунок 6 – Результаты испытания материалов в условиях трения скольжения: 1 – сталь после цементации в твердом карбюризаторе, закалки и низкого отпуска; 2 – наплавленный слой со структурой заэвтектоидной стали ($I = 26$ мА); 3 – наплавленный слой со структурой чугуна ($I = 24$ мА)

Улучшить свойства наплавленных материалов возможно, используя последующую закалку и отпуск, что позволит получить в наплавленных слоях структуру высокоуглеродистого мартенсита. Поэтому была поставлена задача изучить возможность использования ускорителя электронов для реализации комбинированной обработки низкоуглеродистой стали, сочетающей наплавку порошковой железуграфитовой смеси с последующей поверхностной закалкой наплавленного слоя.

Пятая глава «Электронно-лучевая закалка и отпуск поверхностных слоев с повышенным содержанием углерода» посвящена структурным исследованиям и изучению свойств поверхностных слоев после поверхностной закалки и

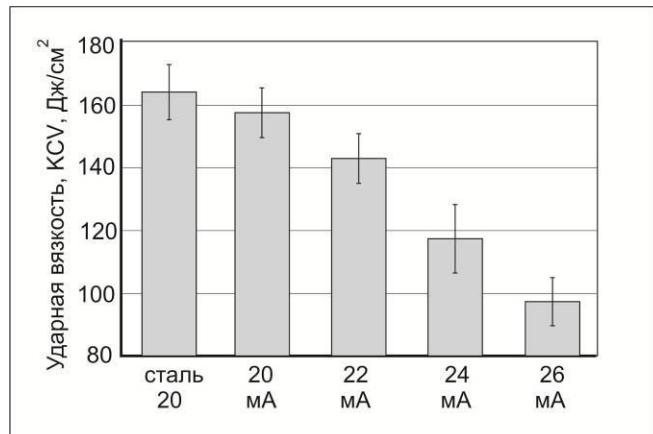


Рисунок 5 – Зависимость ударной вязкости материалов от тока пучка электронов

отпуска науглероженных слоев. Обработке подвергались наплавленные высокоуглеродистые слои, имеющие структуру белого чугуна ($I = 24$ мА) и заэвтектоидной стали ($I = 26$ мА).

После электронно-лучевой закалки наплавленных слоев формируется градиентная структура, которая условно может быть разделена на 5 характерных зон (рисунок 7). В зоне 5 толщиной 380...400 мкм, полученной при закалке из аустенитной области, наблюдается структура игольчатого мартенсита (рисунок 8 а). В промежутках между мартенситными кристаллами находятся микрообъемы остаточного аустенита. Объемное содержание γ -фазы достигает 23 %. Зерна аустенита имеют полиэдрическую морфологию, их средний размер составляет 16 мкм. Температура нагрева четвертой зоны была ниже, чем на поверхности. Образование мартенсита в ней происходит из аустенитно-цементитной области, поэтому в структуре образующегося материала наблюдаются кристаллы видманштеттова цементита. Толщина четвертой зоны составляет ~ 200 мкм. Переходная зона 3 толщиной ~ 300 мкм, расположенная между слоями с закаленной структурой и литой структурой наплавленного слоя, имеет наиболее сложное строение (рисунок 8 б). Скорость охлаждения некоторых локальных участков в ней была недостаточной для образования мартенсита, что привело к образованию колоний перлита. Основными структурными составляющими зоны 2, сохранившей литое строение, являются перлит и цементит видманштеттова типа. Феррит в зоне 1 является преимущественно полиэдрическим. В то же время в ее верхней части наблюдаются кристаллы видманштеттова феррита.

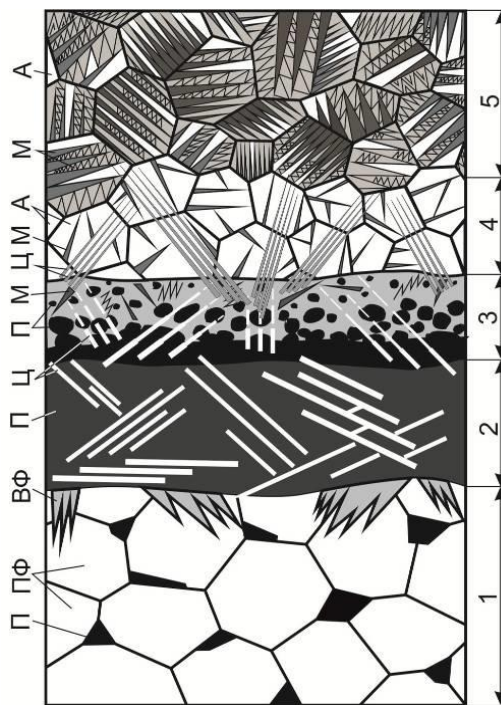


Рисунок 7 – Структурные зоны покрытия после электронно-лучевой наплавки и закалки наплавленной стали: 1 – исходная структура; 2 – зона, сформированная при наплавке порошковой смеси; 3 – переходная зона; 4 – зона, закаленная из аустенитно-цементитной области; 5 – зона, закаленная из аустенитной области

При электронно-лучевой закалке и отпуске наплавленных слоев со структурой белого чугуна образуется сетка трещин, присутствие которых свидетельствует о наличии напряжений высокого уровня. Особенностью строения этих слоев является присутствие во всех зонах нерастворившегося цементита, который входил в состав ледебурита.

Строение покрытия, обладавшего после наплавки структурой заэвтектоидной стали, а затем подвергнутого закалке, изучалось с использованием метода просвечивающей микроскопии (рисунок 8 в, г). Было установлено, что мартенситные пластины содержат большое количество близко расположенных двойников. В остаточном аустените наблюдается высокая плотность дислокаций, возникающих из-за внутренних напряжений, формирующихся в процессе

закалки. Некоторые кристаллы мартенсита неоднородны и содержат нерастворенные пластины цементита (рисунок 8 г).

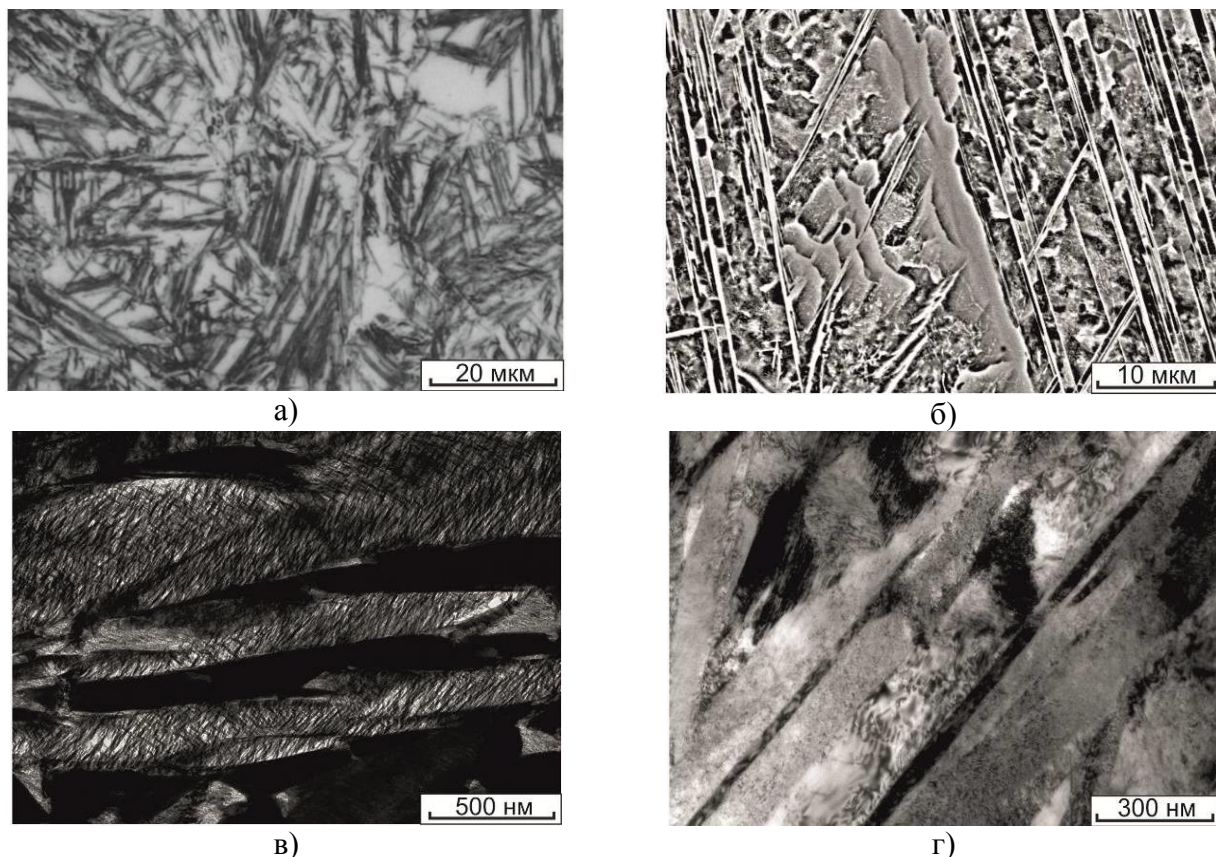


Рисунок 8 – Строение поверхностных слоев и переходных зон, сформированных в результате вневакуумной электронно-лучевой наплавки и последующей закалки покрытия пучком электронов, выведенным в атмосферу:
а – поверхностная зона; б – переходная зона; в, г – тонкая структура покрытия после закалки (ПЭМ)

Рентгенофазовый анализ подтвердил наличие остаточного аустенита в закаленных электронным лучом высокоуглеродистых слоях, полученных методом наплавки. Уширение пика $\alpha-Fe$ на рентгенограммах свидетельствует о том, что данная фаза является мартенситом.

Для того чтобы оценить эффективность электронно-лучевой закалки измеряли микротвердость наплавленных слоев. Анализ зависимостей «микротвердость – расстояние от поверхности» позволяет сделать вывод о том, что толщина слоев, сформированных в процессе наплавки железографитовой смеси, составила 2 мм и 2,6 мм. Средняя микротвердость этих слоев составила 5,3 ГПа и 4,5 ГПа, соответственно. Последующая электронно-лучевая закалка позволила повысить значения средней микротвердости до 8 ГПа и 7 ГПа соответственно. Микротвердость исходной стали 20 составляет ~ 2 ГПа.

Для оценки износостойкости поверхностных слоев, полученных после электронно-лучевой наплавки с последующей закалкой и отпуском, были проведены триботехнические испытания в разных условиях изнашивания.

Способность эксплуатироваться в условиях абразивного изнашивания является одним из важнейших качеств поверхностно упрочненных материалов,

поэтому в работе были проведены испытания при трении о закрепленные и не жестко закрепленные абразивные частицы. Наименьшим уровнем износостойкости при испытаниях на трение о закрепленные частицы абразива обладает нормализованная сталь 20 (0,6 от уровня эталонного материала). Относительная износостойкость наплавленных слоев со структурой стали и чугуна без термической обработки составила 0,95 и 1,07 соответственно. Дополнительная термическая обработка слоев повысила эти показатели до 1,6 и 1,4 соответственно (рисунок 9 а). Несмотря на большее содержание углерода и более высокую твердость, износостойкость образцов со структурой чугуна после закалки хуже, чем у образцов со структурой стали. Это вызвано, вероятно, напряженным состоянием закаленного чугуна и наличием в нем сетки микротрещин.

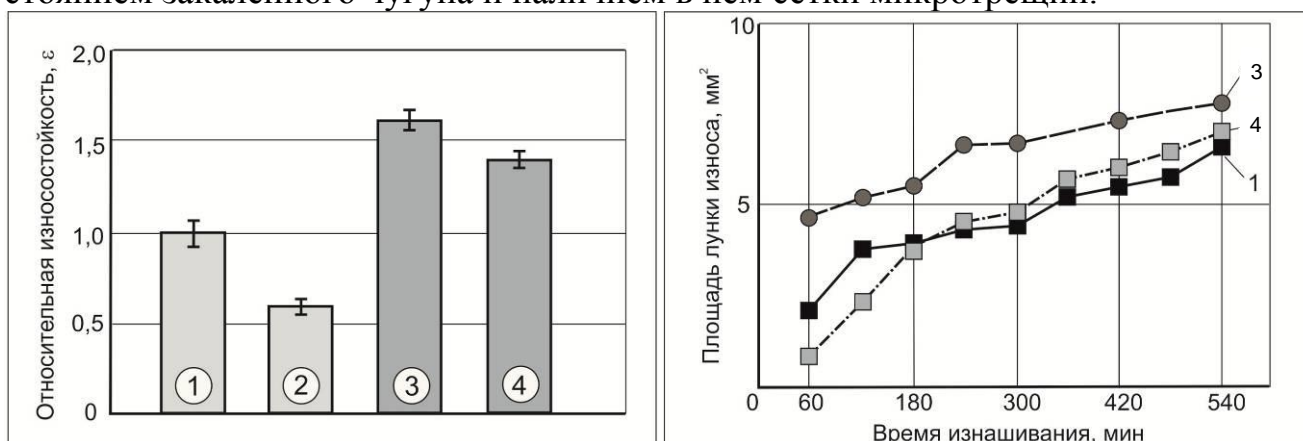


Рисунок 9 – Результаты триботехнических испытаний материалов:

а - относительная износостойкость материалов в условиях воздействия закрепленных частиц абразива; б – результаты изнашивания материалов в условиях трения скольжения; 1 – цементация в твердом карбюризаторе на глубину 0,8 мм, закалка и низкий отпуск; 2 – отожженная низкоуглеродистая сталь; 3 – наплавленный слой заэвтектоидного состава после закалки и отпуска; 4 – наплавленный чугун после закалки и отпуска

Электронно-лучевая закалка предварительно наплавленных материалов привела к формированию в поверхностных слоях мелкокристаллического мартенсита и повышению твердости поверхностных слоев, что явилось причиной повышения их износостойкости. В условиях воздействия не жестко закрепленных абразивных частиц износостойкость закаленных слоев со структурой чугуна несколько выше, чем со структурой закаленной стали. Это объясняется тем, что в структуре чугуна сохраняется большое количество цементита.

В связи с тем, что предложенная технология может быть использована для обработки изделий, работающих в условиях трения скольжения, были проведены испытания на машине трения СМТ-1 по схеме «диск – плоскость». Экспериментально установлено, что наибольшей износостойкостью обладают образцы закаленных слоев со структурой чугуна. Интенсивность их изнашивания соответствует контрольному материалу (сталь 20 после цементации и последующей закалки с низким отпуском) (рисунок 9 б). Наплавленные и закаленные слои со структурой заэвтектоидной стали изнашиваются быстрее, чем слои со структурой чугуна. Коэффициент трения контрольных образцов составляет 0,193. На образцах со структурой закаленного чугуна величина этого показате-

ля достигает ~ 0,199. Коэффициент трения образцов со структурой закаленной заэвтектонидной стали ниже, чем у контрольного материала (~ 0,188).

В шестой главе «Апробация результатов экспериментальных исследований» проведен анализ возможностей практического применения полученных результатов. Апробация результатов осуществлялась в ОАО «Сибэлектротерм» (г. Новосибирск) в технологическом процессе упрочнения втулок сеялки СПЗ-3,6. Полевые испытания, проведенные при посеве озимых культур, показали, что износостойкость втулок с поверхностно упрочненным слоем, сформированным по разработанной технологии, в 1,6 раз выше износостойкости втулок, упрочненных по заводской технологии. Результаты диссертационной работы использованы при разработке технологии поверхностного упрочнения винтов, входящих в конструкцию станка для намотки щеток, разработанного в ООО НПП «ГЕФЕСТ» (г. Новосибирск). Износостойкость деталей, обработанных по предложенной технологии, в 1,4 раза выше по сравнению с деталями, упрочненными методом объемной закалки. С учетом результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы, были разработаны рекомендации для ООО «ЭкспертНефтеГаз» (Новосибирск) по вневакуумному электронно-лучевому оплавлению борсодержащих смесей и упрочнению рабочих поверхностей деталей установок горизонтального бурения.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технологии материалов» в лекционных и лабораторных курсах «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов».

Заключение

1. С использованием методов математического моделирования проведена оценка температур, достигаемых в процессе вневакуумной электронно-лучевой обработки порошковых железо-графитовых смесей, а также остаточных напряжений, возникающих при кристаллизации расплавленного металла. Показано, что максимальный уровень температуры при взаимодействии пучков релятивистских электронов с поверхностным слоем составляет 1850 °С. Несмотря на кратковременность теплового воздействия, обрабатываемый материал при этих условиях переходит в жидкое состояние.

2. Мощный электронный пучок, выведенный в атмосферу, представляет собой эффективный тепловой источник, позволяющий с высокой скоростью выполнять наплавку углеродсодержащих порошковых материалов на низкоуглеродистую сталь. Данная технология обеспечивает формирование высокоуглеродистых слоев толщиной до 2,6 мм, обладающих высокой твердостью и износостойкостью. Производительность метода поверхностного легирования стали при реализации режимов, рассмотренных в работе, составляет 1,8 м²/ч.

3. Показано, что мощность теплового источника определяет глубину упрочненного слоя, его структуру и механические свойства. Увеличение глубины проплавления приводит к снижению в поверхностном слое концентрации углерода. Высокоуглеродистые слои толщиной 1,2 мм с максимальным содержанием углерода (2,55 %) формируются при обработке с силой тока пучка

электронов равной 20 мА. Использование технологических режимов с током пучка 26 мА позволяет получить слои с концентрацией углерода 1,57 % при толщине до 2,6 мм. Возможно дальнейшее увеличение толщины наплавленных слоев, сопровождающееся снижением в них концентрации углерода. Твердость материала, полученного наплавкой порошковых железо-графитовых смесей, составляет 5,7...4,5 ГПа.

4. Высокоуглеродистые слои представляют собой монолитные материалы с малым количеством структурных дефектов, прочно соединенные с основным материалом и оказывающие на него охрупчивающее воздействие. Установлено, что ударная вязкость поверхностно легированных материалов в большей степени зависит не от содержания углерода в наплавленных слоях, а от их толщины. Наибольшее снижение уровня ударной вязкости исходного материала (от 164 до 98 Дж/см²) зафиксировано при испытании материала с наплавленным слоем толщиной 2,6 мм, содержание углерода в котором было минимальным (1,57 % С). Наплавка высокоуглеродистого слоя толщиной 1,2 мм сопровождается менее значительным снижением ударной вязкости (от 164 до 158 Дж/см²).

5. При упрочнении деталей, предназначенных для эксплуатации в условиях трения скольжения, целесообразно применять электронно-лучевую наплавку углеродсодержащей порошковой смеси при силе тока величиной 24 мА. Данный режим приводит к формированию в поверхностном слое структуры белого чугуна, обладающего высокой твердостью (5,7 ГПа) и обеспечивающего высокие антифрикционные свойства. Достоинства наплавленных слоев со структурой белого чугуна и заэвтектоидной стали в условиях трения скольжения обусловлены формированием измельченной структуры.

6. С целью повышения износостойкости наплавленных слоев предложена комбинированная высокоскоростная обработка, сочетающую закалку и отпуск науглероженных слоев с использованием промышленного ускорителя электронов. Предложенный метод позволяет с производительностью 12,6 м²/час получать закаленные слои глубиной до 1 мм, обладающие твердостью до 8 ГПа.

7. В условиях воздействия закрепленных частиц абразива наиболее эффективной является структура заэвтектоидной стали (1,57 % С) после комбинированной обработки, включающей наплавку железо-графитовой порошковой смеси пучком электронов, выведенным в воздушную атмосферу с последующей электронно-лучевой закалкой и отпуском. Относительная износостойкость этого материала на 60 % выше по сравнению с низкоуглеродистой сталью после цементации в твердом карбюризаторе, закалки и отпуска при 200 °С. Скорость изнашивания наплавленного, закаленного и отпущенного электронным лучом чугуна (2,19 % С) примерно на 12 % выше по сравнению с аналогично обработанным слоем из заэвтектоидной стали. Причина этого обусловлена напряженным состоянием закаленного чугуна и присутствием в нем сетки микротрещин. Таким образом наплавленные слои, структура которых соответствует белому доэвтектическому чугуну, целесообразно применять без дополнительной закалки.

8. В условиях воздействия нежестко закрепленных частиц абразива интенсивность изнашивания наплавленных слоев высокоуглеродистой стали и чу-

гуна соответствует поведению стальных образцов после цементации в твердом карбюризаторе, закалки и отпуска при 200 °С. Вневакуумная электронно-лучевая закалка наплавленных материалов приводит к повышению твердости до 8 ГПа, результатом которого является снижение интенсивности их изнашивания, обусловленное малыми размерами аустенитных зерен и последующим формированием в поверхностных слоях образцов мелкокристаллического мартенсита.

9. При реализации схемы трения скольжения наименьший уровень интенсивности изнашивания из разработанных материалов был зафиксирован при испытании наплавленного чугуна после дополнительной электронно-лучевой закалки и отпуска. Поведение этого материала соответствует низкоуглеродистой стали после цементации в твердом карбюризаторе, закалки и низкого отпуска. Слой термически упрочненной наплавленной стали изнашивается быстрее, чем слой закаленного чугуна. Скорость изнашивания наплавленных слоев без дополнительной обработки существенно выше по сравнению с закаленными и низкоотпущенными материалами.

10. Результаты проведенных исследований апробированы в ОАО «Сиб-электротерм» (г. Новосибирск) при упрочнении втулок сеялки СПЗ-3,6; в ООО НПП «ГЕФЕСТ» (г. Новосибирск) при разработке технологии поверхностного упрочнения детали (винта) станка для намотки проволочных щеток; в ООО «ЭкспертНефтеГаз» (г. Новосибирск) при разработке поверхностно упрочненных слоев лопаток установки горизонтального бурения. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Новосибирском государственном техническом университете при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Материаловедение и технологии материалов» в лекционных курсах и на лабораторных занятиях по дисциплинам «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов». Научные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, экспонировались на всероссийских и международных выставках.

Список работ опубликованных автором по теме диссертации:

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Структура и свойства поверхностных слоев низкоуглеродистой стали, полученных методом наплавки углеродсодержащих порошковых смесей и последующей закалки [Текст] / А. А. Лосинская, М. Г. Голковский, Е. А. Дробяз, Н. В. Плотникова, В. В. Самойленко // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. – 2013. – № 4. – С. 5–11.

2. Лосинская, А. А. Формирование высокоуглеродистых слоев на стали и их закалка с использованием мощного электронного пучка, выведенного в атмосферу [Текст] / А. А. Лосинская, Д. Д. Головин // Перспективы науки. – 2013. № 10 (49). – С. 7–10.

3. Свойства защитных покрытий из эвтектического хромованадиевого чугуна, полученных электронно-лучевой наплавкой в вакууме [Текст] / Н. С. Белоусова, Б. В. Дампилон, В. Г. Дураков, Л. В. Еремина, А. А. Лосинская // Об-

работка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. – 2011. – № 3(52). – С. 80–84.

4. Морфология боридов железа в поверхностном слое, наплавленном электронным лучом [Текст] / И. А. Батаев, Н. В. Курлаев, О. А. Бутыленкова, О. Г. Ленивцева, А. А. Лосинская // *Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты.* – 2012. – № 1(54). – С. 85–89.

5. *Structure of surface layers produced by non-vacuum electron-beam boriding [Text] / I. A. Bataev, A. A. Bataev, M. G. Golkovski, D. S. Krivizhenko, A. A. Losinskaya, O. G. Lenivtseva // Applied Surface Science.* – 2013. – Vol. 284. – P. 472–481. [Структура поверхностных слоев, полученных по технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки аморфного бора].

В прочих изданиях

6. *Losinskaya, A.A. Cladding of carbon-containing mixtures onto steels utilizing atmospheric electron-beam treatment [Text] / A. A. Losinskaya, D. D. Golovin // Eastern European Scientific Journal.* – 2013. – Vol. 5. – P. 22–27. [Наплавка углеродсодержащих смесей на стали с использованием вневакуумной электронно-лучевой обработки].

7. Лосинская, А. А. Особенности строения поверхностного слоя стали, насыщенного углеродом в процессе вневакуумной электронно-лучевой обработки [Текст] / А. А. Лосинская, О. Г. Ленивцева // *Наука. Промышленность. Оборона: тр. 13 Всерос. науч.-техн. конф. для студентов аспирантов и молодых ученых. (НПО–2012), Новосибирск, 18-20 апр. 2012 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – С. 391–393.*

8. Лосинская, А. А. Получение износостойких слоев на низкоуглеродистых сталях методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки [Текст] / А. А. Лосинская, Д. Д. Головин, О. Г. Ленивцева // *Новые материалы. Создание, структура, свойства: тр. 12 Всерос. школы-семинара с междунар. уч. для студентов аспирантов и молодых ученых, Томск, 6 – 8 июня 2012 г. – Томск, 2012. – С. 106–108.*

9. Лосинская, А. А. Структурные особенности и износостойкость высокоуглеродистых слоев, полученных на стали 20 методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки [Текст] / А. А. Лосинская, Р. А. Доставалов // *Сборник научных докладов 13 междунар. науч.-техн. Урал. shk.-семинар металлосведов-молодых ученых, Екатеринбург, 12–16 нояб. 2012 г. – Екатеринбург Изд-во УрФу, 2012. – С. 297–299.*

10. Лосинская, А. А. Формирование на сталях высокоуглеродистых слоев с использованием высокоэнергетического электронного луча [Текст] / А. А. Лосинская, Д. Д. Головин // *Наука. Промышленность. Оборона: тр. 14 Всерос. науч.-техн. конф. для студентов аспирантов и молодых ученых. (НПО–2013), Новосибирск, 24–26 апр. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 353–355.*

11. Лосинская, А. А. Поверхностное насыщение стали углеродом в процессе вневакуумной электронно-лучевой обработки [Текст] / А. А. Лосинская // *Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на*

современном этапе: материалы 10-й Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 28 марта 2012 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – С.190–192.

12. Лосинская, А. А. Получение высокоуглеродистых износостойких поверхностных слоев методом вневакуумного электронно-лучевого оплавления [Текст] / А. А. Лосинская // Физико-химия и технология неорганических материалов : материалы 9 Рос. ежегодной конф. молодых научных сотрудников и аспирантов, Москва, 23-26 октября 2012 г. Москва : ИМЕТ РАН, 2012. – С. 503–505.

13. Лосинская, А. А. Поверхностное насыщение стали углеродом в процессе вневакуумной электронно-лучевой обработки с использованием углеродосодержащей ткани [Текст] / А. А. Лосинская, Р. А. Доставалов // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 29 нояб. - 2 дек. 2012 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012 – С. 200–201.

14. Лосинская, А. А. Наплавка железо-графитовой смеси на сталь пучками электронов высокой мощности, выведенными в воздушную атмосферу [Текст] / А. А. Лосинская // Новые материалы и технологии. Студент и научно-технический прогресс: материалы 51 междунар. науч. студ. конф, Новосибирск, 12–18 апр. 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГУ, 2013. – С. 45.

15. Лосинская, А. А. Поверхностная закалка предварительно науглероженных слоев низкоуглеродистой стали с использованием мощного электронного пучка, выведенного в атмосферу [Текст] / А. А. Лосинская // Современные техника и технологии : материалы 19 Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 15-19 апр. 2013 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – С. 94–95.

16. Лосинская, А. А. Формирование на сталях высокоуглеродистых слоев методом вневакуумной электронно-лучевой обработки порошковых смесей [Текст] / А. А. Лосинская, Д. Д. Головин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе : материалы 11 Всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 27 марта 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 324–326.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
Тел./факс: (383)346-08-57
формат 60x84 1/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
заказ № 1512 подписано в печать 22.11.2013 г.