

ОТЗЫВ

**научного консультанта
на диссертационную работу И.И. Вегеры «Концептуальное
развитие технологии и оборудования скоростного термического
упрочнения деталей машин»,**

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Вегера Иван Иванович в 2001 году закончил Мозырский государственный педагогический институт имени Н.К.Крупской. С 2001 года работает в государственном научном учреждении «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», с 2007 г. – в должности начальника отдела индукционных технологий и термической обработки – заведующего лабораторией технологий и оборудования индукционного нагрева, с 27.05.2026 – директором института.

29 июня 2006 года Вегера И.И. защитил кандидатскую диссертацию «Создание функционально-градиентных материалов на основе высокопрочных сталей с повышенным уровнем специальных свойств» по специальности 05.02.01 – материаловедение (машиностроение). Научный руководитель – директор Физико-технического института НАН Беларуси, академик, д.т.н., профессор А.И.Гордиенко.

Научные исследования Вегеры И.И. направлены на разработку научных основ кинетики процессов фазовых и структурных изменений в металлах и сплавах в условиях высокоэнергетических воздействий и управляемого процесса охлаждения, обеспечивающих достижение оптимального уровня физико-механических свойств материалов и формирование функционально-градиентных слоев с целью обеспечения оптимального уровня эксплуатационных свойств деталей.

В ходе многолетних научных исследований установлены закономерности распределения температурных полей по глубине обрабатываемых материалов при воздействии электромагнитных полей различной плотности, определены способы управления параметрами высокочастотного нагрева для деталей сложной геометрической формы, требующих формирования упрочненного слоя на поверхности детали строго определенной конфигурации.

Результаты фундаментальных исследований легли в основу создания энергоэффективных технологий и оборудования индукционного

нагрева для поверхностного электромагнитного упрочнения деталей, нагрева металла под деформацию, плавку, наплавку и пайку.

Разработки, основанные на применении концентрированных потоков энергии, были использованы при реализации проекта «Создание производства полупроводниковых генераторов и индукционных установок для нагрева металла под пластическую деформацию и термообработку», включенного в Государственную программу инновационного развития Республики Беларусь на 2011-2015 гг. и 2016-2020 гг. и направленного на техническое переоснащение и модернизацию литейных, термических, кузнечных и других энергоемких производств.

Созданное инновационное оборудование отличается конкурентоспособностью и наукоемкостью, разработанные новые ресурсосберегающие технологии позволяют снизить затраты на производство (повышение эксплуатационных характеристик изделий, повышение производительности процессов обработки деталей).

В 2014-2020 гг. при участии и под руководством И.И. Вегеры на созданном сертифицированном производстве выполнены и выполняются более 100 договоров и проектов по разработке технологий и созданию оборудования индукционного нагрева для ОАО «МАЗ», ОАО «МЗКТ», ОАО «Салео Кобрин», ОАО «Гидроусилитель», ОАО «БААЗ», УП «Нива», ОАО «Бобруйскагромаш», ОАО «МПЗ», ОАО «Могилёвлифтмаш», ОАО «КЗТШ».

Соискателю принадлежат определение цели и постановка задач исследования, их экспериментальное выполнение, разработка концепции моделирования технологических процессов и создания оборудования скоростной термической обработки, анализ и обобщение полученных результатов.

Научная новизна представленной работы 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. Можно выделить:

- закономерности процесса фазовой перекристаллизации в интервале скоростей индукционного нагрева (ИН) 50–100 °C/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 $920\text{ }^\circ\text{C}$ – $1000\text{ }^\circ\text{C}$, а при последующем охлаждении ниже точки A_{T3} , соответствующей температурному диапазону $840\text{ }^\circ\text{C}$ – $870\text{ }^\circ\text{C}$ $\gamma\text{-Fe}\rightarrow\alpha\text{-Fe}$ превращения, – образование и рост зерен феррита по границам зерен аустенита с формированием мелкозернистой структуры с размером $5\text{--}10$ 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;

- зависимости влияния скорости индукционного нагрева 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 $50\text{ }^\circ\text{C}$ – $100\text{ }^\circ\text{C}$ соответствующие этим сталям температуры печного нагрева, а ИН Cr-, Si-, Mo-содержащих и заэвтектоидных сталей – при температурах на $100\text{ }^\circ\text{C}$ – $150\text{ }^\circ\text{C}$ 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 $5\text{--}15$ мкм, образование высокодисперсных карбидных включений, частичное сохранение пластичных фаз, тем самым повысить прочность сталей на $50\text{--}100$ МПа и пластичность на 3% – 5% при исключении окисления, угара и обезуглероживания металла;

- 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 $100\text{--}200$ мкм с микротвердостью в пределах от 6 ГПа (при использовании

SiC) до 18 ГПа (при легировании Cr_3C_2), при этом формируется градиентная макроструктура материала, состоящая из вышеуказанного поверхностного слоя, приповерхностного слоя мартенсита толщиной до 0,3 мм с твердостью до 800 HV_{50} и зоны термического влияния толщиной до 0,6 мм с переменной твердостью 800–500 HV_{50} .

- 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 для создания в поверхностных слоях деталей заданное распределение магнитного поля с целью реализации локальной термической обработки и получения упрочненных слоев с требуемыми физико-механическими свойствами.

По материалам диссертационной работы опубликовано 116 печатных работ, в том числе 1 монография, 11 глав коллективных монографий, 47 статей в рецензируемых журналах, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь, а также 44 статьи в сборниках материалов и трудов научных конференций и 3 тезиса докладов конференций, 7 патентов Республики Беларусь и 3 технические условия на оборудование. 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

Диссертационная работа к.т.н. И.И.Вегеры, представляемая на соискание ученой степени доктора технических наук, выполнена на высоком научном уровне и по своему объему и содержанию соответствует требованиям ВАК Беларуси, предъявляемым к докторским диссертациям в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь).

В процессе работы над диссертацией соискатель показал себя высококвалифицированным научным работником, умеющим самостоятельно ставить и решать сложные научно-технические задачи, анализировать, обобщать и научно интерпретировать полученные результаты. И.И.Вегера отвечает всем требованиям ВАК Беларуси, предъявляемым к соискателям ученой степени доктора наук в соответствии с Положением о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

Диссертация Вегеры И.И. является законченной научно-исследовательской работой и соответствует Положению ВАК Беларуси о присуждении ученых степеней, так как посвящена концептуальному развитию актуального научного направления – разработке технологии и оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин и содержит принципиально новые научно обоснованные результаты теоретических и экспериментальных исследований, которые признаны научным сообществом, обеспечивают приоритет белорусской школы скоростной термической обработки и реальный экономический эффект.

Считаю, что Вегера Иван Иванович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки за новые научно обоснованные результаты в теории и практике скоростного термического упрочнения, включающие:

- 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 и обеспечить идентичность механических свойств по всему объему изделий с микротвердостью до 200 HV и ударной вязкостью $KCU^{-70} \geq 1,15 \text{ МДж/м}^2$,

- 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, Ст3пс с сохранением их высокой пластичности ($\delta \geq 16 \%$).

- 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, индукционного нагрева доэвтектоидных Mn-, Ni- и V-содержащих сталей проводят до температур на

50 °С–100 °С превышающих температуры печного нагрева, а индукционный нагрев 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 °С–150 °С 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.

– разработанные технологии скоростной термической обработки сталей и титановых сплавов, в том числе комбинированные с индукционного нагрева 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,

– 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,

– новый концептуальный подход к созданию технологий термического упрочнения деталей с формированием поверхностных структур, для выбора технологических режимов, обеспечивающих структурно-фазовое состояние и свойства упрочненных слоев с уровнем твердости, износостойкости, циклической долговечности, соответствующим эксплуатационным нагрузкам.

– разработанные на основе нового концептуального подхода технологии и современное высокоэффективное 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); концепцию модульного построения разработанной линейки универсального индукционного оборудования, позволяющего реализовать широкий спектр вариантов технологий скоростной индукционной

обработки (ручной, автоматический, режим наладки, одновременный способ нагрева, непрерывно-последовательный способ нагрева, 3D-сканирование);

что в совокупности позволило решить крупную научно-техническую проблему внедрения новых технологий и оборудования скоростной индукционной термической обработки на предприятиях Республики Беларусь.

Научный консультант соискателя,
доктор физико-математических наук, доцент,
Первый заместитель Председателя
Президиума Национальной академии наук Беларуси



В.Г. Залесский

Подпись удостоверяю:
Ученый секретарь
ФТИ НАН Беларуси, к.т.н.



А.В.Басалай