

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального
директора по научной работе и
инновационной деятельности
Государственного научного
учреждения «Объединенный
институт машиностроения
Национальной академии наук
Беларуси»



О.М. Еловой

2026 г.

ОТЗЫВ ОППОНИРУЮЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию 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. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа Вегеры И.И. посвящена разработке научно обоснованных принципов скоростной термической обработки металлов и сплавов с формированием в них требуемых функционально-градиентных структур, что определяется режимами нагрева и охлаждения с учетом происходящих в материалах структурных и фазовых превращений. Текущее состояние дел в этой области требует создания методик моделирования и расчета процессов скоростного индукционного нагрева деталей для прогнозирования их физико-механических свойств, разработки современного автоматизированного технологического оборудования индукционного нагрева для реализации операций термообработки.

По совокупности поставленных целей и решаемых задач содержание диссертационной работы Вегеры И.И. соответствует отрасли наук 05.00.00 (технические науки) и паспорту специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки (пункты 1, 2, 4, 5 раздела III «Области исследований»), а именно:

1. Процессы синтеза или модифицирования структуры и свойств материалов и формирования поверхностей изделий с наложением различных энергетических воздействий и использованием возникающих при этом физических и химических эффектов.

Вх. № 11-52 /38
от 04.04.2026

2. Методы управления технологическими параметрами энергетического воздействия в процессах механической и физико-технической обработки.

4. Теория и практика проектирования, производства и эксплуатации отдельных видов и систем технологического оборудования и инструментов с заданными технико-экономическими показателями для механической и физико-технической обработки, оптимизация компоновки, состава и параметров оборудования и инструментов, в том числе и для специальных видов обработки и послойного синтеза изделий.

5. Теоретические расчеты и оптимизация параметров, моделирование, в том числе с использованием искусственного интеллекта, мониторинг и диагностика процессов, оборудования и инструментов для механической и физико-технической обработки в целях повышения технико-экономических и экологических показателей средств технологического оснащения на стадиях их создания и эксплуатации.

Поставленная цель исследований и решаемые в работе задачи соответствуют приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: машиностроение и машиноведение» (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. №156).

2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой ее значимости

Соискателем получены новые научно-обоснованные результаты, совокупность которых вносит весомый вклад в решение поставленной научной задачи, заключающиеся в:

- предложенном новом концептуальном подходе к созданию технологий термического упрочнения деталей с формированием поверхностных градиентных структур, включающем предварительный расчет требуемого распределения механических свойств по сечению детали, исходя из условий ее эксплуатации, выбор параметров скоростного индукционного нагрева на основе результатов экспериментов и созданной базы данных, компьютерное моделирование электромагнитных и температурных полей, формируемых в детали при скоростной термообработке, и выбор технологических режимов и оборудования для индукционной термообработки;

- впервые установленных закономерностях процесса фазовой перекристаллизации в сварных швах изделий из низкоуглеродистых конструкционных сталей, содержащих локальные зоны с метастабильной дефектной структурой, при индукционном нагреве со скоростью 50–100 °C/с до температур 920–1000 °C, отражающих формирование мелкозернистой феррито-перлитной структуры с размером зерна 5–10 мкм,

что обеспечивает идентичность сформированной структуры по всему объему сварного изделия и его повышенную усталостную прочность;

- впервые выявленных особенностях структурных и фазовых превращений в сталях, содержащих α - (Cr, Si, Mo) и γ - (Mn, Ni, V) стабилизирующие легирующие элементы, и оптимизированных режимах их термической обработки, позволяющих за счет гомогенизации аустенитной структуры обеспечить при последующей закалке диспергирование мартенситных составляющих до размера зерна 5–15 мкм, образование высокодисперсных карбидных включений, частичное сохранение пластичных фаз и, тем самым, повышение прочности сталей на 50–100 МПа и пластичности на 3–5 % при исключении окисления, угара и обезуглероживания металла;

- экспериментально установленном характере влияния карбидов, боридов, силицидов и нитридов на микротвердость поверхностного слоя сталей, подвергнутых скоростной индукционной термообработке и последующему лазерному модифицированию в атмосфере аргона и азота, что позволило сформировать градиентную макроструктуру деталей, состоящую из модифицированного поверхностного слоя толщиной 100–200 мкм с заданной микротвердостью, приповерхностного слоя мартенсита толщиной до 0,3 мм с твердостью до 800 HV50 и слоя зоны термического влияния толщиной до 0,6 мм с переменной твердостью 800–500 HV50, что обуславливает сочетание высоких прочностных и противоизносных свойств термически обработанной детали;

- разработанных компьютерных моделях электромагнитных и температурных полей, формируемых при индукционном нагреве и последующем охлаждении деталей, позволивших определить оптимальные электрофизические и технологические параметры индукционного оборудования, обеспечивающего создание в поверхностных слоях деталей требуемого распределения магнитного поля, формирующего индукционные токи разной плотности для реализации локальной термической обработки и получения упрочненных слоев с требуемыми физико-механическими свойствами;

- предложенных универсальных алгоритмах, математических и компьютерных моделях использования CALS-технологий для расчета физико-механических и эксплуатационных свойств деталей, подвергнутых скоростной индукционной термообработке, и прогнозирования их жизненного цикла.

3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны, научной и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая учёная степень

Ученая степень доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки может быть присуждена Вегере И.И. за следующие новые научные результаты:

– установленные закономерности процессов фазовой перекристаллизации зон с метастабильной дефектной структурой, образующихся при сварке изделий из низкоуглеродистых конструкционных сталей, в процессе локальных деформационных и термических воздействий и режимы их скоростной термической обработки, позволяющие сформировать мелкозернистую рекристаллизованную феррито-перлитную структуру сталей и обеспечить идентичность физико-механических свойств по всему объему сварных изделий с микротвердостью до 200 HV и ударной вязкостью $KCU^{-70} \geq 1,15 \text{ МДж/м}^2$;

– экспериментально установленные зависимости влияния температуры и скорости индукционного нагрева и охлаждения на структуру и физико-механические свойства сталей с содержанием углерода до 0,3 %, позволившие определить режимы их скоростной закалки с формированием мелкозернистой мартенситной структуры, обеспечивающей значительного повышение конструкционной прочности этих сталей с сохранением высокой пластичности;

– экспериментально установленные особенности структурных и фазовых превращений в легированных сталях и режимы скоростной закалки, обеспечивающие диспергирование мартенситных составляющих до размера 5–15 мкм, образование высокодисперсных карбидных включений, частичное сохранение пластичных фаз с повышением прочности сталей на 50–100 МПа и пластичности на 3–5 %;

– разработанные комбинированные технологии скоростной термической обработки сталей и титановых сплавов при индукционном нагреве и последующем модифицировании поверхностного слоя методами лазерного или электронно-лучевого воздействия, позволяющие формировать поверхностный слой толщиной до 1,7 мм с микротвердостью от 9 ГПа до 18 ГПа с градиентным распределением карбидных и/или нитридных соединений, снижающий интенсивность изнашивания упрочненной поверхности в 1,1–1,4 раза;

– разработанные методики моделирования температурных и электромагнитных полей, формируемых по сечению детали при индукционном нагреве, методики расчета оптимальных электрофизических и технологических параметров индукционного оборудования, обеспечивающего достижение требуемого уровня свойств по сечению детали, а также алгоритм расчета усталостной выносливости упрочненных индукционной закалкой деталей, позволяющий определять оптимальные параметры упрочненных слоев, повышающих 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 их объемной закалке;

– новый подход к созданию технологий скоростного термического упрочнения деталей с формированием поверхностных структур, базирующийся на предварительном расчете требуемого распределения механических свойств по сечению детали, выборе параметров нагрева на

основе сформированной базы данных, компьютерного моделирования электромагнитных и температурных полей и экспериментальной проверке оптимальности выбранных технологических режимов термообработки по показателям твердости, износостойкости, циклической долговечности;

– разработанные на основе этого подхода технологии и оборудование скоростной индукционной термообработки широкой номенклатуры деталей разной формы и габаритов, эффективно используемые на ряде машиностроительных холдингов Беларуси и Российской Федерации.

Новизна технических решений защищена 6 патентами Республики Беларусь и 1 патентом Евразийского патентного ведомства.

Научная значимость результатов диссертации заключается в:

– установленных закономерностях процессов фазовой перекристаллизации зон с метастабильной дефектной структурой, образующихся при сварке изделий из низкоуглеродистых конструкционных сталей, в процессе термической обработки с индукционным нагревом со скоростями 50–100 °C/с до температур 920–1000 °C, обеспечивающих формирование в сварном шве мелкозернистой рекристаллизованной феррито-перлитной структуры и идентичность физико-механических свойств по всему объему изделия, что, вследствие высокой пластичности ($\delta \geq 20\%$) таких структур, повышает усталостную прочность сварного соединения;

– установленных зависимостях влияния температуры и скорости индукционного нагрева и охлаждения на структуру и физико-механические свойства низкоуглеродистых конструкционных, насосно-компрессорных и нефтегазовых трубных сталей с содержанием углерода до 0,3 %, позволившие определить режимы их скоростной индукционной закалки с формированием мелкозернистой мартенситной структуры, обеспечивающей повышение их конструкционной прочности до уровня лучших европейских аналогов с сохранением высокой пластичности;

– установленных особенностях структурных и фазовых превращений в доэвтектоидных (45Х2ГН, 60ПП, 65Г) и заэвтектоидных (95Х18) сталях при скоростной индукционной закалке, включающих более полное, чем при печной закалке, растворение карбидных фаз, равномерное распределение углерода и легирующих элементов, что обеспечивает диспергирование мартенситных составляющих до размера 5–15 мкм, образование высокодисперсных карбидных включений, частичное сохранение пластичных фаз и повышение прочности сталей на 50–100 МПа и пластичности на 3–5 % при исключении окисления, угара и обезуглероживания металла;

– разработке методик моделирования температурных и электромагнитных полей, формируемых по сечению детали при индукционном нагреве, методик расчета оптимальных электрофизических и технологических параметров индукционного оборудования и алгоритма расчета усталостной выносливости упрочненных индукционной закалкой

деталей, позволяющих определять оптимальные параметры упрочненных слоев, повышающих эксплуатационные характеристики термообработанных деталей.

Практическая значимость результатов диссертационных исследований состоит в разработке технологий скоростного термического упрочнения широкой номенклатуры деталей, в создании модельного ряда технологического оборудования индукционного нагрева с оптимальными характеристиками для разных групп деталей, оснащенного уникальной системой управления с обратной связью, позволяющей реализовывать все возможные варианты технологий скоростной индукционной термообработки, а также в создании специализированного сертифицированного производства по выпуску индукционного оборудования. Разработаны технологии локального индукционного отжига и нормализации низкоуглеродистых сталей для сварных швов несущих рам карьерной и автомобильной техники, что позволило повысить их ресурс и надежность техники в целом. Разработаны инновационные технологические процессы комбинированного упрочнения, объединяющие объемную индукционную закалку и лазерное модифицирование поверхности для обработки быстроизнашивающихся элементов кормо- и зерноуборочной сельскохозяйственной и строительно-дорожной техники.

4. Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени, на которую он претендует

Анализ содержания диссертационной работы, цели и задач исследований, уровня их решения, научных и прикладных результатов, представленных Вегерой И.И. в диссертационной работе «Концептуальное развитие технологии и создание оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин», свидетельствует о высокой научной квалификации автора, полностью соответствующего ученой степени доктора технических наук. Диссертация соответствует пп. 20, 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь.

Результаты, выносимые на защиту, получены соискателем лично или при его преимущественном вкладе. Достоверность полученных результатов опирается на физическую обоснованность выбранных методов исследования. Результаты получены с использованием современного измерительного оборудования и не противоречат известным литературным данным.

Диссертация отвечает требованиям пп. 20, 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК Республики Беларусь.

5. Рекомендации по практическому использованию результатов исследования

Выпускаемое индукционное оборудование функционирует на ряде предприятий машиностроительных холдингов Беларуси (ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Амкодор», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Бобруйскагромаш», ОАО «БМЗ» и др.) и России (ПАО «КАМАЗ», ПАО «Уралмашзавод», ИЗ-КАРТЭКС» и др.).

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

Рекомендуется дальнейшее использование результатов созданного первого специализированного сертифицированного производства индукционного оборудования: преобразователя частоты полупроводникового ТН ВЭД 8504 40 9008; установки 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; специальной оснастки для индукционных установок и преобразователей частоты (индуктора, средства механизации, автоматизации, системы управления, трансформаторы, нагревательных блоков).

6. Обоснованность и достоверность заключительных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, базируются на общепринятых научных положениях и понятиях, получены с использованием новейших апробированных методик исследований и современного исследовательского и технологического оборудования. Достоверность результатов проведенных исследований подтверждена достаточным в соответствии с требованиями ВАК РБ количеством публикаций в профильных научных изданиях, широкой апробацией на международных научных конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в 116 печатных работах, в том числе в 1 монографии и в 48 статьях в рецензируемых научных журналах, содержатся в 11 главах коллективных монографий, 43 статьях в сборниках материалов и трудах научных конференций, отражены в 6 белорусских и 1 евразийском патентах.

Достоверность заключительных выводов диссертационной работы подтверждена использованием современных методик исследования физико-механических характеристик, структуры и эксплуатационных свойств деталей, использованием современной измерительной и регистрирующей

аппаратуры, достаточной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, практическим применением результатов исследований в технологических процессах и технических средствах их реализации (результаты исследований прошли апробацию в производственных условиях и внедрены на ряде машиностроительных предприятий).

7. Замечания

1. В работе следовало более акцентированно представить отличительные стороны разработанных соискателем технологий высокоскоростного термического упрочнения широкой гаммы деталей машин с приведением сопоставления полученных технико-экономических параметров этих технологий с показателями традиционных технологий индукционной термообработки, например, в монографиях [20–22] списка использованных в диссертации источников.

2. В связи с тем, что тематика диссертационных исследований затрагивает как концептуальное развитие технологий скоростного термического упрочнения деталей машин с применением индукционного нагрева, так и создание линейки нового типа технологического оборудования для реализации этих технологий, то, по всей видимости, соискателю следовало в большей степени раскрыть особенности и преимущества предложенного им модульного подхода к созданию такого оборудования.

3. Соискателем обнаружен эффект повышения температуры $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения для стали пониженной прокаливаемости марки 60ГП на 50 °С при скоростном индукционном нагреве по сравнению с печным нагревом. Однако при этом следовало бы раскрыть и механизм этого эффекта, что позволило бы более аргументированно подойти к выработке рекомендаций по выбору оптимальных скоростей нагрева и охлаждения для получения заданной структуры этой стали и требуемого уровня ее физико-механических свойств.

4. Представленные в диссертационной работе технические решения защищены шестью патентами Республики Беларусь и одним патентом Евразийского патентного ведомства, но при этом все патенты получены в период 2007–2014 гг., а за последующие 12 лет по теме диссертации не представлено ни одного патента.

5. Представляется, что «изотермической выдержки в течение 3 – 5 с ...» не во всех случаях может оказаться достаточным «... для более полного растворения карбидных фаз, равномерного распределения углерода и легирующих элементов» (с. 10) и гомогенизации аустенитной структуры.

6. В тексте диссертации встречаются некорректные фразы типа «охлаждение образцов ... осуществляли пропусканием тока через образец» (с. 55) или «... применение скоростного нагрева для операции отпуска

позволяет сократить время обработки за счет повышения температуры нагрева на 100 °С ...» (с. 114).

7. Имеются некоторые замечания терминологического характера. В частности, согласно ГОСТ 1497-2023 «Металлы. Методы испытания на растяжение» вместо ранее широко используемого термина «предел прочности» (с. 71 и др.) предписано применять термин «временное сопротивление». В соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507 твердость по Виккерсу обозначают, например, 800HV50, а 800HV₅₀ или 6 ГПа, 18 ГПа (с. 11 и др.).

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости проделанной соискателем работы. В целом, диссертационная работа заслуживает положительной оценки

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости проделанной соискателем работы. В целом диссертационная работа заслуживает положительной оценки.

8. Заключение

Диссертационная работа Вегеры Ивана Ивановича «Концептуальное развитие технологии и создание оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является законченной квалификационной научно-исследовательской работой, которая по уровню научной новизны и практической значимости соответствует требованиям пп. 20, 21 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автору может быть присвоена ученая степень доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки за концептуальное развитие актуального научного направления в области инженерии поверхности и принципиально новые научные результаты, включающие:

- новый подход к созданию технологий скоростного термического упрочнения деталей с формированием поверхностных структур, предусматривающий предварительный расчет требуемого распределения механических свойств по сечению детали, выбор параметров нагрева на основе сформированной базы данных, компьютерное моделирование электромагнитных и температурных полей и экспериментальную проверку оптимальности выбранных технологических режимов термообработки;

- установленные закономерности процессов фазовой перекристаллизации сварных швов из низкоуглеродистых сталей при термической обработке с индукционным нагревом, обеспечивающей формирование в сварном шве мелкозернистой рекристаллизованной феррито-перлитной структуры и повышение усталостной прочности сварного соединения;

– установленные зависимости влияния температуры и скорости индукционного нагрева и охлаждения на структуру и физико-механические свойства сталей с содержанием углерода до 0,3 %, позволившие определить режимы их скоростной закалки с формированием мелкозернистой мартенситной структуры, обеспечивающей повышение их конструкционной прочности до уровня лучших европейских аналогов с сохранением высокой пластичности;

– установленные особенности структурных и фазовых превращений в легированных сталях при скоростной индукционной закалке, включающие более полное, чем при печной закалке, растворение карбидных фаз, равномерное распределение углерода и легирующих элементов с обеспечением диспергирования мартенситных составляющих до размера 5–15 мкм, образование высокодисперсных карбидных включений и повышение прочности сталей на 50–100 МПа и пластичности на 3–5 %;

– разработку методик моделирования температурных и электромагнитных полей, методик расчета оптимальных электрофизических и технологических параметров индукционного оборудования и алгоритма расчета усталостной выносливости упрочненных индукционной закалкой деталей с определением оптимальных параметров упрочненных слоев, повышающих эксплуатационные характеристики термообработанных деталей;

– разработанные на основе нового подхода технологии и оборудование скоростной индукционной термообработки и пайки широкой номенклатуры деталей разной формы и габаритов, внедренные на ряде машиностроительных предприятий Республики Беларусь,

что в совокупности позволило решить крупную народнохозяйственную задачу по широкому промышленному освоению технологий и оборудования скоростного термического упрочнения и повышению качества отечественной машиностроительной продукции с реализацией за период 2014–2025 годы оборудования индукционного нагрева на сумму более 30 млн. белорусских рублей, оказанием услуг по термической обработке нескольких сотен тысяч деталей машиностроения на сумму более 7 млн. белорусских рублей, а также выпуском более 500 000 деталей на сумму 11 млн. долларов США (в эквиваленте).

Эксперт от оппонирующей организации назначен приказом заместителя генерального директора по научной работе и инновационной деятельности Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси» № 138 от 15 июня 2026 г.

Доклад соискателя и отзыв на диссертационную работу Вегеры Ивана Ивановича «Концептуальное развитие технологии и создание оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин» рассмотрены на научном семинаре Научно-технического центра «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» Государственного

научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси» (протокол № 1 от 30 июня 2026 г.), на котором присутствовали 26 человек, из них 18 человек, имеющих ученую степень, в том числе 4 доктора наук и 14 кандидатов наук.

В голосовании при одобрении отзыва на диссертационную работу Вегеры И. И. приняли участие 18 человек, имеющих ученую степень.

Результаты голосования: «за» – 18, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Председатель научного семинара,
доктор технических наук, профессор

В.И. Жорник

Секретарь научного семинара,
кандидат технических наук

Н.Н. Максимченко

Эксперт, заведующий лабораторией
металлургии в машиностроении,
доктор технических наук, доцент

С.Г. Сандомирский

Поступил в совет 02.07.2026

Луквич О.К.
ут. секретарь совета