

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 621.785.545

ВЕГЕРА
Иван Иванович

**КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ
И СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ СКОРОСТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО
УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2026

Работа выполнена в государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук»

Научный
консультант

Залесский Виталий Геннадьевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
Первый заместитель Председателя Президиума
Национальной академии наук Беларуси

Официальные
оппоненты:

Витязь Петр Александрович, академик, доктор
технических наук, профессор, главный научный
сотрудник – консультант государственного научного
учреждения «Институт порошковой металлургии
имени О.В. Романа»;

Пантелеенко Федор Иванович,
член-корр. НАН Беларуси, доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры «Порошковая
металлургия, сварка и технология материалов»
Белорусского национального технического
университета;

Рубаник Василий Васильевич,
член-корр. НАН Беларуси, доктор технических наук,
профессор, заведующий лабораторией физики
металлов государственного научного учреждения
«Институт технической акустики Национальной
академии наук Беларуси»

Оппонирующая
организация

Государственное научное учреждение «Объединенный
институт машиностроения Национальной академии
наук Беларуси»

Защита состоится «10» июля 2026 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря: +375 17 293 93 58, e-mail: yaskevich.o@bntu.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «09» июня 2026 г.

Учёный секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент



О.К. Яцкевич

© Вегера И.И., 2026

© ФТИ НАН Беларуси, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Повышение конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения, снижение издержек ее производства требуют применения прогрессивных энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки, позволяющих формировать необходимый комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств деталей машин.

Наибольшее распространение в промышленности получили методы термического объемного упрочнения сталей и сплавов с использованием нагрева в камерных, шахтных и других печах с воздушной средой и применением ручного труда при загрузке и выгрузке. В результате – значительные потери металла в окалину, обезуглероживание поверхностных слоев, а также непроизводительные затраты на очистку, травление и т. п. Нагревательное оборудование на большинстве предприятий республики имеет высокую энергоемкость, низкий коэффициент полезного действия и не отвечает современным требованиям.

В связи с этим актуальной задачей является разработка новой концепции развития технологий и оборудования для скоростных методов термического упрочнения с применением индукционного, лазерного, электронно-лучевого нагрева деталей. Данные методы позволяют формировать функционально-градиентные слои толщиной от 0,1 до 15 мм, обладающие регламентированным распределением свойств, перекрывающих широкий диапазон требований, зависящих от условий работы деталей машиностроения.

Перспективными направления исследования в области скоростных методов обработки являются: научное обоснование режимов нагрева и охлаждения металлов с учетом происходящих в них структурных и фазовых превращений; формирование баз данных по режимам скоростного нагрева широкой номенклатуры сталей и титановых сплавов под различные виды термообработки (закалку, отпуск, отжиг, нормализацию) с последующим управляемым охлаждением, обеспечивающим достижение нормированных показателей свойств сталей; создание методик моделирования и расчета процессов и технологий при скоростном индукционном нагреве (ИН) деталей для прогнозирования их физико-механических свойств; разработка современного оборудования ИН для выполнения термических операций, обеспечивающих получение как гомогенных структур в зонах термического воздействия, так и градиентных слоев с высоким уровнем и регламентированным распределением их физико-механических свойств.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156, п. 4. «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: машиностроение и машиноведение; производственные автоматизированные комплексы».

Исследования по теме диссертации проводились в рамках следующих программ и проектов: ГПНИ «Материалы в технике», задание 1.26 (2006–2010 гг., № ГР 20073231); ГПФНИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии», задание 2.08 (2006–2010 гг., № ГР 20061190); ГКПНИ «Металлургия», задание 1.26 (2008–2010 гг., № ГР 20081599); ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», задание 5.2.01 (2011–2013 гг., № ГР 20112118), задание 4.1.01-3 (2011–2013 гг., № ГР 20113248), задание 5.2.01 (2014–2015 гг., № ГР 20140516); ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», задание 2.4.03 (2011–2013 гг., № ГР 20113247), задание 2.3.10 (2011–2013 гг., № ГР 20140499); ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», задание 4.2.01 (2016–2018 гг., № ГР 20162125), задание 4.2.15 (2019–2020 гг., № ГР 20190732), задание 3.3.11 (2019–2020 гг., № ГР 20190496); ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении» задания 2.3.03 (2016–2018 гг., № ГР 20162126), задание 2.3.05 (2016–2018 гг., № ГР 20161105); ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 3.1.6 (2021–2025 гг., ГР 20210809); проект ГПИР (2011–2015 и 2016–2020 гг.) «Создание производства полупроводниковых генераторов и индукционных установок для нагрева металла под пластическую деформацию и термообработку»; ГНТП «Технологии и оборудование машиностроения», задание 1.50 (2011–2012 гг., № ГР 20115500), задание 1.51 (2011–2012 гг., № ГР 20115499), задание 1.53 (2012–2014 гг., № ГР 201223610), задание 2.32 (2013–2015 гг., № ГР 20131786), задание 1.54 (2012–2013 гг., № ГР 20130057), задание 1.55 (2017–2019 гг., № ГР 20171785), задание 1.56 (2017–2019 гг., № ГР 20171786), 1.60 (2018–2020 гг., № ГР 20190215), ГНТП «Инновационное машиностроение и машиностроительные технологии» задание 1.63 (2023–2025 гг., № ГР 20240056) ГНТП «Ресурсосбережение, новые материалы и технологии – 2020», задание 2.95 (2019–2020; 2021–2022 гг., № ГР 20200164, № ГР 20213261); проект Т08Р-032 БРФФИ-РФФИ (2008–2010 гг., № ГР 20082949); проект Т10Р-166 БРФФИ-РФФИ (2010–2012 гг., № ГР 20102868).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является концептуальное развитие технологии и создание оборудования для скоростного термического упрочнения, обеспечивающих повышенный уровень и регламентированное распределение механических свойств деталей машин.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- исследовать особенности фазовых и структурных превращений при скоростном нагреве и охлаждении сталей и титановых сплавов в сравнении со стационарной их обработкой;
- установить закономерности формирования градиентных слоев при скоростной индукционной обработке деталей, а также при ее комбинировании с лазерным и электронно-лучевым воздействием;
- разработать методики сквозного моделирования процессов скоростного нагрева и охлаждения при закалке, отпуске и других операциях термической обработки деталей;
- разработать методики и провести расчеты градиентов физико-механических свойств по сечению упрочненных слоев, обеспечивающих достижение оптимальных функциональных свойств деталей для заданных условий их эксплуатации;
- создать базы данных по режимам скоростной термической обработки сталей, обеспечивающим необходимый уровень механических свойств изготовленных из них деталей;
- предложить на основе результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования концептуальные решения по совершенствованию технологии скоростного термического упрочнения и организовать серийное производство оборудования для ее реализации;
- выполнить апробирование и внедрение в производство созданных технологий и оборудования скоростной термической обработки деталей, а также комбинированных технологий с применением лазерного и электронно-лучевого воздействия.

Объект исследования: процессы скоростной термической обработки.

Предмет исследования: методы и технологические параметры процессов скоростной термической обработки упрочнения деталей из сталей и титановых сплавов и их взаимосвязь с механическими свойствами, структурой поверхностных слоев, принципы создания оборудования скоростной термической обработки деталей с элементами сложной геометрической формы, имеющих различные виды упрочняемых наружных и внутренних поверхностей.

Научная новизна заключается в установлении закономерностей скоростной термической обработки сталей и сплавов различного состава и разработке технологий

и оборудования для упрочнения деталей с обеспечением требуемых механических свойств в зависимости от условий эксплуатации.

1. Установлены закономерности процесса фазовой перекристаллизации в интервале скоростей индукционного нагрева (ИН) 50–100 °С/с до температур выше точки A_{c3} фазового превращения $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$ низкоуглеродистых конструкционных сталей, содержащих образующиеся при термических сварочных и деформационных воздействиях локальные зоны с метастабильной дефектной структурой, отличающиеся от трансформации структуры при стационарном печном нагреве тем, что при температурах выше точки A_3 происходит образование однофазной аустенитной структуры, размер зерна которой ограничен кратковременностью (<20 с) ИН до температур 920 °С–1000 °С, а при последующем охлаждении ниже точки A_{r3} , соответствующей температурному диапазону 840 °С–870 °С $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ превращения, – образование и рост зерен феррита по границам зерен аустенита с формированием мелкозернистой структуры с размером 5–10 мкм, что обеспечивает идентичность окончательно сформированной феррито-перлитной структуры по всему объему сварных изделий. Зоны сварных соединений, термического влияния и пластических деформаций приобретают при этом близкие к уровню основного металла значения ударной вязкости и микротвердости, исключая, вследствие высокой пластичности ($\delta \geq 20\%$), усталостный излом при эксплуатации изделий.

2. Установлены зависимости влияния скорости ИН под закалку на механические свойства и особенности структурных и фазовых превращений в сталях, содержащих α - (Cr, Si, Mo) и γ -стабилизирующие (Mn, Ni, V) легирующие элементы, и оптимизированы режимы их термообработки, заключающиеся в том, что ИН доэвтектоидных Mn-, Ni- и V-содержащих сталей проводят при температурах, превышающих на 50 °С–100 °С соответствующие этим сталям температуры печного нагрева, а ИН Cr-, Si-, Mo-содержащих и заэвтектоидных сталей – при температурах на 100 °С–150 °С выше, чем при печном нагреве, с изотермической выдержкой от 3 до 5 с для более полного растворения карбидных фаз, равномерного распределения углерода и легирующих элементов, что позволило за счет гомогенизации аустенитной структуры обеспечить при последующей закалке диспергирование мартенситных составляющих с размером зерна 5–15 мкм, образование высокодисперсных карбидных включений, частичное сохранение пластичных фаз, тем самым повысить прочность сталей на 50–100 МПа и пластичность на 3 %–5 % при исключении окисления, угара и обезуглероживания металла.

3. Экспериментально установлены закономерности влияния карбидных, боридных, силицидных и нитридных фаз на микротвердость поверхностного слоя сталей, подвергнутых скоростной индукционной термообработке и последующему лазерному модифицированию, позволившие определить технологические режимы

индукционной обработки, обеспечивающие оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств сталей, а при последующей лазерной обработке получается модифицированный поверхностный слой толщиной 100–200 мкм с микротвердостью в пределах от 6 ГПа (при использовании SiC) до 18 ГПа (при легировании Cr₃C₂), при этом формируется градиентная макроструктура материала, состоящая из вышеуказанного поверхностного слоя, приповерхностного слоя мартенсита толщиной до 0,3 мм с твердостью до 800 HV₅₀ и зоны термического влияния толщиной до 0,6 мм с переменной твердостью 800–500 HV₅₀.

4. Разработаны компьютерные модели температурных и электромагнитных полей, формируемых при ИН и последующем охлаждении деталей, учитывающие длительность, частоту, мощность, профиль индукционного витка и интенсивность охлаждения, позволившие определить оптимальные электрофизические и технологические параметры индукционного оборудования, позволяющего создавать в поверхностных слоях деталей заданное распределение магнитного поля, формирующего индукционные токи различной плотности для реализации локальной термической обработки и получения упрочненных слоев определенной конфигурации и с требуемыми физико-механическими свойствами; предложены универсальные алгоритмы, математические и компьютерные модели использования CALS-технологий для расчёта физико-механических и эксплуатационных свойств деталей после скоростной индукционной обработки и прогнозирования жизненного цикла изделий.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанные на основе экспериментально установленных закономерностей процессов фазовой перекристаллизации зон с метастабильной дефектной структурой, наследуемой в низкоуглеродистых сталях при локальных деформационных и термических воздействиях, режимы ИН со скоростями в интервале 50–100 °С/с до температур в интервале 920 °С–1000 °С, позволяющие сформировать мелкозернистую феррито-перлитную структуру сталей с размером зерна 5–10 мкм, обеспечить идентичность механических свойств по всему объёму изделий с микротвердостью до 200 HV и ударной вязкостью $KCU^{70} \geq 1,15 \text{ МДж/м}^2$, исключаящие, вследствие высокой пластичности ($\delta \geq 20 \%$), усталостный излом несущих рам автомобильной техники и сосудов, работающих под давлением.

2. Экспериментально установленные зависимости влияния температуры, скорости ИН и охлаждения на структуру и механические свойства низкоуглеродистых конструкционных сталей, сталей для изготовления насосно-компрессорных и нефтегазовых труб с содержанием углерода до 0,3 %, позволившие определить режимы их скоростной закалки для формирования мелкозернистой мартенситной структуры, обеспечивающей повышение конструкционной прочности сталей марок 20пс, СтЗпс с уровня S275 до уровня S355, стали 10ХСНД и 09Г2С до уровня S460 –

S700, сталей 17Г2СФ, 28ГХМ и 32Г2 до уровня S1000 с сохранением их высокой пластичности ($\delta \geq 16\%$).

3. Экспериментально установленные особенности структурных и фазовых превращений в доэвтектоидных (45Х2ГН, 60ПП, 65Г) и заэвтектоидных (95Х18) сталях при скоростной закалке, заключающиеся в том, что для более полного растворения карбидных фаз, равномерного распределения углерода и легирующих элементов, ИН доэвтектоидных Mn-, Ni- и V-содержащих сталей проводят до температур на $50\text{ }^\circ\text{C}$ – $100\text{ }^\circ\text{C}$ превышающих температуры печного нагрева, а ИН доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных Cr-, Si- и Mo-содержащих сталей необходимо проводить с выдержкой в течение от 3 до 5 с до температур на $100\text{ }^\circ\text{C}$ – $150\text{ }^\circ\text{C}$ выше печного нагрева, что обеспечивает диспергирование мартенситных составляющих до размера 5–15 мкм, образование высокодисперсных карбидных включений, частичное сохранение пластичных фаз и повышает прочность сталей на 50–100 МПа и пластичность на 3%–5% при исключении окисления, угара и обезуглероживания металла.

4. Разработанные технологии скоростной термической обработки сталей и титановых сплавов, в том числе комбинированные с ИН и последующим модифицированием поверхностного слоя методами лазерного или электронно-лучевого воздействия, позволившие при индукционной обработке получить оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств сталей и титановых сплавов, а при последующем лазерном или электронно-лучевом воздействии – модифицированный поверхностный слой толщиной до 1,7 мм с микротвердостью от 9 до 18 ГПа с градиентным распределением карбидных и/или нитридных соединений, снижающий интенсивность изнашивания, в частности, сплава ВТ23 при модифицировании карбидами SiC + TiC или VC с $I_q = 173 \cdot 10^{-3}$ до $1,2 \cdot 10^{-3}$ и $1,6 \cdot 10^{-3}$ мг/м соответственно.

5. Разработанные методики моделирования электромагнитных и температурных полей, формируемых по сечению детали, в зависимости от электрофизических и технологических параметров скоростной термообработки, методики расчета электрофизических и технологических параметров индукционного оборудования, обеспечивающих достижение требуемого распределения свойств по сечению детали, а также алгоритм расчета усталостной выносливости деталей, упрочненных скоростной индукционной обработкой, позволяющий определить оптимальные характеристики упрочнённых слоев, повышающие коэффициент запаса прочности от 1,8–1,9 до 2,0–2,5 и циклическую долговечность деталей от $8,65 \cdot 10^7$ до $8,41 \cdot 10^8$ в сравнении с полученными при объемной печной закалке.

6. Новый концептуальный подход к созданию технологий термического упрочнения деталей с формированием поверхностных структур, включающий предварительный расчет распределения механических свойств по сечению детали,

исходя из условий эксплуатации, выбор параметров скоростного индукционного нагрева на основе результатов экспериментальных исследований и созданной базы данных, компьютерное моделирование электромагнитных и температурных полей, формируемых в детали при скоростной обработке, что позволило выбрать технологические режимы, обеспечивающие структурно-фазовое состояние и свойства упрочненных слоев с уровнем твердости, износостойкости, циклической долговечности, соответствующим эксплуатационным нагрузкам.

7. Разработанные на основе нового концептуального подхода технологии и оборудование скоростной индукционной обработки широкой номенклатуры деталей с элементами сложной геометрической формы, имеющих различные виды упрочняемых наружных и внутренних поверхностей простого и фасонного вида (зубчатые колеса модулем от 1 до 50, внутренние отверстия диаметром от 18 до 450 мм, ручки шкивов и барабанов, шлицы, режущие кромки и другие). Концепция модульного построения разработанной линейки универсального индукционного оборудования с дискретностью по мощности и диапазонам частот, позволяющего реализовать широкий спектр вариантов технологий скоростной индукционной обработки (ручной, автоматический, режим наладки, одновременный способ нагрева, непрерывно-последовательный способ нагрева, 3D-сканирование). Результаты внедрения новых технологий и оборудования скоростной индукционной термической обработки на предприятиях Республики Беларусь.

Личный вклад соискателя учёной степени

Результаты опубликованных работ получены автором лично, а также в соавторстве с научными сотрудниками ФТИ НАН Беларуси, ЛЭТИ (г. Санкт-Петербург). Основные приведенные в диссертации результаты исследований были получены лично автором или при его непосредственном участии. Личный вклад автора заключается в выработке гипотез и методик исследования, постановке задач, их экспериментальном выполнении, анализе и обобщении полученных результатов, разработке компьютерных моделей, в разработке и внедрении оборудования и технологий скоростной термической обработки методами индукционного, лазерного и электронно-лучевого воздействия на стали и титановые сплавы, в представлении результатов исследований на конференциях и подготовке научных публикаций.

Соавторами по опубликованным работам являются д-р физ.-мат. наук, доц. Залесский В.Г. – научный консультант по диссертационной работе; академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Гордиенко А.И., канд. техн. наук Михлюк А.И., д-р техн. наук, проф. Поболь И.Л., канд. техн. наук Голубев В.С., канд. техн. наук Ивашко В.В., совместно с которыми выполнены исследования по скоростной термической обработке материалов, а также зам. зав. сектором Зизико А.В., науч. сотр. Полысаев А.В., науч. сотр. Цыкунов П.Ю., зам. зав. лабораторией

Гайлевич Э.В. и мл. науч. сотр. Ходюш В.Е. принимали участие в подготовке и проведении экспериментов, обработке и обсуждении результатов исследований. Другие соавторы публикаций оказывали практическую помощь при проведении экспериментальных исследований.

Результаты научно-исследовательских работ, положенные в основу диссертационной работы, были отмечены Стипендией Правительства Республики Беларусь (2003 г.), Стипендией Президента Республики Беларусь (2007, 2013 гг.), Премией НАН Беларуси им. В.Ф. Купревича (2008 г.), Премиями НАН Беларуси (2011, 2020 гг.), Почетными грамотами Министерства промышленности Республики Беларусь (2016, 2021 гг.), Почетными грамотами Государственного комитета по науке и технологиям (2018, 2021 гг.), Нагрудным знаком отличия НАН Беларуси имени В.М. Игнатовского (2022 г.).

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Основные положения и результаты диссертации докладывались в период с 2005 по 2025 годы более чем на 40 международных и республиканских научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе на: Международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2008–2021 гг.); Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2008–2025 гг.); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра» (Гомель 2017, 2020, 2023 гг.); «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь 2019, 2021–2025 гг.); Всероссийской научно-практической конференции «Информационные и инновационные технологии в науке и образовании» (Ростов-на-Дону, 2022, 2024–2025 гг.); Международном конгрессе UIE по эволюции и новым тенденциям в электротермических процессах (Пльзень, Чехия, 2021 г.); Международной научно-практической конференции «Мировая экономика и бизнес-администрирование» (Минск, 2022, 2024–2025 гг.).

В рамках Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2014–2020 годы в ФТИ НАН Беларуси создано специализированное производство по выпуску оборудования ИН, разработанные технологии и оборудование внедрены на предприятиях холдингов и корпораций ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Амкодор», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Бобруйскагромаш», ОАО «Могилевлифтмаш», ОАО «БМЗ», ИЗ-КАРТЭКС, ПАО «КАМАЗ», ПАО «Уралмашзавод» и др. Всего на производстве в период 2014–2025 гг. выпущено и реализовано оборудования на сумму более 30 млн белорусских рублей. По разработанным технологиям только на производстве ФТИ НАН Беларуси термически обработано сотни тысяч деталей машиностроения на сумму более 7 млн рублей.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 116 печатных работах, в том числе в 1 монографии, 48 статьях в рецензируемых журналах, общим объемом 46,52 авторских листа, 11 главах коллективных монографий, а также в 43 статьях в сборниках материалов и трудов научных конференций, 3 тезисах докладов конференций, 7 патентах Республики Беларусь и 3 технических условиях на оборудование.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка и приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 260 страниц, включая 150 рисунков, 18 таблиц, 24 приложения, библиографический список из 263 источников, в том числе 116 публикаций автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит анализ современного состояния решаемой проблемы, обоснование актуальности, показана научная, практическая значимость работы, а также личный вклад соискателя и апробация результатов работы.

Первая глава посвящена анализу физико-механических свойств и особенностей структурных превращений, протекающих в конструкционных высокопрочных сталях и титановых сплавах при скоростных процессах их нагрева и охлаждения. Показано, что основными задачами являются создание новых ресурсосберегающих технологических процессов ИН и оборудования для его реализации. Применение ИН в комбинировании с лазерной и/или электронно-лучевой обработкой с учетом эксплуатационных нагрузок позволит повысить конструкционную прочность деталей при снижении площади их поперечных сечений и массы до 30 %.

Показано, что острой проблемой при разработке процессов упрочнения деталей является отсутствие информации по фазовому составу, структуре и свойствам формируемых при скоростном ИН слоев. Экспериментальные исследования позволят установить основные закономерности и особенности скоростных методов обработки сталей различных составов и создать базы данных для выбора оптимальных режимов обработки, разработать концепцию скоростной термообработки сталей и титановых сплавов, обосновать режимы комбинированной обработки для получения функционально-градиентных упрочненных слоев. На основании проведенного анализа сформулирована цель и определены задачи исследования.

Во второй главе приведены химические составы исследованных в работе материалов, в том числе низкоуглеродистых сталей 20пс, 09Г2С и 10ХСНД, среднеуглеродистых сталей для насосно-компрессорных и нефтегазовых труб S355J2(17Г2СФ), 32Г2 и ТТ309(28ГХМ), высокопрочной конструкционной стали 96 (45Х2ГН), рессорно-пружинных сталей 50ХГФА и 65Г, стали пониженной прокаливаемости 60ПП, коррозионностойких сталей 08Х18Н1 и 095Х18, а также титановых сплавов ВТ 6 и ВТ 23.

Скоростную термообработку проводили на установке электроконтактного нагрева при скоростях 1–1000 °С/с и охлаждения 1–400 °С/с. Закалку деталей осуществляли одновременным и непрерывно-последовательным индукционными методами с использованием генератора ВЧГ2-100/0,066, закалочного станка ОТ-54, установок ФТИ 3.148, изготовленных в ФТИ НАН Беларуси.

Для лазерной обработки использовали технологический комплекс с СО₂-лазером «Комета 2» и оптоволоконный лазерный комплекс. Химический состав и распределение легирующих элементов по сечению упрочненного слоя определяли на атомно-эмиссионном спектрометре тлеющего разряда HORIBA GD PROFILER2, спектрометре DV-6 (фирма «Baird», США) и на рентгено-флюоресцентном спектрометре S4 Pioneer AXS Bruker.

Фазовые и структурные превращения исследовали с помощью электронно-микроскопического, металлографического и рентгеноструктурного анализов, применяя следующее оборудование: металлографический комплекс «Versamet-2» и «Autoscan» с компьютерным анализом структуры по заданным параметрам, электронный микроскоп РЭМ-100У и Tescan MIRA 3 LMU, дифрактометров ДРОН-3М и GNR EXPLORER.

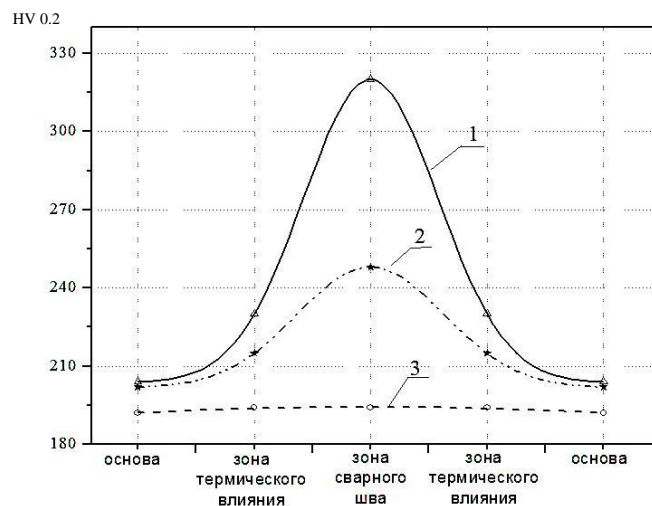
Твердость определяли по методам Роквелла, Виккерса на твердомерах ТК-2М, ТП-7Р, Wilson Hardtss WH-574, AFFRI-URBV-VRS, микротвердость измеряли на приборах ПМТ-3, STRUERS DURAMIN-5 и автоматическом микротвердомере AFFRI-MVDM8. Прочностные и пластические характеристики определяли методами статического растяжения и изгиба на машинах ZD 10/90 и Time WDW-100E. Ударную вязкость определяли с применением маятникового копра МК-15 (30).

Эксплуатационные характеристики деталей после различных видов упрочнения определяли по методикам, применяемым на открытых акционерных обществах «БЕЛАЗ», «Амкодор», «БМЗ», «Автогидроусилитель», «МЗКТ», «Могилевлифтмаш», «МАЗ» и «Бобруйскагромаш».

В третьей главе приведены результаты исследований влияния режимов ИН на процессы фазовых и структурных превращений, рекристаллизации деформированных зон, фазовой перекристаллизации зон сварных швов, снятия остаточных напряжений в низкоуглеродистых сталях с содержанием углерода до 0,25 %, применяемых для изготовления сварных каркасов автомобильной техники. Повышение

конструкционной прочности низкоуглеродистых сталей и исключения усталостного разрушения возможно только с применением локального скоростного ИН.

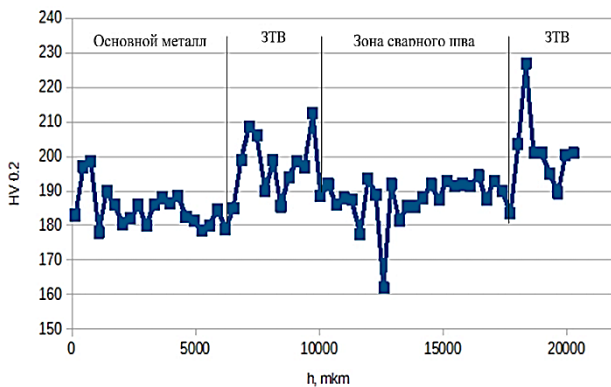
Установлено, что при ИН сталей 20пс и СтЗпс до 920 °С–1000 °С, в результате фазовой перекристаллизации зон сварных соединений и локальных пластических деформаций, формирования их мелкозернистой структуры, выравниваются механические свойства по объему изделий. При этом их ударная вязкость возрастает до $KCU^{70} = 1,15 \text{ МДж/м}^2$, а микротвердость снижается до исходной твердости низкоуглеродистых сталей, равной 190–200 HV (рисунок 1).



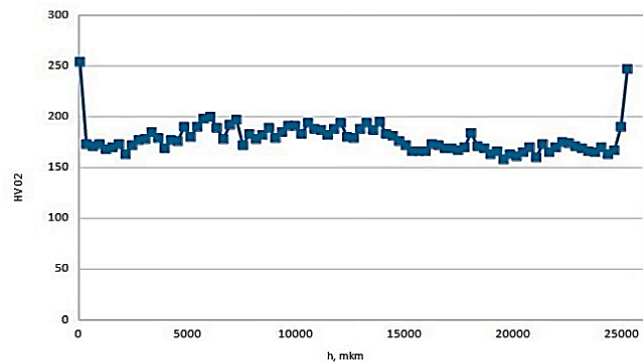
1 – после сварки; 2 – $T_n = 700 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $T_n = 900 \text{ }^\circ\text{C}$

Рисунок 1 – Влияние температуры нагрева со скоростью $V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/с}$ на твердость сварного шва трубы из стали 20пс

Показано, что ИН сварных соединений из стали 10ХСНД позволяет снизить микротвердость сварного шва с 180–200 HV и зоны термического влияния с 200–220 HV (рисунок 2 а) до микротвердости основного металла 170–185 HV (рисунок 2 б).



а

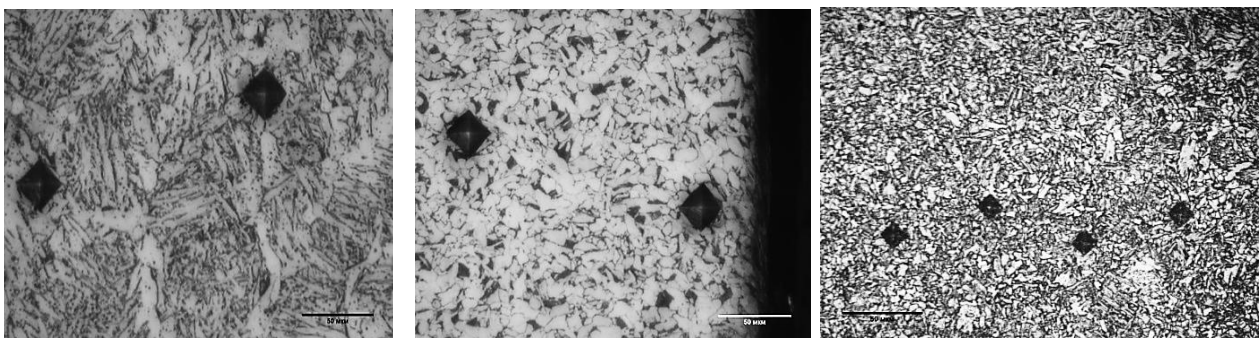


б

а – после сварки; б – $T_n = 900 \text{ }^\circ\text{C}$

Рисунок 2 – Распределение микротвердости по зонам сварного шва стали 10ХСНД

Микроструктура сварного шва – столбчатые дендриты феррита и перлит с вытянутыми зернами (рисунок 3 а), в результате фазовой перекристаллизации преобразуется в мелкозернистую феррито-перлитную структуру (рисунок 3 в), близкую к структуре основного металла (рисунок 3 б). Это позволяет повысить ударную вязкости $KCU^{-70} = 0,09–0,17 \text{ МДж/м}^2$ зоны сварного шва, до $KCU^{-70} = 1,15–1,2 \text{ МДж/м}^2$, что выше уровня основного металла. Предложено использовать ИН для локального отжига и нормализации сварных швов несущих рам карьерной техники, а также сосудов, работающих под давлением, что позволило обеспечить получение равнопрочных по всему объёму изделий и снизить риск аварийных ситуаций из-за усталостного излома и хрупкого разрушения деталей.



а – после сварки; **б** – структура основного металла; **в** – $T_n = 950 \text{ }^\circ\text{C}$
Рисунок 3 – Микроструктура сварного шва стали 10ХСНД

Установлено, что при скорости ИН $50 \text{ }^\circ\text{C/с}$ до $800 \text{ }^\circ\text{C}–900 \text{ }^\circ\text{C}$ механические свойства стали находятся на уровне: $\sigma_B = 720–950 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 570–700 \text{ МПа}$; $\delta = 13 \text{ } \%$ – $14 \text{ } \%$; $\psi = 48 \text{ } \%$. В интервале температур $1200 \text{ }^\circ\text{C}–1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $\sigma_B = 1150–1260 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 1050–1170 \text{ МПа}$, а относительное удлинение δ снижается до $5 \text{ } \%$ (рисунок 4 а). Отпуск (рисунок 4 б) при $500 \text{ }^\circ\text{C}–650 \text{ }^\circ\text{C}$ позволяет в полной мере реализовать прочностной ресурс стали.

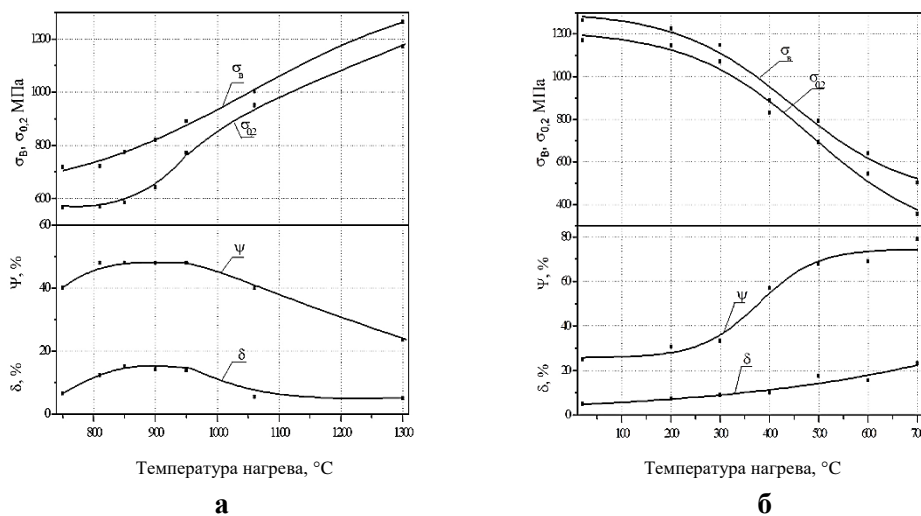
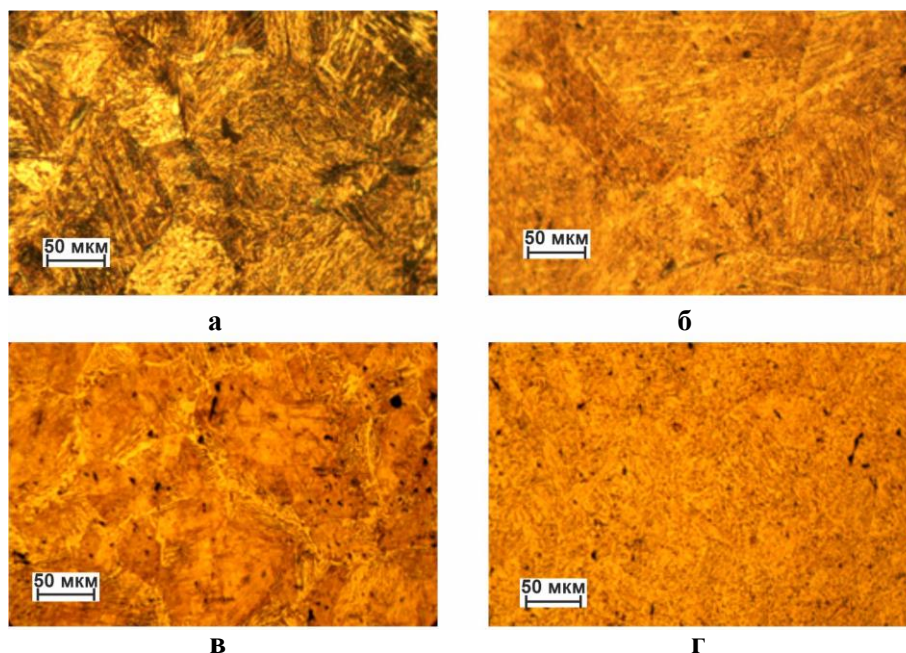


Рисунок 4 – Влияние температур ИН (а) и отпуска (б) на свойства стали 09Г2С

После закалки со скоростного нагрева в стали 09Г2С формируется мартенситная игольчатая структура (рисунок 5 а). После отпуска при 300 °С она представляет собой отпущенный мартенсит (рисунок 5 б). Повышение температуры отпуска до 500 °С приводит к началу распада мартенсита с выделением феррита по границам бывших аустенитных зерен (рисунок 5 в). При 700 °С формируется однородная мелкодисперсная феррито-перлитная структура с выделениями карбидной фазы (рисунок 5 г).



а **б**
в **г**
 Скоростной нагрев, $V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/с}$, $T_n = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$,
 вода: а – без отпуска; б – 300 °С; в – 500 °С; г – 700 °С
 Рисунок 5 – Микроструктура стали 09Г2С после закалки и отпуска

Установлено, что ИН до 1100 °С повышает конструкционную прочность сталей 20пс и Ст3пс с S275 до уровня прочности S355, а легированных сталей 09Г2С и 10ХСНД – с S355 до S460. Скоростная закалка с температур 1200 °С–1300 °С со скоростью охлаждения 400 °С/с и отпуском при 500 °С–600 °С повышает прочность сталей 09Г2С и 17Г1С до S460–S700 с сохранением их высокой пластичности ($\delta = 20 \%$). Формирование при этом мелкозернистой мартенситной структуры повышает твердость стали 09Г2С до 30 HRC, а стали 17Г1С – до 40 HRC.

Проведено упрочнение с ИН силовой балки из стали 09Г2С оборотных плугов, что позволило повысить уровень их прочности до 1000 МПа при твердости 28–30 HRC, что соответствует классу прочности S700. Разработана технология упрочнения ножей для грейдеров Амкодор из стали 17Г1С, обеспечивающая твердость 40 HRC на глубину до 4 мм, что позволило достичь параметров импортных аналогов ножей фирмы ESTI. Впервые предложено использовать ИН для закалки деталей из низкоуглеродистых сталей.

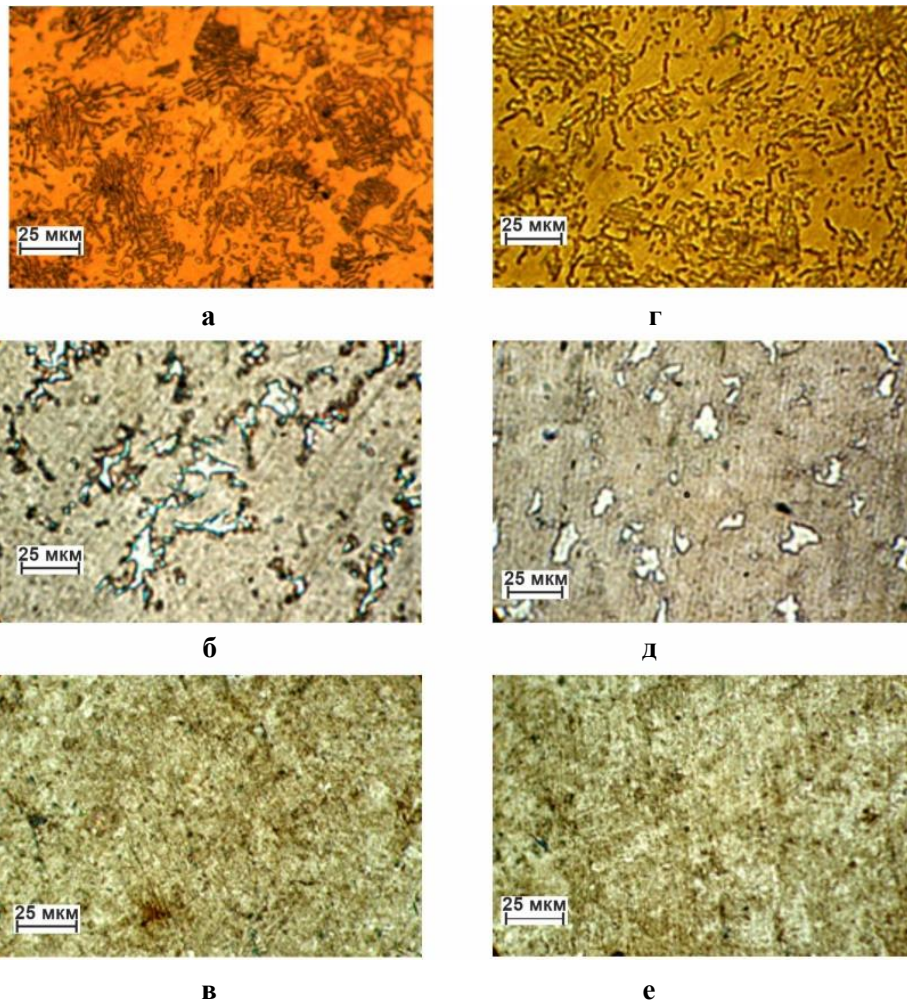
Установлены закономерности влияния температуры и скорости ИН, а также режимов охлаждения, на структуру и физико-механические свойства насосно-компрессорных и нефтегазовых трубных сталей с содержанием углерода до 0,3 % (S355J2(17Г2СФ), 32Г2 и ТТ309(28ГХМ)). Установлено, что процессы фазовых и структурных превращений при ИН данных сталей смещаются на 50 °С–100 °С вверх по температурной шкале в сравнении с печным нагревом. Их прочностные свойства повышаются на 50–100 МПа, а пластические – на 3 %–5 % при сокращении времени нагрева, исключении окисления, угара и обезуглероживания металла. Для гомогенизации сталей рекомендованы температуры их нагрева под закалку в пределах 950 °С–980 °С со скоростью до 50 °С/с и изотермические выдержки при закалочной температуре в течение 3–5 с. Сформирована база данных по режимам скоростной термической обработки, обеспечивающая необходимый уровень механических свойств в соответствии с требованиями стандартов отечественных ГОСТ 633-80 и международных API 5CT, API 5L, DIN EN10297, DIN EN 10216 (таблица 1).

Таблица 1 – База данных режимов термической обработки стали ТТ309-1

Темп. нагрева, °С	Охл. среда	Темп. отпуска, °С	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относит. удлинение/сужение	Класс прочности	Группа прочности
печной нагрев							
860	вода	450	1039	1155	11/65	Р	Q125
860	вода	500	912	1043	12,5/67	М	P110
860	вода	550	864	955	15,6/70,4	М	P110
860	вода	600	735	885	16,3/72	Л	T95
860	вода	650	627	765	18,1/74	К, Е	N80
860	вода	680	537	672	20/76	Д исп А, Б	K55
825	воздух	–	415	673	21,8/76	Д исп А, Б	H40
скоростной нагрев 50 °С/с							
950	вода	450	1065	1185	14/65	Р	Q125
950	вода	500	941	1087	15/65	Р	Q125
950	вода	550	895	996	16/66	М	P110
950	вода	600	747	897	17/71	Л	T95
950	вода	625	691	845	19/72	Е	N80
950	вода	650	653	792	21/74	К	N80

Показано, что при нагреве в печи до температуры 750 °С и последующем охлаждении в воде в структуре стали 60ПП появляются участки мартенсита с частицами цементита, располагающимися по границам зерен в виде цепочек (рисунок 6 б, д). При нагреве выше 900 °С фиксируется гомогенный мартенсит (рисунок 6 в, е).

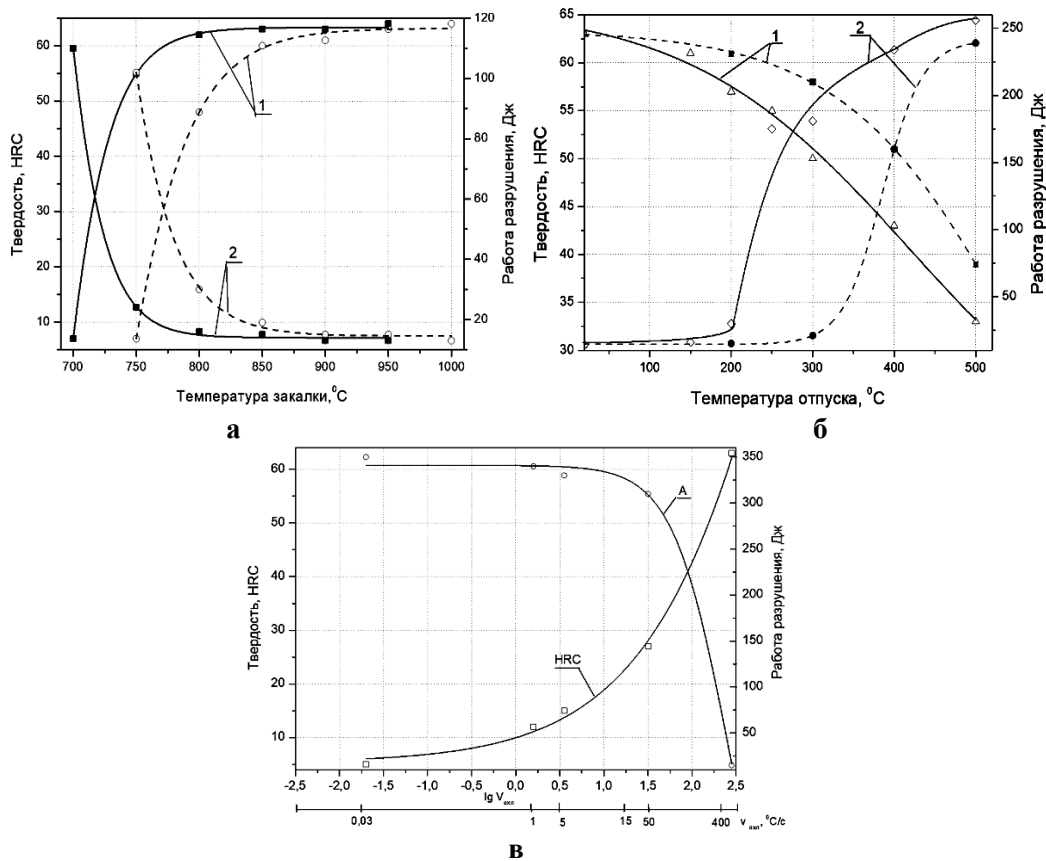
Скоростной нагрев смещает фазовое ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращение в сторону повышенных температур на 50 °С. Мартенсит появляется после нагрева выше 800 °С, а полное растворение карбидов – выше 950 °С (рисунок 6 г, д, е).



**Печной нагрев, 25 мин, охлаждение вода: а – исходный; б – 750 °С; в – 850 °С.
Скоростной нагрев, $V_n = 50$ °С/с, вода: г – 750 °С; д – 800 °С; е – 1000 °С
Рисунок 6 – Влияние термообработки на микроструктуру стали 60ПП**

Зависимость изменения механических свойств от различных режимов термической обработки показана на рисунках 7 а, б. Наибольшей твердостью (63 HRC) обладают образцы, охлажденные со скоростью 400 °С/с, однако работа их разрушения составляет 0,15 МДж/м² (рисунок 7 в). Снижение скорости охлаждения из γ -области до 50 °С/с сопровождается снижением твердости до 27 HRC и повышением работы разрушения до 3,0 МДж/м².

Определены оптимальные режимы обработки высокопрочной стали 96 (45Х2ГНМ): ИН до температуры 1000 °С–1050 °С, закалка в масле и последующий отпуск при 150 °С–200 °С, обеспечивающие предельное упрочнение сталей: $\sigma_B = 2000$ –2100 МПа, $\sigma_{0,2} = 1800$ –1900 МПа, $\delta = 5$ %–7 %, $\psi = 25$ %, 58–60 HRC.



Термическая обработка: скоростной нагрев $V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/s}$, $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$, вода:
 — печной отпуск 2 ч, воздух; --- скоростной отпуск $V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/s}$, вода.

1 – твердость; 2 – работа разрушения

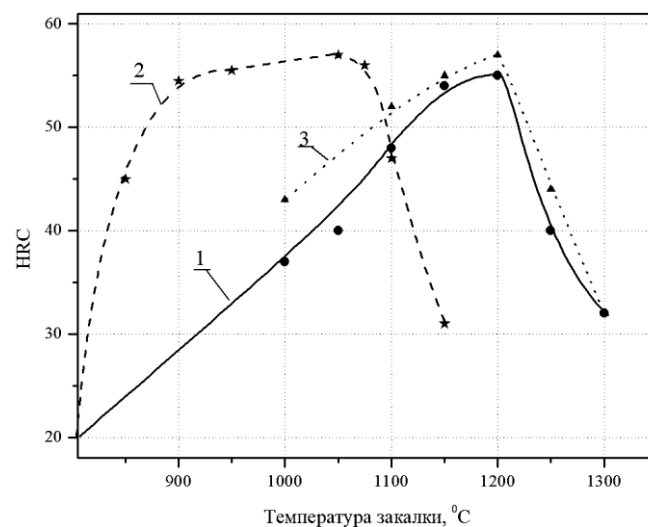
Рисунок 7 – Влияние температур закалки (а) и отпуска (б), скорости охлаждения (в) на твердость и работу разрушения (А) $^\circ\text{C}$ стали 60ПП

Показано, что при ИН легированных сталей формируется гетерогенная микроструктура с градиентным распределением углерода и легирующих элементов в аустените. Для гомогенизации структуры рекомендовано проводить изотермические выдержки для полного растворения карбидной фазы.

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния режимов ИН на процессы фазовых и структурных превращений в сталях и титановых сплавах. Установлены зависимости изменения их физико-механических свойств от температуры нагрева и скорости охлаждения. Разработаны комбинированные методы скоростной термообработки индукционным, лазерным и электронно-лучевым воздействиями с целью получения функционально-градиентных материалов.

Исследовано влияние ИН, изотермической выдержки при закалочных температурах и обработки холодом в жидком азоте на структуру и твердость мартенситной коррозионностойкой стали 95X18 (рисунок 8). Показано, что максимум твердости 56–57 HRC достигается при закалке с $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ – $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, что на $100 \text{ }^\circ\text{C}$ – $150 \text{ }^\circ\text{C}$ выше, чем при печном нагреве. Выдержка в течение 5 с при температуре закалки повышает твердость стали на 2–4 HRC.

Исследованы процессы фазовых и структурных превращений в сплаве ВТ6 при нагреве со скоростями 10, 25, 100 и 300 °С/с до температур 800 °С–1200 °С и при последующей закалке в воде. Установлено, что при нагреве со скоростью 50 °С/с в двухфазную ($\alpha+\beta$)-область до 900 °С происходит образование полигональной структуры. Зарождение и рост новых зерен β -фазы начинается при 950 °С. При 1000 °С формируется структура α' -мартенсита с размером β -зерен 20 мкм, что повышает твердость сплава до 40 HRC. Показано, что скоростной нагрев в β -область подавляет рост β -зерен, характерный для печного нагрева. Размер зерна при скоростях нагрева 10, 25, 100 и 300 °С/с до 1000 °С составляет 35, 22, 18 и 10 мкм соответственно.

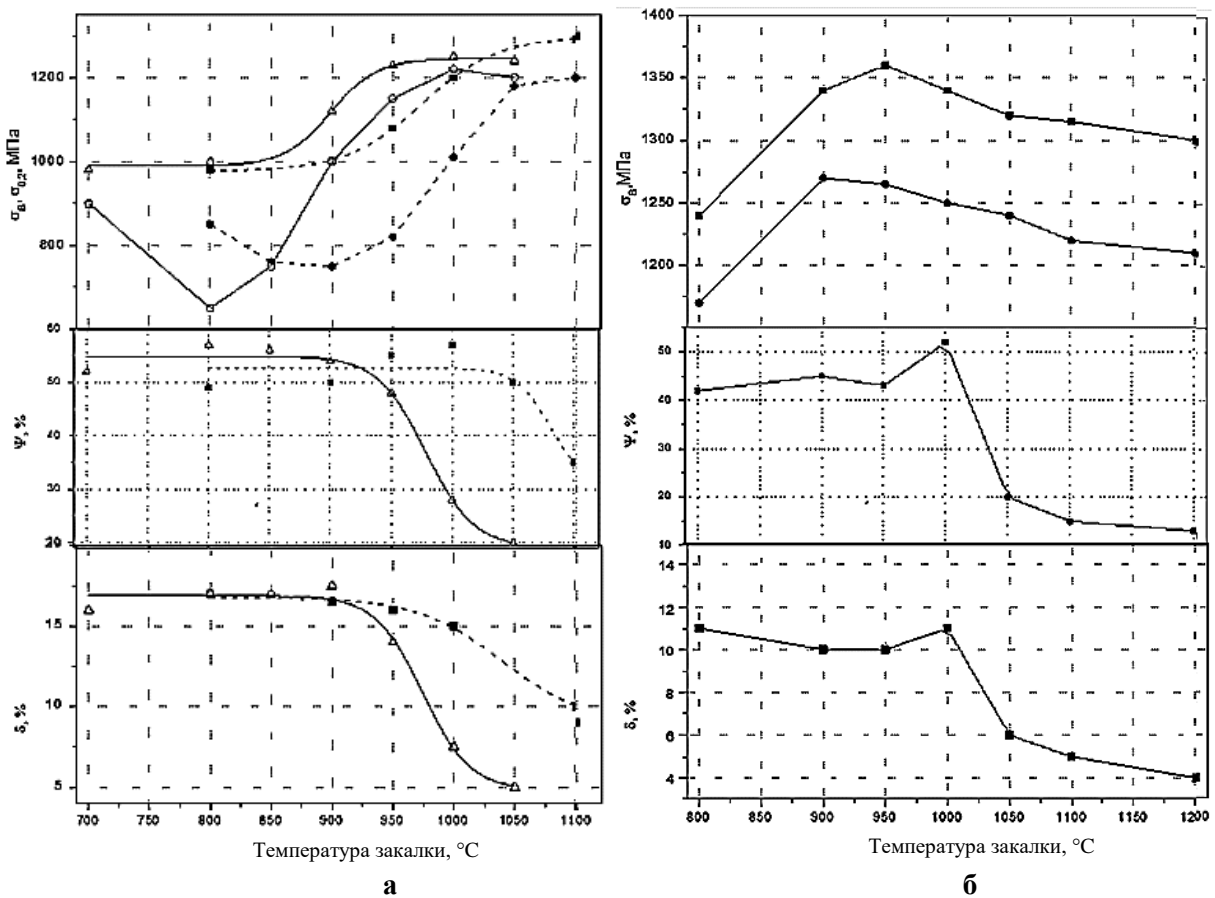


1 – скоростной нагрев ($V_n = 50$ °С/с), вода; 2 – нагрев в печи, 1 ч, вода;
3 – скоростной нагрев ($V_n = 50$ °С/с), изотермическая выдержка 5 с, охлаждение в воде
Рисунок 8 – Влияние режимов нагрева на твердость стали 95X18

Исследовано влияние температуры закалки (рисунок 9 а) и последующего старения (рисунок 9 б) при температуре 450 °С в течение 4 ч на физико-механические свойства сплава ВТ6. Установлено, что старение сплава ВТ6, состоящего в закаленном состоянии из α - и β_m -фаз, обеспечивает рост предела прочности почти на 20 %, что связано с распадом метастабильной β -фазы. В процессе нагрева до 900 °С, наряду с ростом количества β -фазы, происходит ее обеднение β -стабилизирующим элементом – ванадием. При последующей закалке β -фаза по мартенситной кинетике превращается в α' -фазу. Прочность закаленного на α' -фазу сплава резко повышается и распад α' -фазы способствует повышению предела прочности до 1340–1370 МПа.

Наиболее полно процесс рекристаллизации происходит после растворения α -фазы при температурах ≥ 1000 °С. Перестройка гексагональной решетки α - в ОЦК решетку β -фазы происходит быстрее, чем перераспределение легирующих элементов. В результате образуется мелкоигльчатый α' -мартенсит при незавершившемся

выравнивании концентрации легирующих элементов в объеме β -зерна. Микро-неоднородности в распределении легирующих элементов способствуют образованию в процессе старения высокопластичных микроучастков, повышающих пластичность сплава в интервале температур 975 °С–1000 °С. При более высоких температурах нагрева образуется α' -мартенсит, распад которого снижает пластические свойства сплава. Для оптимального сочетания прочности и пластичности закалку сплава ВТ6 необходимо проводить с температур скоростного нагрева 950 °С–1000 °С с последующим его старением при 450 °С в течение 4 ч.



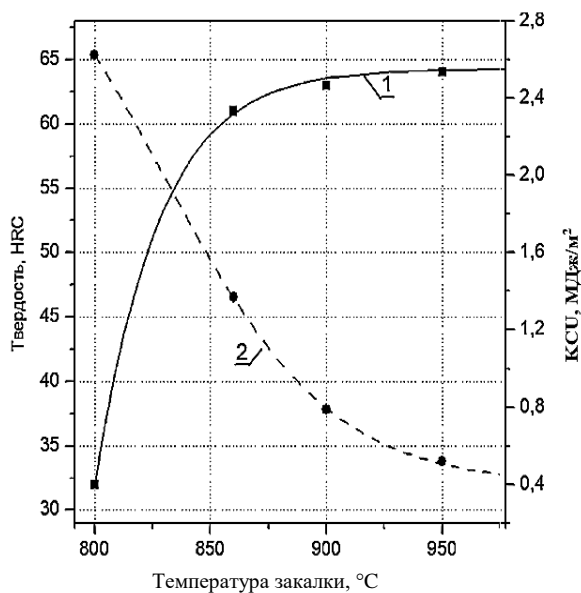
а скоростной нагрев (100 °С/с); _____ печной нагрев, 30 мин;
 б – скоростной нагрев, (100 °С/с), закалка и старение 450 °С, 4 ч

Рисунок 9 – Зависимость механических свойств сплава ВТ6 от температуры закалки (а) и от температуры закалки со старением (б)

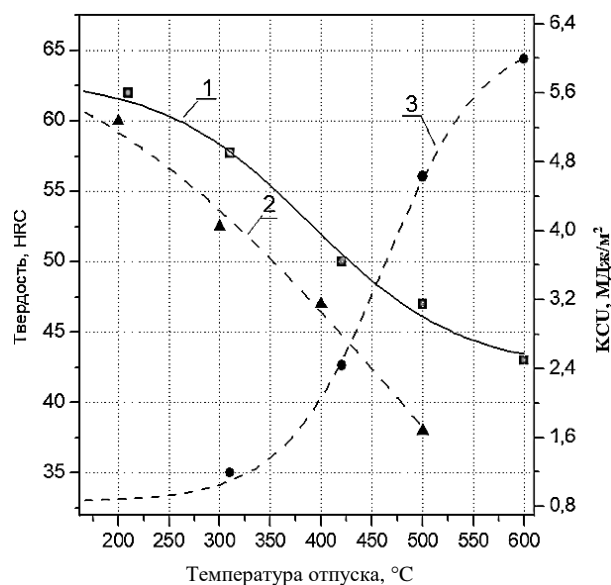
Исследовано влияние режимов комбинированной обработки на структуру и свойства сталей 65Г, 40Х, 96 и 60ПП. Установлено, что сталь 65Г после нагрева со скоростью 50 °С/с и закалки в масле эффективно упрочняется в интервале температур 800 °С–860 °С.

Твердость при этом возрастает от 32 до 61 HRC, а ударная вязкость KCU снижается с 2,6 до 1,3 МДж/м² (рисунок 10 а).

После печного отпуска при температурах 200 °С–600 °С в течение 2 ч, а также отпуска со скоростью нагрева 50 °С/с до 400 °С–500 °С ударная вязкость стали 65Г повышается с 2,2 до 4,5 МДж/м², а твердость снижается до 45–47 HRC (рисунок 10 б).



а
1 – твердость; 2 – ударная вязкость



б
1 – твердость; 2 – твердость (50 °С/с)
3 – ударная вязкость

Рисунок 10 – Влияние температуры закалки (а) и отпуска (б) на твердость и ударную вязкость стали 65Г

Установлено, что скоростной нагрев позволяет сформировать оптимальное сочетание свойств высокопрочных сталей 40Х, 96 и 60ПП по твердости поверхностных слоев и вязкости разрушения сердцевины. Наилучшим сочетанием свойств обладают стали 60ПП и 96 (рисунок 11).

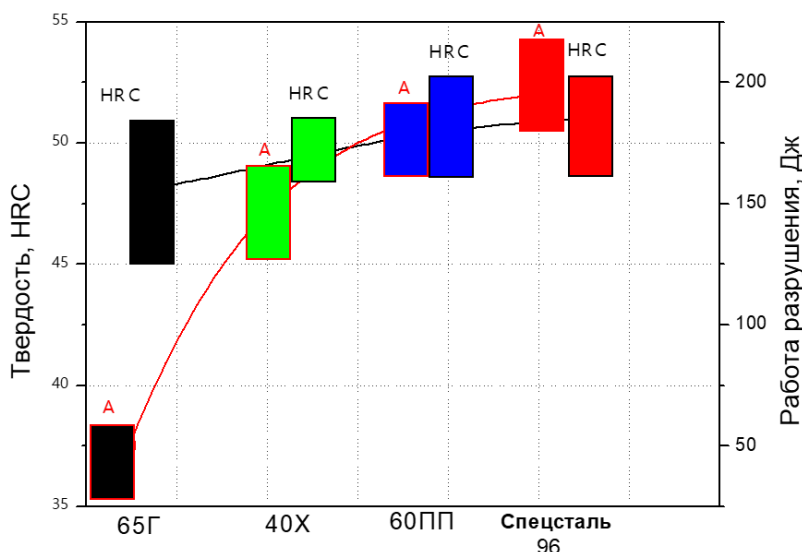


Рисунок 11 – Твердость (HRC) и работа разрушения (A) легированных сталей после скоростной термообработки

Исследовано влияние составов порошков, в том числе: карбидов – WC, Cr₃C₂, TiC, SiC, B₄C; боридов – TiB₂, W₂B₅, SiB₆; силицидов – VSi₂, TiSi₂ и нитридов – VN, ZrN на поверхностное лазерное упрочнение сталей. Установлено, что применение SiC позволяет сформировать поверхностный слой с твердостью 6–7 ГПа, легирование Cr₃C₂ повышает микротвердость до 15–18 ГПа. Наиболее перспективным является W₂B₅, который повышает износо-, окалино- и красностойкость сталей. Интенсивность изнашивания образцов, наплавленных композицией с 50 % W₂B₅, в 10–15 раз меньше, чем образцов из стали У8А. Микротвердость зон легирования при нанесении покрытий с W₂B₅ составляла 7–8 ГПа, с SiB₆ – до 10 ГПа, а TiSi₂ – до 11 ГПа.

Скоростная термообработка позволяет получить оптимальное сочетание механических свойств (ударная вязкость и твердость) сталей, а применение лазерного модифицирования – повысить твердость и износостойкость их поверхностных слоев.

Разработаны комбинированные технологии упрочнения, включающие объемную индукционную закалку и лазерную обработку режущих элементов. Показано, что в результате комбинирования скоростной индукционной и электронно-лучевой обработки может быть получен модифицированный слой глубиной до 1,5 мм. Наиболее высокая твердость и износостойкость модифицированного слоя получена при электронно-лучевом легировании упрочненного сплава ВТ23 карбидами Ti и Si (рисунок 12).

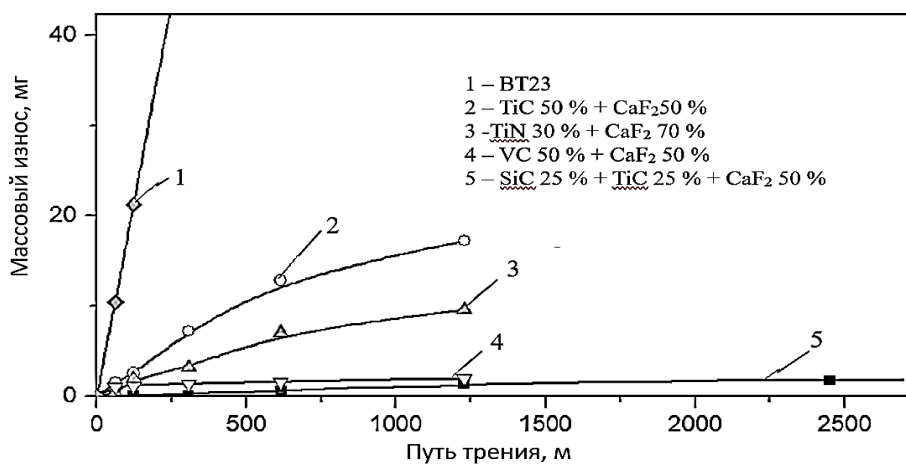


Рисунок 12 – Массовый износ исходного (1) и модифицированного (2–5) сплава ВТ23

В пятой главе разработана принципиально новая концепция создания технологий скоростной индукционной термической обработки, включающая следующие этапы: расчёт необходимых для детали физико-механических свойств в зависимости от условий её работы; исследование влияние скоростного нагрева на структуру и свойства материала детали; моделирование температурных и электромагнитных полей, формируемых в детали при скоростной термической обработке; расчет оптимальных электро-физических и технологических параметров индукционного оборудования. По каждому пункту концепции разработаны и теоретически обоснованы новые методы расчёта и моделирования.

Показано, что при традиционных методах расчёта используются справочные данные по свойствам материалов, полученным при печной термообработке, т. е. без учета градиентного распределения структуры и свойств по сечению деталей. В связи с этим для расчёта ресурса деталей и оптимальных режимов их скоростной индукционной обработки предложено два алгоритма последовательности действий. Первый основан на проведении экспериментальной обработки опытной партии деталей по различным технологическим режимам упрочнения; изучении макро– и микроструктуры с построением графиков распределения твердости по сечениям деталей; составлении базы данных по значениям твердости и соответствующим значениям прочностных и пластических свойств; формировании сетки слоев с различным уровнем свойств; расчете деталей с многослойной структурой в программах типа ANSYS с учетом условий их работы. Второй алгоритм заключается в проведении следующих действий: моделирование и расчет температурных полей, формируемых в детали при различных технологических режимах и параметрах работы высокочастотного оборудования; составление базы данных по значениям твердости и соответствующим значениям прочностных и пластических свойств, установленных при проведении исследований скоростного нагрева соответствующей марки стали; построение графика распределения свойств по сечению детали; формирование сетки слоев с различным уровнем свойств; расчет детали с многослойной структурой в специализированных программах с учетом условий ее работы.

На примере шлицевых валов методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS проведен расчёт их циклической усталости и коэффициента запаса прочности. Деталь рассматривали как состоящую из приповерхностных слоев с различными свойствами и сердцевиной с однородной твердостью 35 HRC, а при объемной закалке – как цельную с одинаковыми свойствами по сечению с твердостью 37 HRC. Валы нагружали одинаковыми предельными крутящими моментами, равными 936 Н·м.

Установлено, что циклическая долговечность на кручение шлицевых валов увеличивается пропорционально глубине закалки. Оптимальным для вала является упрочнённый слой глубиной 2,5–3 мм. Значения коэффициента запаса прочности (К.З.) и циклической долговечности при глубине слоя закалки $h = 2,7–3,0$ мм показаны на рисунке 13. Запас прочности в концентраторах напряжений равен 0,98, а циклическая долговечность составляет $8,41 \cdot 10^8$ циклов.

Таким образом, разработан алгоритм расчета усталостной выносливости деталей, работающих в условиях знакопеременных циклических нагрузок, подвергающихся поверхностной скоростной высокочастотной обработке с формированием градиентной структуры упрочненного слоя. Данный алгоритм позволяет определять необходимые для конкретных условий работы деталей оптимальные характеристики упрочнённых

слоев, значительно повышающих коэффициент запаса прочности и циклическую долговечность деталей в сравнении с полученными при их объемной закалке.

Созданы методика и алгоритм моделирования заданного температурного поля с допустимыми градиентами температуры по сечению заготовки, которые определяются теплофизическими свойствами материала, геометрическими размерами, температурой нагрева, конструктивными особенностями рабочей оснастки (индуктора), параметрами установки. Основными свойствами материалов, необходимыми для моделирования ИН, являются: теплопроводность λ , теплоемкость γ , плотность ρ , которые зависят от элементного, фазового состава и структуры материала, а также от температуры нагрева.

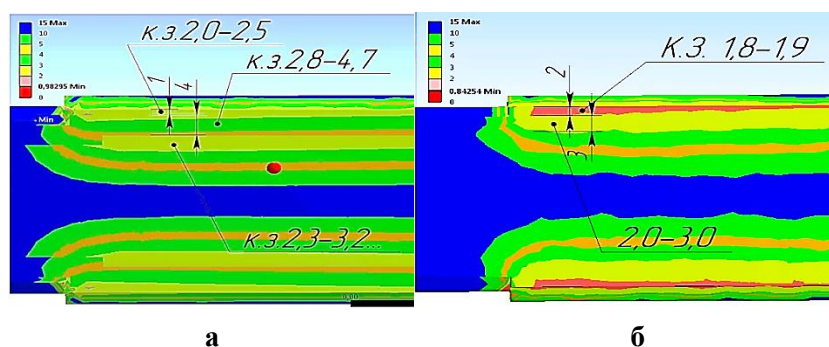


Рисунок 13 – Циклическая долговечность и К.З. вала после ТВЧ (а) и объемной (б) закалки

Для решения двумерных задач наиболее точный и универсальный алгоритм, основанный на сшивании внешней и внутренней электромагнитной задачи на поверхности загрузки с постановкой импедансных граничных условий, реализован в лицензируемой версии компьютерной программы Universal 2D. Рассмотрен пример моделирования ИН полуоси заднего моста автомобиля МАЗ, изготавливаемой из сталей 40Х, 40ХН или 35ХГСА. Требования по КД: твердость слоя – 58–60 HRC; твердость слоя на глубине 6,0 мм – 42 HRC. Этими требованиями задан градиент изменения твердости по сечению, который оказывает определяющее влияние на усталостную выносливость и ресурс детали. Результаты моделирования нагрева шлицевых поверхностей показаны на рисунках 14 и 15.

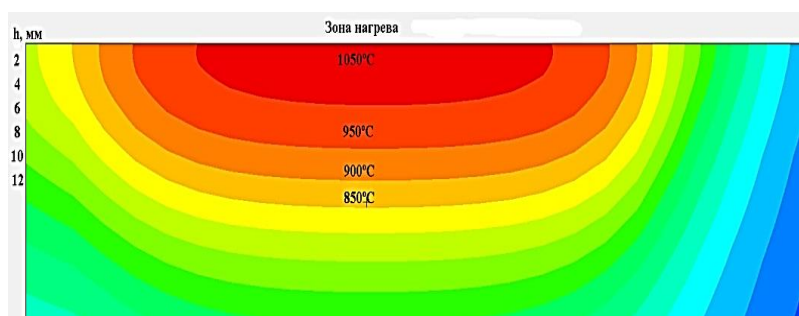
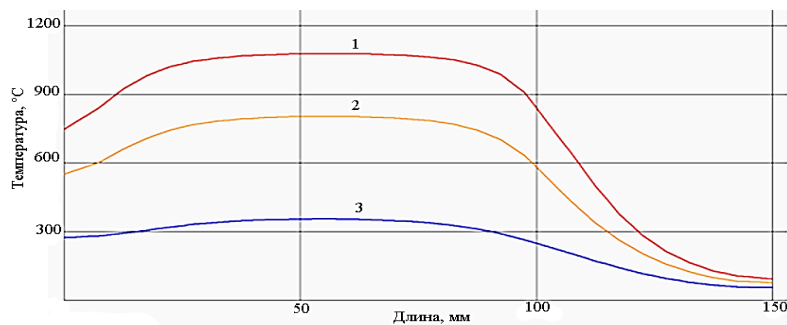


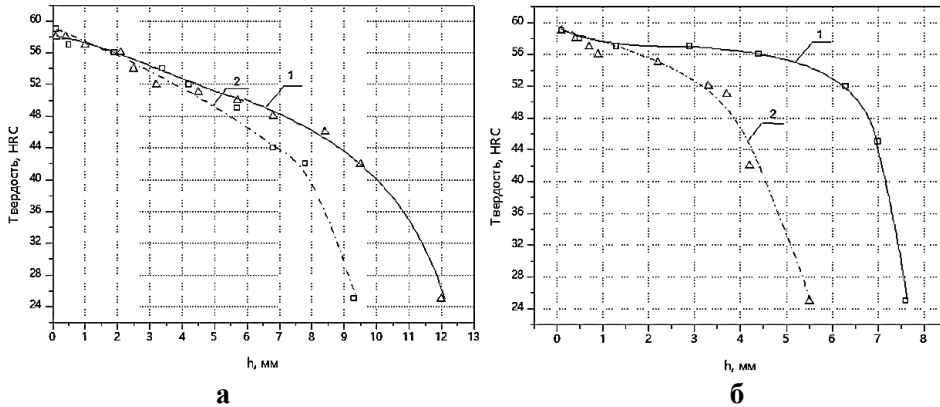
Рисунок 14 – Температурное поле, формируемое в течение 15 с с начала процесса нагрева полуоси

Моделирование распределения температурного поля при непрерывно-последовательном перемещении полуоси относительно индуктора показало, что температура на поверхности достигает 980 °С, а на глубине 8 мм – 890 °С.



Температура: 1 – на поверхности, 2 – средняя, 3 – в центре
 Рисунок 15 – Распределение температуры по сечению детали

Эти температуры достаточны для получения поверхностного закаленного слоя толщиной 6 мм. Проведенная верификация подтвердила адекватность алгоритма построения модели распределения температурных полей по сечению детали при скоростном ИН под поверхностную термообработку. На обработанных по установленным режимам полуосях получено распределение твердости, показанное на рисунке 16, на шлицах формируется слой толщиной до 7 мм с твердостью на глубине 42 HRC, на цилиндрической части – слой толщиной до 6 мм.



1 – измерение по зубу, 2 – измерение по впадине
 Рисунок 16 – Распределение твердости по глубине закаленного слоя на нижних (а) и на верхних (б) шлицах полуоси

Разработаны методики моделирования и расчёта ИН деталей под объёмную закалку при локальном ИН их поверхностей внешним электромагнитным полем. Предложен алгоритм расчета оптимальных электрофизических и технологических параметров оборудования скоростного ИН под операции поверхностной и объёмной обработки, включающий:

- анализ указанных на чертежах деталей-представителей требований к свойствам упрочненного слоя (глубина, твердость, конфигурация упрочненного слоя,

количество упрочненных зон), максимальные и минимальные габаритные размеры деталей, которые предполагается обрабатывать на оборудовании ИН;

- разбиение всех деталей на группы в зависимости от уровня требований и определение для каждой группы способа реализации скоростной обработки: непрерывно-последовательная или одновременная закалка; 3D-сканирование; отжиг; отпуск и др.;

- определение для каждой группы деталей оптимального частотного диапазона работы оборудования с целью достижения необходимой глубины закаленного слоя;

- расчет и проектирование для каждой детали оптимального по размерам и форме индуктора;

- расчет основных технических параметров оборудования и режимов технологического процесса.

Созданы методика моделирования температурных и электромагнитных полей, формируемых по сечению детали в зависимости от электрофизических и технологических параметров скоростной индукционной поверхностной и объемной обработки, а также методика расчета оптимальных электрофизических и технологических параметров индукционного оборудования, обеспечивающего достижение требуемого уровня свойств по сечению детали.

В шестой главе рассмотрены вопросы разработки линейки отечественного оборудования ИН под различные технологические задачи и организации его производства. Установлены основные требования к комплектности комплекса скоростного ИН, которые включают следующие модули:

- полупроводниковый преобразователь частоты на основе силовых тиристорных или транзисторных IGBT-модулей с КПД не менее 95 %;

- установку механизации с системой полной автоматизации или роботизации для обеспечения перемещения и вращения обрабатываемой детали относительно индуктора;

- микропроцессорную систему управления и контроля оборудования и технологии ИН;

- комплект индукторов и оснастки для обработки деталей заказчика;

- станцию охлаждения элементов оборудования и станцию подготовки и охлаждения закалочной жидкости.

В качестве силовых элементов для создания преобразователей выбраны полупроводниковые транзисторные IGBT-модули. Определены следующие 6 частотных диапазонов преобразователей для реализации технологий ИН, в кГц: 1 – 2,4; 2,4 – 10; 7 – 20; 10 – 60; 30 – 80 и 50 – 100. По мощности преобразователи разделены на модули с дискретностью 40–50 кВт, т. е. определена оптимальная единичная ячейка, которую можно создать на имеющейся элементной базе.

Предложена концепция модульного построения кинематической схемы универсальных индукционных установок. Разработана линейка оборудования со следующими схемами:

– установка, в которой деталь не перемещается относительно неподвижного блока преобразователя. Предназначена для одновременного нагрева всей детали или ее зоны под операции последующей деформации, термообработки, наплавки и пайки;

– установка, в которой деталь линейно перемещается и вращается относительно неподвижного блока преобразователя. Применяется для обработки деталей длиной до 1 м и массой не более 50 кг. Установка обладает высокой производительностью, проста в работе и обслуживании, может быть роботизирована с применением промышленных манипуляторов;

– установка, в которой блок преобразователя линейно перемещается относительно детали, наиболее востребована для обработки деталей длиной от 1 до 3 м и массой до 1500 кг;

– установка, в которой блок преобразователя перемещается в трех и более координатах относительно детали, наиболее универсальна, позволяет обрабатывать детали длиной от 0,1 до 5 м и массой 1500 кг и более, а также сканировать поверхность детали одновременно по 3 осям.

Спроектированы и изготовлены все вышеперечисленные виды установок под брендом ФТИ. На основные узлы комплексов ИН разработаны и в 2025 году актуализированы технические условия. Мобильная ФТИ 3.148.10 и универсальная ФТИ 3.148.1 установки показаны на рисунке 17.



а



б

Рисунок 17 – Мобильная ФТИ 3.148.10 (а) и универсальная ФТИ 3.148.1. (б) установки

Комплексы и установки ИН имеют разработанные специализированные системы управления, позволяющие реализовать основные режимы работы оборудования и технологий (ручной, автоматический, режим наладки, одновременный

способ нагрева, непрерывно-последовательный способ нагрева и 3D-сканирование). Созданные программные комплексы позволяют управлять и контролировать следующие процессы: перемещение и вращение деталей в широком диапазоне скоростей; нагрев и выдержка деталей при требуемой температуре; охлаждение деталей с контролем давления охлаждающей среды и скорости снижения температуры.

Система управления обладает функцией обратной связи, регулирующей параметры работы оборудования в зависимости от изменения параметров нагрева (температуры детали; температуры, скорости потока и давления охлаждающей среды) и функцией сохранения для последующего анализа и обработки всех параметров. Создана программная оболочка в виде диалоговых окон, позволяющих оператору создавать управляющую программу реализации технологии ИН детали путем заполнения диалоговых окон. Внутренняя программная оболочка создается на языке непрерывных функциональных схем в специализированных программных продуктах квалифицированными специалистами при разработке и изготовлении оборудования по ТЗ заказчика.

Разработаны специализированные комплексы ИН. Для ОАО «БЕЛАЗ» разработана технология и создан комплекс оборудования поверхностного упрочнения длинномерных и сложно-профильных деталей подвески автомобилей БЕЛАЗ. По разработанной технологии обрабатываются детали подвески типа шток, штанга, крышка длиной более 2500 мм с отверстиями диаметром до 300 мм и массой более 300 кг (рисунок 18).



Рисунок 18 – Номенклатура деталей подвески БЕЛАЗ, обрабатываемых на комплексе ФТИ 3.179

В рамках реализации Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь на 2011–2015 и 2016–2020 годы создано первое в Республике Беларусь специализированное производство по следующим направлениям:

- преобразователь частоты полупроводниковый ТН ВЭД 8504 40 900 8;

- установка индукционного нагрева для наплавки, пайки, плавки, термообработки и нагрева металла под деформацию ТН ВЭД 8514 40 000 0;
- станции охлаждения и подготовки охлаждающей жидкости ТН ВЭД 8419 50 000 0.

Выпускаемое индукционное оборудование по техническому уровню не уступает лучшим мировым аналогам. Установки ФТИ внедрены на предприятиях ОАО «МЗКТ», ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Амкодор», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Бобруйскагромаш», ОАО «БМЗ», ОАО «Могилевлифтмаш», ОАО «БЗА», ОАО «Автогидроусилитель», ПАО «КАМАЗ» и др. Для ОАО «БЕЛАЗ» в период с 2017 по 2021 гг. выполнены проекты по разработке новых технологий и пяти комплексов оборудования для упрочнения деталей. Выпущено 61899 шт. деталей на сумму 7 512 171,00 руб. / 3 092 000,00 долл. США, коэффициент эффективности – 23,56. Всего за период освоения (2019–2022 гг.) выпущено 23 484 шт. деталей подвески автомобилей БЕЛАЗ на сумму 17 722 426,03 руб./ 6 950 673,67 долл. США.

С 2014 г. на производстве ФТИ НАН Беларуси выполнено более 350 договоров на оказание услуг по упрочняющей обработке деталей, проектированию и изготовлению установок, индукторов, преобразователей, станций охлаждения, разработку технологий и оборудования ИН. Объемы работ, услуг по хозяйственным и бюджетным (ГНТП) договорам сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Объемы работ по производству индукционных установок и услуг по ТВЧ обработке деталей за 2019–2025 гг.

Направления	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	Всего
ТВЧ обработка, тыс. руб.	638	515	420	669	1 099	1 452	1 841	6 634
Производство индукционных установок и комплектующих, тыс. руб.	608	1 345	1 966	3 639	8 406	5 357	3 165	24 486

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Исследованы процессы структурных и фазовых превращений при скоростном нагреве и охлаждении низкоуглеродистых сталей с содержанием углерода до 0,25 % и их влияние на физико-механические свойства сталей. Установлено, что:

- при нагреве сталей 20пс, СтЗпс и 10ХСНД со скоростью 50 °С/с до температур 920 °С–1000 °С в результате фазовой перекристаллизации зон сварных

соединений и пластических деформаций с формированием мелкозернистой структуры выравниваются физико-механические свойства по объему изделий при этом ударная вязкость KCU^{-70} составляет $1,15 \text{ МДж/м}^2$, а микротвердость соответствует исходной твердости сталей 160–170 HV;

– скоростной нагрев конструкционных марок сталей и металлопроката из них в интервале температур фазового ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения до $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ повышает конструкционную прочность сталей 20пс и Ст3пс с S275 до уровня прочности S355, а легированной стали 10ХСНД – с S355 до S460;

– закалка с температур $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ – $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью охлаждения $400 \text{ }^\circ\text{C/с}$ и отпуском при $600 \text{ }^\circ\text{C}$ – $650 \text{ }^\circ\text{C}$ повышает прочность конструкционных сталей 09Г2С и 17Г1С до S460–S700 с сохранением их высокой пластичности. Формирование при данных скоростях охлаждения мелкозернистой мартенситной структуры повышает твердость стали 09Г2С до 30 HRC, а стали 17Г1С – до 40 HRC [1; 21; 35; 57; 60; 69; 70; 72; 76].

2. Установлены зависимости влияния температуры и скорости нагрева, а также режимов охлаждения, на структуру и физико-механические свойства насосно-компрессорных и нефтегазовых трубных сталей с содержанием углерода 0,3 %. Все процессы фазовых и структурных превращений в условиях скоростного нагрева сталей 17Г2СФ, 28ГХМ и 32Г2 смещаются на $50 \text{ }^\circ\text{C}$ – $100 \text{ }^\circ\text{C}$ вверх по температурной шкале. Прочностные свойства сталей повышаются на 50–100 МПа, а пластические – на 3 %–5 % при сокращении времени нагрева, исключении окисления, угара и обезуглероживания металла. Для гомогенизации сталей рекомендованы температуры их нагрева в пределах $950 \text{ }^\circ\text{C}$ – $980 \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью до $50 \text{ }^\circ\text{C/с}$ и изотермические выдержки при закалочной температуре [8; 9; 31; 46; 74; 75; 88].

3. Установлено, что при скоростях нагрева 20 – $100 \text{ }^\circ\text{C/с}$ высокопрочной стали 96 (45Х2ГНМ) все процессы, связанные с растворением карбидной фазы, распределением углерода и легирующих элементов, смещаются вверх по температурной шкале на $100 \text{ }^\circ\text{C}$ – $150 \text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению с печным нагревом. Определены оптимальные режимы ее обработки: скоростной нагрев до температур $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ – $1050 \text{ }^\circ\text{C}$, закалка в масле и последующий отпуск при $150 \text{ }^\circ\text{C}$ – $200 \text{ }^\circ\text{C}$, обеспечивающие предельное упрочнение сталей: $\sigma_b = 2000$ – 2100 МПа , $\sigma_{0,2} = 1800$ – 1900 МПа , $\delta = 5 \%$ – 7% , $\psi = 25 \%$, 58–60 HRC. Показано, что при скоростном нагреве стали 96 формируется гетерогенная микроструктура с градиентным распределением углерода и легирующих элементов в аустените. Скоростной нагрев рессорно-пружинной стали 50ХГФА после закалки с температур $950 \text{ }^\circ\text{C}$ – $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ позволяет получить оптимальные свойства стали ($\sigma_b = 1420 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 1320$ – 1340 МПа , $\delta = 10,0 \%$, $\psi = 45 \%$) при сохранении ее размера зерна в пределах 5–15 мкм [1; 2; 15; 16; 109].

4. Установлено, что при скоростном нагреве стали 60ПП, температуры ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения смещаются на 50 °С вверх по температурной шкале по сравнению с печным нагревом. Критическим параметром в процесс термообработки данного класса сталей является скорость охлаждения из γ -области. Для получения высокой твердости рекомендовано охлаждать их со скоростями выше 400 °С/с, что в сочетании с мелкодисперсной структурой повысило ресурс сельскохозяйственной и автомобильной техники в 1,5–2 раза [1; 59; 66; 73].

5. Исследованы процессы фазовых и структурных превращений в сплавах ВТ6 и ВТ23 при ИН до температур 800 °С–1200 °С и закалке. Установлено, что при нагреве со скоростью 50 °С/с до 900 °С происходит образование полигональной структуры, в интервале температур 900 °С–950 °С – развитие ($\alpha \rightarrow \beta$)-превращения с зарождением и ростом зерен β -фазы. При 1000 °С формируется мелкозернистая структура α' -мартенсита с размером β -зерен до 20 мкм, что приводит к повышению твердости сплава до 40 HRC. Старение закаленного сплава при температуре 450 °С в течение 4 ч обеспечивает распад метастабильной β -фазы и рост предела прочности на 20 %.

Показано, что для оптимального сочетания прочности и пластичности закалку сплава ВТ6 необходимо проводить с температур скоростного нагрева 950 °С–1000 °С с последующим его старением при 450 °С в течение 4 ч. Скоростной нагрев снижает газонасыщение, окисление сплава и оптимизирует его структуру [5; 6; 17; 19; 26; 62].

6. Исследовано влияние комбинированной обработки на механические свойства высокопрочных сталей 65Г, 40Х, 96, 60ПП и 95Х18. Установлено, что предварительная скоростная индукционная поверхностная обработка позволяет получить на деталях из данных сталей градиентные слои с оптимальным сочетанием механических свойств (ударная вязкость и твердость), а лазерное и электронно-лучевое модифицирование – поверхностные слои повышенной твердости и износостойкости. Сталь 65Г после нагрева со скоростью 50 °С/с и закалки в масле упрочняется в интервале температур 800 °С–860 °С. Твердость при этом возрастает от 32 до 61 HRC, а ударная вязкость KCU снижается с 2,6 до 1,3 кДж/м². После печного отпуска при температурах 200 °С–600 °С в течение 2 ч, а также отпуска со скоростью нагрева 50 °С/с, до 400 °С–500 °С ударная вязкость стали 65Г повышается с 2,2 до 4,5 кДж/м², а твердость снижается до 45–47 HRC. Исследовано влияние скоростного нагрева под закалку, изотермической выдержки при закалочных температурах и обработки холодом в жидком азоте на структуру и твердость мартенситной коррозионностойкой стали 95Х18. Установлено, что при печном нагреве максимум твердости 56–57 HRC достигается при закалке в воде с температуры 1050 °С. Дополнительные изотермические выдержки при скоростном нагреве до 1150 °С–1200 °С, что на 100 °С–150 °С выше, позволяют получить более равновесную и гомогенную структуру упрочненного слоя. При охлаждении после ИН в жидком азоте

за счет распада остаточного аустенита твердость стали 95X18 повышается до максимальных значений 58–60 HRC. Наилучшим сочетанием свойств обладают стали 60ПП и сталь 96, а среди коррозионно-стойких – 95X18 [1–3; 13; 14; 18; 38; 40; 51; 59; 63; 64; 71; 102; 108].

7. Исследовано влияние составов порошков химических соединений, в том числе: карбидов – WC, Cr₃C₂, TiC, SiC, B₄C; боридов – TiB₂, W₂B₅, SiB₆; силицидов – VSi₂, TiSi₂ и нитридов – VN, ZrN на упрочнение сталей методом лазерного воздействия в атмосфере аргона и азота. Установлено, что применение SiC позволяет сформировать поверхностный слой с твердостью 6–7 ГПа, легирование Cr₃C₂ повышает микротвердость до 15–18 ГПа. Наиболее перспективным является W₂B₅, который повышает износо-, окалино- и красностойкость сталей. Микротвердость зон легирования при нанесении покрытий с W₂B₅ составляет 7–8 ГПа, SiB₆ позволяет повысить твердость до 10 ГПа, а TiSi₂ – до 11 ГПа. Скоростная термообработка позволяет получить оптимальное сочетание механических свойств (ударная вязкость и твердость) сталей, а применение лазерного модифицирования – повысить микротвердость поверхностного слоя толщиной 100–200 мкм до 1100–1200 HV₅₀ и сформировать градиентную структуру, состоящую: на глубине 0,1–0,3 мм из мартенсита с твердостью до 800 HV₅₀, на глубине 0,3–0,6 мм из зоны термического влияния с переменной твердостью 800–500 HV₅₀ и далее из основного металла. [2; 3; 14; 19; 27; 28; 30; 32; 34; 36–38; 49–51; 55; 56; 58; 59; 65; 67; 68; 83–87; 89–91; 93; 95; 97; 98; 100–103; 105; 112; 113].

8. Разработана принципиально новая концепция создания технологии и оборудования скоростной индукционной термической обработки, включающий следующие этапы: расчёт необходимых для детали физико-механических и технологических свойств; исследование влияния скоростного нагрева на структуру и свойства материала детали; моделирование тепловых и электромагнитных полей, формируемых в детали при скоростной термической обработке; расчет оптимальных электрофизических и технологических параметров индукционного оборудования [1; 4; 7–12; 20; 22–25; 29; 31; 33; 39–48; 52–54; 61; 77; 81; 82; 92; 96; 99; 104; 106; 107; 111; 113–116].

9. Разработан оригинальный алгоритм расчета усталостной выносливости при знакопеременных циклических нагрузках деталей машиностроения, упрочненных методом поверхностной скоростной высокочастотной обработки на различную глубину и имеющих градиентную многослойную структуру упрочненного слоя. Создана методика моделирования температурных и электромагнитных полей, формируемых по сечению детали в зависимости от электрофизических и технологических параметров скоростной индукционной поверхностной и объемной термообработки. Создана методика расчета оптимальных электрофизических и

технологических параметров индукционного оборудования, позволяющего достигать необходимый уровень свойств по сечению детали [1; 4; 7; 10–12; 20; 22–25; 29; 31; 33; 39–48; 52–54; 78–80; 92; 114–116].

Рекомендации по практическому использованию результатов

На основе проведенных исследований, расчётов и проектирования создан модельный ряд индукционного оборудования по типовому КД ФТИ 3.148 с оптимальными характеристиками для различных групп деталей. Созданы уникальные системы управления оборудованием с обратной связью, позволяющие реализовать все возможные варианты технологий скоростной индукционной обработки. Разработано более 300 комплектов документации на индуктора для реализации технологий скоростного индукционного упрочнения деталей машиностроения сложной геометрической формы.

Создано первое специализированное сертифицированное производство индукционного оборудования по следующим направлениям:

- преобразователь частоты полупроводниковый ТН ВЭД 8504 40 9008;
- установка индукционного нагрева для наплавки, пайки, плавки, термообработки и нагрева металла под деформацию ТН ВЭД 8514 40 000 0;
- станции охлаждения и подготовки охлаждающей жидкости ТН ВЭД 8419 50 000 0;
- специальная оснастка для индукционных установок и преобразователей частоты (индуктора, средства механизации, автоматизации, системы управления, трансформаторы, нагревательные блоки и т. д.).

Выпускаемое в ФТИ НАН Беларуси индукционное оборудование внедрено на предприятиях холдингов и корпораций: ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Амкор», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Бобруйскагромаш», ОАО «Могилевлифтмаш», ОАО «БМЗ», ИЗ-КАРТЭКС (РФ), ПАО «КАМАЗ» (РФ), ПАО «Уралмашзавод» (РФ) и других. Всего на производстве в период 2014–2025 гг. выпущено и реализовано оборудования и термически обработано деталей на сумму более 30 млн белорусских рублей.

В рамках проектов ГНТП разработаны: КД ФТИ 3.178 и ТД 120.02350 на комплекс оборудования и технологию для создания упрочненных слоев с заданным градиентом свойств методом управляемого и контролируемого процесса охлаждения; КД ФТИ 3.179 и ТД 120.02250 на комплекс оборудования и технологию поверхностного электромагнитного упрочнения длинномерных и сложнопрофильных деталей подвески автомобилей БЕЛАЗ грузоподъемностью до 450 тонн; КД ФТИ 3.185.00 и МШЕЛ 01050.00026 на комплекс оборудования и технологию для автоматизированной пайки и термической обработки металлорежущего инструмента. Только по данным технологиям в течение 3 лет освоения обработано скоростным

индукционным нагревом на ОАО «БАЛАЗ» и ОАО «ОИЗ» более 500 000 серийных деталей на сумму более 11 млн долларов, выпуск серийной продукции продолжается.

В развитие широкомасштабного применения технологий ИН впервые предложено использовать локальный индукционный отжиг и нормализацию низкоуглеродистых сталей для сварных швов несущих рам карьерной и автомобильной техники, что позволило снизить структурную неоднородность, обеспечить получение равнопрочного состояния по всем опасным сечениям изделия, снизить риск аварийных ситуаций из-за усталостного излома и хрупкого разрушения деталей, повысить ресурс и надежность техники в целом. Предложено использовать стали трубного сортамента для массового производства деталей типа: ось, вал, шток гидроцилиндра и другие, как альтернативу традиционно применяемым среднеуглеродистым сталям. Показано, что при их поверхностной индукционной скоростной закалке формируется упрочненный слой с твердостью 45–52 HRC, при сохранении хорошей свариваемости. Сформированы базы данных по режимам скоростной индукционной обработки сталей 17Г2СФ, 28ГХМ и 32Г2 для различных групп прочности в соответствии с ГОСТ 633-80 и API 5CT. Предложены инновационные технологические процессы комбинированного упрочнения, включающие объемную индукционную закалку и лазерное модифицирование поверхности для обработки быстроизнашивающихся органов кормо- и зерноуборочной сельскохозяйственной и дорожной техники.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монография

1. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А.И. Гордиенко, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк, И.И. Вегера. – Мн. : Беларуская навука. – 2009. – 287 с.

Главы в коллективных монографиях

2. Гордиенко, А.И. Исследование и разработка скоростных методов термообработки высокопрочных сталей и создание на их основе функционально-градиентных материалов / А.И. Гордиенко, И.И. Вегера, В.В. Ивашко // Перспективные материалы и технологии / под общей редакцией В.В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2008. – Гл. 12. – С. 253–287.

3. Гордиенко, А.И. Исследование влияния режимов скоростной термической обработки и последующего лазерного нагрева на структуру и механические свойства среднеуглеродистых сталей / А.И. Гордиенко, И.И. Вегера, В.В. Ивашко // Перспективные технологии и методы контроля / сост. С.П. Беляев [и др.]. – Витебск : ВГТУ, 2009. – Гл. 17. – С. 450–485.

4. Перспективы развития оборудования и технологий индукционного нагрева в Республике Беларусь / А.И. Гордиенко, И.И. Вегера, В.В. Ивашко, А.И. Михлюк // Актуальные проблемы прочности / под общ. ред. В.В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2010. – Гл. 1. – С. 5–42.

5. Научные исследования и применение титановых и кобальтовых сплавов для производства имплантатов медицинского назначения / А.И. Гордиенко, И.И. Вегера, Г.И. Новик, И.Л. Поболь // Современные перспективные материалы / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2011. – Гл. 2. – С. 31–69.

6. Гордиенко, А.И. Электронно-лучевая сварка титановых сплавов / А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь, И.И. Вегера // Перспективные материалы и технологии / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2013. – Гл. 5. – С. 96–116.

7. Технологии и оборудование получения осевых трубных заготовок переменного профиля / В.А. Томило, И.И. Вегера, А.И. Михлюк, В.В. Левкович // Перспективные материалы и технологии / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2013. – Гл. 17. – С. 335–356.

8. Моделирование индукционного нагрева трубных цилиндрических стальных заготовок переменного сечения / А.И. Гордиенко, В.Б. Демидович, И.И. Вегера, А.И. Михлюк, А.В. Полысаев // Перспективные материалы и технологии / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2015. – Т. 1. – Гл. 20. – С. 333–354.

9. Вегера, И.И. Новые перспективные технологии индукционной термообработки труб / И.И. Вегера, А.В. Полысаев // Перспективные материалы и технологии / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2017. – Т. 2. – Гл.18. – С. 342–362.

10. Вегера, И.И. Эффективність використання індукційного нагріву в області металообробки / І.І. Вегера, І.А. Скавиш, П.Ю. Цикунов // Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти : колективна монографія / кол. авторів ; за заг. ред. П.М. Макаренка, О.В. Калініченка, В.І. Аранчій. – Полтава : Астроя, 2019. – С 335–342.

11. Вегера, И.И. Создание автоматизированных систем контроля и управления параметрами электромагнитного поля при индукционном нагреве / И.И. Вегера, Э.В. Гайлевич, В.Е. Ходюш // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В.В. Рубаника. – Витебск : ВГТУ, 2019. – Т. 2. – Гл. 17. – С. 230–243.

12. Вегера, И.И. Моделирование, расчет и разработка процессов высокочастотной термообработки шлицевых поверхностей / И.И. Вегера, А.В. Зизико, М.М. Сидоров // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В.В. Рубаника. – Мн. : Издательский центр БГУ, 2021. – Гл. 43. – С. 638–652.

**Статьи в научных изданиях в соответствии с пунктом 19 Положения
о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий
в Республике Беларусь**

13. Гордиенко, А.И. Поверхностное электротермическое упрочнение звеньев гусениц из литых и деформированных заготовок / А.И. Гордиенко, А.И. Тарарук, И.И. Вегера // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2005. – № 2. – С. 48–52.

14. Вегера, И.И. Создание технологии упрочнения режущих элементов кормоуборочной техники / И.И. Вегера // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2006. – № 5. – С. 23–28.

15. Гордиенко, А.И. Разработка и применение функционально-градиентных материалов / А.И. Гордиенко, В.В. Ивашко, И.И. Вегера // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2007. – № 2. – С. 51–58.

16. Гордиенко, А.И. Функционально-градиентные материалы на основе легированных сталей / А.И. Гордиенко, В.В. Ивашко, И.И. Вегера // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 2. – С. 24–32.

17. Вегера, И.И. Скоростная термообработка титанового сплава ВТ6 и анализ его биологической совместимости в зависимости от режимов обработки / И.И. Вегера, А.В. Сидоренко, Д.В. Рахуба // Молодежь в науке – 2007 : приложение к журналу

«Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук». – 2008. – Ч. 3. – С. 80–85.

18. Биленко, Э.Г. Влияние скоростной термической обработки с последующим ионно-лучевым азотированием на физико-механические свойства стали 40X / Э.Г. Биленко, И.И. Вегера // Трение и износ. – 2008. – № 6 (29). – С. 578–582.

19. Мурашова, И.В. Применение методов электронно-лучевой обработки для создания покрытий с особыми свойствами на сталях и титановых сплавах / И.В. Мурашова, А.В. Гринкин, И.И. Вегера // Молодежь в науке – 2009 : приложение к журналу «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук». – 2010. – Ч. 5. – С. 163–169.

20. Михлюк, А.И. Индукционная термическая обработка: анализ, состояние и перспективы развития / А.И. Михлюк, А.И. Гордиенко, И.И. Вегера // Литье и металлургия. – 2010. – №1–2. – С. 140–148.

21. Вегера, И.И. Исследование процессов фазовой перекристаллизации среднеуглеродистых сталей при отжиге длиномерного круглого проката / И.И. Вегера, А.И. Михлюк // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2012. – № 2. – С. 24–29.

22. Гордиенко, А.И. Индукционная термическая обработка в машиностроении: анализ, проблемы, перспективы развития в Республике Беларусь / А.И. Гордиенко, А.И. Михлюк, И.И. Вегера // Индукционный нагрев. – 2014. – № 1 (27). – С. 16–23.

23. Михлюк, А.И. Индукционная закалка внутренних поверхностей в машиностроении: обзор, анализ, решения / А.И. Михлюк, И.И. Вегера, В.С. Вишневецкий // Индукционный нагрев. – 2015. – № 1 (28). – С. 44–49.

24. Циклическое охлаждение водяным душем при индукционной закалке деталей сложной формы / И.И. Вегера, А.И. Михлюк, А.И. Тарарук, А.В. Польшаев // Индукционный нагрев. – 2015. – № 1 (28). – С. 50–53.

25. Гордиенко, А.И. Новые направления развития технологий и оборудования индукционного нагрева / А.И. Гордиенко, А.И. Михлюк, И.И. Вегера // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2016. – № 1. – С. 5–14.

26. Индукционная термообработка титановых сплавов / И.И. Вегера, А.И. Михлюк, В.Б. Демидович, М.Ю. Хацаюк // Титан. – 2018. – № 1 (59). – С. 41–46.

27. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя / В.С. Голубев, И.И. Вегера, О. Чернашеюс, В.В. Чаевский // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. – 2019. – Вып. 7. – С. 34–42.

28. Лазерное модифицирование газотермических покрытий из нержавеющей сталей / О.В. Дьяченко, С.М. Криуша, М.А. Кардаполова, В.С. Голубев, И.И. Вегера // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. – 2020. – Вып. 8. – С. 44–53.

29. Особенности технологии нагрева при индукционной термообработке внешним электромагнитным полем / И.И. Вегера, А.В. Зизико, П.Ю. Цыкунов, В.М. Якович // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2020. – № 1. – С. 54–61.
30. Романчук, И.А. Особенности формирования упрочняющих покрытий при комплексной лазерной и плазменно-порошковой наплавке / И.А. Романчук, В.С. Голубев, И.И. Вегера // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. – 2021. – Вып. 9. – С. 44–52.
31. Расчет и моделирование параметров поверхностной высокочастотной термообработки труб / И.И. Вегера, А.И. Матальго, И.А. Скавыш, П.Ю. Цыкунов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2021. – № 1. – С. 20–27.
32. Наплавка износостойких слоев на рабочие кромки противорезающих брусьев кормоуборочных комбайнов / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш, П.С. Дробышевский // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. – 2022. – Вып. 12. – С. 65–73.
33. Инновационные технологии упрочнения внутренних поверхностей деталей подвески тяжелонагруженных машин методами лазерного и высокочастотного индукционного воздействия / О.Г. Девойно, И.И. Вегера, В.Г. Залесский, В.В. Рудый, В.В. Жарский // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2023. – № 3. – С. 208–219.
34. Применение волоконного лазера для поверхностного легирования стали / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш, О.В. Дьяченко, К.В. Протасевич // Вестник БарГУ. Серия: Технические науки. – 2023. – Вып. 14. – С. 8–15.
35. Исследование влияния скоростной электротермической обработки на структуру сварного соединения из низколегированной конструкционной стали / И.Ю. Куделко, А.Г. Сидоренко, И.И. Вегера, А.В. Зизико // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 2. – С. 61–68.
36. About the Efficiency of Using Modern Technologies for the Formation of Hardened Coatings from Self-Fluxing Alloys in Combination of Gas Thermal Spraying and High-Frequency Current Melting / O.G. Devoino, I.I. Vegera, V.G. Zaleski, A.Y. Rudnitskii, A.V. Gorbunov, A.S. Volod'ko // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2025. – 61. – P. 427–440.
37. Surface Alloying of Hardox 600 Steel Using a Fiber Laser / V.S. Golubev, I.I. Vegera, V.E. Hodyush, O.V. Dyachenko, K.V. Protasevich // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2025. – Vol. 61, No. 3. – P. 293–300.

38. Application of Fiber Laser for Surface Alloying of 95Cr18 Steel / V.S. Golubev, I.I. Vegeera, V.E. Khodyush, O.V. Dyachenko, K.V. Protasevich // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2025. – Vol. 61, No. 6. – P. 824–831.

Статьи в сборниках научных трудов, включенных в перечень ВАК

39. Михлюк, А.И. Высокочастотная термообработка внутренних поверхностей деталей машиностроения / А.И. Михлюк, И.И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Кн. 2. – С. 204–214.

40. Тарарук, А.И. Поверхностная закалка ТВЧ цилиндрических деталей сложной формы из легированных сталей с использованием циклического охлаждения водяным душем / А.И. Тарарук, И.И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Кн. 2. – С. 363–370.

41. Современная система управления процессом индукционного нагрева / И.И. Вегера, Э.В. Гайлевич, А.В. Польшаев, М.А. Селедцов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2015. – Кн. 2. – С. 96–101.

42. Польшаев, А.В. Анализ современных программных продуктов для моделирования процессов термообработки с применением индукционного нагрева / А.В. Польшаев, А.И. Михлюк, И.И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2015. – Кн. 2. – С. 278–283.

43. Моделирование и разработка технологии индукционного нагрева трубной заготовки под операцию раскатки / А.И. Михлюк, И.И. Вегера, А.И. Матальго, А.В. Польшаев // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2016. – Кн. 2. – С. 160–169.

44. Вегера, И.И. Моделирование и разработка технологии высокочастотного нагрева внутренних отверстий // И.И. Вегера, Д.И. Булан, А.И. Тарарук // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2016. – Кн. 2. – С. 59–66.

45. Моделирование влияния электромагнитного поля высокой частоты на температурные поля в металлах и сплавах при индукционной плавке / И.И. Вегера, В.Ч. Вишнеvский, А.В. Зизико, И.А. Скавыш // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2017. – Кн. 2. – С. 302–316.

46. Моделирование процесса индукционной термообработки трубного проката / И.И. Вегера, А.В. Полысаев, Д.И. Булан, А.И. Маталыго // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2017. – Кн. 2. – С. 19–27.

47. Гайлевич, Э.В. Концепция автоматизированной системы управления установками индукционной термообработки / Э.В. Гайлевич, И.И. Вегера, А.В. Зизико // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2018. – Кн. 2. – С. 51–57.

48. Моделирование нагрева заготовок внешним электромагнитным полем / Д.И. Булан., И.И. Вегера, А.В. Полысаев, П.Ю. Цыкунов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2018. – Кн. 2. – С. 25–33.

49. Исследование особенностей структуры и качества слоев, получаемых при лазерном модифицировании и наплавке / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.И. Пушкевич, А.П. Личевский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2019. – Кн. 2. – С. 163–172.

50. Романчук, И.А. Особенности формирования упрочняющих покрытий при лазерной порошковой наплавке / И.А. Романчук, В.С. Голубев, И.И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2020. – Кн. 2. – С. 48–57.

51. Вегера, И.И. Опыт применения современных методов поверхностного упрочнения на основе лазерной и ТВЧ обработки / И.И. Вегера, В.С. Голубев // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. : в 2 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2021. – Кн. 2. – С. 44–58.

52. Демидович, В.Б. История и развитие промышленных технологий индукционного нагрева / В.Б. Демидович, А.И. Михлюк, И.И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2021. – Кн. 2. – С. 12–21.

53. Демидович, В.Б. Состояние и перспективы развития индукционного нагрева в научно промышленном комплексе союзного государства / В.Б. Демидович, А.И. Михлюк, И.И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2021. – Кн. 2. – С. 22–31.

54. Специальные магнитные материалы и практика их применения при высокочастотном индукционном нагреве / А.К. Вечер, Г.А. Говор, О.Ф. Демиденко, И.И. Вегера, А.В. Зизико // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2021. – Кн. 2. – С. 59–72.

55. Создание поверхностных композиционных слоев на основе порошковых материалов с использованием лазерной и индукционной обработки / В.С. Голубев,

И.И. Вегера, В.Е. Ходюш, П.С. Дробышевский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2022. – Кн. 2. – С. 61–73.

56. Об эффективности использования современных технологий формирования упрочненных покрытий из самофлюсующихся сплавов при комбинации газотермического напыления и ТВЧ оплавления / И.И. Вегера, О.Г. Девойно, В.Г. Залесский, А.Ю. Рудницкий, А.В. Горбунов, А.С. Володько // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2023. – Кн. 2. – С. 14–34.

57. Исследование скоростной электротермической обработки (СЭТО) сварных соединений образцов и элементов рамы карьерных самосвалов БЕЛАЗ с целью обеспечения равнопрочности конструкции / Д.С. Маньковский, И.И. Вегера, А.В. Зизико, П.Ю. Цыкунов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2023. – Кн. 2. – С. 149–155.

58. Исследование по оптимизации нанесения упрочненных покрытий из самофлюсующегося никелевого сплава на цилиндрические детали при газопламенном напылении с индукционным оплавлением и водно-капельной закалкой / О.Г. Девойно, А.Ю. Рудницкий, И.И. Вегера, А.В. Горбунов, А.С. Володько, А.Н. Поляков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2024. – Кн. 2. – С. 211–228.

59. Моделирование и разработка технологии объемно поверхностной закалки деталей трансмиссии и зубчатых передач автомобильной техники / И.И. Вегера, А.В. Зизико, А.В. Полысаев, А.Г. Шагиев, М.М. Ганиев // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2025. – Кн. 1. – С. 53–70.

60. Технология скоростного электротермического отжига сварных соединений сложной конфигурации рам карьерных самосвалов / И.И. Вегера, П.Ю. Цыкунов, А.В. Зизико, Д.С. Маньковский, А.Г. Сидоренко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2025. – Кн. 1. – С. 71–82.

Статьи в научных журналах и сборниках научных трудов конференций

61. Лашкевич, О.Е. Технология контурного упрочнения осей и валов сложной формы / О.Е. Лашкевич, А.И. Тарарук, И.И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы Междунар. науч.-техн.

конф., г. Минск, 27–29 марта 2006 г. / ФТИ НАН Беларуси. – Мн. : Экоперспектива. – 2006. – С. 270–275.

62. Исследование и разработка технологии электротермической обработки титановых сплавов и анализ их биологической совместимости / А.И. Гордиенко, В.В. Ивашко, И.И. Вегера, Г.И. Новик // Титан. – 2007. – № 2 (21). – С. 18–25.

63. Ивашко, В.В. Исследование влияния режимов скоростной термической обработки и последующего лазерного нагрева на структуру и механические свойства среднеуглеродистых сталей / В.В. Ивашко, В.С. Голубев, И.И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Мн. : Экоперспектива. – 2007. – Ч. 1. – С. 142–150.

64. Ивашко, В.В. Разработка процесса комбинированного термоупрочнения деталей, изготовленных из стали 40Х / В.В. Ивашко, И.И. Вегера, С.И. Синцов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Мн. : Экоперспектива, 2007. – Ч. 1. – С. 163–170.

65. Поболь, И.Л. Исследование возможностей электронно-лучевой обработки для повышения бронезащитных свойств титановых сплавов / И.Л. Поболь, И.И. Вегера, М.Г. Голковский // Физика экстремальных состояний вещества – 2008 : сб. ст. / Институт проблем химической физики РАН. – Черногоровка, 2008. – С. 212–214.

66. Ивашко, В.В. Влияние режимов нагрева на структуру и механические свойства стали 60ПП / В.В. Ивашко, И.И. Вегера, С.И. Синцов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. материалов III Междунар. науч.-техн. конф. : в 4 кн. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2008. – Кн. 1. Многофункциональные материалы в современной технике, микро- и нанoeлектронике. – С. 122–129.

67. Гордиенко, А.И. Разработка новых методов электронно-лучевой обработки для повышения бронезащитных свойств титановых сплавов / А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь, И.И. Вегера // Ti – 2008 в СНГ : материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Санкт-Петербург, 18–21 мая 2008 г. – С. 219–230.

68. Гордиенко, А.И. Применение электронно-лучевой обработки для создания керамических покрытий с особыми свойствами на титановых сплавах / А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь, И.И. Вегера // Ti-2009 в СНГ : материалы Междунар. конф., г. Одесса, 17–20 мая 2009 г. – Киев : РИО ИМФ им. Курдюмова НАН Украины. – С. 234–242.

69. Гордиенко, А.И. Исследование процессов разупрочнения холоднодеформированной листовой стали 09Г2С, применяемой для изготовления сосудов, работающих под давлением / А.И. Гордиенко, В.В. Ивашко, И.И. Вегера //

Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. материалов IV Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 19–21 окт. 2009 г. : в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2009. – Кн. 2. Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование для упрочнения и восстановления свойств поверхности материалов. – С. 70–75.

70. Ивашко, В.В. Исследование процессов разупрочнения холоднодеформированной коррозионностойкой листовой стали AISI 304, применяемой для изготовления сосудов, работающих под давлением / В.В. Ивашко, И.И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. материалов V Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 15–17 сент. 2010 г. : в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси ; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2010. – Кн. 1. Конструкционные и функциональные материалы в современной технике, методы их получения. Материалы для микро- и наноэлектроники. – С. 37–44.

71. Ивашко, В.В. Скоростная термическая обработка нержавеющей стали 95X18 / В.В. Ивашко, И.И. Вегера, С.И. Синцов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. материалов VI Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 14–16 сент. 2011 г. : в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси. – Мн., 2011. – Кн. 2. – С. 165–171.

72. Вегера, И.И. Скоростная термообработка длинномерных полуфабрикатов несущих конструкций автотехники / И.И. Вегера, В.В. Ивашко, А.И. Михлюк // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. материалов VI Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 14–16 сент. 2011 г. : в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси. – Мн., 2011. – Кн. 2. – С. 165–171.

73. Влияние режимов нагрева на структуру и механические свойства стали 60ПП / А.И. Гордиенко, А.И. Михлюк, В.В. Ивашко, И.И. Вегера // Литье и металлургия. – 2011. – № 1. – С. 146–153.

74. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства горячекатанных труб, изготовленных из стали 32Г2 / В.В. Ивашко, О.М. Кириленко, И.И. Вегера, Д.А. Семенов // Литье и металлургия. – 2011. – № 4. – С. 108–114.

75. Исследование влияния режимов скоростной термической обработки на структуру и механические свойства трубной стали 32Г2 / А.И. Гордиенко, О.М. Кириленко, И.И. Вегера, Д.А. Семенов // Литье и металлургия. – 2012. – № 1. – С. 43–48.

76. Михлюк, А.И. Улучшение структуры и механических характеристик несущих конструкций мобильных машин путем индукционной термообработки /

А.И. Михлюк, И.И. Вегера, О.А. Вегера // Литье и металлургия. – 2012. – № 1. – С. 104–110.

77. К вопросу о актуальности создания индукционного оборудования / И.И. Вегера, А.В. Полысаев, А.А. Новиков, И.А. Хайтин // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. материалов VII Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 19–21 сент. 2012 г. : в 3 кн. / ФТИ НАН Беларуси. – Мн., 2012. – Кн. 2. – С. 53–58.

78. Моделирование процесса термообработки с применением индукционного нагрева / И.И. Вегера, А.И. Маталыго, И.А. Скавыш, П.Ю. Цыкунов // Современные технологии в образовании : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практич. конф., г. Минск, 24–25 нояб. 2016 г. / БНТУ. – Мн., 2016. – С. 177–182.

79. Вегера, И.И. Анализ влияния длины ножки магнитопровода на скорость нагрева / И.И. Вегера, А.В. Зизико // Современные технологии в образовании : материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 29–30 нояб. 2018 г. : в 2 ч. / БНТУ. – Мн., 2018. – Ч. 1. – С. 11–14.

80. Вегера, И.И. Автоматизация процессов индукционного нагрева / И.И. Вегера, Э.В. Гайлевич // Современные технологии в образовании : материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 29–30 нояб. 2018 г. : в 2 ч. / – Мн., 2018. – Ч. 1. – С. 7–11.

81. Вегера, И.И. Разработка станции охлаждения индукционной установки / И.И. Вегера, И.А. Скавыш // Современные технологии в образовании : материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 29–30 нояб. 2018 г. : в 2 ч. / БНТУ. – Мн., 2018. – Ч. 1. – С. 14–18.

82. Вегера, И.И. Автоматизация вертикального перемещения и контроль точности позиционирования деталей на установках ТВЧ / И.И. Вегера, В.Е. Ходюш // Современные технологии в образовании : материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 29–30 нояб. 2018 г. : в 2 ч. / БНТУ. – Мн., 2018. – Ч. 1. – С. 18–22.

83. Голубев, В.С. Особенности структуры и качества поверхностных слоев материалов при их лазерной обработке с изменением химического состава / В.С. Голубев, И.И. Вегера, О. Чернашеюс // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXVI Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 23–29 сент. 2019 г. – С. 84–87.

84. Романчук, И.А. Особенности формирования упрочняющих покрытий при плазменной порошковой наплавке / И.А. Романчук, В.С. Голубев, И.И. Вегера // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXVII Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 23–29 сент. 2020 г. – С. 342–345.

85. Лазерная обработка покрытий из нержавеющей сталей / В.С. Голубев, И.И. Вегера, С.М. Криуша, О. В. Дьяченко // Быстрозакаленные материалы и

покрытия : сб. материалов XVII Междунар. науч.-техн. конф., г. Москва, 2020 г. – М., 2020. – С. 201–205.

86. Влияние лазерного модифицирования боридами на микротвердость покрытий из нержавеющей стали / О.В. Дьяченко, С.М. Криуша, В.С. Голубев, И.И. Вегера // Информационные и инновационные технологии в науке и образовании : сб. материалов всерос. науч.-практ. конф., г. Таганрог, 2020 г. – Таганрог, 2020. – С. 62–65.

87. Романчук, И.А. Изучение особенностей формирования покрытий при комплексной лазерной и плазменно-порошковой наплавке / И.А. Романчук, В.С. Голубев, И.И. Вегера // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, сент. 2021 г. – С. 489–493.

88. Перевалов, Ю.А. Усовершенствованные системы индукционной термообработки труб / Ю.А. Перевалов, В.Б. Демидович, И.И. Вегера // Международный конгресс UIE по эволюции и новым тенденциям в электро-термических процессах, Пльзень, 2021 г. – Режим доступа: <https://easychair.org/conferences/overview?a=24312630>.

89. Влияние лазерного модифицирования боридами на микротвердость покрытий из нержавеющей стали / О.В. Дьяченко, С.М. Криуша, В.С. Голубев, И.И. Вегера // Информационные и инновационные технологии в науке и образовании : материалы V всерос. науч.-практ. конф., г. Ростов-на-Дону, 2022 г. – С. 782–785.

90. Перспективы создания поверхностных композиционных слоев на основе совместного использования лазерной и индукционной обработки / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш, П.С. Дробышевский // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXIX Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 2022 г. – 2022. – С. 45–49.

91. Особенности наплавки на рабочие кромки противорежущих брусьев кормоуборочных комбайнов / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш, П.С. Дробышевский // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Гомель, 2022 г. – Гомель, 2022. – С. 90–95.

92. Mechanisms of the Structure Formation of Soldered Seams When Using Composite Solders / V. Lebedev, I. Vegera, E. Dzhemilov, R. Dzhemalyadinov // Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. : DSMIE 2022 : Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Springer, Cham, 2022. – P. 414–423.

93. Исследования микроструктуры высокопрочного чугуна после лазерной и плазменной обработки / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.И. Гуринович, П.С. Дробышевский // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 2023 г. – Севастополь, 2023. – С. 77–81.

94. Голубев, В.С. Применение современных лазерных и индукционных технологий в сельскохозяйственном машиностроении / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тр. 7-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Гомель, 2023 г. – Гомель, 2023. – Ч. 1. – С. 96–100.

95. Испытания на износ упрочненных культиваторных лап / В.В. Голдыбан, И.И. Вегера, А.С. Воробей, М.И. Курилович, А.Н. Антоненко, В.М. Константинов // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межведомственный тематический сб. / Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2023. – Вып. 57. – С. 175–180.

96. Вегера, И.И. Инновационные технологии и промышленное оборудование для индукционного нагрева в машиностроении / И.И. Вегера, В.Г. Залесский // Наука и инновации. – 2023. – № 1 (239). – С. 24–29.

97. Использование волоконного лазера для поверхностного легирования стали HARDOX 600 / О.В. Дьяченко, В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш, К.В. Протасевич // Физические основы современных технологий и методика преподавания естественно-научных и технологических дисциплин : материалы VIII всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием), г. Ростов-на-Дону, 2024 г. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 99–103.

98. Особенности поверхностного легирования стали Hardox 600 с использованием волоконного лазера / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш, О.В. Дьяченко, К.В. Протасевич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : сб. науч. тр. – 2024. – № 4, (87). – С. 32–37.

99. Цифровое моделирование индукционных нагревателей в металлургическом производстве / В.Б. Демидович, В.В. Андрушкевич, Ю.Ю. Перевалов, И.И. Вегера // Электричество. – 2025. – № 12. – С. 18–26.

100. Инженерия поверхности металлических материалов с использованием мощного диодного лазера / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Г. Залесский, С.Н. Соколов, А.Н. Миряха // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : сб. науч. тр. – 2025. – № 2 (89). – С. 27–35.

101. Исследование влияния параметров волоконного лазера на трибологические свойства поверхностей сталей 03X17 и 04X18H8 / О.В. Дьяченко, В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш, В.С. Капленко, К.В. Протасевич // Информационные и инновационные технологии в науке и образовании : сб. тр. IX всерос. науч.-практ. конф., г. Ростов-на-Дону, 2025 г. – Ростов-на-Дону, 2025. – С. 480–483.

102. Лазерное легирование нержавеющей стали 95X18 / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш, О.В. Дьяченко, К.В. Протасевич // Машиностроение и

техносфера XXI века : сб. тр. XXXII Междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 2025 г. – Севастополь, 2025. – С. 88–92.

103. Исследование влияния лазерной обработки на свойства покрытий из нержавеющей стали / В.С. Голубев, О.В. Дьяченко, И.И. Вегера, К.В. Протасевич // Мировая экономика и бизнес-администрирование : материалы 21-го Междунар. науч. семинара, г. Минск, 2025 г. – Мн., 2025. – С. 228–231.

Тезисы докладов

104. Вегера, И.И. Технологии и оборудование индукционной термообработки для агропромышленного комплекса / И.И. Вегера, А.И. Михлюк // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., г. Гомель, 21–22 дек. 2017 г. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2017. – С. 30–31.

105. Голубев, В.С. Применение лазерных технологий в сельскохозяйственном машиностроении / В.С. Голубев, И.И. Вегера, В.Е. Ходюш // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. 4-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Гомель, 4 нояб. 2020 г. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2020. – С. 30.

106. Энергосберегающая технология и комплекс оборудования для индукционного нагрева заготовок / И.И. Вегера, Э.В. Гайлевич, В.Е. Ходюш, А.В. Денисов // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. 4-й Международной науч.-практ. конф., г. Гомель, 4 нояб. 2020 г. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2020. – С. 31.

Патенты

107. Патент ВУ 3958, МПК В02С7/12. Мелющий диск для машин плющения зерна : № U 20070240 : заявлено 04.04.2007 : опубл. 16.07.2007 / Ивашко В.В., Гордиенко А.И., Вегера И.И. ; заявитель и патентообладатель ФТИ НАН Беларуси // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2007.

108. Патент ВУ 4597, МПК А01D 34/01. Нож для кормоуборочных машин : № U 20080072 : заявлено 05.02.2008 : опубл. 15.05.2008 / Ивашко В.В., Вегера И.И., Голубев В.С. ; заявитель и патентообладатель ФТИ НАН Беларуси // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2008.

109. Патент ВУ 4784, МПК F41H 7/04; F41H 5/04. Многослойная броневая панель : № U 20080176 : заявлено 04.03.2008 : опубл. 04.08.2008 / Ивашко В.В., Дик В.Н., Вегера И.И. ; заявитель и патентообладатель ФТИ НАН Беларуси // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2008.

110. Патент ВУ 4721, МПК F41H 1/02. Слоистый броневой материал : № U 20080200 : заявлено 13.03.2008 : опубл. 30.06.2008 / Ивашко В.В., Гордиенко А.И., Вегера И.И.; заявитель и патентообладатель ФТИ НАН Беларуси // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2008.

111. Патент ВУ 6825, МПК C21D 1/06. Устройство для поверхностной закалки дисковых изделий с нагревом токами высокой частоты : № U 20100371 : заявлено 14.04.10 : опубл. 01.09.2010 / Ивашко В.В., Гордиенко А.И., Вегера И.И. ; заявитель и патентообладатель ФТИ НАН Беларуси // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2010.

112. Евразийский патент № 016700, МПК C23C 14/48, C21B 1/09. Способ ионно-лучевой обработки деталей и инструмента из углеродистых и легированных сплавов : № 200900106 : заявлено 17.12.2008 : опубл. 29.06.2012 / Вегера И.И., Биленко Э.Г., Гордиенко А.И., Белый А.В. ; заявитель и патентообладатель ФТИ НАН Беларуси.

113 Патент ВУ 9985, МПК C21D 1/10. Установка для поверхностной закалки конусных деталей с нагревом токами высокой частоты : № U 20130499 : заявлено 10.06.2013 : опубл. 28.02.2014 / Вегера И.И, Польшаев А.В., Хайтин И.А., Ресенчук В.В. ; заявитель и патентообладатель ФТИ НАН Беларуси // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2014.

Технические условия

114. Преобразователи частотные полупроводниковые : ТУ ВУ 100185302.433-2025 : техн. условия : зарегистрированы Бел. гос. ин-том стандартизации и сертификации 08.10.2025 : дата введения 08.10.2025. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2025. – 21 с.

115. Установки индукционного нагрева : ТУ ВУ 100185302.434-2025 : техн. условия : зарегистрированы Бел. гос. ин-том стандартизации и сертификации 08.10.2025 : дата введения 08.10.2025. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2025. – 20 с.

116. Станции охлаждения : ТУ ВУ 100185302.435-2025 : техн. условия : зарегистрированы Бел. гос. ин-том стандартизации и сертификации 08.10.2025 : дата введения 08.10.2025. – Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2025. – 15 с.



РЭЗІЮМЭ

Вегера Іван Іванавіч

Канцэптуальнае развіццё тэхналогіі і стварэнне абсталявання хуткаснага тэрмічнага загартоўвання дэталю машын

Ключавыя словы: індукцыйны нагрэў, лазерная апрацоўка, тэрмічная апрацоўка, нізка- і сярэднеугляродзістыя сталі, легаваныя і высокатрывалыя сталі, каразійнастойкія сталі, тытанавыя сплавы, мадэляванне тэмпературных і электрамагнітных палёў, мікраструктура і механічныя ўласцівасці сталей.

Мэта працы: канцэптуальнае развіццё тэхналогіі хуткаснай тэрмічнай апрацоўкі і стварэнне абсталявання для хуткаснага тэрмічнага загартоўвання, якое забяспечвае павышаны ўзровень і рэгламентаванае размеркаванне механічных уласцівасцей дэталю машын.

Метады даследавання: аптычная і электронная мікраскапія; мікрарэнтгенаспектральны і рэнтгенаструктурны аналізы, а таксама стандартныя і арыгінальныя метадыкі даследавання структуры, механічных і эксплуатацыйных уласцівасцей сталей і тытанавых сплаваў, метады камп'ютарнага мадэлявання.

Атрыманыя вынікі: вывучаны асаблівасці фазавых і структурных ператварэнняў пры хуткаснай тэрмічнай апрацоўцы сталей і тытанавых сплаваў, устаноўлены заканамернасці ўплыву рэжымаў на іх механічныя ўласцівасці, распрацаваны метадыкі мадэлявання і разліку электрамагнітных і тэмпературных палёў, якія фарміруюцца па сячэнні дэталі, распрацаваны тэхналогіі і створана абсталяванне для зацвярдзення дэталей з забеспячэннем патрабаваных механічных уласцівасцей у залежнасці ад умоў эксплуатацыі.

Ступень выкарыстання: распрацаваныя тэхналогіі і абсталяванне ўкаранёны на вядучых машынабудаўнічых прадпрыемствах і холдынгах Рэспублікі Беларусь (ААТ «Мінскі трактарны завод», ААТ «Амкадор», ААТ «БЕЛАЗ», ААТ «Бабруйскаграмаш», ААТ «Магілёўліфтмаш», ААТ «БМЗ») і Расійскай Федэрацыі (ІЗ-КАРТЭКС, ПАТ «КАМАЗ», ПАТ «УРАЛ», ПАТ «Уралмашзавод»). Усяго ў перыяд 2014–2025 гг. выпушчана і рэалізавана абсталявання на суму больш за 24 млн беларускіх рублёў і тэрмічна апрацавана дэталей на вытворчасці ФТІ НАН Беларусі на суму больш за 6 млн беларускіх рублёў. Вынікі навуковых даследаванняў выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе БНТУ.

Галіна прымянення – машынабудаванне, металургія, аўтамабілебудаванне, станкабудаванне, сельскагаспадарчая тэхніка.

РЕЗЮМЕ

Вегера Иван Иванович

Концептуальное развитие технологии и создание оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин

Ключевые слова: индукционный нагрев, лазерная обработка, термическая обработка, низко- и среднеуглеродистые стали, легированные и высокопрочных стали, коррозионностойкие стали, титановые сплавы, моделирование температурных и электромагнитных полей, микроструктура и механические свойства сталей.

Цель работы: концептуальное развитие технологии скоростной термической обработки и создание оборудования для скоростного термического упрочнения, обеспечивающего повышенный уровень и регламентированное распределение механических свойств деталей машин.

Методы исследования: в работе использованы; оптическая и электронная микроскопия; микрорентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы, а также стандартные и оригинальные методики исследования структуры, механических и эксплуатационных свойств сталей и титановых сплавов, методы компьютерного моделирования.

Полученные результаты: изучены особенности фазовых и структурных превращений при скоростной термической обработки сталей и титановых сплавов, установлены закономерности влияния режимов на их механические свойства, разработаны методики моделирования и расчета электромагнитных и температурных полей, формируемых по сечению детали, разработаны технологии и создано оборудование для упрочнения деталей с обеспечением требуемых механических свойств в зависимости от условий эксплуатации.

Степень использования: разработанные технологии и оборудование внедрены на ведущих машиностроительных предприятиях и холдингах Республики Беларусь (ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Амкодор», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Бобруйскагромаш», ОАО «Могилевлифтмаш», ОАО «БМЗ») и Российской Федерации (ИЗ-КАРТЭКС, ПАО «КАМАЗ», ПАО «УРАЛ», ПАО «Уралмашзавод»). Всего в период 2014–2025 гг. выпущено и реализовано оборудования на сумму более 24 млн белорусских рублей и термически обработано деталей на производстве ФТИ НАН Беларуси на сумму более 6 млн белорусских рублей. Используются в учебном процессе БНТУ.

Область применения – машиностроение, металлургия, автомобилестроение, станкостроение, сельскохозяйственная техника.

SUMMARY

Vegera Ivan Ivanovich

Conceptual development of technology and creation of equipment for high-speed thermal hardening of machine parts

Keywords: induction heating, laser processing, thermal treatment, low- and medium-carbon steels, alloyed and high-strength steels, corrosion-resistant steels, titanium alloys, modeling of temperature and electromagnetic fields, microstructure and mechanical properties of steels.

The aim of the work is the conceptual development of high-speed heat treatment technology and the creation of equipment for high-speed thermal hardening, which ensures an increased level and regulated distribution of the mechanical properties of machine parts.

Research methods: optical and electron microscopy, micro-X-ray spectral and X-ray diffraction analysis, as well as standard and original methods for studying the structure, mechanical and operational properties of steels and titanium alloys, and computer modeling methods.

The results obtained include the study of the features of phase and structural transformations during high-speed heat treatment of steels and titanium alloys, the establishment of patterns of the influence of modes on their mechanical properties, the development of methods for modeling and calculating electromagnetic and temperature fields formed across the cross-section of a part, and the development of technologies and equipment for hardening parts to ensure the required mechanical properties depending on the operating conditions.

Degree of use: the developed technologies and equipment have been implemented at leading engineering enterprises and holdings in the Republic of Belarus (JSC Minsk Tractor Plant, JSC Amkodor, JSC BELAZ, JSC Bobruiskagromash, JSC Mogilevlifmash, JSC BMZ) and the Russian Federation (IZ-KARTEX, PJSC KAMAZ, PJSC URAL, PJSC Uralmashzavod). In total, during the period 2014–2025, more than 24 million Belarusian rubles were spent on the production and sale of equipment, as well as on the thermal treatment of parts at the Production Facility of the Physics and Technology Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. The results of scientific research are used in the educational process at Belarusian National Technical University.

Scope of application: mechanical engineering, metallurgy, automotive engineering, machine tool engineering, and agricultural machinery.

Подписано в печать 08.06.2026.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 2,85. Тираж 50 экз. Заказ № 170.

ФТИ НАН Беларуси.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/12 от 21.11.2013.
220084, ул. Академика Купревича, 10, г. Минск.