

На правах рукописи



Якимов Николай Сергеевич

**УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ
СТАЛЕЙ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ
АППАРАТОВ И ДЕМПФЕРОВ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ
ТЕРМИЧЕСКОЙ И ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКАХ**

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

Научный руководитель: **Муратов Владимир Сергеевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Крылова Светлана Евгеньевна**
доктор технических наук, доцент
профессор кафедры «Материаловедение и технология материалов» ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург
Клевцов Геннадий Всеволодович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика» ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти, Самарская область

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита состоится «17» декабря 2021 г. в 15 час. 30 мин. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, главный корпус, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» и на сайте: http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/yakimov_dis.pdf

Отзывы на автореферат просьба выслать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 99.2.039.02 (Д 999.122.02).

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А. Р. Луц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Стратегии развития железнодорожного транспорта и авиационной промышленности на период до 2030 года, утвержденные Правительством РФ, предусматривают формирование условий для устойчивого социально-экономического развития России, повышения мобильности населения и оптимизации товародвижения, укрепления экономического суверенитета, национальной безопасности и обороноспособности страны на основе опережающего и инновационного развития авиационного и железнодорожного транспорта. Поставлена национальная цель – создание в базовых отраслях экономики (в том числе и в сфере транспорта) высокопроизводительных экспортно-ориентированных секторов, развивающихся на основе современных технологий. Так по сравнению с 2018г. к 2024 г. планируется увеличение показателей экспорта в гражданском авиастроении в 9 раз, а в железнодорожной технике – на 96,7 %.

Указанные задачи не могут быть решены без формирования мощного научно-технического потенциала авиационной и машиностроительной промышленности, совершенствования применяемых методов обработки и внедрения новых материалов, реализации перспективных технологических процессов.

Должны решаться проблемы повышения эффективности, уровня качества и безопасности перевозок и полетов на основе технологического и технического развития транспорта. Так в области железнодорожного транспорта осевые нагрузки при движении составов в ближайшее время увеличатся до 270 - 300 кН; стоят задачи производства скоростных и высокоскоростных поездов, увеличения наработки на отказ на 30-40%, межремонтного пробега грузового вагона до 1 млн.км.

К особо важным узлам и изделиям транспортного назначения, относятся гидравлические системы и оборудование, в том числе поршневые гидроцилиндры. Их принцип действия и конструкция лежат в основе функционирования разнообразных амортизационных, поглощающих и демпфирующих устройств, широко применяемых в железнодорожных и авиационных транспортных средствах. Поглощающие аппараты (ПА) предназначены для поглощения основной части энергии ударных воздействий, а также для снижения продольных растягивающих и сжимающих усилий, передающихся на конструкцию вагонов. Такие воздействия и усилия могут негативно сказаться на целостности конструкции транспортного средства, его автотормозного оборудования, ходовой части и груза, который в нем перевозится, безопасности перевозок. При этом, в последнее время скорость соударения вагонов при маневровых операциях и скорость движения поездов значительно увеличиваются, растет использование переходных режимов движения, возрастают массы вагонов и поездов.

Демпферы (Д), предназначенные для погашения и рассеяния энергии колебаний, возникающих в различных узлах и конструкциях авиационной техники, обеспечивают надежность их эксплуатации, предотвращают возможные отказы и повышают безопасность полетов.

В силу отмеченного, решение проблемы повышения надежности функционирования ПА и Д, исключение преждевременного их разрушения является актуальным, поскольку способствует выполнению стратегических задач развития и достижению национальной цели в области железнодорожного транспорта и авиационной промышленности. Важным направлением решения данной проблемы является совершенствование способов обработки используемых для их изготовления сталей и сплавов, а также применение перспективных методов воздействия на материалы для формирования улучшенной структуры и уровня свойств.

Степень разработанности темы. Проблема предотвращения преждевременного разрушения ПА и Д имеет особую значимость для обеспечения надежности отечественной и зарубежной транспортной техники. К началу работы над диссертацией имелись сведения о частых случаях преждевременного разрушения данных устройств в ходе приемо - сдаточных испытаний и эксплуатации.

Современные отечественная и зарубежная транспортная и авиационная промышленность располагают достаточно широким спектром высокопрочных сталей и титановых сплавов, потенциально удовлетворяющих условиям эксплуатации ПА и Д. Проведены серьезные исследования по установлению влияния легирующих элементов и примесей на комплекс свойств этих сталей и сплавов. Химические составы их постоянно совершенствуются.

Существует большое количество методов термического и поверхностного упрочнения высокопрочных сталей и титановых сплавов. Однако выбор способов обработки и назначение технологических режимов выполняется не всегда обоснованно. В частности, часто не учитываются состояние материала после предшествующей обработки (начиная с выплавки стали) и сформировавшиеся при этом особенности химического состава и структуры. Неполно выявлены закономерности формирования структуры и свойств сталей и сплавов в процессе многоэтапных комбинированных воздействий. Возникает необходимость коррекции структуры сплава уже после окончательной термической обработки, которая не сформировала требуемый уровень свойств изделия. Во многих случаях используемые методы поверхностного упрочнения и их режимы не обладают высокой воспроизводимостью требуемого уровня качества покрытий, могут быть реализованы только после многостадийной и сложной предварительной обработки поверхности, экологически несовершенны.

Цель работы: предложить способы и режимы термической и поверхностной обработок высокопрочных сталей и титановых сплавов для ПА и Д транспортной техники, обеспечивающие улучшение их структуры и свойств.

В диссертационной работе поставлены и решены следующие **исследовательские задачи:**

- проанализированы условия эксплуатации исследуемых железнодорожных ПА и авиационных Д и определены воздействия, приводящие к случаям отказа;
- установлены причины и механизмы преждевременного разрушения исследуемых ПА и Д;

- выявлены закономерности формирования структуры и свойств высокопрочных сталей и титановых сплавов, используемых для изготовления ПА и Д, при термической и поверхностной обработках;
- отработаны режимы термической и поверхностной обработок, обеспечивающие предотвращение преждевременного разрушения ПА и Д;
- апробированы предлагаемые режимы обработок в условиях действующего производства.

Научная новизна работы:

- установлены механизмы преждевременного разрушения высокопрочных сталей и титановых сплавов, в том числе с гальваническим хромовым покрытием, в условиях комплексного воздействия значительных статических и ударных воздействий, циклических нагрузок и износа, характерного для ПА и Д транспортной техники;
- установлена взаимосвязь между содержанием примеси азота в сталях и склонностью к обезуглероживанию и прокаливаемостью; зональное повышение содержания азота обуславливает повышение склонности к обезуглероживанию и понижение прокаливаемости;
- выявлены особенности формирования структуры и свойств высокопрочных сталей (30ХГСН2А, 14Х17Н2, ВКЛ-3) и титанового сплава ВТ22 в процессе варьирования видов и режимов термической обработки;
- показано, что обезводороживание гальванического хромового покрытия по предложенному режиму позволяет уменьшить степень его дефектности;
- установлены закономерности влияния исходного состояния порошковых смесей и параметров газотермического напыления (в вариантах APS и HVOF) на характеристики качества износостойких и антифрикционных покрытий, наносимых на высокопрочные стали и титановые сплавы;
- установлены закономерности формирования фазового состава по глубине поверхностного слоя, получаемого при лазерном поверхностном легировании титана медью.

Практическая значимость работы:

- разработаны режимы термической обработки высокопрочных сталей для корпусов ПА железнодорожного назначения, обеспечивающие повышение их надежности, за счет исключения случаев преждевременного разрушения;
- разработаны вид и режимы повторной термической обработки высокопрочных сталей для корпусов ПА и титановых сплавов для штоков Д авиационного назначения, позволяющие достигать требуемого уровня свойств, в случае его неудовлетворительного уровня после первой термической обработки;
- разработаны режимы нанесения газотермических покрытий (в вариантах APS и HVOF) на высокопрочные стали и титановые сплавы, позволяющие получать износостойкие и антифрикционные покрытия с характеристиками, отвечающими требованиям нормативных документов для ПА и Д;
- предложены режимы поверхностного лазерного легирования медью технического титана, позволяющие значительно повысить его жаростойкость

и износостойкость, что позволяет перейти к обработке этого процесса на высокопрочных титановых сплавах для Д;

- результаты диссертационной работы внедрены при разработке технологических процессов термической обработки деталей «Корпус» ПА на АО «Авиаагрегат», а также использованы в учебном процессе кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Методология и методы исследования:

Методология работы состояла из теоретического изучения литературных источников, планирования исследований и интерпретации их результатов на основе научных положений материаловедения, машиностроения, теории и технологии термической обработки, технологии нанесения покрытий, статистического анализа, а также практических экспериментальных методов исследования, к которым относятся сканирующая электронная микроскопия, рентгеновский фазовый анализ, микрорентгеноспектральный анализ, оптико-эмиссионный анализ, оптическая микроскопия, метод пробных закалок, испытания для определения механических свойств.

Объект исследования: особенности формирования структуры и свойств высокопрочных сталей (30XГСН2А, 14Х17Н2, ВКЛ-3), титана и сплава на его основе ВТ22 при термической и поверхностной обработках.

Предмет исследования: причины формирования структуры с недостаточным уровнем свойств указанных сталей и сплавов, приводящих к преждевременному разрушению ПА и Д; способы и режимы их упрочняющих термической и поверхностной (электролитическое хромирование, газотермическое напыление в плазменном (APS) и газопламенном (HVOF) вариантах, лазерное легирование) обработок, приводящие к улучшению структуры и свойств материалов и повышению надежности ПА и Д.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механизмы преждевременного разрушения высокопрочных сталей и титановых сплавов, в том числе с гальваническим хромовым покрытием, в процессах испытаний и эксплуатации ПА и Д.

2. Результаты исследований влияния режимов термической обработки на структуру и свойства высокопрочных сталей (30XГСН2А, 14Х17Н2, ВКЛ-3) и титанового сплава ВТ22. Технологические варианты термической обработки корпусов ПА, штоков Д, крепежных деталей, улучшающие структуру и свойства перечисленных сталей и сплавов и повышающие надежность ПА и Д.

3. Закономерности влияния исходного состояния порошков (ПС – 85КдХ + 15Х20Н80, Cr₃C₂ – 20NiCr, WC – Co- Cr – 86/10/4, ПН75Ю23В (ВКНА), ПР-БрА9) и параметров газотермического напыления (в вариантах APS и HVOF) на характеристики качества износостойких и антифрикционных покрытий, наносимых на высокопрочные стали и титановые сплавы.

4. Закономерности формирования фазового состава по глубине поверхностного слоя, получаемого при лазерном поверхностном легировании титана медью.

Связь работы с научными программами и темами: Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-38-90172, тема «Влияние процессов термической

обработки и поверхностного упрочнения на структуру и свойства перспективных высокопрочных сталей и сплавов для авиационной техники».

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается корректностью поставленной цели и задач, использованием совокупности известных теоретических и апробированных экспериментальных методов исследования, обоснованностью полученных в работе результатов и выводов, отсутствием противоречий с положениями литературных источников.

Апробация работы: Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических мероприятиях: X Юбилейная международная научная конференция «Наука и образование в современной России» (Москва, 2018 г.); научно-технические семинары кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» СамГТУ (Самара, 2018, 2019, 2020, 2021 г.г.); X Международная научно-практическая конференция «Перспективное развитие науки, техники и технологий» (Курск, 2020); 19 Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (Сочи, 2020 г.); 20 Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (Сочи, 2021 г.).

Личный вклад автора состоит в разработке и апробации новых режимов термической и поверхностной обработок сталей и титановых сплавов, обработке и интерпретации экспериментальных данных, формулировании выводов и рекомендаций по полученным результатам.

Автор работы лично представил результаты проведенных исследований на международных конференциях в виде устных презентаций, в качестве соавтора участвовал в написании рукописей публикаций.

Обсуждение и осмысление результатов проводились автором совместно с научным руководителем и научным коллективом.

Публикации: Результаты диссертации опубликованы в 12 работах, из них 6 статей в рецензируемых изданиях, входящих в системы индексирования WoS и Scopus и рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации: Диссертация изложена на 176 страницах машинописного текста, включает 70 рисунков и 37 таблиц. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, содержащего 272 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, изложена методология и методика исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, подтверждена достоверность результатов работы, указан личный вклад автора в выполненные в работе исследования.

В первой главе проанализированы условия эксплуатации ПА и Д, используемых в транспортной технике; выявлены требования по характеристикам свойств применяемых сталей и титановых сплавов. Установлены особенности химического состава и формирования структуры высокопрочных сталей и сплавов транспортного назначения, проанализированы

современные методы их термического и поверхностного упрочнения. На основании выполненного анализа сформулированы цель и задачи работы.

Во **второй главе** описаны материалы, методы и методики исследований. Изложены методические особенности проведения термической и поверхностной обработок, выполненных структурных и физико-механических исследований, методики определения прочности сцепления покрытий с основой, испытаний ПА и Д.

В **третьей главе** исследованы случаи преждевременного разрушения железнодорожных поглощающих эластомерных аппаратов и авиационных гидравлических демпферов. В **разделе 1 третьей главы** проанализированы случаи разрушения ПА в ходе приемо-сдаточных испытаний. В зоне разрушения корпусов из стали 30ХГСН2А выявляется вязкий излом статического характера. Процесс разрушения инициирован в донной части корпуса, а затем развивается вдоль его образующей по направлению волокон макроструктуры. На рис.1 приведена область донной части корпуса, где начиналось развитие трещины (а), и область развития трещины по образующей корпуса (б).



а) область зарождения разрушения; б) развитие разрушения

Рисунок 1. Области зарождения и развития разрушения корпуса ПА при приемо-сдаточных испытаниях

В таблице 1 приведены результаты определения механических свойств стали 30ХГСН2А, полученные на продольных образцах, вырезанных из донной части преждевременно разрушенных изделий.

Таблица 1. Значения механических свойств корпусов из стали 30ХГСН2А

Вариант разрушения	σ_b , МПа	δ , %	φ , %	НВ на поверхности, МПа	КСУ, кДж/м ²
В ходе испытаний	1120	14,4	44,3	3150	250
При эксплуатации	1700	14,8	61,6	4800	810
Требование нормативного документа (НД)	≥ 1570	$\geq 8,0$	$\geq 35,0$	≥ 4150	≥ 390

Как видно из приведенных в таблице 1 данных, разрушение при приемо-сдаточных испытаниях обусловлено недопустимо низким уровнем поверхностной твердости и других механических свойств материала корпуса после окончательной термической обработки. Типовой режим окончательной термической обработки корпусов: температура закалки T_3 $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ (используется ступенчатый нагрев: I ступень – 460°C , выдержка 15 минут; II

ступень - 750 °С, выдержка 15 минут; III ступень - 850 °С, выдержка 15 минут; IV ступень -900 °С), время выдержки при температуре заковки τ_{3190} - 200 минут, охлаждение в масле (с барботажем), температура отпуска T_0 230-270 °С, время выдержки при отпуске τ_0 240 минут, охлаждение на воздухе.

Структура и уровень свойств горячекатаных прутков, используемых для изготовления корпусов, в состоянии поставки (после отжига) соответствуют требованиям НД.

Выполнен химический анализ (оптико-эмиссионный метод) образцов, вырезанных из разрушенных деталей. Установлено, что содержание углерода, основных легирующих элементов и вредных контролируемых примесей (серы и фосфора) соответствует нормативным документам. Вместе с тем, (см. табл.2), содержание азота в отдельных зонах сечения корпуса существенно превышает требования ($\leq 0,012$ мас. %) и результаты определения по ковшовой пробе (0,01-0,009 мас. %) при выплавке стали. Следует обратить внимание и на весьма значительное суммарное содержание легкоплавких примесей (мышьяк, свинец, сурьма, олово), достигающее 0,025мас.%. Известно, что содержание последних в количествах даже 0,003- 0,005 мас. % ухудшает служебные характеристики легированных сталей, их пластичность и вязкость.

Таблица 2. Содержание некоторых примесей в образцах стали 30ХГСН2А (мас.%)

P	S	As	Pb	Sb	Sn	Ca	N
0,004- 0,012	0,001- 0,005	0,003- 0,006	0,001- 0,002	<0,005	0,008- 0,012	0,0002- 0,0004	от <0,001 до 0,041

Известно, что азот ускоряет диффузию углерода и кислорода в стали, а также связывает в нитриды такие легирующие элементы как марганец и хром. Указанное должно приводить к повышению интенсивности обезуглероживания поверхности изделия и снижению прокаливаемости в зонах повышенного содержания азота. Микроструктура стали в донной части корпуса, подвергшегося разрушению, представляет собой либо троостомартенсит с участками свободного феррита, либо полосчатую структуру, что свидетельствует о недостаточной прокаливаемости стали в данной части корпуса. В полосчатой структуре светлые полосы представлены среднеигльчатым мартенситом отпуска (твердость 53-55HRC), темные – троостомартенситом (твердость 44-46 HRC).

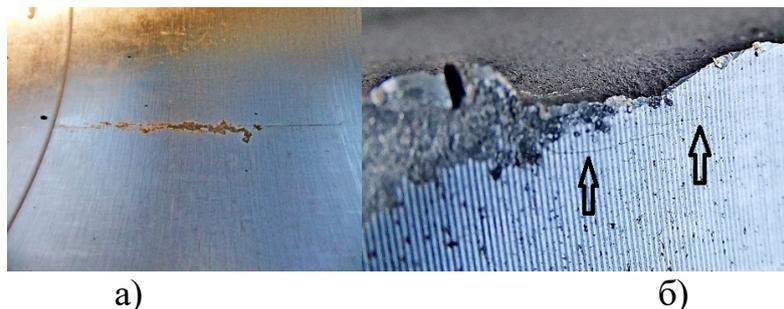
Также установлено наличие обезуглероженного слоя на поверхности корпуса, глубина которого может достигать 1,5 мм.

В разделе 2 третьей главы проанализированы случаи разрушения ПА и Д при их эксплуатации.

В данном случае очаг разрушения расположен на внутренней поверхности корпуса ПА и далее разрушение развивается вдоль его образующей.

Излом имеет строение, характерное для усталостного разрушения. На внутренней поверхности корпуса в области зарождения усталостного повреждения обнаружены продольные задиры от перемещения штока (рис.2). Непосредственно в месте задира выявлены трещины и внедренные в поверхность частицы хромового покрытия, нанесенного на шток. Частицы имеют твердость

61 HRC. В процесс электролитического хромирования на поверхность штока наносится слой хрома толщиной 90 мкм, который затем подвергают шлифованию до толщины 30-60 мкм.



а) общий вид дефекта; б) трещины в месте задира
Рисунок 2. Задиры на внутренней поверхности корпуса

Анализ уровня достигнутых свойств после окончательной термической обработки показывает, что преждевременное разрушение в процессе эксплуатации имеет место при значениях механических свойств изделий полностью соответствующих НД (таблица 1).

Таким образом, причиной разрушения изделий в процессе эксплуатации является разрушение хромового покрытия штока, появление задира на поверхности корпуса и последующее зарождение в зоне задира усталостной трещины.

Известно, что в процессе электроосаждения хрома происходит активное насыщение формирующегося покрытия водородом. Предусмотренная технологическим процессом операция обезводороживания для стали 30ХГСН2А (выдержка 120-180 минут при температуре 180 - 190 °С) представляется недостаточно полно реализующей процесс удаления водорода. В такой ситуации в качестве причины разрушения хромового покрытия следует рассматривать его замедленное разрушение, как объекта, находящегося длительное время под действием напряжений.

Сколы хромового покрытия выявлены и при эксплуатации штоков демпферов авиационного назначения, изготовленных из титанового сплава ВТ22.

В **четвертой главе** выполнена разработка режимов термической обработки сталей, используемых в конструкциях ПА. Выбор режимов термической обработки проводился на основе анализа существующих, установленных и прогнозируемых зависимостей между свойствами и изменениями микроструктуры, их экспериментального апробирования и выпуска опытных партий изделий. В **разделе 1 четвертой главы** реализован поиск режимов окончательной термической обработки корпусов из стали 30ХГСН2А, которые позволили бы нивелировать возможное негативное влияние зональной ликвации на прокаливаемость и обезуглероживание, уровень твердости и других свойств.

Первичным критерием приемлемости того или иного режима термической обработки являлось достижение поверхностной твердости корпуса 4150-5000 МПа, что соответствует требованиям НД. В дальнейшем, режимы

обеспечивающие первичный критерий, проверялись по уровню механических свойств в теле корпуса.

Установлено, что полностью годные партии деталей обеспечивают режимы А - $T_3=900\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau_3=180\text{ мин}$, $T_0=210\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau_0=180\text{ мин}$ и Б - нагрев в вакууме, $T_3=900\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau_3=360\text{ мин}$, $T_0=210\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau_0=240\text{ мин}$. Причем применение режима А в качестве повторной термической обработки позволяет исправлять нежелательные последствия обработки и по другим исследованным режимам. В табл.3 приведены результаты оценки механических свойств корпусов, обработанных по режимам А и Б.

Таблица 3. Значения механических свойств корпусов из стали 30ХГСН2А

Вариант термической обработки	σ_b , МПа	НВ на поверхности, МПа	δ , %	КСУ, кДж/м ²
А	1600-1680	4170-4750	12,8-13,2	790-820
Б	1750-1760	4450-4830	12,8-13,6	860-920

Как видно из таблицы 3 режимы термической обработки А и Б обеспечивают уровень механических свойств, требуемый НД (см. таблица 1). Микроструктура в донной части корпуса после термической обработки по режиму А представляет собой мартенсит отпуск, что свидетельствует о достаточной прокаливаемости стали.

Метод пробной закалки подтверждает достижение повышенной прокаливаемости. Предлагаемый режим обеспечивает сквозную закалку в масле образцов диаметром 45 мм из стали 30ХГСН2А (в центре образца выявлена микроструктура с 90-95% мартенсита и твердостью 51-53 HRC). Данные микроструктура и твердость при закалке по типовому режиму выявлены на глубине 14-16 мм, а в центре образца выявляется троостомартенситная структура с твердостью 43-45 HRC.

Скорректированные режимы окончательной термической обработки предполагают уменьшение длительности выдержки при температуре закалки, снижение температуры отпуска до 210 °С и его длительности.

Уменьшение длительности выдержки при закалке приводит к уменьшению глубины развития обезуглероживания, что позволяет полностью избавляться от него при использовании припуска на механическую обработку равного 1 мм. При анализе влияния времени выдержки на прокаливаемость сталей с избытком азота следует учитывать два фактора. Снижение времени выдержки при закалке сохраняет большее количество нитридов марганца и хрома, что, с одной стороны, связывает азот и уменьшает активность диффузии углерода, что повышает прокаливаемость; с другой стороны, связывая марганец и хром, нитриды снижают прокаливаемость стали. Очевидно, что оптимальное с точки зрения прокаливаемости τ_3 должно обеспечивать целесообразное сочетание действия этих факторов, что и реализуется при $\tau_3 = 180\text{ мин}$.

Уменьшение температуры и длительности отпуска позволяет уменьшить степень распада мартенсита, это позволяет повысить твердость стали и скомпенсировать ее снижение, что может быть необходимо в случае проявления

начальных стадий обезуглероживания в сталях с избытком азота, если сокращение τ_z полностью предотвратить это не позволяет.

Далее выполнена дополнительная отработка возможных вариантов корректирующей термической обработки корпусов ПА из стали 30ХГСН2А для устранения их несоответствий по уровню механических свойств. Несмотря на выявленное соответствие исходных заготовок требованиям НД, установлены случаи получения пониженной твердости изготовленных из них корпусов ПА после окончательной термической обработки и их разрушения при приемочных испытаниях или в процессе эксплуатации. Такая ситуация выявлена при содержании углерода в стали на нижнем допустимом уровне. В этой связи, исследованы различные варианты корректирующей термической обработки.

Установлено, что режим окончательной термической обработки с временем выдержки при температуре закалки 150 мин и временем пребывания изделий в масле при закалке не менее 90 мин позволяет увеличить количество годных изделий до 95% (в лучшем случае 50-63% при иных режимах). Режим повторной термической обработки, включающий нормализацию, закалку и отпуск при 210 °С, позволяет достигнуть требуемый уровень твердости у 80% изделий, имеющих неудовлетворительный уровень твердости после первой термической обработки.

В разделе 2 четвертой главы исследовано влияние режимов термической обработки на структуру и дефектность штамповок из стали 14Х17Н2. Окончательная упрочняющая термическая обработка штамповок из стали 14Х17Н2 предполагает следующие операции и режимы их проведения. Закалка - T_z 1030±10 °С, τ_z 60 минут, последующее охлаждение в масле. Отпуск при 640±10 °С, τ_o -135 минут. Термическое упрочнение должно обеспечить твердость HRC 23 - 32 и предел прочности 830-1030 МПа. После проведения закалки в заготовках весьма часто обнаруживаются дефекты – трещины (длиной – до 45 мм и шириной – до 8мм).

После закалки в масле с повышенных температур 1040 - 1050 °С количество пластичного δ -феррита превышает на 15 - 20% его количество после закалки с температуры 1030 °С. При этом закалочные трещины в заготовках отсутствовали. После полного цикла окончательной термической обработки сталь удовлетворяла требованиям по уровню твердости и предела прочности.

При использовании охлаждения заготовки с температуры 1030 °С на воздухе также удалось исключить появления трещин и обеспечить требуемый уровень свойств изделий.

В разделе 3 четвертой главы выполнены исследования закономерностей влияния химического состава и режимов термической обработки на структуру и комплекс механических свойств стали ВКЛ-3 (12Х2НВМЛ). Сталь ВКЛ-3 содержит в составе элементы весьма склонные к ликвации – С, W, Mo, Cr, Si. Для обеспечения требуемой пластичности и вязкости идут на повышение температуры отпуска по сравнению с деформируемой сталью идентичного состава. При этом отсутствуют исследования, опровергающие факт, что в отдельных локальных зонах отливки вязкость и в этом случае может не достигать требуемых значений.

Получена сталь экспериментальной плавки, имеющая в составе

повышенное содержание Cr, Si, Ni и Mo. Содержание углерода в ней соответствует максимально допустимому пределу. Это позволяет моделировать ликвационные зоны с повышенным содержанием ряда легирующих элементов, а проведением скорректированных режимов термической обработки проверяется возможность повышения пластичности и вязкости таких зон. Показано, что ни увеличение длительности выдержки при температурах закалки и отпуска, ни снижение температуры закалки, ни повышение температуры отпуска не позволяет обеспечить требуемый уровень ударной вязкости ($KCU \geq 400$ кДж/м²) стали экспериментальной плавки.

Установлено, что для получения отливок надлежащего качества целесообразно поддерживать содержание легирующих элементов вблизи нижнего допустимого предела.

В **пятой главе** выполнена разработка режимов поверхностного упрочнения штоков с поршнем железнодорожных эластомерных ПА. В **разделе 1 пятой главы** исследованы возможности снижения дефектности хромовых покрытий коррекцией режимов обезводороживания. Температура увеличена до значений 190-200 °С, а время выдержки до 300 -360 минут. Исследования выполнены на образцах в виде муфт из стали 30ХГСН2А. Толщина хромового покрытия составляла 15-28мкм. Дефектность покрытия оценивалась по наличию дефектов в покрытии после проведения операций приготовления микрошлифов. В микроструктуре шлифов с типовым обезводороживанием в покрытии видно большое количество дефектов (трещин, сколов, впадин, пор). При аналогичных исследованиях покрытий на образцах, прошедших скорректированный режим обезводороживания, вышеуказанные дефекты отсутствуют.

В **разделе 2 пятой главы** исследованы процессы газотермического напыления покрытий. Для нанесения защитных износостойких покрытий методами воздушно-плазменного напыления (APS) и сверхзвукового газопламенного напыления в модификации HVOF использована порошковая смесь ПС – 85КдХ + 15Х20Н80 (химический состав, вес. % - 85% карбида хрома, 15 % смеси, состоящей из 20% хрома и 80% никеля). Для реализации метода HVOF – смесь на основе карбида хрома – Cr₃C₂ – 20NiCr (химический состав, вес. % - 80% карбида хрома, 15% никеля и 5% хрома), а также смесь WC – Co- Cr – 86/10/4 (химический состав, вес. % - 86% карбида вольфрама, 10% кобальта и 4% хрома).

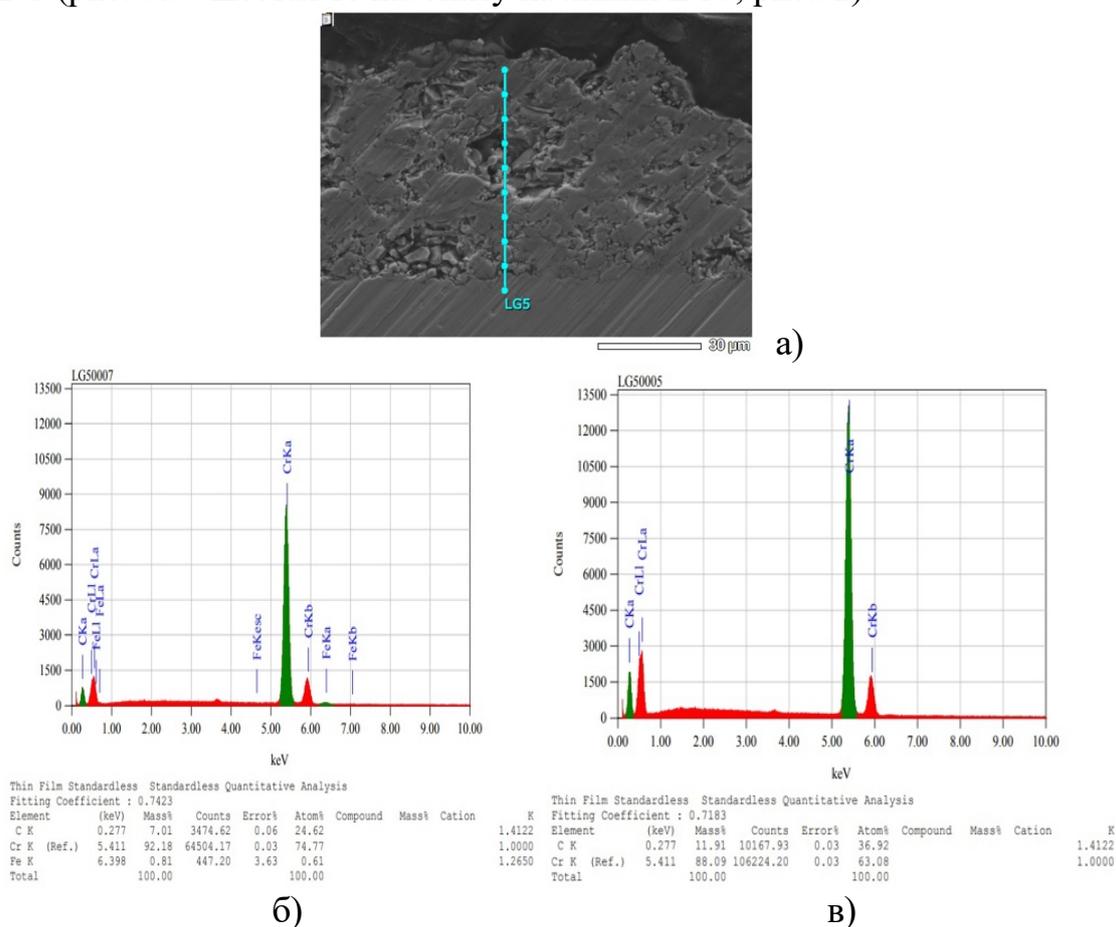
Перед нанесением покрытий поверхность образцов подвергалась обезжириванию, промывке и дробеструйной обработке не более чем за два часа до начала нанесения. Использована установка высокоскоростного и плазменного напыления HVP (производитель – компания GTV, Германия).

Исследования показали, что покрытия с наилучшими показателями качества получены при использовании сферической формы частиц и дистанции напыления 120-140 мм для метода APS и 270-300 мм для метода HVOF. Отработаны режимы процессов газотермического напыления. При проведении контроля качества нанесенных покрытий оценивались: внешний вид, толщина, прочность сцепления, микротвердость и пористость.

Рекомендованные режимы метода APS и метода HVOF позволяют получать износостойкие покрытия на сталь 30ХГСН2А, удовлетворяющие

требованиям к покрытиям штоков (твердость не менее 8500 МПа, прочность сцепления $\tau_{сдв}$ не менее 40МПа, пористость не более 10%):

Выполнен микрорентгеноспектральный анализ по толщине полученных покрытий. Установлено, что в покрытии ПС – 85КдХ + 15Х20Н80, полученном методом APS, присутствуют карбиды сложной формы, расположенные в хромово-никелевой связке. Выявлено наличие карбидов двух стехиометрических составов – Cr_7C_3 , химический состав ат. % - 74,77 Cr; 24,62 С (рис. 3а – восьмая точка снизу на линии LG5; рис. 3б) и Cr_3C_2 , химический состав ат.% - 63,08 Cr; 36,92 С (рис. 3а – шестая точка снизу на линии LG5; рис.3в).



а) микроструктура покрытия;
 б) микрорентгеновский спектр и химический состав в восьмой точке;
 в) микрорентгеновский спектр и химический состав в шестой точке
 Рисунок 3. Микроструктура, микрорентгеновский спектр и химический состав в восьмой снизу и шестой снизу точках на линии LG5, покрытия ПС – 85КдХ + 15Х20Н80

В покрытии WC – Co- Cr – 86/10/4, полученном методом HVOF, присутствуют карбиды WC (основное количество) и W₂C (незначительное количество). Карбиды W₂C присутствуют в покрытии до толщины ~ 20мкм от основы, а далее установлено наличие только карбидов WC.

В **шестой** главе выполнена разработка режимов термического и поверхностного упрочнения штоков и поршней демпферов авиационного назначения из титановых сплавов. В **разделе 1 шестой** главы выполнен анализ

особенностей существующей технологии изготовления штоков и поршней из сплава VT22 и возникающих несоответствий по качеству изделий.

В условиях АО «АВИААГРЕГАТ» термическая обработка изделий из титановых сплавов заключается в проведении двухступенчатого отжига либо по варианту обработки в контейнерах с подачей аргона (вариант №1), либо в варианте обработки в вакуумной печи (вариант № 2). В первом варианте установлены случаи получения значений σ_b сплава ниже требуемых по НД (1100 - 1300 МПа).

Уровень прочностных свойств, формируемый в сплаве VT22 при двухступенчатом отжиге штоков и поршней, во многом определяется скоростью охлаждения сплава с температуры 750 °С на первой ступени. В варианте №1 охлаждение происходит в контейнере, в котором изделия засыпаны титановой стружкой. Охлаждение крайне неравномерно по разным деталям (расположенным в центре контейнера и вблизи его стенок). В деталях, охлажденных замедленно, упрочнение снижается и σ_b может не достигать требуемого уровня.

Предложен режим повторной термической обработки для исправления пониженного уровня прочности штоков и поршней после отжига. Режим предполагает: подогрев до 650 °С, выдержка 60 мин.; нагрев до 750 °С, выдержка 180 мин.; охлаждение в контейнере с подачей аргона на воздухе под вентилятором; нагрев до 570 °С, выдержка 240 мин., охлаждение в контейнере с подачей аргона на воздухе.

Повторная выдержка при температуре 750 °С позволяет получить более стабильную и устойчивую к распаду при охлаждении структуру, а более низкая температура второй ступени приводит к распаду метастабильной β -фазы с образованием дисперсных частиц, что приводит к повышенной прочности сплава. Обеспечиваются значения σ_b в пределах 1200-1210 МПа.

На этапе поверхностного упрочнения штоков и поршней из титанового сплава VT22 в существующих технологических процессах реализуется нанесение двух типов покрытий – хромового и бронзового. Тип покрытия определяется условиями работы изделия, а также материалом, в контакте с которым работают шток и поршень.

В разделе 2 шестой главы проведена отработка режимов поверхностной обработки штоков и поршней Д авиационного назначения.

Для нанесения защитных износостойких покрытий на образцы из сплава VT22 методом HVOF применялась порошковая смесь WC – Co - Cr – 86/10/4. Дистанция напыления составляла 270-300 мм, использовалась порошковая смесь с размером сферических частиц 20-45 мкм. Сформировано покрытие толщиной 16-20 мкм с микротвердостью 11200-12000 МПа, прочностью сцепления $\tau_{сдв}$ 80,2 МПа и пористостью 1,6-1,9 %.

Если требуется получение покрытий меньшей твердости, то может быть использована порошковая смесь ПС– 85КдХ + 15Х20Н80. Применялся порошок со сферической формой частиц размерами 45-100мкм. Для напыления использован метод APS, дистанция напыления 120-140мм. Сформировано покрытие толщиной 95-100 мкм с микротвердостью 9300- 9800 МПа, прочностью сцепления $\tau_{сдв}$ 104 ,0 МПа и пористостью 5- 7 %.

Выполнены исследования процесса нанесения антифрикционного бронзового покрытия на сплав ВТ22 методом APS на установке напыления HVP. Реализованы два варианта формирования покрытий: первый – нанесение бронзового покрытия непосредственно на поверхность сплава ВТ22; второй – нанесение бронзового покрытия с использованием подслоя. При проведении напыления использован порошок ПР-БрА9 (фракция 40-100 мкм). Порошок получен методом распыления, форма частиц – сферическая. При реализации второго варианта для напыления подслоя использован порошок ПН75Ю23В (ВКНА) фракции 40-100 мкм. Порошок получен методом восстановления, форма частиц – округлая.

Установлено, что предлагаемые режимы плазменного напыления позволяют получать на установке APS бронзовое покрытие с характеристиками, удовлетворяющими требованиям НД (прочность сцепления $\tau_{сдв}$ не менее 30 МПа, пористость 0,5-10%), при бронзировании с подслоем ВКНА. Нанесение слоя бронзы без подслоя не обеспечивает требуемый уровень прочности сцепления.

Исследовано лазерное поверхностное легирование (ЛПЛ) медью технически чистого титана ВТ1-0, микротвердость поверхности которого составляла 1800 МПа. Для нанесения исходного медного слоя толщиной 10 мкм использовался метод вакуумного напыления. Для формирования зоны лазерного легирования медью использовался источник с мощностью $P=160$ Вт, диаметр пятна лазерного луча 2,5 мм, что обеспечивало плотность мощности излучения $32,6$ Вт/мм². Скорость перемещения луча $V_{л}$ по поверхности составляла 1,66 и 2,5 мм/с.

Режим со скоростью 2,5 мм/с обеспечивает получение наиболее однородной структуры зоны оплавления глубиной 38 мкм с высоким (~ 26,3%) содержанием меди и повышенными значениями микротвердости 7000–7200 МПа.

Качественный рентгенофазовый анализ и микрорентгеноспектральные исследования на поперечных шлифах показали, что интерметаллидные соединения фиксируются в последовательности $TiCu_2$, $TiCu$ (возможно), Ti_2Cu т.е. по мере удаления от поверхности образца наблюдаются интерметаллиды, все более обогащенные титаном и обедненные медью.

Испытания на фреттингостойкость показывают, что, например, линейный износ 60 мкм при работе контактной пары достигается в образце из титана без легирования за 2,4 часа, а в образце титана с ЛПЛ медью – за 7,2 часа. Износ 120 мкм – за 2,5 и 8 часов соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Главным результатом диссертационной работы является решение проблемы повышения надежности железнодорожных поглощающих аппаратов и авиационных демпферов за счет разработки технологических режимов термической и поверхностной обработок, позволяющих улучшить структуру и свойства применяемых сталей и сплавов.

1. Установлены причины и механизмы преждевременного разрушения корпусов железнодорожных поглощающих аппаратов из стали 30ХГСН2А, имевшего место как в ходе приемо-сдаточных испытаний (выявлен вязкий излом статического характера, установлен недостаточный уровень механических свойств корпуса), так и при эксплуатации (выявлен усталостный характер разрушения, установлены повреждения внутренней поверхности корпуса из-за разрушения хромового покрытия штока). Отказы авиационных демпферов обусловлены разрушением хромового покрытия штоков из сплава ВТ22.

2. Установлено, что количественно неконтролируемая в производстве недостаточная степень чистоты стали 30ХГСН2А по азоту в отдельных зонах корпуса, сформированная при выплавке стали и получении горячекатаных прутков, является причиной повышенной склонности к обезуглероживанию и пониженной прокаливаемости, что не позволяет обеспечить требуемый уровень свойств стали после типовой окончательной термической обработки.

3. Предложен скорректированный режим окончательной термической обработки корпусов из стали 30ХГСН2А, предусматривающий назначение сокращенного времени выдержки при температуре закалки (900 °С) - 180 минут и отпуск при температуре 210 °С в течении 180 минут. Данный режим обработки позволяет обеспечить требуемый уровень механических свойств стали при появлении случаев неконтролируемой недостаточной зональной степени чистоты стали по азоту и легкоплавким примесям.

4. Предложены варианты корректирующей термической обработки корпусов из стали 30ХГСН2А для дополнительного увеличения закаливемости и прокаливаемости стали. Обработка, предусматривающая увеличение времени пребывания изделий в масле при закалке до значений не менее 90 мин позволяет обеспечить количество годных изделий в партии (отсутствуют при типовой обработке) до 95%. Режим повторной термической обработки, включающий нормализацию, закалку и отпуск при 210 °С, позволяет достигнуть требуемый уровень твердости у 80% изделий, имеющих неудовлетворительный уровень твердости после первой термической обработки.

Даны рекомендации по режимам термической обработки стали 14Х17Н2 (увеличение температуры закалки и использование охлаждения на воздухе), предупреждающие появление закалочных трещин и химическому составу стали ВКЛ-3 (поддержание содержания легирующих элементов на нажнем допустимом уровне), устраняющие негативное влияние ликвации легирующих элементов.

5. Разработан режим повторной термической обработки штоков из сплава ВТ22 (подогрев до 650 °С, выдержка 60 мин.; нагрев до 750 °С, выдержка 180 мин.; охлаждение в контейнере с подачей аргона на воздухе под вентилятором; нагрев до 570 °С, выдержка 240 мин., охлаждение в контейнере с подачей аргона на воздухе), обеспечивающий достижение необходимого уровня прочности ($\sigma_b = 1100-1300$ МПа).

6. Предложен режим обезводороживания гальванических хромовых покрытий (температура 190-200 °С, время выдержки 300 -360 минут), снижающий их склонность к образованию дефектов при механических воздействиях.

7. Отработаны варианты воздушно-плазменного напыления (APS) и сверхзвукового газопламенного напыления в модификации HVOF износостойких покрытий на установке HVP на сталь 30XГСН2А и сплав ВТ22, удовлетворяющих требованиям к покрытиям штоков (твердость не менее 8500 МПа, прочность сцепления $\tau_{сдв}$ не менее 40МПа, пористость не более 10%) из порошков ПС – 85КдХ + 15Х20Н80, Cr_3C_2 – 20NiCr, WC – Co- Cr – 86/10/4. Установлен фазовый состав покрытий, в частности, в карбидохромовом покрытии присутствуют карбиды Cr_3C_2 и Cr_7C_3 , в карбидовольфрамовом - WC и W_2C . Предложены режимы APS, позволяющие получать бронзовое покрытие на сплаве ВТ22 с характеристиками, удовлетворяющими требованиям нормативных документов (прочность сцепления $\tau_{сдв}$ не менее 30 МПа, пористость 0,5-10%), при бронзировании с подслоем покрытия из ПН75Ю23В (ВКНА). Нанесение слоя бронзы без подслоя не обеспечивает требуемый уровень прочности сцепления.

8. Установлено, что оптимальным режимом лазерного поверхностного легирования титана марки ВТ1-0 медью является режим с толщиной медного исходного покрытия 10 мкм и скоростью перемещения лазерного луча $V_{л}=2,5$ мм/с при плотности мощности излучения 32,6 Вт/мм². Лазерное поверхностное легирование титана марки ВТ1-0 медью обеспечивает повышение твердости до 7000-7200 МПа и износостойкости повышается в 3-3,2раза. Куприды титана, определяющие упрочнение поверхностных слоев, распространяются до глубины 30-35 мкм; по мере удаления от поверхности образца наблюдаются интерметаллиды, все более обогащенные титаном и обедненные медью и фиксируются в последовательности $TiCu_2$, Ti_2Cu . Медь в виде твердого раствора отсутствует на глубине 10 мкм от поверхности.

9. Ряд предлагаемых технологических вариантов успешно применен и апробирован в производстве на предприятии ОАО «АВИААГРЕГАТ». Материалы диссертационных исследований широко используются в учебном процессе кафедры: «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» ФГБОУ ВПО «Самарского государственного технического университета».

Основное содержание диссертации представлено в следующих работах:

Публикации в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus и Web of Science:

1. Muratov V.S., Yakimov N.S. Formation of structure and properties of 30HGSN2A steel at technological stages of manufacture of heavy-loaded parts // Solid State Phenomena. - 2021. - Vol 316. - pp 324-333.

2. Muratov, V.S., Morozova, E.A., Zhuravel, L.V., Yakimov N.S. et al. Formation of Structure and Properties in Titanium under Laser Surface Alloying with Copper. // Metal Science and Heat Treatment. – 2021. - № 62. - P. 604–608.

Муратов В.С., Морозова Е.А., Журавель Л.В., Якимов Н.С. Формирование структуры и свойств титана при лазерном поверхностном легировании медью // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2020. - № 10. – С. 8-12. (Издание, рекомендованное ВАК РФ.)

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

3. Якимов Н.С., Муратов В.С. Особенности деформационной и термической обработок коррозионностойких сталей мартенситно-ферритного класса // Современные наукоемкие технологии. - 2018. - № 12-2. - С. 398-402.

4. Муратов В.С., Якимов Н.С. Особенности формирования структуры и свойств высокопрочной стали 30ХГСН2А при изготовлении гидравлических поглощающих аппаратов // Заготовительные производства в машиностроении. - 2020. - № 5. - С. 222-229.

5. Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С. Формирование структуры и свойств комплексно-легированной литой стали // Заготовительные производства в машиностроении. – 2020 - № 9. - С.429-432.

6. Муратов В.С., Якимов Н.С. Отработка вариантов корректирующей термической обработки тяжело нагруженных изделий из стали 30ХГСН2А // Заготовительные производства в машиностроении. - 2021. - № 1. - С. 39-43.

Публикации в прочих изданиях:

7. Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С. Термическая обработка мартенситно-ферритных нержавеющей сталей // Современные проблемы науки и образования. - 2018. - № 9. - С.16.

8. Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С. Анализ дефектов штамповок из мартенситно-ферритных нержавеющей сталей // Современные проблемы науки и образования. - 2018. - № 9. - С.16.

9. Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С., Анализ и пути предотвращения преждевременного разрушения тяжело нагруженных изделий из высокопрочных сталей // Современные материалы, техника и технологии. – 2019. - № 4(26). - С.126-132.

10. Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С. Особенности требуемых структуры и свойства стали 30ХГСН2А при реализации многоэтапной комбинированной обработки // Современные материалы, техника и технологии. – 2019. - № 4(26). - С.121-126.

11. Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С. Получение качественных изделий из коррозионностойких хромо - никелевых сталей // Современные материалы, техника и технологии. - 2020. - № 4 (35). - С. 76-81.

12. Муратов В.С., Морозова Е.А., Якимов Н.С. Поверхностное упрочнение титана легированием железом // Современные материалы, техника и технологии. – 2020. - № 4 (35). - С. 81-87.

Научное издание

Якимов Николай Сергеевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук на тему:

Улучшение структуры и свойств высокопрочных сталей и титановых сплавов
для поглощающих аппаратов и демпферов транспортной техники при
термической и поверхностной обработках

Автореферат отпечатан с разрешения объединенного диссертационного совета
99.2.039.02 (Д 999.122.02) на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика
С.П. Королева»
(протокол № 15 от «8» октября 2021 г.).

Формат 60 x 84 1/16. Набор компьютерный.
Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «СамГТУ»

Отдел типографии и оперативной печати
443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244