

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Вегеры Ивана Ивановича
**«Концептуальное развитие технологии и создание оборудования
скоростного термического упрочнения деталей машин»**, представленную
на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность представленного исследования обусловлена потребностями машиностроения не только Республики Беларусь, но и зарубежных партнеров. В условиях жёсткой конкуренции на внутреннем и внешнем рынках критически важно повышать конкурентоспособность продукции и одновременно снижать издержки ее производства. Ключевым инструментом решения этих задач выступает внедрение прогрессивных энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки материалов, позволяющих гарантировать требуемый комплекс физических, механических и эксплуатационных свойств деталей машин.

На текущий момент в промышленности доминируют традиционные методы термического объемного упрочнения сталей и сплавов, предполагающие нагрев в камерных, шахтных и аналогичных печах с воздушной средой и в большинстве случаев ручную загрузку и выгрузку деталей. Указанный подход сопряжен с рядом существенных недостатков, прямо влияющих на экономическую и технологическую эффективность производства: значительные потери металла из-за образования окалины; обезуглероживание поверхностных слоев, снижающие прочность и долговечность деталей; необходимость дополнительных трудоемких операций (очистка, травление), увеличивающих цикл производства; высокая энергоемкость и низкий КПД используемого нагревательного оборудования, не отвечающего современным стандартам.

Перечисленные факторы приводят к росту себестоимости продукции, снижению ее качества и надежности, а также повышают экологическую нагрузку. В результате отечественные предприятия теряют конкурентные преимущества, что особенно критично в контексте задач импортозамещения и технологического суверенитета.

Таким образом, разработка и внедрение новых технологических решений для термического упрочнения деталей – не просто научно-техническая задача, а острая производственная необходимость. Представленные в докторской диссертации исследования направлены на решение проблемы развития скоростных методов термического упрочнения, отвечают стратегическим приоритетам развития машиностроения Республики Беларусь, что однозначно подтверждает их актуальность.

*Вх. № 44-52/36
от 01.04.2026*

2. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представляется к защите

Диссертационная работа Вегеры И.И. посвящена созданию научной концепции развития технологий и оборудования для скоростного термического упрочнения деталей машин с использованием индукционного, лазерного и электронно-лучевого нагрева. Объектом исследования являются процессы скоростной термической обработки. Предметом – 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. В работе установлены неизвестные ранее закономерности фазовой перекристаллизации $\alpha\text{-Fe} \leftrightarrow \gamma\text{-Fe}$ и структурообразования в низкоуглеродистых и легированных сталях с локальными метастабильными дефектными зонами при скоростном индукционном нагреве, отличающиеся от печных режимов кратковременностью процесса и возможностью управления размерами зерна (5–10 мкм) и гомогенизацией аустенита. Впервые научно обоснованы температурно-временные режимы индукционной закалки для сталей с различными стабилизирующими элементами, обеспечивающие прирост прочности и пластичности без дефектов поверхности. Экспериментально выявлены механизмы формирования градиентных макроструктур при комбинировании ИН с лазерным легированием (микротвердость до 18 ГПа). Разработан комплекс компьютерных моделей и CALS-алгоритмов, позволяющих прогнозировать физико-механические свойства и жизненный цикл изделий с заданным распределением упрочненных слоев.

Содержание автореферата, диссертации, основные научные результаты и положения, выносимые на защиту, полностью соответствуют отрасли технических наук, специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки и относятся к областям исследований, указанным в паспорте специальности (пункты, связанные с процессами модифицирования структуры и свойств материалов с использованием различных энергетических воздействий, а также с моделированием структурно-фазовых превращений – пункт 1 раздела II и пункты 2 и 3 раздела III паспорта специальности).

3. Степень новизны результатов, научных положений, которые выносятся на защиту

Выносимые на защиту научные положения и результаты являются принципиально новыми:

– установлены закономерности фазовой перекристаллизации при индукционном нагреве (50 – 100 °C/c) низкоуглеродистых сталей,

позволяющие формировать мелкозернистую феррито-перлитную структуру (5 – 10 мкм) и выравнивать механические свойства по объёму сварных изделий, исключая усталостный излом;

- выявлены зависимости влияния температуры и скорости индукционного нагрева на структуру и свойства легированных сталей (содержащих Cr, Si, Mo, Mn, Ni, V), оптимизированы режимы обработки, обеспечивающие повышение прочности на 50–100 МПа и пластичности на 3–5 % при исключении окисления и обезуглероживания;

- экспериментально установлены закономерности влияния карбидных, боридных, силицидных и нитридных фаз на микротвердость поверхностного слоя после комбинированной индукционной и лазерной обработки, позволившие формировать модифицированный слой толщиной 100–200 мкм с микротвердостью до 18 ГПа;

- разработаны компьютерные модели электромагнитных и температурных полей, формируемых при индукционном нагреве и охлаждении деталей, учитывающие технологические параметры, что позволяет создавать упрочнённые слои требуемой конфигурации и свойств. Предложены алгоритмы использования CALS-технологий для прогнозирования жизненного цикла изделий.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается значительным объёмом экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных методов и оборудования (электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, спектрометрия, испытания механических свойств). Результаты теоретических исследований (моделирование электромагнитных и температурных полей) верифицированы экспериментально. Работа базируется на анализе большого числа литературных источников (263 наименования). Выводы логично следуют из полученных результатов и не содержат противоречий. Достоверность результатов работы подтверждается отсутствием противоречий в полученных данных, которые опубликованы в отечественных и зарубежных научных изданиях различного уровня.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Научная значимость заключается в установлении закономерностей фазовых и структурных превращений при скоростной термической обработке сталей и титановых сплавов, создании методик сквозного моделирования процессов нагрева и охлаждения, разработке концептуального подхода к формированию градиентных структур с заданными свойствами.

Практическая значимость подтверждается созданием на основе разработанной концепции линейки универсального индукционного оборудования (модульное построение, дискретность по мощности и частоте). Следует особо отметить то, что масштабное внедрение технологий и оборудования, разработанных диссертантом, на ведущих предприятиях Республики Беларусь (ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Амкодор», ОАО «БелАЗ», ОАО «Бобруйскагромаш», ОАО «Могилевлифтмаш», ОАО «БМЗ») и Российской Федерации (ПАО «КамАЗ», ПАО «Уралмашзавод» и других) соответствует требованиям нашего Президента о максимальной практической отдаче научных разработок реальному сектору экономики. За период 2014–2025 гг. выпущено и реализовано оборудования и технологий на сумму более 30 млн белорусских рублей, термически обработаны сотни тысяч деталей. Разработанные технологии позволяют повысить ресурс деталей, снизить энергозатраты и исключить окисление и обезуглероживание металлов. Результаты исследований используются в учебном процессе БНТУ.

Для тяжелого машиностроения разработаны технологии скоростного индукционного отжига и нормализации сварных швов несущих рам карьерных самосвалов (ОАО «БелАЗ»), автомобильной техники (ОАО «МАЗ», МЗКТ) и сосудов, работающих под давлением. Установлено, что локальный индукционный нагрев сварных соединений из сталей 20пс, Ст3пс и 10ХСНД обеспечивает формирование мелкозернистой феррито-перлитной структуры (5–10 мкм), выравнивание микротвердости по всему объему изделия и повышение ударной вязкости зоны сварного шва с 0,09–0,17 до 1,15–1,2 МДж/м². Это позволяет снизить структурную неоднородность, исключить усталостный излом и хрупкое разрушение, повысить ресурс и надежность техники в целом.

Для нефтегазового машиностроения разработаны режимы скоростной закалки насосно-компрессорных и нефтегазовых трубных сталей (17Г2СФ, 28ГХМ, 32Г2), обеспечивающие повышение прочности на 50–100 МПа и пластичности на 3–5 % по сравнению с печной обработкой при сокращении времени нагрева и полном исключении окисления, угара и обезуглероживания металла. Созданы базы данных режимов термической обработки, соответствующие требованиям ГОСТ 633-80 и международных стандартов API 5CT, API 5L, DIN EN10297, что позволяет целенаправленно получать классы прочности от S355 до S700. Предложено использование трубных сталей для массового производства деталей типа ось, вал, шток гидроцилиндра, как альтернативу традиционно применяемым среднеуглеродистым сталям.

Для станкостроения и автомобилестроения разработаны технологии упрочнения высокопрочных сталей 45Х2ГН, 60ПП, 65Г, 95Х18, обеспечивающие достижение предела прочности до 2000–2100 МПа, твердости до 58–60 HRC при сохранении размера зерна 5–15 мкм. Впервые предложен метод объемно-поверхностной закалки деталей трансмиссии и зубчатых передач с формированием градиентного упрочненного слоя толщиной до 6 – 7 мм. Разработан алгоритм расчета усталостной

выносливости, позволяющий повысить коэффициент запаса прочности с 1,8–1,9 до 2,0–2,5 и циклическую долговечность с $8,65 \cdot 10^7$ до $8,41 \cdot 10^8$ циклов по сравнению с объемной печной закалкой.

Для сельскохозяйственного машиностроения созданы комбинированные технологии упрочнения быстроизнашивающихся рабочих органов (ножи кормоуборочных комбайнов, культиваторные лапы, режущие элементы), включающие индукционную закалку с последующим лазерным модифицированием. Установлено, что лазерное легирование карбидами (Cr_3C_2) позволяет повысить микротвердость поверхностного слоя до 15–18 ГПа, а бориды (W_2B_5) – снизить интенсивность изнашивания в 10–15 раз по сравнению с серийными деталями. Ресурс деталей сельскохозяйственной техники увеличен в 1,5 – 2 раза.

Разработанный модельный ряд индукционного оборудования (преобразователи частоты мощностью 40 – 250 кВт в 6 частотных диапазонах от 1 до 100 кГц, установки с различными кинематическими схемами, системы автоматизированного управления с обратной связью) позволяет реализовать полный спектр технологических операций: одновременный и непрерывно-последовательный нагрев, 3D-сканирование, закалку, отпуск, отжиг, нормализацию, пайку и наплавку. Оборудование внедрено на ведущих предприятиях Беларуси и России (ОАО «МТЗ», «Амкодор», «БелАЗ», «БМЗ», «МАЗ», «МЗКТ», ПАО «КамАЗ», «Уралмашзавод», ИЗ-КАРТЭКС). Коэффициент эффективности внедрения для отдельных производств достигает 23,56.

Таким образом, работа имеет большое народнохозяйственное значение, рекомендуется для дальнейшего широкого использования в машиностроении, металлургии, энергетике и других отраслях поскольку обеспечивает импортозамещение высокотехнологичного термического оборудования, снижение энергозатрат (КПД установок $\geq 95\%$), экономию металла за счет исключения окисления и обезуглероживания, повышение ресурса и надежности машин, а также создание новых рабочих мест и развитие экспортного потенциала отечественного машиностроения.

Диссертация выполнена в рамках многочисленных государственных программ Республики Беларусь, что подтверждает её значимость.

6. Полнота опубликования основных положений, результатов диссертации в научной печати

Основные результаты диссертации опубликованы в 116 печатных работах, в том числе в 1 монографии, 48 статьях в рецензируемых журналах, 11 главах коллективных монографий, 7 патентах Республики Беларусь и 3 технических условиях на оборудование.

Опубликованные работы в достаточно полной мере отражают содержание диссертации. Автореферат соответствует основным положениям работы.

7. Соответствие оформления автореферата требованиям ВАК

Оформление автореферата соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Республики Беларусь к авторефератам докторских диссертаций. Структура автореферата включает все необходимые разделы: введение, общую характеристику работы, основное содержание, заключение, список публикаций. Приведены достаточные сведения о научной новизне, положениях, выносимых на защиту и внедрении результатов.

Автореферат диссертационной работы достаточно полно отражает основное содержание работы.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Содержание диссертационной работы, автореферата, а также совокупность опубликованных научных трудов свидетельствуют о высокой научной квалификации Вегеры И.И., его способности самостоятельно формулировать и решать крупные научно-технические проблемы в области технологии и оборудования термической обработки. Уровень представленных результатов соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям. Работа соискателя соответствует п. 20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь.

9. Замечания

1. В работе приведено большое количество экспериментальных данных и режимов обработки для различных марок сталей и сплавов, однако в ряде случаев отсутствует более детальное объяснение физической сущности смещения температур фазовых превращений при скоростном нагреве (например, на 50–150 °С) по сравнению с печным нагревом для разных классов сталей.

2. При описании комбинированных технологий (индукционный нагрев + лазерное или электронно-лучевое модифицирование) не в полной мере раскрыты критерии выбора конкретного вида последующего воздействия для достижения оптимального градиента свойств.

3. На странице 10 диссертации и странице 4 автореферата ванадий ошибочно отнесен к γ -стабилизирующим легирующим элементам.

4. На странице 15 автореферата утверждается, что «Мартенсит появляется после нагрева выше 800 °С, а полное растворение карбидов - выше 950 °С», на странице 113 диссертации утверждается, что «Появление мартенсита регистрируется после нагрева выше 800 °С, а полное растворение карбидов наблюдается после нагрева до температуры 950 °С».

Возможно, автор имел в виду то, что... Мартенсит появляется после нагрева выше 800 °С и последующего охлаждения при закалке, а полное растворение карбидов происходит при нагреве выше 950°С...

5. В тексте диссертации и автореферата встречаются отдельные опечатки и незначительные стилистические погрешности, не влияющие на общее восприятие работы.

В целом, указанные замечания не касаются положений, выносимых на защиту, не носят принципиального характера и не снижают научной и практической ценности работы.

10. Заключение

Диссертация Вегеры Ивана Ивановича «Концептуальное развитие технологии и создание оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин» свидетельствует о том, что работа является завершённым квалификационным научным исследованием и соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Вегера Иван Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки за содержащие новые научно обоснованные технические и технологические решения проблемы в области скоростной термической обработки деталей машин, имеющие важное значение для машиностроительной отрасли, включающие:

- исследование особенностей фазовых и структурных превращений при скоростном индукционном нагреве и охлаждении шести наиболее широко применяемых групп углеродистых и легированных сталей, титановых сплавов, в том числе сдвиг $\alpha\text{-Fe} \leftrightarrow \gamma\text{-Fe}$ превращений на 50-150°С в область более высоких температур, выявление зависимости влияния температуры и скорости индукционного нагрева на структуру и свойства легированных сталей (содержащих Cr, Si, Mo, Mn, Ni, V), оптимизацию режимов обработки, обеспечивающие мелкозернистость конечной микроструктуры, повышение прочности на 50–100 МПа и пластичности на 3–5 % при исключении окисления и обезуглероживания, более высокую конструктивную прочность, выравнивание механических свойств по объёму сварных изделий;

- экспериментальное установление закономерностей влияния карбидных, боридных, силицидных и нитридных фаз на микротвердость поверхностного слоя после скоростной комбинированной индукционной, лазерной и электронно-лучевой обработки, обеспечившей формирование градиентных материалов с модифицированным поверхностным слоем толщиной 100–200 мкм с микротвердостью до 18 ГПа;

- разработку методики сквозного моделирования скоростного индукционного нагрева и охлаждения, комплекса компьютерных моделей и CALS-алгоритмов, обеспечивших возможность прогнозирования физико-механических свойств и жизненного цикла изделий;

- разработку концепции скоростной термической обработки, создание современного эффективного оборудования, технологий, масштабное их внедрение,

что в совокупности позволило решить проблему развития скоростных методов термического упрочнения, отвечающую стратегическим приоритетам развития машиностроения Республики Беларусь, имеющую большое народнохозяйственное значение, обеспечивающую импортозамещение высокотехнологичного термического оборудования, снижение энергозатрат (КПД установок $\geq 95\%$), экономию металла за счет исключения окисления и обезуглероживания, повышение ресурса и надежности машин, а также создание новых рабочих мест и развитие экспортного потенциала отечественного машиностроения.

Официальный оппонент:

профессор кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» механико-технологического факультета Белорусского Национального технического университета, член-корреспондент НАН Беларуси, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, доктор технических наук, профессор



Ф.И. Пантелеенко



Поступил
01.07.2026

в совет

 у.г. секретарь совета
Язкевич А.К.