

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Вегеры Ивана Ивановича

«Концептуальное развитие технологии и создание 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.

1. Соответствие диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите.

По содержанию диссертация соответствует пунктам III.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», III.2. «Методы управления технологическими параметрами энергетического воздействия в процессах механической и физико-технической обработки», III. 3. «Механизмы формирования напряженного-деформированного состояния и структурно-фазовых превращений при взаимодействии материалов с инструментом и технологической средой, как при механической обработке, так и при воздействии направленных потоков энергии различной природы, а также при комбинированных воздействиях » паспорта специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки)

2. Актуальность темы диссертации.

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. 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.

*Вх. № 11-52/39
от 04.04.2016*

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации, и научных положений, выносимых на защиту.

Тема диссертации, научные результаты и положения, выносимые на защиту, соответствуют приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь: направлению №8 «Многофункциональные материалы и технологии», перечня Приоритетных направлений научных исследований на 2016–2020 гг., утвержденного постановлением № 190 Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г.; направлению №1 «Энергоэффективные технологии и техника», перечня Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016 – 2020 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04. 2015 г. № 166); направлению – 4. «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы», перечня Приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2021 – 2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г., №156).

Диссертационная работа И.И. Вегеры представляет собой завершённое научное исследование, в котором впервые на системном уровне разработана концепция скоростной индукционной термообработки, базирующаяся на комплексном учёте закономерностей фазовых и структурных превращений, компьютерном моделировании электромагнитных и температурных полей и создании универсального модульного оборудования. Научная новизна заключается в следующем:

1. Установлены 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 °C–1000 °C, а при последующем охлаждении ниже точки A_{c3} , соответствующей температурному диапазону 840 °C–870 °C $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ превращения, – образование и рост зерен феррита по границам зерен аустенита с формированием мелкозернистой структуры с размером 5–10 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, исключаяющие, 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 °C–100 °C соответствующие этим сталям температуры печного нагрева, а ИН Cr-, Si-, Mo-содержащих и заэвтектоидных сталей – при температурах на 100 °C–150 °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 5–15 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 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 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.

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

Достоверность изложенных в работе результатов определяется применением современных экспериментальных методов: металлографический (оптическая и растровая электронная микроскопия), рентгеноструктурный (дифрактометрия), химический (спектральный анализ), механические испытания (статическое растяжение, изгиб, ударная вязкость, твёрдость по Роквеллу и Виккерсу, микротвердость), трибологические испытания. Все исследования выполнены на аттестованном оборудовании (микроскопы Versamet-2, Tescan MIRA 3 LMU, дифрактометры ДРОН-3М и GNR EXPLORER, твердомеры AFFRI, испытательные машины ZD 10/90, Time WDW-100E и др.) по стандартизованным методикам.

Исследовано более 10 марок сталей и 2 титановых сплавов, варьировались скорости нагрева (1–1000 °C/c), температуры, режимы охлаждения, отпуска, лазерной и электронно-лучевой обработки. Каждый эксперимент проводился с многократной повторностью (не менее 3–5 параллельных измерений), обработка результатов выполнена методами математической статистики с доверительной вероятностью 0,95.

Полученные закономерности согласуются с известными представлениями о фазовых превращениях, но существенно их дополняют и конкретизируют для условий скоростного нагрева. Разработанные модели электромагнитных и температурных полей верифицированы путём сравнения расчётных данных с экспериментальными макро- и микроструктурными исследованиями (совпадение глубин закалки и распределения твёрдости в пределах 5–10 %).

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

Научная значимость работы заключается в создании новой концептуальной основы для проектирования технологий скоростной термической обработки, которая объединяет фундаментальные исследования с инженерными методами расчета.

Установлены новые закономерности фазовых и структурных превращений в широкой гамме сталей (низкоуглеродистых, трубных, высокопрочных, рессорно-пружинных, коррозионностойких) и титановых сплавах в условиях скоростного индукционного нагрева. Выявлены температурные сдвиги критических точек (на 50–150 °С вверх по сравнению с печным нагревом), что восполняет фундаментальный пробел в материаловедении.

Разработаны оригинальные методики сквозного моделирования электромагнитных и температурных полей, формируемых в деталях при различных режимах индукционного нагрева. Создан алгоритм расчета усталостной прочности деталей с градиентным упрочненным слоем, позволяющий прогнозировать эксплуатационные характеристики.

Предложен новый концептуальный подход к созданию технологий термоупрочнения, базирующийся на предварительном расчете требуемого распределения свойств по сечению детали, экспериментальном определении структурно-фазовых зависимостей, компьютерном моделировании полей и выборе оптимальных режимов.

Сформированы базы данных по режимам скоростной термической обработки для различных классов сталей, что создает основу для дальнейших исследований и промышленного применения.

В ходе выполнения Государственной программы инновационного развития (2014–2020 гг.) в ФТИ НАН Беларуси организовано серийное производство индукционного оборудования. Модульная линейка установок мощностью 40–50 кВт в частотном диапазоне до 100 кГц обеспечивает технологическую гибкость и применимость к широкой номенклатуре деталей. Оборудование и технологии внедрены на более чем десяти крупных предприятиях холдингов и корпораций Беларуси и России, в том числе на БЕЛАЗе, МТЗ, «Амкодоре», «Бобруйскагромаше», «Могилевлифтмаше», БМЗ, а также на российских заводах ИЗ-КАРТЭКС, КАМАЗ и Уралмашзавод.

За 2014–2025 гг. реализовано оборудование и услуги на сумму более 30 млн белорусских рублей. Созданы базы данных по режимам термообработки для сталей трубного сортамента в соответствии с ГОСТ и API.

Социальная значимость работы определяется повышением безопасности труда: замена ручного труда на автоматизированные процессы индукционной обработки, улучшение условий труда, отказ от экологически вредных веществ (масляных закалочных сред, газовых печей); повышением безопасности эксплуатации техники: упрочнение ответственных деталей (элементы подвески карьерных самосвалов, несущие рамы, сосуды под давлением) снижает риск аварийных ситуаций, усталостных изломов и хрупких разрушений, повышая надежность и безопасность автомобильной, сельскохозяйственной и нефтегазовой техники; упрочненные детали имеют в 1,5–2 раза больший срок службы, что снижает затраты на ремонт и обслуживание, уменьшает простои техники и повышает эффективность работы предприятий-потребителей; Снижением экологической нагрузки; созданием новых рабочих мест: организацией сертифицированного производства индукционного оборудования в Республике Беларусь, подготовка кадров высшей квалификации (научная школа в области технологий и оборудования индукционного нагрева).

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

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.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются их широкой апробацией. Основные положения и выводы диссертации были представлены на международных и республиканских научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах в период с 2005 по 2025 год (более 40 мероприятий).

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК Республики Беларусь. Общий объем диссертации составляет 260 страниц, в том числе 150 рисунков, 18 таблиц, 24 приложения, библиографический список из 263 источников, в том числе 116 публикаций автора.

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

Объем представленного в диссертации и автореферате материала, применение современных экспериментальных методик для выполнения запланированных исследований, использование адекватных физических моделей для обработки результатов исследований с применением современного программного обеспечения обработки результатов экспериментальных измерений, а также обоснованность сделанных выводов и вынесенных на защиту положений позволяют заключить, что Вегера И.И. обладает научной квалификацией, необходимой для присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки. В целом диссертационная работа Вегеры И.И. «Концептуальное развитие технологии и создание оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин», соответствует требованиям пунктов 19 и 20 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь».

9. Замечания по работе.

В диссертации не достаточно внимания уделено раскрытию концепции развития технологии и оборудования индукционного нагрева, в частности не раскрыты перспективы дальнейшего развития предложенной концепции создания технологии и оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин.

В диссертации не отражена особенность структурно фазовых превращений в сталях при индукционном нагреве выявленная соискателем в отличие от результатов ранее проведенных исследований другими учёными, в том числе учёными ФТИ НАН Беларуси, Украины и др.

В работе приводятся результаты по термической обработке сварных соединений из низкоуглеродистых сталей, однако нет выводов о возможности применения их для других материалов.

В работе рассматривается ряд конкретных марок сталей и титановых сплавов, однако не отражены критерии, на основании которых были выбраны для исследований именно эти материалы, что не позволяет обосновать расширение номенклатуры материалов для разработанных технологий.

В работе использовались карбиды, бориды, силициды и нитриды (WC , Cr_3C_2 , TiC , SiC , B_4C , TiB_2 , W_2B_5 , SiB_6 , VSi_2 , $TiSi_2$, VN , ZrN), но не объяснены критерии их выбора.

Недостаточно раскрыта экономическая эффективность разработок. Хотя приведены суммы реализованного оборудования, отсутствует анализ экономического эффекта от

внедрения разработанных технологий на конкретных предприятиях (снижение себестоимости, срок окупаемости, сокращение брака и т.п.).

В главе 4 приводятся примеры получения деталей машин с регламентированным распределением свойств. На самом деле приводятся свойства изделий после различных видов обработки. А вот методики и рекомендации перехода от регламентированных (заданных) свойств к выбору способов и режимов, их обеспечивающих, нет.

В главе 5 упоминаются разработанные компьютерные модели температурных и электромагнитных полей, однако не приведены конкретные уравнения, граничные условия или верификационные данные, что затрудняет оценку точности и универсальности предложенных алгоритмов.

В работе утверждается, что созданное оборудование «по техническому уровню не уступает лучшим мировым аналогам» (стр. 27 автореферата), однако конкретные сравнительные характеристики (КПД, точность регулирования, производительность и др.) с зарубежными системами (например, EFD Induction, Inductotherm) не приведены.

На рисунке 3.15 для стали 09Г2С при нагреве до 1200–1300 °С наблюдается резкий рост прочности (до 1260 МПа) при падении пластичности до 5 %. Однако при столь высоких температурах в низкоуглеродистой стали должен происходить интенсивный рост аустенитного зерна, что, наоборот, должно снижать прочность после закалки. Автор объясняет это формированием мартенсита, но для стали 09Г2С с 0,12 % С получение мартенсита при охлаждении в воде с 1300 °С – физически объяснимо, однако рост прочности до 1260 МПа требует подтверждения другими методами (например, рентгеноструктурным анализом). На рисунке 3.17 показан мартенсит, но количественная доля мартенсита не приведена.

На рисунке 4.7 показано, что после скоростного нагрева стали 95Х18 до 1200 °С твердость достигает 56–57 HRC, а микроструктура при этом режиме содержит мартенсит с карбидами (рис. 4.8в). Однако на рисунке 4.8 г (1300 °С) показано оплавление по границам зерен. Автор рекомендует не допускать межкристаллитного оплавления, но не приводит четких критериев (температура, время выдержки), при которых оно начинается, что снижает практическую ценность рекомендации.

На рисунках 4.11, 4.12 показано, что при скоростном нагреве сплава ВТ6 до 1100 °С предел прочности достигает максимума (~1300 МПа), а затем снижается. Однако из рисунка 4.10 следует, что при 1000 °С формируется мелкозернистый α' -мартенсит. Физически не объяснено, почему при 1050–1100 °С, когда β -зерно уже выросло, прочность не падает, а остается высокой. Автор связывает это с гомогенизацией, но не приводит данных о размере β -зерна при этих температурах.

В главе 3 приведены микроструктуры, но рентгеноструктурный анализ (определение количества остаточного аустенита, карбидных фаз) выполнен только для стали 50ХГФА (стр. 107) и для покрытий (гл. 4). Для большинства сталей (20пс, 09Г2С, 32Г2, 65Г) количественный фазовый состав не приведен, что снижает доказательность выводов о механизмах упрочнения.

В главе 5 моделируются только температурные и электромагнитные поля, но не учитываются термические напряжения и деформации, возникающие при закалке. Это особенно важно для деталей сложной формы (шлицевые валы, зубчатые колеса и др.).

Многие рисунки содержат неудачные названия: рис. 3.20, 5.20, 6.5, 6.6, 6.17 и др.

В главах 3 и 4 представлено большое количество однотипных микроструктур (до 6–8 на одном рисунке), что перегружает текст.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не опровергают основные научные результаты диссертации. Они касаются в основном полноты представления данных, унификации обозначений, учета погрешностей и более строгой

физической интерпретации. Работа выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне, а замечания могут быть учтены при подготовке публикаций и в дальнейших исследованиях.

10. Заключение.

Представленная Вегерой И.И. диссертационная работа является законченным научным исследованием и выполнена на высоком научном уровне. Основные ее результаты и положения апробированы на международных научных конференциях и симпозиумах и опубликованы в авторитетных изданиях. Важнейшие результаты работы нашли конкретное практическое применение. Актуальность и научный уровень выполненного исследования свидетельствует о соответствии научной квалификации соискателя ученой степени доктора наук.

Представленная Вегерой И.И. диссертационная работа «Концептуальное развитие технологии и создание оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин» оформлена в соответствии с требованиями п.19, 20 «Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки – за получение научно-обоснованных результатов, позволивших установить новые закономерности 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.

Я, Рубаник Василий Васильевич, выражаю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

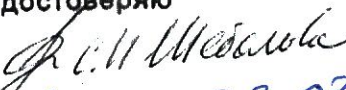
Заведующий отделом ультразвуковых технологий-
заведующий лабораторией физики металлов
государственного научного учреждения
«Институт технической акустики
Национальной академии наук Беларуси»,
член-корреспондент Национальной
академии наук Беларуси,
доктор технических наук, профессор



Василий Васильевич Рубаник

(согласен на обработку персональных данных)
05.02.07-технология и оборудование механической
и физико-технической обработки
210009, г. Витебск, пр. Генерала Людникова, 13,
Республика Беларусь
тел. +375(212) 331948. (029) 6273547
e-mail: ita@vitebsk.by, v.v.rubanik@itanas.by

Подпись Рубаника В.В. удостоверяю
Ведущий юрисконсульт



Поступил в совет 02.07.2026



Лукевич В.К.
уг секретарь совета.