

На правах рукописи



Малушин Николай Николаевич

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
УПРОЧНЕНИЯ ТЕПЛОСТОЙКИХ СПЛАВОВ ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТИ,
СФОРМИРОВАННЫХ ПЛАЗМОЙ В СРЕДЕ АЗОТА**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новокузнецк – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный консультант Громов Виктор Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Клименов Василий Александрович – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», заведующий кафедрой – руководитель отделения материаловедения на правах кафедры инженерной школы новых производственных технологий

Смирнов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», профессор кафедры «Технологии машиностроения»

Прибытков Геннадий Андреевич – доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук», главный научный сотрудник лаборатории физики наноструктурных функциональных материалов

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится «20» сентября 2022 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.252.04 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42.

Факс (3843) 46-57-92, E-mail: d212_252_04@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», <http://www.sibsiu.ru>

Автореферат разослан «17» мая 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.х.н., профессор



Горюшкин
Владимир Фёдорович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Из современных наплавочных материалов, широко применяемых для упрочнения деталей машин и инструмента, особый интерес представляют теплостойкие сплавы высокой твердости (быстрорежущие стали), потребление которых в России и мире остается преобладающим. Разработка новых материалов, создание и совершенствование сплавов со специальными эксплуатационными свойствами в России отнесено к Критическим технологиям федерального уровня, являющимися объектами первоочередной государственной поддержки.

Предметом исследования является научная проблема, возникшая в результате противоречия между имеющимися высокими служебными характеристиками высоколегированного наплавленного металла и существующими способами их наплавки, не позволяющими на практике реализовать эти свойства теплостойких сплавов высокой твердости.

В связи со сложностью физических процессов, происходящих при нанесении на поверхность изделия теплостойких сплавов сжатой (плазменной) дугой в среде азота, возможности этого метода упрочнения продолжают изучаться. Это обуславливает актуальность проведения новых теоретических и экспериментальных исследований физических основ и механизмов упрочнения поверхностных слоев из теплостойких сплавов. Повышение качества и износостойкости деталей машин и механизмов путем нанесения поверхностного слоя из теплостойких сплавов, сформированного плазменной дугой в среде азота, и разработка комплекса технических и технологических решений для дополнительного повышения твердости являются своевременными и актуальными.

Работа выполнена в соответствии с федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы» раздел «Технологии создания и обработки кристаллических материалов», а также согласно планам госбюджетных и хоздоговорных работ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ).

Степень разработанности темы исследования

Совокупность теоретических разработок и базы достоверных экспериментальных данных, приведенных в работах российских и зарубежных ученых (Э. Гудремона, А.П. Гуляева, Ю.А. Геллера, И. Артингера, Ю.М. Лахтина, Б.Е. Патона, В.П. Полухина, И.И. Фрумина, М.Х. Шоршорова, О.А. Кайбышева, Н.С. Зубкова, С.Ф. Гнусова, А.А. Батаева, М.Д. Старостенкова, А.Н. Иванова, В.Е. Громова, В.Е. Панина, М. Кутсуна и др.), позволяют решать задачи по созданию и совершенствованию наплавочных материалов на базе теплостойких сплавов высокой твердости, а также по разработке современных высокоэффективных способов нанесения их на поверхность упрочняемого изделия.

В процессе наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости образуются холодные трещины, для предотвращения которых обязательно применяют предварительный и сопутствующий высокотемпературный подогрев и замедленное охлаждение деталей. В итоге наплавленные детали имеют неравномерную и низкую твердость и износостойкость, а высокие

служебные характеристики высоколегированных теплостойких сплавов используются не полностью. Для восстановления высокой твердости и износостойкости детали после наплавки подвергают сложной термической обработке в виде отжига – закалки – отпуска. Проведение такой термической обработки для многих деталей затруднено или практически невозможно. Поэтому актуальным является поиск способов наплавки, позволяющих получать наплавленные сплавы в закаленном состоянии без трещин.

В последние годы получили развитие плазменные методы легирования поверхности металлов и сплавов (плазменная наплавка и напыление, поверхностное легирование импульсными плазменными струями, ионно-плазменное осаждение и др.). Широко применяются различные способы химико – термической обработки (нитроцементация, азотирование, борирование и др.). Все шире находит применение упрочняющая поверхностная ультразвуковая обработка (УПУО) и другие способы упрочнения. Комбинированное применение различных технологий упрочнения позволяет получать рабочие слои, обладающие повышенными эксплуатационными свойствами. В литературе недостаточно систематизированных сведений по разработке высокоэффективных способов наплавки, комплексного применения различных упрочняющих технологий, позволяющих значительно повысить твердость наплавленных деталей.

В представленной работе изложены исследования и научно-обоснованные технические и технологические решения в области повышения качества биметаллических деталей, внедрение которых имеет важное хозяйственное значение. В целом диссертация является развитием традиционных работ, проводимых в научной школе СибГИУ «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий».

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка физических основ комплексной технологии упрочнения теплостойких сплавов высокой твердости и износостойкости, сформированных плазмой в среде азота.

Для достижения цели были сформулированы задачи:

1. Исследовать особенности формирования напряженного состояния в процессе многослойной плазменной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости и разработать на основе эффекта повышенной пластичности («сверхпластичности») новые способы их наплавки, обеспечивающие получение наплавленного сплава в закаленном состоянии без трещин.

2. Исследовать формирование временных и остаточных напряжений в наплавленных в среде азота сплавах при мартенситном превращении на разных стадиях термического цикла наплавки и разработать мероприятия, обеспечивающие низкий уровень остаточных напряжений и предотвращение образования холодных трещин в наплавленном слое.

3. Провести исследования влияния легирования на формирование остаточных напряжений и разработать рекомендации по созданию новых наплавочных материалов на базе теплостойких сталей высокой твердости (с твердостью 62 – 66 HRC при отсутствии пор, трещин и дефектов микроструктуры).

4. Исследовать структурно – фазовое состояние, распределение твердости, микротвердости и химических элементов в зонах поверхностного слоя и установить закономерности формирования структуры и свойств наплавленных в защитно – легирующей среде азота теплостойких сплавах.

5. Оценить вклад регулируемого термического цикла наплавки, наплавочных материалов и высокотемпературного отпуска в упрочнение теплостойких сплавов, сформированных плазмой в среде азота.

6. Исследовать и разработать способы регулирования напряженного состояния в наплавленных деталях в процессе их изготовления и эксплуатации.

7. Выявить роль процессов азотирования и ультразвуковой обработки в упрочнении наплавленных теплостойких сплавов высокой твердости и износостойкости.

8. Разработать комплексные технологии упрочнения рабочего слоя наплавленных деталей на основе их изготовления с применением плазменной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости, позволяющие значительно (в 1,5 – 2,0 раза) повысить их износостойкость.

9. Внедрить результаты теоретических и экспериментальных исследований в практику производства биметаллических деталей и учебный процесс.

Научная новизна

1. С использованием высокоинформативных методов физического материаловедения проведены исследования структуры и фазового состояния, распределения твердости и микротвердости в различных зонах поверхностного слоя, сформированного плазменной наплавкой в среде азота. Установлено, что в наплавленных теплостойких сплавах основными фазами являются твердый раствор α – железа, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия. Высокотемпературный отпуск наплавленных сплавов приводит к изменению фазового состава, параметра кристаллической решетки, размеров блоков когерентного рассеяния и изменению внутренних упругих напряжений.

2. Установлено, что физическую основу повышения твердости (52 – 57 HRC) обеспечивает плазменная наплавка теплостойкими сплавами высокой твердости в среде азота, дополнительное упрочнение (8 – 10 HRC) в основном происходит в процессе высокотемпературного отпуска, азотирование и ультразвуковая обработка увеличивают твердость наплавленного сплава на 1 – 2 HRC каждая.

3. Впервые установлено проявление эффекта повышенной пластичности («сверхпластичности») в наплавленных теплостойких сплавах в момент протекания мартенситного превращения и доказана возможность его применения для регулирования напряженного состояния в процессе многослойной наплавки.

4. Установлена физическая природа высоких эксплуатационных свойств наплавленного слоя, заключающаяся в формировании мелкозернистой структуры, содержащей твердый раствор α – железа, карбиды и карбонитриды, в совершенстве наплавленного слоя (без трещин, пор и дефектов микроструктуры) и благоприятном напряженном состоянии.

5. Разработаны новые способы многослойной наплавки теплостойкими сплавами, основанные на применении низкотемпературного регулируемого термического цикла с использованием эффекта сверхпластичности, обеспечивающие получение наплавленного сплава в закаленном состоянии с низкой склонностью к образованию холодных трещин.

6. Для плазменной наплавки в среде азота разработаны порошковые проволоки, обеспечивающие химический состав и эксплуатационные свойства наплавленного слоя типа теплостойких сплавов высокой твердости (62 – 64 HRC) и износостойкости.

7. Доказано, что регулирование напряженного состояния в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации наплавленных валков позволяет значительно повысить их стойкость. Напряженное состояние наплавленных деталей в процессе изготовления регулируется в процессе наплавки по термическому циклу с применением эффекта сверхпластичности, в процессе эксплуатации – рекристаллизационным отжигом.

8. Предложена комплексная технология упрочнения деталей, включающая плазменную наплавку, термообработку после наплавки, азотирование, УПУО, рекристаллизационный отжиг в процессе эксплуатации изделия, восстановительную наплавку изношенного слоя.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость полученных в работе данных заключается в разработке физических основ формирования структуры и свойств наплавленных в защитно – легирующей среде азота теплостойких сплавов.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1) разработаны и реализованы способы многослойной плазменной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости в среде азота, обеспечивающие получение наплавленных сплавов в закаленном состоянии с низкой склонностью к образованию холодных трещин при высоком качестве наплавленного слоя;

2) разработаны порошковые проволоки для плазменной наплавки в защитно – легирующей среде азота, которые обеспечивают получение наплавленного слоя из теплостойких сплавов высокой твердости различного химического состава и эксплуатационных свойств;

3) разработаны способы регулирования напряженного состояния в наплавленных деталях на всех этапах их жизненного цикла;

4) предложен комплекс технических решений, позволяющий реализовать разработанные способы многослойной плазменной наплавки;

5) разработана комплексная технология упрочнения прокатных валков, включающая следующие операции: базовая технология – плазменная наплавка теплостойкими сплавами; дополнительные операции – высокотемпературный отпуск после наплавки, УПУО или азотирование после чистовой шлифовки, рекристаллизационный отжиг в процессе эксплуатации изделия, восстановительная наплавка изношенного слоя;

б) результаты работы используются обучающимися Сибирского государственного индустриального университета, апробированы на предприятиях промышленности, что подтверждено 6 актами внедрения.

Методология и методы исследования

Методы упрочнения поверхности за счет нанесения наплавленного слоя основаны на изменении фазового состава и формировании необходимой структуры и свойств материала поверхностного сплава. Экспериментальные исследования проводились с использованием оборудования кафедр материаловедения, литейного и сварочного производств, естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, центра коллективного пользования «Материаловедение» СибГИУ, Томского материаловедческого центра коллективного пользования при Национальном исследовательском Томском государственном университете.

В процессе выполнения работы использован комплексный метод, включающий аналитическую разработку способов наплавки теплостойкими сплавами и их экспериментальные исследования с помощью установок тепловой микроскопии ИМАШ-5С-69 и ИМАШ-20-75, экскалографа ЕАН-220 фирмы «Бальцерс», дилатометра Шевенара типа ДР-49; металлографические и физико-химические исследования свойств наплавленного металла проведены на световом микроскопе OLYMPUS GX-51, дифрактометре ДРОН-3, на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA 3 LMN, оснащенный приставкой X-Act ADD; микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проведен на приборе Leo EVO 50XVP (Карл Цейс, Германия). Прочностные свойства наплавленного слоя оценивали, определяя твердость поверхности по методам Роквелла и Шора, а микротвердость по методу Виккерса на микротвердомерах ПМТ-3 и HVS-1000A. Напряженное состояние оценивали методами тензометрии и МРСА. Использовали установки для плазменной наплавки, ультразвуковой обработки, газового азотирования; методики и исследовательское оборудование, разработанные автором или при его личном участии.

Положения, выносимые на защиту:

1) физические основы упрочнения наплавленных слоев из теплостойких сплавов, сформированных плазмой в среде азота, позволяющие обеспечить их высокую твердость и износостойкость. Физическую основу повышения твердости до 62 – 64 HRC обеспечивает плазменная наплавка в среде азота теплостойкими сплавами (типа P18, P6M5 и P2M9) и высокотемпературный отпуск. Дополнительное упрочнение наплавленного слоя основано на воздействии ультразвуковых колебаний при УПУО и применении процесса азотирования;

2) проявление эффекта повышенной пластичности (сверхпластичности), отражающееся на снижении временных напряжений в процессе мартенситного превращения в наплавленных теплостойких сплавах высокой твердости и возможность его применения для регулирования напряженного состояния в процессе многослойной наплавки;

3) новые способы многослойной плазменной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости с низкотемпературным подогревом и использованием эффекта сверхпластичности, обеспечивающие получение наплавленного

сплава в закаленном состоянии с низкой склонностью к образованию холодных трещин и дефектов макро – и микроструктуры;

4) новые наплавочные материалы, разработанные на базе теплостойких сталей высокой твердости, обеспечивающие различный химический состав (сплавы P18, P6M5 и P2M9 и др.) и высокие эксплуатационные свойства наплавленного сплава (твердость 62 – 64 HRC);

5) физические методы оценки напряженного состояния в наплавленных деталях с высокой твердостью поверхностного слоя и способы его регулирования в наплавленных деталях на всех этапах их жизненного цикла, позволяющие обеспечить высокую работоспособность при эксплуатации;

6) новые технические и технологические решения, позволяющие реализовать предложенные способы наплавки и комплексные технологии упрочнения наплавленных деталей, обеспечивающие их повышенную твердость и износостойкость.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждаются большим объемом экспериментального материала, полученного с применением современных методов физического материаловедения, корректным использованием математических и статистических методов; согласованным сравнительным анализом аналитических и экспериментальных результатов и зависимостей; сопоставлением полученных экспериментальных результатов с данными других исследователей; соответствием их известным теоретическим представлениям физики прочности; эффективностью предложенных технических и технологических решений, подтвержденных результатами промышленных испытаний и внедрением в производство. Достоверность и новизна технических решений подтверждена 15 охранными документами на объекты интеллектуальной собственности.

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на всероссийских и международных конференциях: Международной конференции «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий» (Новокузнецк, 1995); Международной научно – технической конференции «Структурная перестройка металлургии: экономика, экология, управление, технологии» (Новокузнецк, 1996); 5 – ой международной конференции «Актуальные проблемы материаловедения в металлургии» (Новокузнецк, 1997); Международной научно – технической конференции «Современные проблемы и пути развития металлургии» (Новокузнецк, 1997, 1998); Всероссийской научно – практической конференции «Металлургия на пороге XXI века: достижения и прогнозы» (Новокузнецк, 1999, 2000); 6 – ой Международной научно – практической конференции «Актуальные проблемы материаловедения» (Новокузнецк, 1999); Всероссийской научно – практической конференции «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении» (Новокузнецк, 2003); Международных научно – практических конференциях «Металлургия: реорганизация, управление, инновации и качество» (Новокузнецк, 2005, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013); Международных научно – практических конференциях «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» (Томск, 2009, 2011,

2012, 2013, 2014); Международных научно – практических конференциях «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» (Санкт-Петербург, 2011, 2012, 2013, 2016); 2 – ой Международной конференции «Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов» (Туапсе, 2013); Международных научно – практических конференциях «Современные концепции научных исследований» (Москва, 2014, 2015); Международных научно – практических конференциях «Современные тенденции развития науки и технологий» (Белгород, 2014, 2015); 9 – ой Международной научно – практической конференции «Научные перспективы XXI века, достижения и перспективы нового столетия» (Новосибирск, 2015); 7 – й Международной научно – практической конференции «Естественные и технические науки в современном мире (Курск, 2017); Международной конференции «Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов, посвященная 150 – летию со дня рождения академика А.Б. Байкова» (Курск, 2020); Научных чтениях им. чл. – корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва, 2020); Международном научном форуме «Наука и инновации – современные концепции» (Москва, 2020); Международной научно – практической конференции «Проблемы прочности и пластичности материалов в условиях внешних энергетических воздействий» (Новокузнецк, 2021); Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Минск, 2021); LXIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Тольятти, 2021); Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (Томск, 2021); XXII Международной научно – практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2021); 9 – ой Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов». К 100 – летию со дня рождения академика Б.К. Вайнштейна (Москва, 2021); III Международной научно-практической конференции «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении» (Кемерово, 2022).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 122 работы, в том числе 30 в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, 13 в статьях зарубежных научных изданий, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus, в трех монографиях, двух учебных пособиях, а также в 15 охранных документах на объекты интеллектуальной собственности.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует п. 6. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами, п. 7. Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния паспорта специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Личный вклад автора

Диссертационная работа обобщает результаты исследований, проведенных непосредственно автором и в сотрудничестве с коллегами. Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследований, участии в планировании, организации и проведении экспериментов, установлении зависимостей и закономерностей в процессе обработки и научном обобщении результатов, формулировке выводов и рекомендаций, написании статей, материалов докладов, патентов, внедрении в производство результатов исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 396 наименований и 6 приложений. Содержит 289 страниц машинописного текста, включая 69 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, перечислены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе *«Развитие и современное состояние применения теплостойких сталей высокой твердости для упрочнения деталей машин и механизмов»* на основании литературных данных показано, что физическая природа упрочнения наплавленного слоя определяется его структурно – фазовым и напряженным состояниями. Для упрочнения деталей широко применяются наплавочные материалы, разработанные на основе теплостойких сталей высокой твердости, типичными представителями которых являются классические стали типа 3X2B8 и PI8. Теплостойкие стали (быстрорежущие) приобретают высокую твердость (62 – 64HRC) и теплостойкость (620 – 630 °C) после закалки с температур 1230 – 1290 °C и отпуска при температурах 560 – 580 °C. Теплостойкие стали выбраны в качестве базовых для разработки и исследования наплавочных материалов для новых способов наплавки. Показана перспективность применения теплостойких сталей для упрочнения поверхностных слоев деталей, работающих в условиях абразивного износа и высоких температур.

Проведен анализ традиционной технологии наплавки теплостойкими сплавами. Показано, что традиционная технология наплавки, направленная на преодоление основной трудности при наплавке данными сплавами (образование холодных трещин), недостаточно эффективна и трудоемка. Основными недостатками при этом являются обязательное применение высокотемпературного подогрева до температуры 350 – 700 °C, замедленное охлаждение и, как следствие, необходимость проведения последующей сложной термической обработки для увеличения твердости и износостойкости. Проведение такой термической обработки многих крупногабаритных деталей связано с опасностью появления трещин и практически трудноосуществимо. Поэтому термообработка ограничивается отпуском для снятия напряжений. Наплавленные детали после отпуска имеют неравномерную твердость и низкую износостойкость. В результате эксплуатационные свойства дорогостоящих и дефицитных теплостойких сплавов используются далеко не полностью. Показано, что методы борьбы с

холодными трещинами по принципу уменьшения скорости охлаждения наплавленного металла недостаточно эффективны.

Проведенный анализ литературы показал, что имеются предпосылки для повышения эффективности применения в качестве наплавочных материалов теплостойких сталей высокой твердости и упрощения технологии их наплавки. Основой для разработки способов наплавки послужили работы И.И. Фрумина, Н.Н. Прохорова, М.И. Разикова, Е.М. Кузьмака, Н.П. Петровичева, О.А. Кайбышева, Н.С. Зубкова, С.Ф. Гнюсова, М. Кутсуна и др. Отмечено, что наиболее простым и эффективным способом борьбы с холодными трещинами и способом получения наплавленных сплавов с необходимым свойствами является регулирование термического цикла. Показано, что "идеальный" термический цикл при наплавке теплостойкими сплавами должен обеспечить предотвращение развития перегрева в околошовной зоне и возникновение грубой столбчатой структуры в металле наплавки; распад аустенита на низкопрочные продукты; пребывание наплавленного металла в процессе наплавки в аустенитном состоянии; релаксацию термических и структурных напряжений; возможность проведения закалки наплавленного металла непосредственно в процессе наплавки. Отмечены пути для достижения отдельных стадий "идеального" цикла наплавки путем комплексного легирования наплавленного сплава и регулирования термического цикла.

Высказано предположение, что новым и перспективным способом борьбы с холодными (закалочными) трещинами в процессе охлаждения наплавленного изделия может явиться использование эффекта повышенной пластичности (сверхпластичности) в момент протекания мартенситного превращения. Наплавленный теплостойкий сплав обладает высокой твердостью и износостойкостью, что затрудняет механическую обработку детали. Для ряда деталей механическая обработка может быть сведена к чистовой шлифовке рабочей поверхности. К таким деталям необходимо, в первую очередь, отнести рабочие валки станов холодной прокатки, которые и выбраны в качестве объекта для исследований. Материал рабочих валков и технология их изготовления должны обеспечить высокую твердость активного слоя 95 – 102 HSh (64 – 66 HRC), достаточную его глубину и высокое качество поверхности после обработки, создание в валках благоприятного напряженного состояния (ГОСТ 3541 – 79 действующий).

Комплекс высоких требований, предъявляемых к валкам холодной прокатки, относится преимущественно к активному слою валков, а свойства сердцевины валка не оказывают решающего влияния на его эксплуатационные свойства. Поэтому оптимальной конструкцией является биметаллический валок, у которого только активный слой выполнен из теплостойких сплавов, а сердцевина валка – из высокопрочной низколегированной стали.

Анализ рассмотренных способов упрочнения валков (применение электрошлакового переплава, высокотемпературной термомеханической поверхностной обработки, перезакалки изношенных валков, изготовление валков из металлокерамических твердых сплавов, применение составных

(бандажированных) валков и др.) показывает, что использование наплавки – наиболее приемлемый способ изготовления и упрочнения валков.

Проведенный анализ причин выхода из строя валков показал, что основным видом разрушения рабочих валков холодной прокатки является усталостное отслоение и выкрашивание поверхностных участков вследствие низкой твердости, недостаточной глубины активного слоя и неблагоприятного напряженного состояния.

Сформулирована цель и определены задачи исследования.

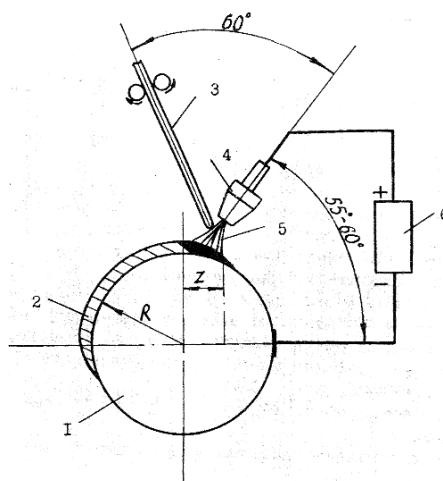
Во второй главе «Оборудование и материалы для плазменной наплавки теплоустойчивыми сплавами высокой твердости» для изготовления наплавленных деталей предложено использовать плазменную наплавку как способ нанесения износостойких покрытий, что объясняется рядом ее преимуществ перед другими способами наплавки: высокая производительность, широкая возможность легирования наплавленного металла, возможность применения различных наплавочных металлов, большой диапазон регулирования ввода теплоты в основной и наплавляемый металлы. Плазменная наплавка или наплавка сжатой (плазменной) дугой является высококонцентрированным источником нагрева и позволяет реализовать на практике первую стадию термического цикла, положенного в основу разработанных способов наплавки.

Степень ионизации газа в сжатых дугах составляет в зависимости от давления и температуры 1 – 10 %, а температура колеблется в пределах 5000 – 30000 °С. Основными характеристиками сжатой дуги как источника теплоты являются ее эффективная тепловая мощность, определяющая количество теплоты, вводимой в изделие за единицу времени, и распределение теплового потока по пятну нагрева.

Эффективная тепловая мощность сжатой дуги и эффективный коэффициент полезного действия (к.п.д.) зависят от параметров режима (тока дуги, расстояния от сопла плазмотрона до изделия, геометрии формирующего канала плазмообразующего сопла плазмотрона, расхода плазмообразующего газа и др.). Эффективный к. п. д. нагрева плазменной дугой составляет 70 – 80 %. Распределение плотности теплового потока сжатой дуги по пятну нагрева достаточно хорошо описывается законом нормального распределения Гаусса. Коэффициент сосредоточенности теплового потока возрастает с уменьшением диаметра и увеличением длины формирующего канала плазмообразующего сопла плазмотрона, поскольку при этом происходит сжатие столба дуги. Распределение теплового потока в пятне нагрева сжатой дуги во многом определяет ее технологические особенности, область применения, существенно влияет на температурное поле, геометрию наплавляемого валика, глубину проплавления основного металла, величину зоны структурных превращений. При наплавке в этой области развиваются процессы, формирующие свойства основного и наплавленного металла, размеры зоны сплавления основного металла с наплавленным металлом. Эти процессы в значительной степени влияют на кристаллизацию наплавленного сплава, диффузионные процессы, образование прослоек, рост зерна аустенита. Использование сжатой дуги

обратной полярности позволяет проводить очистку наплавляемой поверхности от загрязнений в процессе наплавки за счет эффекта катодного распыления, что обеспечивает необходимые условия смачиваемости поверхности изделия наплавляемым металлом и бездефектное формирование наплавленного слоя. При наплавке на обратной полярности достигается и меньшее разбавление наплавляемого металла основным.

Для упрочнения активного слоя деталей разработан технологический процесс плазменной наплавки на обратной полярности нетоковедущей порошковой проволокой и оборудование для его реализации. Для плазменной наплавки нетоковедущей порошковой проволокой была использована установка, состоящая из манипулятора, задней бабки, модернизированного аппарата А-384 и пульта управления. Источником питания служит выпрямитель аппарата АПР-401У4. Из серийно выпускаемого оборудования достаточно легко модернизируется для плазменной наплавки порошковыми проволоками установка УД-417. На установках применен плазмотрон, разработанный автором совместно с сотрудниками СибГИУ и успешно зарекомендовавший себя в эксплуатации. Схема процесса плазменной наплавки приведена на рисунке 1.



1 – изделие; 2 – наплавленный слой; 3 – присадочная проволока; 4 – плазмотрон;
5 – сжатая дуга; 6 – источник питания

Рисунок 1 – Схема процесса плазменной наплавки тел вращения

Для плазменной наплавки в защитно – легирующей среде азота разработаны порошковые проволоки, обеспечивающие получение наплавленного металла типа теплостойких сплавов высокой твердости таких, как Р18, Р6М5, Р2М9 и др. Порошковые проволоки предназначены для плазменной наплавки в защитно – легирующей среде азота с целью восстановления и упрочнения деталей машин и механизмов, для которых требуется особенно высокие твердость и износостойкость рабочих поверхностей. Возможность использования в качестве защитного газа азота взамен аргона позволяет снизить материальные затраты, повысить производительность наплавки, дополнительно упрочнить наплавленный металл

за счет легирования его азотом из газовой фазы непосредственно в процессе наплавки (до 0,06 – 0,08 % N).

Для устранения пористости, вызванной азотным кипением, в состав сердечника порошковой проволоки вводили алюминий, связывающий избыточный азот в нерастворимые в жидком металле соединения. В работе показано, что оптимальным с точки зрения получения максимальной вторичной твердости и предотвращения пористости является концентрация алюминия в наплавленном металле в пределах 0,8 – 1,0 %. Для уменьшения склонности к порообразованию, вызванному водородом, в состав сердечника порошковой проволоки дополнительно вводили кремнефтористый или алюмофтористый натрий, а также пыль фильтров алюминиевого производства, связывающие водород в соединение [HF].

Диаметр изготавливаемой порошковой проволоки 2,7 – 3,7 мм; коэффициент наплавки – 18 – 20 г/(А·ч); коэффициент разбрызгивания не более 3,5 %. Твердость направленного металла 52 – 60 HRC, твердость наплавленного металла после термической обработки (отпуска) – 62 – 64 HRC.

Реализацию разработанного термического цикла наплавки предложено проводить с помощью регулируемого подогрева сжатой дугой и регулируемого охлаждения специальными устройствами. Правильность выдвинутых предпосылок проверялась путем записи реальных термических циклов наплавки. Измерение и контроль теплового состояния изделия при плазменной наплавке тел вращения осуществляли при помощи специально разработанного устройства платина – платинородиевыми термопарами. Реальный термический цикл четырехслойной плазменной наплавки рабочего вала диаметром 100 мм полностью соответствует рекомендуемому.

В работе предложен алгоритм комплексного обеспечения качества наплавленных деталей, построенный на основе причинно – следственной диаграммы Исикавы с использованием метода расслоения 5М, учитывающего факторы, которые зависят от человека (man), машины (machine), материала (material), метода (method), измерения (measurement) на примере изготовления наплавленных прокатных валков. Анализ диаграммы показал, что для обеспечения качественной наплавки теплостойкими сплавами на более высоком уровне, чем существующий ранее, прежде всего необходимо разработать принципиально новые методы наплавки и наплавочные материалы. В способах наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости для предотвращения образования холодных трещин предлагается использовать эффект повышенной пластичности (сверхпластичности) и термический цикл с низкотемпературным предварительным и сопутствующим подогревом.

Улучшить свойства наплавленного высоколегированного сплава, а также обеспечить благоприятное напряженное состояние позволяет применение дополнительно после наплавки высокотемпературного отпуска. Так, твердость металла после наплавки составляет 52 – 57 HRC, а после отпуска на вторичную твердость достигает 62 – 64 HRC. Применив дополнительно после наплавки УПУО или азотирование, можно повысить твердость до 64 – 66 HRC. Резервом

повышения качества наплавленных деталей является применение рекристаллизационного отжига в процессе эксплуатации изделия.

В третьей главе «Исследование физических основ способов многослойной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости» рассмотрены физические основы способов многослойной наплавки теплостойкими сплавами и исследованы основные параметры их термических циклов.

При разработке способов многослойной наплавки теплостойкими сплавами было учтено влияние водорода на образование холодных трещин в наплавленном металле. Для этого в работе определено содержание водорода в наплавленном металле различного состава в широком диапазоне режимов наплавки. Содержание водорода в наплавленном металле определяли методом вакуум-нагрева на установке Баталина и на эксхалографе ЕАН-220 фирмы «Бальцерс». Установлено, что содержание водорода колеблется в пределах 0,3–0,6 см³/100 г наплавленного металла при допустимом содержании водорода в высоколегированном наплавленном металле 2 см³/100 г металла.

Проведенные исследования позволяют предположить, что в образовании холодных трещин в теплостойком металле главную роль играют закалочные явления, связанные с протеканием мартенситного превращения. Этот вывод подтверждают также данные Ю.А. Геллера о низком содержании водорода в теплостойких сталях. Поэтому при разработке способов наплавки теплостойкими сплавами необходимо особое внимание уделить выбору термического цикла наплавки и изучению протекания мартенситного превращения в них.

Анализ существующих предпосылок позволил выработать требования к "идеальному" термическому циклу наплавки и теоретически разработать способы многослойной наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости, в которых для предотвращения образования холодных трещин предложено использовать эффект сверхпластичности в момент протекания мартенситного превращения. Основой способов, позволяющих получить наплавленный металл в закаленном состоянии без трещин и с низким уровнем остаточных напряжений, является термический цикл наплавки, особенностями которого является ограниченное время пребывания наплавленного металла в высокотемпературной зоне, высокие скорости охлаждения металла в области минимальной устойчивости аустенита, сохранение металла в аустенитном состоянии до завершения процесса наплавки путем применения предварительного подогрева с температурой $M_n + (50 \div 100)^\circ\text{C}$ (рисунок 2).

Для уменьшения уровня накопившихся временных напряжений предложено кратковременное снижение температуры подогрева на 20 – 100 °C ниже точки M_n . Снижение температуры подогрева в процессе многослойной наплавки приводит к частичной релаксации временных напряжений, происходящей в основном за счет эффекта сверхпластичности в момент мартенситного превращения. Релаксация временных напряжений предотвращает образование трещин в процессе многослойной наплавки. Уровень релаксации временных напряжений обеспечивается временем выдержки t_v при температурах ниже точки M_n , которое определяется из соотношения $t_{10} < t_v < t_{30}$, где

t_{10} – время, необходимое для образования 10 % мартенсита; t_{30} – время, необходимое для образования 30 % мартенсита.

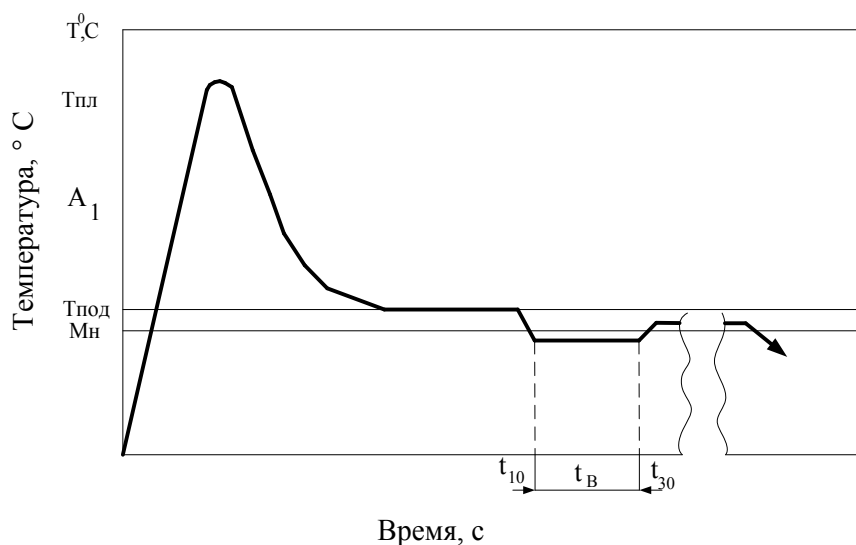


Рисунок 2 – Схема термического цикла многослойной наплавки
теплостойкими сплавами

Охлаждение наплавленных слоев и изотермическая выдержка в интервале мартенситного превращения приводит к термической стабилизации аустенита. При этом наплавленный металл в процессе наплавки на 70 – 90 % состоит из стабилизированного аустенита. При увеличении количества аустенита снижаются напряжения, увеличивается пластичность, уменьшаются объемные изменения, деформации и чувствительность к трещинам. Длительность выдержки зависит от химического состава наплавленного металла и может быть определена для сплава каждой конкретной марки экспериментально или по диаграмме распада переохлажденного аустенита.

При выдержке меньшей, чем в указанных пределах, когда образуется менее 10 % мартенсита, не происходит существенной релаксации временных напряжений и происходит образование трещин. Релаксация напряжений необходима для приостановки мартенситного превращения и стабилизации аустенита. При увеличении времени выдержки более t_v существенно снижается пластичность наплавленного металла из-за образования большого количества мартенсита, что приводит к образованию трещин. Для получения однородной структуры в металле всех наплавленных слоев охлаждение и выдержку осуществляют после наложения каждого слоя.

При наплавке по описанному способу трещины в наплавленном слое отсутствуют, а твердость составляет 52 – 57 HRC. Для увеличения твердости до 62 – 64 HRC после наплавки необходим высокотемпературный отпуск. Для менее ответственных деталей, чем прокатные валки, процессы наплавки и отпуска можно совместить. Для этого в работе предложен способ наплавки, по которому непосредственно после наплавки последнего слоя проводят

высокотемпературный отпуск на наплавочной установке с температурой отпуска $T_{отп}$, находящейся в интервале температура рекристаллизации основного металла – температура отпуска наплавленного металла. Способ многослойной наплавки предотвращает образование трещин в процессе наплавки и позволяет увеличить твердость до 59 – 60 HRC.

В работе проведены лабораторные исследования с целью изучения особенностей предложенных способов и выработки практических рекомендаций для их реализации.

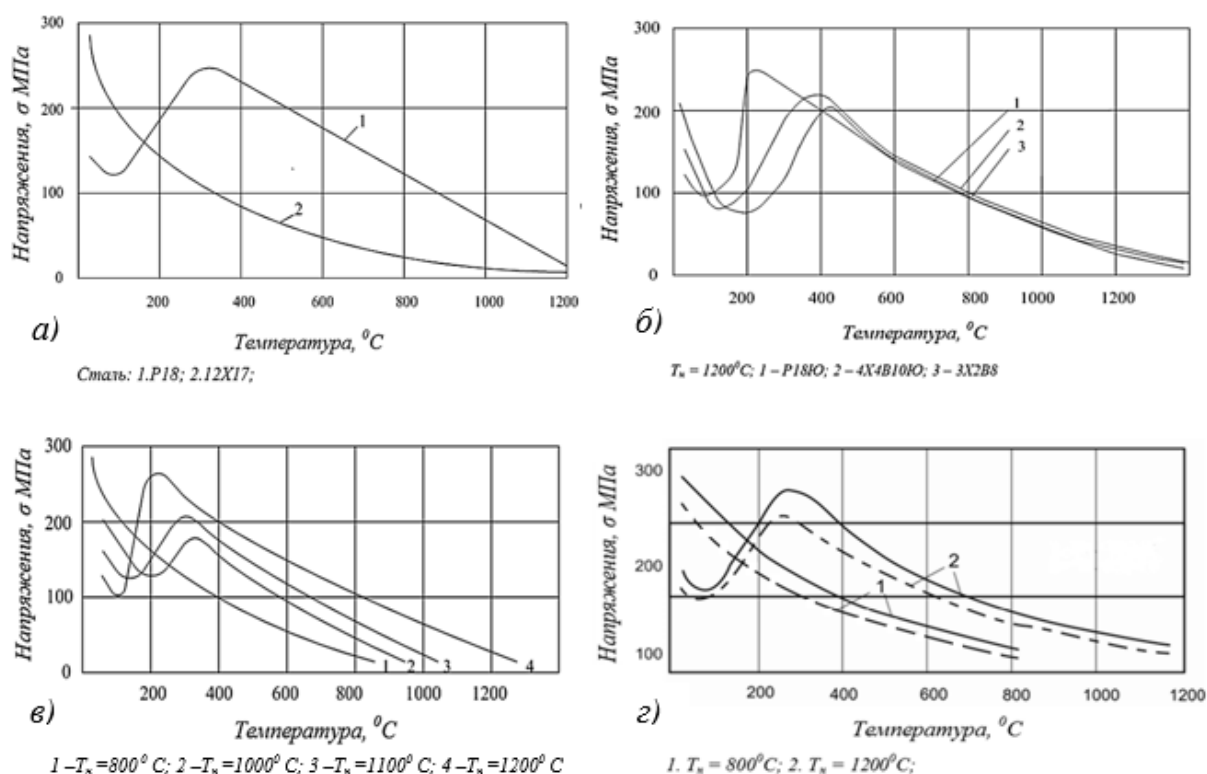
Исследовано проявление эффекта сверхпластичности в теплостойком наплавленном металле и возможность его применения для регулирования уровня временных напряжений. Изучены процессы релаксации временных напряжений в образцах из теплостойких наплавленных сплавов при условии постоянства длины образца, сохраняемой при изменении температуры. Для этого образцы сечением 9 мм² и длиной рабочей части 46 мм, приготовленные для металлографических испытаний, нагревались в вакуумной камере установки до аустенитного состояния и закреплялись при различной температуре так, чтобы их длина при последующем охлаждении не изменялась. Постоянство длины образца достигалось с помощью электромеханического привода системы нагружения установки. Условия нагрева и охлаждения имитировали термический цикл наплавки. Неизменность длины обуславливала соответствующий рост упругопластической деформации образца при охлаждении. Напряжения в образцах в процессе испытаний непрерывно измеряли с помощью тензометрических датчиков с точностью $\pm 1,5$ %. Температуру замеряли с помощью платина-платинородиевой термопары с точностью ± 1 %. Кинетика формирования временных напряжений в жестко закрепленных образцах непосредственно фиксировалась на двухкоординатном планшетном потенциометре ПДП-4.

Показано, что при охлаждении образцов из теплостойкого сплава наблюдается эффект повышенной пластичности при фазовом превращении, который проявляется в снижении временных напряжений в мартенситном интервале (рисунок 3, а). Максимум на кривой формирования временных напряжений соответствует температурам начала мартенситного превращения, минимум – температурам выше температуры конца мартенситного превращения ($M_K^{усл} > M_K$), когда степень превращения уже достаточно велика и за счет образования прочного "каркаса" из многочисленных мартенситных кристаллов возрастает предел текучести, а пластичность сплава начинает уменьшаться. Соответствие температур максимальных и минимальных значений временных напряжений температурам точек M_K и M_n подтверждено методами измерения удельного электросопротивления, дилатометрического анализа и литературными данными. Отмечено, что в интервале мартенситного превращения временные напряжения снижаются в 1,5 – 2,0 раза по сравнению с величиной напряжений, накопившихся в аустенитной области. При дальнейшем охлаждении ниже $M_K^{усл}$ напряжения снова возрастают до 120 – 180 МПа за счет термической усадки металла. При охлаждении образцов из стали 12X17 ввиду отсутствия фазового превращения релаксации напряжений не наблюдается, они непрерывно увеличивают-

ся и значительно превышают величину напряжений в образцах из теплостойкого сплава, претерпевшего мартенситное превращение.

Релаксация напряжений в интервале температур мартенситного превращения происходит в результате объемных изменений при $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении, дополнительных линейных изменений в направлении действия напряжений вследствие образования текстурованного мартенсита и повышенной пластичности сплава в момент превращения.

В работе доказана определяющая роль сверхпластичного состояния в релаксации временных напряжений в образцах теплостойких сплавов высокой твердости. Для этого проведено определение величины относительного удлинения при охлаждении нагруженных по различным схемам образцов. Значения величины относительного удлинения перед разрушением образцов из сталей 3Х2В8 и Р18 в 5 – 10 раз превышали величину относительного удлинения при условии компенсации температурного укорочения.



а – формирование временных напряжений в образцах из сплава Р18 и стали 12Х17; б – влияние комплексного легирования на формирование временных напряжений в металле; в – кинетика формирования временных напряжений в образцах из сплава Р18 в зависимости от температуры нагрева; г – влияние температуры нагрева на формирование временных напряжений в образцах из кованого (—) и наплавленного (—.—) сплава Р18

Рисунок 3 – Формирование временных напряжений в образцах из теплостойких сплавов

Исследования эффекта сверхпластичности показали, что величина остаточных напряжений зависит от температур мартенситного превращения, от степени легирования твердого раствора и, соответственно, связана с кинетикой процесса. По – видимому, оказывает влияние морфологический тип и общее

количество образующихся кристаллов мартенсита. При этом уровень остаточных напряжений зависит от величины интервала температура окончания релаксации временных напряжений $M_K^{ysl} - T_K$ – комнатная температура T_K . Чем меньше интервал $M_K^{ysl} - T_K$, тем меньшую величину имеют остаточные напряжения. Полученные данные позволили заключить, что эффект сверхпластичности можно использовать для регулирования напряженного состояния. Для этого необходимо соответствующим легированием наплавленного металла снизить положение температур M_n и M_K^{ysl} . Тогда временные напряжения, накопившиеся при охлаждении металла в аустенитной области, релаксируются в интервале мартенситного превращения и не получают дальнейшего развития вследствие малой величины интервала $M_K - T_K$ (рисунок 3, б – г).

Исследовано влияние комплексного легирования на формирование временных напряжений в наплавленном металле, легированном углеродом от 0,3 до 1,2 %, хромом от 2 до 4,5 %, вольфрамом от 8 до 18 %, алюминием от 0,5 до 2,0 %, кобальтом от 0,5 до 2,0 % и никелем от 0,5 до 2,0 %. Показано, что совместное легирование углеродом, хромом, вольфрамом, алюминием и азотом приводит к значительному уменьшению степени дисперсности мартенсита. От степени дисперсности мартенсита зависит полнота использования мартенситного превращения в качестве механизма релаксации внутренних пиковых напряжений. Легирование никелем приводит к возрастанию количества остаточного аустенита. Показано, что наиболее низкий уровень остаточных напряжений наблюдается у наплавленного сплава P18Ю, дополнительно легированного 1 % алюминия, 0,080 % азота и 1 % никеля. Определены точки начала мартенситного превращения и рекомендована температура подогрева (230 – 280 °C).

Исследования влияния скорости охлаждения на релаксацию временных напряжений показали, что релаксация временных напряжений наблюдается только при охлаждении со скоростями, превышающими критические скорости закалки, когда реализуется механизм бездиффузионного мартенситного превращения. Уменьшение скорости охлаждения, традиционно рекомендуемое для увеличения стойкости наплавленного металла против образования холодных трещин, приводит к диффузионному распаду аустенита на ферритокарбидную смесь. Невозможность осуществления релаксации приводит к непрерывному росту временных напряжений. Показано, что в исследованных теплостойких сплавах повышенные скорости охлаждения способствуют сохранению высоколегированного аустенита и приводят к релаксации временных напряжений за счет эффекта сверхпластичности в момент перестройки кристаллической решетки. Высокие скорости охлаждения позволяют получать наплавленный сплав в закаленном состоянии при отсутствии холодных трещин.

В четвертой главе «Исследование структурно – фазового состояния поверхностного слоя наплавленных теплостойких сплавов, методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа» исследовано влияние основных стадий предложенного термического цикла наплавки на упрочнение наплавленных сплавов с целью получения высокой твердости и износостойкости. Установлено, что многослойная плазменная наплавка в среде

азота приводит к неравномерности распределения твердости и микротвердости по сечению наплавленного слоя (рисунок 4). Применение высокотемпературного отпуска позволяет устранить неравномерность твердости и микротвердости, приводит к повышению микротвердости. Проведенные исследования отдельных зон наплавленного металла подтверждают это заключение.

Неравномерность распределения микротвердости объясняется разбавлением высоколегированного наплавленного металла низколегированным металлом основы в процессе многослойной плазменной наплавки цилиндрической заготовки по винтовой линии и связана со сложным термическим циклом нагрева и охлаждения. Малая глубина проплавления основного металла (около 0,5 мм) и низкая доля основного металла в наплавленном (менее 10 %) позволяют получать наплавленный сплав заданного химического состава уже во втором слое наплавки.

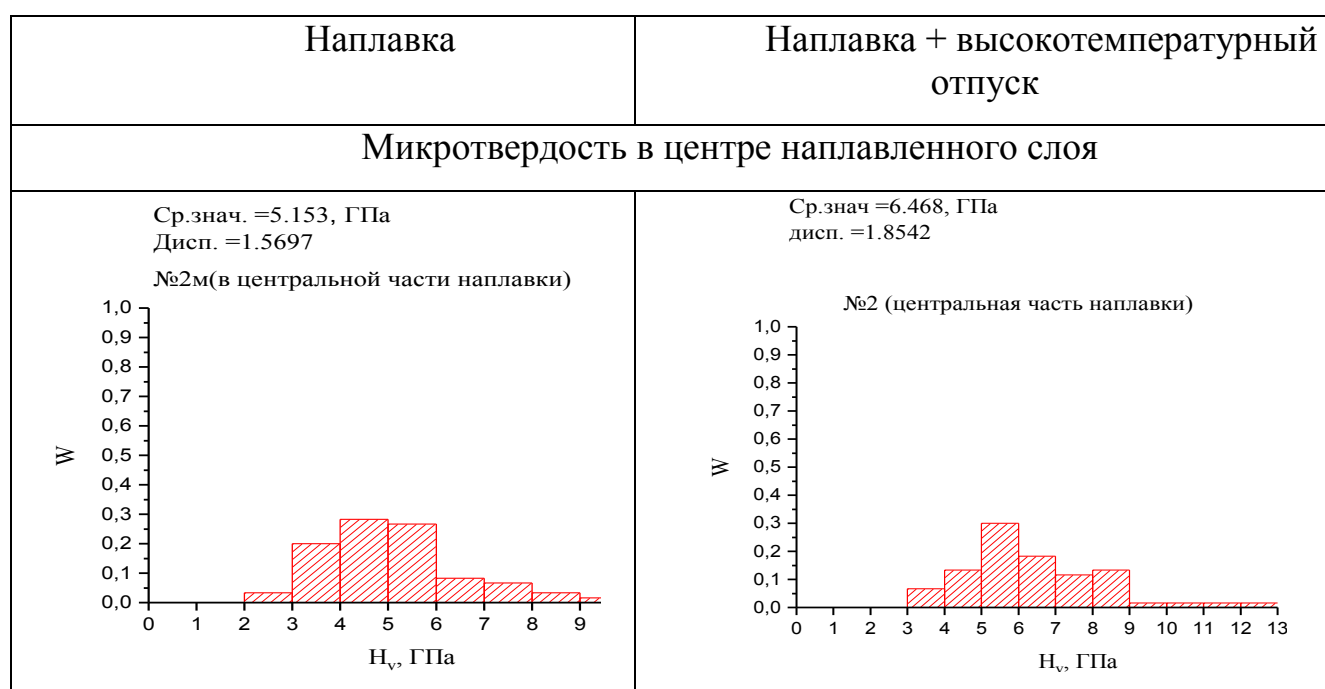


Рисунок 4 – Распределение микротвердости в центральной части наплавленного слоя после наплавки и высокотемпературного отпуска

В связи с этим обстоятельством микротвердость металла в средней части наплавки и на поверхности (четвертый и пятый слой наплавленного сплава) составляет в состоянии после наплавки 4,11 и 5,15 ГПа соответственно. Высокотемпературный отпуск приводит к превращению остаточного аустенита, выделению карбидов и карбонитридов и к увеличению микротвердости поверхностного слоя до средних значений 5,7 – 6,5 ГПа, а также частично устраняет дендритную структуру. Наблюдаемая неоднородность микротвердости свидетельствует о сложном структурно – фазовом состоянии наплавленного металла. Как показали исследования, полностью устранить неоднородность микротвердости термической обработкой (высокотемпературным отпуском) не удастся. Частично эта проблема может быть решена путем применения ультразвуковой упроч-

няющей обработки, а также нанесением на поверхность электровзрывных покрытий импульсной плазменной обработкой.

Исследования структурно – фазового состояния проводили методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на приборе ДРОН – 3. Съёмка дифрактограмм исследуемых наплавленных образцов проводилась при непрерывном 2θ -сканировании с фокусировкой по Брэггу–Брентано в излучении медного анода (длина волны излучения $\text{Cu K}\alpha$ $\lambda = 1,54051 \text{ \AA}$). Идентификация кристаллических фаз проводилась с использованием базы данных JCPDS PDF–2 структурного банка данных ICDD. Методом РСА был определен фазовый состав сплавов, параметры кристаллической решетки, микродеформация кристаллической решетки ($\Delta d/d$), размер блоков когерентного рассеяния (ОКР).

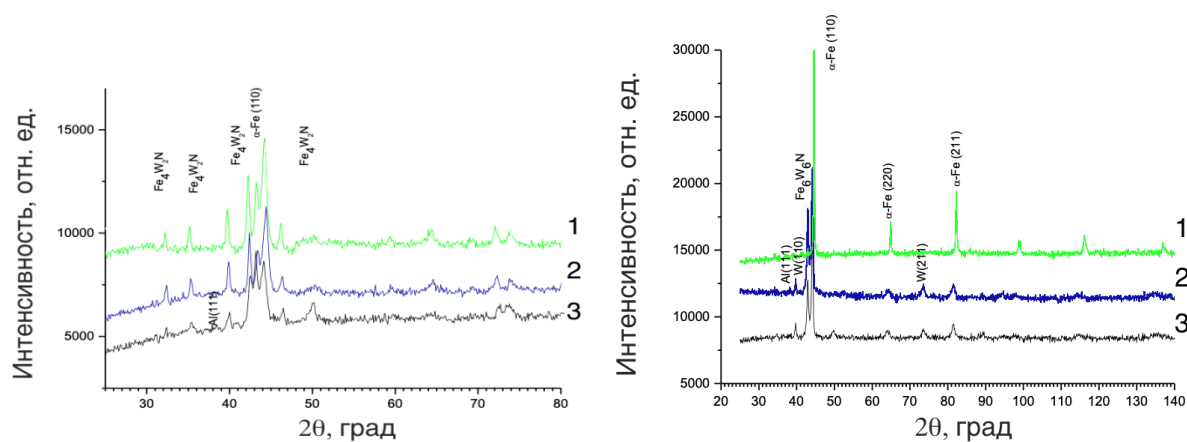
Установлено, что все наплавленные сплавы в исходном состоянии имеют в своем составе твердый раствор α – железа и соединения на основе железа, вольфрама и молибдена переменного состава $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{N}$, FeWN_2 и $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$. Все эти соединения имеют кубическую структуру $\text{Fd} - 3m$ с большим параметром кристаллической решетки, около 11 \AA . Соединения на основе углерода и азота, как правило, изоморфны, различить их достаточно трудно, а скорее всего, они оба присутствуют в этих соединениях. Как правило, это метастабильные фазы. Оба эти элемента образуют твердые растворы внедрения. Присутствуют также твердые растворы на основе алюминия и фаза AlN .

На рисунке 5 приведены участки дифрактограмм для сплавов после наплавки и наплавки с высокотемпературным отпуском. Видно, что дифрактограммы после наплавки имеют достаточно сложный характер, что свидетельствует о неравновесном состоянии материала. Все три состояния имеют один и тот же фазовый состав. Соотношение фаз в наплавленном сплаве различное.

В случае наплавленных сплавов с последующим высокотемпературным отпуском существенно уменьшилось количество линий на рентгенограмме, что говорит о том, что уменьшилось количество метастабильных неравновесных фаз и произошли структурно – фазовые превращения. Основными фазами являются твердый раствор α – железа и сложный карбид, в состав которого входят хром, алюминий, вольфрам, имеющий формулу $(\text{Fe,Cr,Al,W})_6\text{C}$. Присутствует карбонитрид $\text{Fe}_6\text{W}_6\text{NC}$. Это соединение так же имеет кубическую структуру $\text{Fd} - 3m$, а параметр кристаллической решетки составляет $10,96 \text{ \AA}$. Для основной фазы на поверхности образца параметр кристаллической решетки один и тот же для наплавки и для наплавки с высокотемпературным отпуском, т.е. на поверхности наплавки сохраняется дополнительное количество легирующих элементов, которые увеличивают параметр решетки α – железа.

Для остальных состояний в исходном наплавленном сплаве параметр кристаллической решетки примерно один и тот же и близок к табличному значению для α – железа ($2,866 \text{ \AA}$). Что касается наплавки с последующим отпуском, то здесь завышенное значение параметра решетки имеют все исследованные зоны. Это свидетельствует о перераспределении легирующих элементов по объему сплава и насыщению его элементами внедрения, такими как углерод и азот.

Установлено, что в наплавленных сплавах основными фазами являются твердый раствор α – железа, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия. Высокотемпературный отпуск наплавленного сплава приводит к изменению фазового состава, изменению параметра кристаллической решетки, размеров блоков когерентного рассеяния, изменению внутренних упругих напряжений.



а – состояние после наплавки

б – наплавка плюс высокотемпературный отпуск

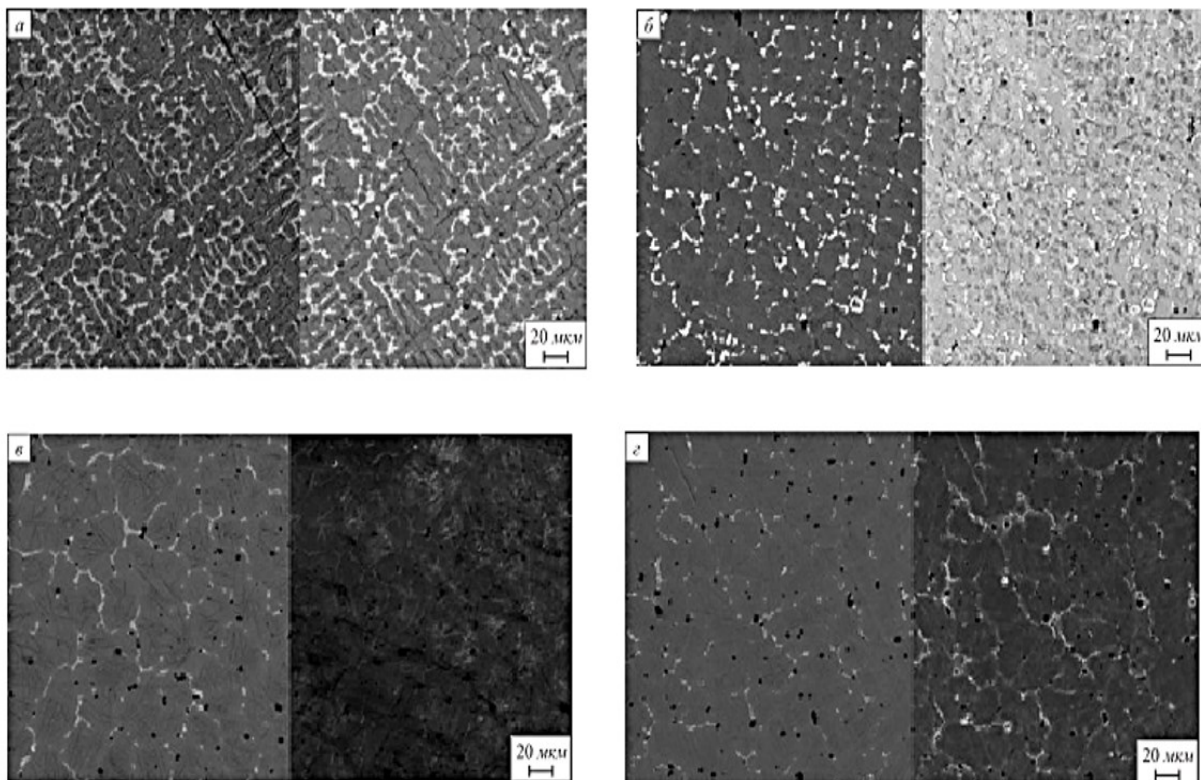
1 – зона сплавления основного металла с наплавленным металлом со стороны наплавки; 2 – центральная часть наплавки; 3 – поверхность

Рисунок 5 – Участки дифрактограмм наплавленного сплава Р18Ю

Исследование структурно – фазового состояния наплавленного металла и зоны сплавления проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на приборе Leo EVO 50XVP (Карл Цейс, Германия) на травленных шлифах в четырех местах (поверхность, центральная часть наплавки, зона сплавления со стороны металла, зона сплавления со стороны наплавки) (рисунки 6 и 7).

На рисунке 6 показаны изображения травленных шлифов, приготовленных после плазменной наплавки без термообработки. На рисунке 6, а (поверхность) наблюдается явно выраженная ориентированная дендритная структура. Основная часть поверхности материала представляет собой перлитные зерна. В стыках и по границам зерен располагается цементит, который имеет сложный состав типа $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al}, \text{W})_3\text{C}$ и соединения на основе железа, вольфрама и молибдена, переменного состава $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{N}$, FeWN_2 и $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$. Присутствуют также твердые растворы на основе алюминия и фаза AlN . Другие три части образца (рисунки 6, б, в, г) существенно не отличаются от морфологии поверхности, но ориентированность дендритной структуры менее выражена.

Как видно из рисунка 7, после наплавки с высокотемпературным отпуском ориентированная дендритная структура практически не просматривается. Видны более четкие границы перлитных зерен. В стыках и по границам зерен располагается цементит. Цементит имеет сложный состав типа $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al}, \text{W})_3\text{C}$. Количество зерен сложного цементита в стыках зерен и по их границам существенно меньше.



а — поверхность; б — центральная часть наплавки; в, г — зона сплавления основного металла с наплавленным металлом со стороны наплавки и со стороны основного металла
Рисунок 6 – Структура наплавленного сплава Р18Ю после наплавки

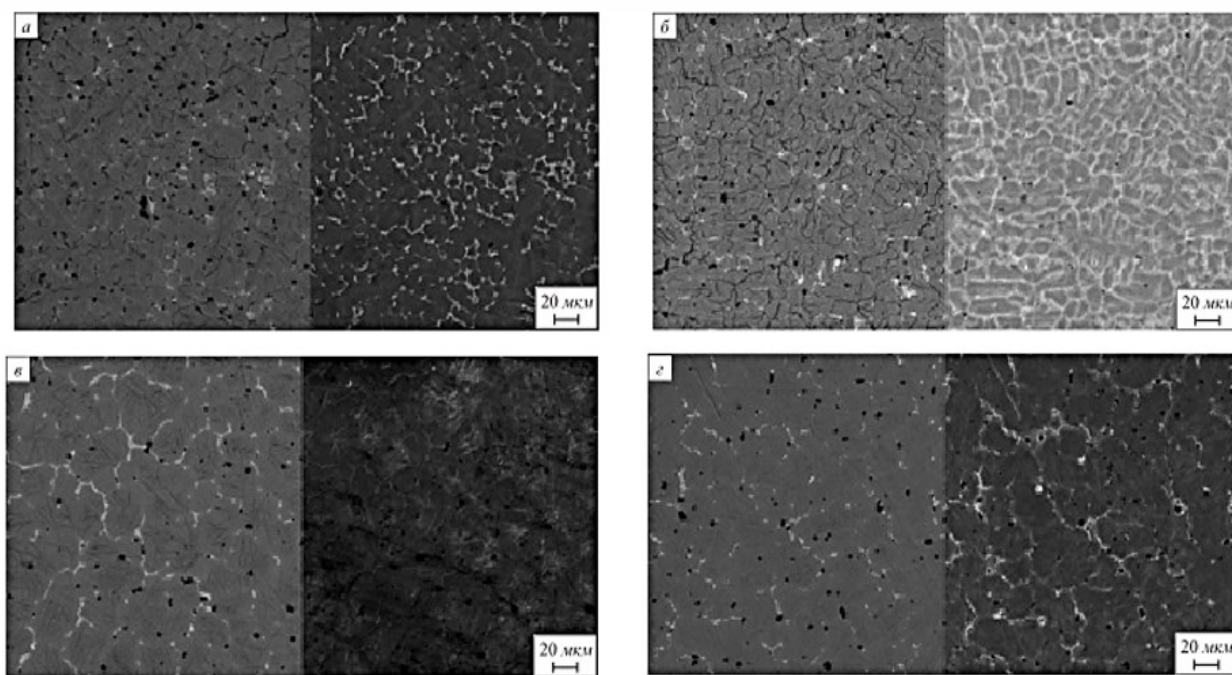


Рисунок 7 – Структура наплавленного сплава Р18Ю после наплавки и высокотемпературного отпуска (обозначения те же, что на рисунке 6)

Исследования, проведенные методом МРСА, показали, что в сплавах после наплавки и наплавки с последующим высокотемпературным отпуском наблюдается равномерное распределение практически всех легирующих элементов С, N, Al, Si, V, Cr, Fe, Mo, W (рисунок 8). Это подтверждает предположение о наличии сложного состава цементита типа $(\text{Fe,Cr,Al,W})_3\text{C}$, что характерно для всех сплавов. Количество легирующих элементов, определенных методом МРСА, Cr, Mo, W, V, Al, N колеблется около значения для исходного сплава P18Ю для всех образцов.

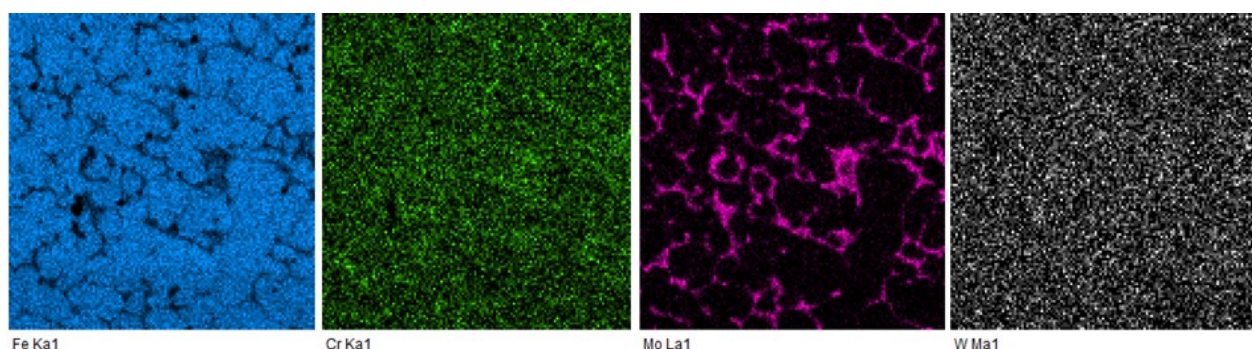


Рисунок 8 – Распределение элементов Fe, Cr, Mo, W в характеристическом излучении (сплав P18Ю)

Исследования методом РЭМ показали, что способ изготовления (плазменная наплавка с высокотемпературным отпуском) обеспечивает все основные требования к поверхности рабочих валков холодной прокатки, что подтверждают результаты испытаний партии наплавленных валков.

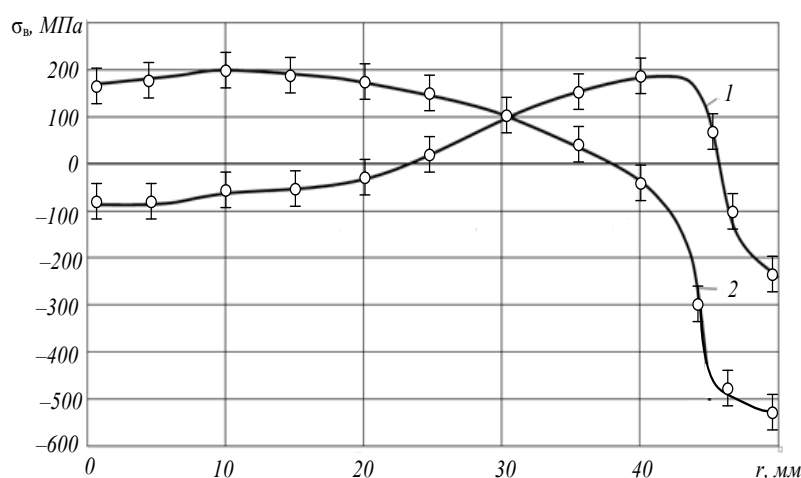
Показано, что наплавленный сплав P18Ю, дополнительно легированной 1,0 % алюминия и 0,080 % азота, сохраняет мелкое зерно аустенита. Рост зерна в теплостойком сплаве задерживается карбидами, а также частицами нитридов и оксидов (AlN и Al_2O_3), которые располагаются преимущественно по границам зерна.

Сохранение мелкого зерна аустенита играет определенную роль в повышении стойкости наплавленного металла против образования холодных трещин. На основе лабораторных исследований для наплавки по разработанному способу рекомендован сплав P18Ю, дополнительно легированной азотом, алюминием и никелем, обладающий высокой твердостью (64 – 66 HRC) и низкой склонностью к образованию холодных трещин.

Данные, полученные при лабораторных испытаниях, были проверены путем прямых натурных испытаний свойств металла, полученного при наплавке по разработанным способам. Оптимальное сочетание свойств наплавленного металла и низкого уровня остаточных напряжений обеспечивала плазменная наплавка порошковой проволокой ПП–P18ЮН.

В пятой главе «Оценка напряженного состояния и способы его регулирования в прокатных валках, изготовленных с применением плазменной наплавки активного слоя теплостойкими сплавами» проведено исследование напряженного состояния в наплавленных валках и влияния дополнительных упрочняющих факторов на свойства теплостойких сплавов высокой твердости.

Одним из способов повышения надежности и долговечности рабочих валков станов холодной прокатки является создание в них благоприятного напряженного состояния. Для определения величины и характера распределения остаточных напряжений в наплавленных рабочих валках холодной прокатки с высокой твердостью активного слоя (55 – 64 HRC) в работе использован метод канавки, наносимой электроэрозионной резкой медным пластинчатым электродом, при этом диски для исследований из наплавленного валка вырезаются анодно-механической резкой. По усовершенствованной методике в работе было определено напряженное состояние в наплавленных и закаленных валках холодной прокатки. На рисунке 9 приведена эпюра остаточных напряжений в рабочих валках холодной прокатки, изготовленных по традиционной технологии из стали 9Х (1) и изготовленных с применением наплавки (2).



1 – валок, изготовленный с применением закалки; 2 – наплавленный валок

Рисунок 9 – Эпюра остаточных напряжений в рабочих валках

Как видно из приведенных данных, напряженное состояние в наплавленных валках более благоприятно для их работоспособности, чем изготовленных по традиционной технологии. В закаленных валках наблюдается резкий пик перехода сжимающих напряжений в растягивающие, что, как известно, неблагоприятно сказывается на их работоспособности. Опытные – промышленные партии наплавленных валков при испытаниях показали повышенную (в 1,5 – 2,0 раза) износостойкость. Повышение износостойкости наплавленных валков можно объяснить наличием в структуре мелкодисперсных карбидов Me_6C , MeC , карбонитридов и нитридов AlN , а также созданием благоприятного напряженного состояния и сжимающих напряжений в поверхностном слое.

Характеристики напряженного состояния наплавленного в среде азота теплоустойчивого сплава Р18Ю после наплавки и наплавки с отпуском, определенные методом рентгеноструктурного анализа, представлены в таблице.

Ширина рентгеновских линий позволяет определить искажения кристаллической решетки двух типов: во – первых, внутренние упругие напряжения, во

– вторых, размер областей когерентного рассеяния (ОКР). Последняя величина является обратной по отношению к расстоянию между дефектами. Результаты эксперимента приведены в таблице (где $\Delta d/d$ – микроискажения кристаллической решетки; d – межплоскостное расстояние; Δd – изменение межплоскостного расстояния; D – размер областей когерентного рассеяния). Из таблицы видно, что ОКР изменяется в пределах от 25 до 100 нм, а $\Delta d/d$ в пределах от 1,7 до 4,8. Это соответствует внутренним упругим напряжениям $\tau = \Delta d/d \times E$ (где E – модуль Юнга), в среднем равным 540 – 940 МПа. Уровень внутренних упругих напряжений достаточно высокий в наплавленном сплаве непосредственно после наплавки (940 МПа) и примерно в два раза напряжения меньше в образцах с последующим высокотемпературным отпуском (540 МПа), который приводит к снижению напряжений. Расстояние между дефектами невелико и составляет 25 – 50 нм в исходном сплаве и около 100 нм в термообработанном сплаве. Отпуск приводит к уменьшению дефектов в сплаве, что снижает уровень внутренних упругих напряжений.

Таблица – Характеристики напряженного состояния наплавленного в среде азота теплостойкого сплава P18Ю

Режимы обработки	$a, \text{\AA}, \alpha\text{-Fe}$	$D, \text{нм}, \alpha\text{-Fe}$	$\Delta d/d \cdot 10^{-3}, \alpha\text{-Fe}$	$\tau = \Delta d/d \times E, \text{МПа}$
Наплавка	2,885	25	3,3	730
	2,869	50	4,8	1060
	2,868	50	4,7	1040
Наплавка с отпуском	2,887	100	1,7	380
	2,880	100	3,0	660
	2,887	100	3,5	770

В работе рассмотрены мероприятия, направленные на повышение стойкости наплавленных рабочих валков холодной прокатки путем регулирования в них напряженного состояния в процессе изготовления и эксплуатации. По предложенному термическому циклу, обеспечивающему регулирование напряженного состояния в процессе изготовления, были наплавлены рабочие валки стана холодной прокатки диаметром 100 мм.

Большая часть испытанных валков (около 70 %), показав высокую стойкость, вышла из строя по причине разрушения рабочей поверхности. Очаги усталостного разрушения располагаются в ослабленной зоне сварного соединения – зоне сплавления основного металла и наплавленного, в которой резко меняются свойства металла. Второй причиной преждевременного выхода валков из строя явились отколы поверхностного слоя. Известно, что склонность к отслоениям и отколам поверхности бочки вала зависит главным образом от состояния поверхностного слоя, который формируется в процессе изготовления и эксплуатации. Валки, вышедшие из строя по отслоениям, отколам и естественному износу изготовлены в аналогичных условиях, поэтому, на наш взгляд, ос-

новная причина повреждения поверхности связана с неправильной эксплуатацией валков. Дополнительные резервы повышения качества наплавленных деталей заложены в применении рекристаллизационного отжига в процессе их эксплуатации. Высокотемпературный отжиг приводит пластически деформированный металл в более устойчивое структурное состояние. При этом за счет явления рекристаллизации полностью снимается наклеп зоны сплавления основного металла с наплавленным металлом, а структура металла и его свойства становятся аналогичными свойствам валка, который не был в эксплуатации. Увеличение стойкости наплавленных валков позволяет, не смотря на введение дополнительной термической обработки в процессе эксплуатации валков, снизить расход валков в 1,6 – 1,9 раза и существенно снижает потребность в валках и затраты на их производство.

Использование наплавленного металла для последующего газового азотирования в атмосфере газообразного аммиака (температура нагрева 560 °С, время выдержки 20 – 30 часов, степень диссоциации 35 – 45 %) показали, что на наплавленных высоколегированных сплавах Р18Ю не удастся получить глубину слоя более 0,20 – 0,25 мм с твердостью после азотирования порядка 1100 – 1240 НV. Применение в технологии азотирования для наплавленного теплостойкого сплава целесообразно в тех случаях, когда требуются повышенные твердость и особенно, коррозионная стойкость.

Одним из возможных способов увеличения твердости наплавленного теплостойкого сплава является упрочняющая ультразвуковая обработка. В работе проводилась ультразвуковая обработка дисков, вырезанных из наплавленных прокатных валков диаметром 100 мм, рабочий слой которых соответствовал сплаву Р18Ю. Использовался ультразвуковой станок модели 4Д772Э, обеспечивающий рабочую частоту задающего генератора в пределах от 20,5 до 27 кГц. В качестве инструмента применялся составной концентратор с экспоненциальным переходным участком (коэффициент усиления 10) из стали 35 с наконечником из стали ШХ15 диаметром 8 мм.

Проведенные исследования показали, что влияние ультразвуковой обработки на упрочнение наплавленного сплава нельзя оценивать однозначно. При определенных значениях интенсивности ультразвуковой обработки возможно снижение тех или иных показателей упрочненного слоя. Однако существует область оптимальных значений (нормальное усилие на инструмент $P_n = 10$ Н, амплитуда колебаний $A = 20$ мкм, скорость обработки $V = 20$ м/мин) технологических факторов ультразвуковой поверхностной обработки, в пределах которой наблюдается резкое увеличение всех характеристик упрочненного наплавленного слоя. Механизм ультразвукового поверхностного упрочнения аналогичен действию наклепа. При пластической деформации происходит измельчение зерна, дробление крупных дендритов, кроме того дополнительное упрочнение обусловлено ростом микроискажений кристаллической решетки. Эффективность ультразвука объясняется снижением сопротивления поверхностных слоев металла поверхностному деформированию. Это вызвано изменением кинематики деформирования

поверхностных слоев, а также возникновением в обрабатываемой детали упругих ультразвуковых колебаний.

Проведенные исследования показали возможность получения благоприятной эпюры остаточных напряжений, увеличения твердости и микротвердости поверхности обработанных ультразвуком сплавов, получения оптимальной микроструктуры поверхностного слоя наплавленного металла. На оптимальных параметрах процесса при базовой твердости наплавленного сплава 64 HRC возможно ее увеличение на 1 – 2 HRC, что является резервом повышения эксплуатационных характеристик наплавленных валков.

В шестой главе *«Практическое использование комплексных технологий упрочнения деталей машин теплостойкими сплавами высокой твердости»* приведены примеры использования предложенного алгоритма повышения качества наплавленных деталей для решения конкретных инженерных задач. Результаты теоретических и экспериментальных исследований явились физической основой для разработки новых технических и технологических решений, использование которых на Ленинградском сталепрокатном заводе, заводе «Кулон» НПО «Позитрон», Новосибирском металлургическом заводе, Западно – Сибирском металлургическом комбинате, ООО «Вест 2002» и разрезе «Бунгурский – Северный» обеспечило повышение стойкости наплавленных деталей в 1,5 – 2,0 раза.

Предложена и реализована схема комплексных технологий упрочнения деталей: плазменная наплавка; термообработка после наплавки в виде высокотемпературного отпуска; азотирование наплавленного слоя или ультразвуковая поверхностная упрочняющая обработка; отжиг в процессе эксплуатации изделия, восстановительная наплавка изношенного слоя.

Приложение содержит 6 актов по использованию разработанных в диссертации материалов на предприятиях страны и в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении работы выявлены закономерности и особенности упрочнения наплавленного слоя из теплостойких сплавов высокой твердости, сформированного плазмой в среде азота.

1. Разработаны физические основы повышения эксплуатационных свойств теплостойких сплавов, сформированных плазмой в среде азота, обеспечиваемые применением комплекса упрочняющих технологий: плазменная наплавка в защитно – легирующей среде азота; высокотемпературный отпуск; ультразвуковая упрочняющая обработка или азотирование; рекристаллизационный отжиг в процессе эксплуатации изделия.

2. Впервые установлено проявление эффекта повышенной пластичности («сверхпластичности») в процессе протекания мартенситного превращения в наплавленных в азоте теплостойких сплавах высокой твердости и доказана возможность его применения для регулирования напряженного состояния в процессе многослойной наплавки путем легирования и изменения условий охлаждения наплавленного изделия.

3. Установлено, что физической основой упрочнения теплостойких наплавленных сплавов является применение новых эффективных способов многослойной наплавки и новых наплавочных материалов, обеспечивающих получение наплавленного металла в закаленном состоянии с твердостью поверхности 55 – 57 HRC и низкой склонностью к образованию холодных трещин. Основой способов наплавки является регулируемый термический цикл с низкотемпературным подогревом до температуры 230 – 250 °С и использованием эффекта сверхпластичности.

4 Установлено, что основной вклад в упрочнение наплавленных сплавов, легированных азотом и алюминием, вносит высокотемпературный отпуск при температуре 560 – 580 °С и ультразвуковая обработка на оптимальных режимах ($P_n = 10$ Н, $A = 20$ мкм, $V = 20$ м/мин), что обеспечивает увеличение твердости до 65 – 66 HRC.

5. Выявлены физические основы формирования структуры и свойств теплостойких сплавов плазменной наплавкой в среде азота. Установлено, что в наплавленных сплавах основными фазами являются твердый раствор α – Fe, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия (Fe_6W_6NC и AlN). Высокотемпературная обработка (отпуск) наплавленных сплавов приводит к изменению фазового состава, изменению параметра кристаллической решетки (с 2,866 до 2,890 Å), размеров блоков когерентного рассеяния (с 25 до 100 нм), изменению внутренних упругих напряжений (с 1000 до 600 МПа).

6. Кристаллизация наплавленного сплава приводит к формированию многослойной структуры, которую по морфологическому признаку условно можно разделить на четыре характерных области, отличающихся формой, размерами и расположением ферритных и перлитных зерен. На поверхности наблюдается явно выраженная ориентированная дендритная структура. Основная часть поверхности сплава представляет собой перлитные зерна, по стыкам и по границам, которых располагается цементит сложного химического состава. Другие три области существенно не отличаются от морфологии поверхности, однако ориентированность дендритной структуры менее выражена. Высокотемпературный отпуск устраняет дендритную структуру, уменьшает количество зерен сложного цементита, приводит к образованию твердого раствора α – Fe, карбидов, карбонитридов Fe_6W_6NC и AlN .

7. На поверхности наплавленного слоя присутствующие элементы (углерод, азот, алюминий, кремний, ванадий, хром, железо, молибден, вольфрам) распределены равномерно. Количество легирующих элементов колеблется около значения для исходной теплостойкой стали, а степень легирования с глубиной уменьшается до металла основы.

8. Микротвердость металла в средней части наплавки и на поверхности составляет в состоянии после наплавки 4,11 и 5,15 ГПа соответственно. Высокотемпературный отпуск приводит к превращению остаточного аустенита, выделению карбидов и карбонитридов и увеличению микротвердости до 5,69 и 6,47 ГПа. Показано, что микротвердость возрастает от микротвердости основы до микротвердости поверхностного слоя.

9. Установлено, что для распределения напряжений по сечению валка характерен плавный переход от сжимающих напряжений (600 МПа) в наплавленном слое к растягивающим напряжениям (200 МПа) в основе валка и это распределение более благоприятно для их работоспособности.

10. Многослойная плазменная наплавка в азоте с регулируемым термическим циклом и наплавочные материалы на основе теплостойких сплавов высокой твердости позволяют получать качественный наплавленный слой без трещин, пор и дефектов микроструктуры.

11. Доказано, что регулирование напряженного состояния в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации наплавленных в азоте прокатных валков позволяет значительно повысить их стойкость. Регулирование напряженного состояния в наплавленных валках в процессе их изготовления предложено производить за счет использования эффекта сверхпластичности и высокотемпературного отпуска, а в процессе эксплуатации регулировать путем применения рекристаллизационного отжига.

12. Предложено для упрочнения деталей применять комплексные технологии: плазменную наплавку в среде азота; высокотемпературный отпуск после наплавки; ультразвуковую поверхностную упрочняющую обработку или азотирование; рекристаллизационный отжиг в процессе эксплуатации изделия; восстановительную наплавку изношенного слоя.

13. Результаты работы внедрены в производство со значительным экономическим эффектом, что подтверждается актами внедрения. Общий экономический эффект в ценах 2021 года составил более 80 млн. рублей, вклад автора 40 млн. рублей. Результаты работы используются в учебном процессе в Сибирском государственном индустриальном университете.

Перспективы дальнейшей разработки темы

В дальнейших разработках темы необходимо уделить внимание исследованиям тонкой структуры наплавленного металла методом просвечивающей электронной микроскопии для получения более детальной информации о составе и особенностях кристаллической структуры фаз, образующихся при плазменной наплавке в среде азота.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Бойков, В.В. Исследование эффекта кинетической пластичности стали Р18 при мартенситном превращении [Текст] / В.В. Бойков, Н.С. Зубков, Л.Б. Крепышева, Н.Н. Малушин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1977. – № 8. – С. 112 – 114.
2. Бойков, В.В. О долговечности и надежности рабочих валков непрерывных листовых станов холодной прокатки [Текст] / В.В. Бойков, Н.С. Зубков, Н.К. Шкредова, Н.Н. Малушин, Л.Н. Рудакова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1979. – №12. – С. 107 – 109.
3. Зубков, Н.С. Определение остаточных напряжений в наплавленных валках холодной прокатки [Текст] / Н.С. Зубков, Н.Н. Малушин, Л.Н. Рудакова, С.Г. Рудаков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 10. – С. 134 – 138.

4. Зубков, Н.С. Остаточные напряжения в закаленных и наплавленных рабочих валках холодной прокатки [Текст] / Н.С. Зубков, Н.Н. Малушин, Л.Н. Рудакова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 10. – С. 20 – 27.
5. Рудаков, С.Г. О возможности упрочнения наплавленного быстрорежущего металла [Текст] / С.Г. Рудаков, Н.Н. Малушин, Г.И. Глухов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 12. – С. 133 – 134.
6. Малушин, Н.Н. Анализ работоспособности наплавленных рабочих валков стана холодной прокатки [Текст] / Н.Н. Малушин, Н.С. Зубков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 10. – С. 62 – 65.
7. Малушин, Н.Н. Эксплуатационная стойкость наплавленных рабочих валков реверсивного стана холодной прокатки [Текст] / Н.Н. Малушин, Н.С. Зубков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 6. – С. 39 – 42.
8. Малушин, Н.Н. Совершенствование методики замера остаточных напряжений в наплавленных деталях методом канавки [Текст] / Н.Н. Малушин, С.В. Богомоллов, А.М. Росс // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 8. – С. 106.
9. Вострецов, Г.Н. Оценка релаксационной способности наплавленного металла типа Р2М8 при мартенситном превращении [Текст] / Г.Н. Вострецов, Н.Н. Малушин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1992. – № 2. – С. 94.
10. Малушин, Н.Н. Повышение качества и долговечности наплавленных прокатных валков путем регулирования напряженного состояния в процессе их изготовления и эксплуатации [Текст] / Н.Н. Малушин, Т.Г. Вострецова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 12. – С. 12 – 17.
11. Малушин, Н.Н. Испытания деталей металлургического оборудования на износостойкость и контактную прочность предназначенного для производства деталей горно – шахтного оборудования [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.В. Валуев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) (ГИАБ). – 2012. – № 12. – С. 90 – 95.
12. Малушин, Н.Н. Плазменная наплавка и азотирование наплавленных деталей горно-металлургического комплекса [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.В. Валуев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) (ГИАБ). – 2012. – № 12. – С. 105 – 108.
13. Малушин, Н.Н. Устройства и термический цикл при плазменной наплавке деталей металлургического оборудования быстрорежущими теплостойкими сталями [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.В. Валуев // Russian journal of Earth Sciences. – 2013. – № 4 (16). – С. 4 – 13.
14. Малушин, Н.Н. Ускоренные испытания деталей металлургического оборудования на износостойкость и контактную прочность [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.В. Валуев // Технология металлов. – 2013. – № 6. – С. 48 – 53.
15. Малушин, Н.Н. Азотирование наплавленных деталей металлургического оборудования [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.В. Валуев // Технология металлов. – 2013. – № 7. – С. 26 – 29.
16. Малушин, Н.Н. Регулируемый термический цикл для плазменной наплавки прокатных валков теплостойкими сталями [Текст] / Н.Н. Малушин, Т.Г. Вост-

- рецова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – № 3. – С. 14 – 16.
17. Малушин, Н.Н. Регулирование термического цикла при изготовлении деталей металлургического оборудования плазменной наплавкой теплостойкими сталями высокой твердости [Текст] / Н.Н. Малушин // Инженерный журнал. Справочник. – 2014. – № 5. – С. 20 – 25.
18. Малушин, Н.Н. Наплавка с низкотемпературным подогревом теплостойкими сталями деталей металлургического оборудования [Текст] / Н.Н. Малушин, В.Л. Осетковский, И.В. Осетковский // Заготовительные производства в машиностроении. – 2014. – № 10. – С. 6–10.
19. Малушин, Н.Н. Влияние легирования наплавленного хромовольфрамового металла на формирование временных напряжений [Текст] / Н.Н. Малушин, В.Л. Осетковский, Р.А. Гизатулин, И.В. Осетковский // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 12 – 15.
20. Малушин, Н.Н. Влияние термического цикла наплавки с низкотемпературным подогревом на свойства наплавленного хромовольфрамового металла высокой твердости [Текст] / Н.Н. Малушин, Р.А. Гизатулин, А.П. Ковалев, Д.А. Смагин, И.В. Осетковский // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 12. – С. 6 – 10.
21. Малушин, Н.Н. Разработка методики оценки качества наплавленных валков холодной прокатки на основе определения плотности распределения наработки до отказа [Текст] / Н.Н. Малушин, Р.А. Гизатулин, А.П. Ковалев А.П., В.Л. Осетковский, И.В. Осетковский // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – № 3. – С. 30 – 36.
22. Малушин, Н. Н. Влияние высокотемпературного отпуска на свойства хромовольфрамового металла высокой твердости, наплавленного плазменной наплавкой в защитно – легирующей среде азота [Текст] / Н.Н. Малушин, А.П. Ковалев, В.Л. Осетковский, Е.А. Никоненко, И.В. Осетковский // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – Т. 15. – № 12. – С. 541 – 546.
23. Малушин, Н.Н. Структурно – фазовое состояние теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного плазменной наплавкой в среде азота и высокотемпературным отпуском [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, А.П. Ковалев, В.Л. Осетковский, Л.П. Бащенко // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т. 62. – № 10 (742). – С. 106 – 111.
24. Малушин, Н.Н. Структура быстрорежущего сплава после плазменной наплавки в среде азота и термообработки [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, А.П. Ковалев, Е.А. Будовских, Xi – zhang Chen // Известия вузов. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – № 9. – С. 707 – 715.
25. Малушин, Н.Н. Эффект кинетической пластичности и его применение при плазменной наплавке теплостойких сплавов с низкотемпературным подогревом [Текст] / Н.Н. Малушин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Бащенко, А.П. Ковалев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 180 – 187.
26. Малушин, Н.Н. Распределение микротвердости и структуры по слою теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного многослойной плазмен-

ной наплавкой в среде азота [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, А.П. Ковалев, Л.П. Бащенко, А.П. Семин, В.Е. Громов // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 7. – С. 75 – 80.

27. Малушин, Н.Н. Физические основы комплексных технологий упрочнения деталей на базе плазменной наплавки в среде азота / Н.Н. Малушин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Бащенко, А.П. Ковалев [Текст] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 399 – 407.

28. Малушин, Н.Н. Физическая природа упрочнения теплостойкого металла высокой твердости, сформированного высокотемпературной плазмой в среде азота [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 12. – С. 877 – 885.

29. Малушин, Н.Н. Напряженное состояние в наплавленных прокатных валках с высокой твердостью поверхностного слоя, сформированного плазменной наплавкой в среде азота [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, А.П. Ковалев, Л.П. Бащенко, А.П. Семин // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 12. – С. 11 – 18.

30. Малушин, Н.Н. Упрочнение поверхностного слоя валков холодной прокатки многослойной плазменной наплавкой в среде азота [Текст] / Н.Н. Малушин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Бащенко, А.П. Ковалев, Ю.А. Шлярова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2022. – Т. 20. – № 1. – С. 42 – 48.

Статьи в зарубежных и переводных рецензируемых изданиях

1. Malushin, N.N. Measuring stress condition in hard faced work rolls for cold rolling [Text] / N.N. Malushin, D.V. Valuev // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 71 – 76.

2. Malushin, N.N. Testing of metallurgical of contact strength and wear resistance [Text] / N.N. Malushin, D.B. Valuev, A.V. Valueva, A. Serikbol // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 53 – 57.

3. Malushin, N.N. Kinetic study of effect of plasticity and its role in stress relaxation in the weld speed steel during the martensitic transformation [Text] / N.N. Malushin, D.B. Valuev, A.V. Valueva, A. Serikbol // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 58 – 63.

4. Malushin, N.N. Selection criteria parameter thermal cycle during surfacing heat resistance high hardness parts of metallurgicalequipment [Text] / N.N. Malushin, B.L. Osetkovskiy, D.B. Valuev, A.V. Valueva, A. Serikbol // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 69 – 74.

5. Malushin, N.N. Hardening of Metallurgical Machinery Components by Facing with Heatproof, Hard Steels and Low Temperature Pre-heating [Text] / N.N. Malushin, B.L. Osetkovskiy, D.B. Valuev, A.V. Valueva, A. Serikbol // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756. – P. 263 – 268.

6. Malushin, N.N. Industrial Surfacing of Hammer Grinder Components Utilized in Coke – Making Process and Outlines of Surfacing Quality Improvement [Text] / N.N.

- Malushin, B.L. Osetkovskiy, D.B. Valuev, A.V. Valueva, A. Serikbol // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 108 – 113.
7. Malushin, N.N. Investigation of High – Strength and Heat – Proof Added Metal Characteristics with Microscopy Facilities [Text] / N.N. Malushin, B.L. Osetkovskiy, D.B. Valuev, A.V. Valueva, A. Serikbol, A.I. Penkov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 195–199.
8. Malushin, N.N. Traditional Technology of Chromium – Tungsten Steels Facing, its Disadvantages and Suggestions for their Eliminations [Text] / N.N. Malushin, D.V. Valuev, A.V. Valueva, R.S. Dariev, R.A. Mamadaliev // IOP Publishing. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 127. – Article 012054.
9. Malushin, N.N. Manufacturing Component Parts of Mining Equipment With Application of Hardening Technologies [Text] / N.N. Malushin, D.V. Valuev, A.V. Valueva, R.S. Dariev, R.A. Mamadaliev // IOP Publishing. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 127. – Article 012053.
10. Malushin, N.N. Development and Study of Hard-Facing Materials on the Base of Heat-Resisting High – Hardness Steels for Plasma-Jet HardFacing in Shielding – Doping Nitrogen Atmosphere [Text] / N.N. Malushin, A.P. Kovalev, D.V. Valuev, E.A. Shats, I.F. Borovikov // IOP Publishing. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – Article 012001.
11. Malushin, N.N. Developing and Studying the Methods of Hard-Facing with Heat-Resisting High – Hardness Steels [Text] / N.N. Malushin, A.P. Kovalev, D.V. Valuev, E.A. Shats, I.F. Borovikov // IOP Publishing. Series: Materials Science and Engineering. 2016. – Vol. 142. – Article 012012.
12. Malushin, N.N. Technological Improvement of Surfacing of Hammer Crushers Used in Core – Chemical Industry [Text] / N.N. Malushin, D.V. Valuev, D.P. Ilyaschenko, R.A. Gizatuin, R.Y. Nekrasov // Trans Tech Publicatijns, Switzerland: Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 927. P. 168 – 175.
13. Malushin, N.N. Improvement of Research Procedures into the Highly Rigid Welded Metal Using Thermal Microscopy facilities Industry [Text] / N.N. Malushin, D.V. Valuev, D.P. Ilyaschenko, R.A. Gizatuin, R.Y. Nekrasov // Trans Tech Publicatijns, Switzerland: Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 927. – P. 146 – 152.

Результаты интеллектуальной деятельности

1. А.с. № 627717 СССР, М. Кл.² В 23 К 9/04. Способ многослойной наплавки [Текст] / Н.С. Зубков, А.П. Калинин, Н.Н. Малушин, А.И. Шадрин, В.А. Терентьев, Н.С. Федоров. Заявл. 14.03.1977; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13. «Изобретения. Полезные модели» свидетельства СССР и патенты на изобретения, ранее не публиковавшиеся». С. 4.
2. А.с. № 632139 СССР, М. Кл.² В 23 К 35/36. Шихта порошковой проволоки [Текст] / Н.С. Зубков, Н.Н. Малушин, Н.С. Федоров, В.А. Терентьев, М.В. Бекиш, Б.Е. Пак, Г.Г. Гладышев. Заявл. 07.04.1977; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.
3. А.с. № 623486 СССР, М. Кл.² В 23 К 35/36. Шихта порошковой проволоки [Текст] / Н.С. Зубков, Б.Е. Пак, В.А. Терентьев, М.В. Бекиш, Н.С. Федоров, Г.Г.

- Гладышев, Н.Н. Малушин, В.П. Образцов. Заявл. 07.04.1977; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.
4. А.с. № 635851 СССР, М. Кл.² В 23 К 35/36. Шихта порошковой проволоки [Текст] / Н.С. Зубков, Н.С. Федоров, В.А. Терентьев, М.В. Бекиш, Н.Н. Малушин, Б.Е. Пак, Г.Г. Гладышев, В.П. Образцов. Заявл. 07.06.1977; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.
5. А.с. № 733213 СССР, М. Кл.² В 23 К 35/36. Шихта порошковой проволоки [Текст] / Н.С. Зубков, А.П. Калинин, В.Ф. Игушев, А.И. Шадрин, Н.Н. Малушин, Н.С. Федоров. Заявл. 30.01.1978; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.
6. А.с. № 1029515 СССР, М. Кл. В23К 35/36. Шихта порошковой проволоки для плазменной наплавки в азотосодержащих газовых смесях и последующего азотирования [Текст] / Н.Н. Малушин, Н.С. Зубков, Л.Н. Рудакова. Заявл. 16.12.1981; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.
7. А.с. № 1186663 СССР, С 21 D 9/38 Способ восстановления валков станов холодной [Текст] / Н.Н. Малушин, Н.С. Зубков, Л.Н. Рудакова. Заявл. 13.04.1984; опубл. 23.10.1985. Бюл. № 39.
8. А.с. № 1 208678 СССР, В 23 К 9/04. Устройство для охлаждения наплавленных деталей [Текст] / В.А. Терентьев, Н.С. Зубков, Б.Е. Пак, Н.Н. Малушин. Заявл. 04.01.1984; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.
9. А.с. № 1478523 СССР В 23 К 9/04. Способ многослойной наплавки теплоустойчивыми сталями высокой твердости [Текст] / Н.Н. Малушин, В.А. Терентьев, Н.С. Зубков, Л.В. Баскаков. Заявл. 22.07.1987; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.
10. А.с. № 1670491 СССР G 01 N 3/18 Образец для испытаний на прочность при нагреве прямым пропусканием тока [Текст] / Н.Н. Малушин, А.М. Росс, Н.С. Зубков. Заявл. 07.09.1989; опубл. 15.06.1991. Бюл. № 30.
11. Пат. № 2492981 РФ. Шихта порошковой проволоки [Текст] / Н.А. Козырев, Н.Н. Малушин, В.М. Шурупов, О.Е. Козырева. Заявл. 05.09.2012; опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26.
12. Пат. № 2574233 РФ. Образец для испытания на прочность при нагреве прямым пропусканием тока [Текст] / Н.Н. Малушин, В.Л. Осетковский, Д.В. Валуев, И.В. Осетковский. Заявл. 24.10.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4.
13. Пат. № 26344526 РФ. Шихта порошковой проволоки [Текст] / Н.Н. Малушин, Е.А. Будовских, С.Б. Сапожков, Д.В. Валуев, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, И.В. Осетковский. Заявл. 07.12.2016; опубл. 31.10.2017. Бюл. № 31.
14. Пат. № 2681049 РФ. Шихта порошковой проволоки для наплавки в азотсодержащей среде [Текст] / Н.Н. Малушин, Е.А. Будовских, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, И.В. Осетковский, Р.А. Гизатулин. Заявл. 21.11.2017; опубл. 01.03.2019. Бюл. № 7.
15. Пат. № 2699488 РФ. Способ многослойной наплавки теплоустойчивыми сталями высокой твердости в азотсодержащей среде [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, Е.А. Будовских, Д.В. Валуев. Заявл. 29.02.2019; опубл. 05.09.2019. Бюл. № 25.

Монографии и учебные пособия

1. Малушин, Н.Н. Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями высокой твердости: монография [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.В. Валуев. – Томск: изд. ТПУ, 2013. – 358 с.
2. Малушин, Н.Н. Наплавка деталей горно – металлургического комплекса теплостойкими сталями высокой твердости: монография [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.В. Валуев, В.Л. Осетковский, С.А. Солодский. – Томск: изд. ТПУ, 2015. – 160 с.
3. Малушин, Н.Н. Технологии наплавки деталей горно – металлургического комплекса теплостойкими сталями высокой твердости: монография [Текст] / Н.Н. Малушин, Д.В. Валуев, В.Л. Осетковский, С.А. Солодский. – Томск: изд. ТПУ, 2015. – 212 с.
4. Малушин, Н.Н. Процессы и технология наплавки: учебное пособие [Текст] / Н.Н. Малушин, В.А. Терентьев. – Новокузнецк: СибГМА, 1997. – 108 с.
5. Малушин, Н.Н. Плазменная наплавка: учебное пособие [Текст] / Н.Н. Малушин, В.А. Терентьев. – Новокузнецк: СибГМА, 1997. – 70 с.

Издание подготовлено в авторской редакции

Подписано в печать 18 апреля 2022 г.

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офисная. Печать цифровая.

Усл. печ. л 2,10. Уч. изд. л. 2,34. Тираж 120 экз. Заказ № 105

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

654007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Издательский центр СибГИУ