

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Вегеры И.И. «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 диссертации специальности и отрасли науки, по которым она представлена к защите

Диссертация посвящена изучению особенностей фазовых и структурных превращений при скоростной термической обработке сталей и титановых сплавов, установлению закономерностей влияния режимов на их механические свойства, разработке методик моделирования и расчета электромагнитных и температурных полей, формируемых по сечению детали, разработке технологии и созданию оборудования для упрочнения деталей с необходимым комплексом свойств.

Диссертация соответствует специальности, по которой она представлена: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки и отрасли наук 05.00.00 – Технические науки.

2. Актуальность темы диссертации

Термическая обработка является одной из ключевых операций технологии машиностроения, при которой формируются необходимые структура и фазовый состав материала, соответственно уровень свойств изделий, определяющий их работоспособность и долговечность.

Широко применяемые на белорусских машиностроительных предприятиях методы объемного термического упрочнения с использованием нагрева в печах с воздушной средой или ваннах имеют существенные недостатки: высокая энергоемкость, низкая производительность, потеря металла из-за образования окалины, использование дорогостоящих солей. Скоростная термообработка с индукционным, лазерным, плазменным, электронно-лучевым нагревом позволяет исключить или уменьшить вышеуказанные недостатки, так как позволяет получать упрочненную градиентную структуру, обладающую регламентированным распределением свойств, ускорить и автоматизировать процесс, соответственно сделать его более эффективным.

Однако для применения скоростной термообработки необходимо установить закономерности влияния режимов нагрева и охлаждения на особенности формирования структуры, фазового состава, свойств материалов, создать базу данных по обработке различных сталей, а также принципы конструирования оборудования для скоростной термообработки.

Актуальность работы подтверждается тем, что исследования автором проводились в рамках государственных научно-технических программ по решению важнейших народнохозяйственных проблем в области естественных наук, кото-

Вх. № 11-52/34
от 02.07.2016

рые завершились внедрением разработок на промышленных предприятиях республики.

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

Результаты исследований, полученных в диссертации и положения, вынесенные на защиту, обладают новизной и вносят вклад в развитие научных и технологических основ скоростной термообработки сталей и титановых сплавов.

Новизна работы заключается в следующем:

- установлены закономерности 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, отражающие формирование мелкозернистой феррито-перлитной структуры с размером зерна 5–10 мкм, что обеспечивает равномерность структуры по всему объему сварного изделия и его повышенную усталостную прочность;

- выявлены особенности структурных и фазовых превращений в сталях, содержащих α - (Cr, Si, Mo) и γ -стабилизирующие (Mn, Ni) легирующие элементы, и оптимизированы режимы их скоростной термообработки, позволяющие за счет гомогенизации аустенитной структуры обеспечить при последующей закалке диспергирование мартенситных составляющих до размера 5–15 мкм, образование высокодисперсных карбидных включений, повысить прочность сталей на 50–100 МПа и пластичность на 3–5 %;

- разработаны режимы скоростной индукционной термообработки и последующего лазерного модифицирования в атмосфере аргона и азота, позволившие сформировать градиентную макроструктуру деталей, состоящую из модифицированного поверхностного слоя толщиной 100–200 мкм с микротвердостью в пределах 6–18 ГПа, 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, обеспечивающую сочетание высоких прочностных и противоизносных свойств, установлен характер влияния карбидов, боридов, силицидов и нитридов на микротвердость поверхностного слоя сталей;

- разработаны компьютерные модели электромагнитных и температурных полей, формируемых при индукционном нагреве и последующем охлаждении деталей, позволившие определить оптимальные электрофизические и технологические параметры индукционного оборудования, обеспечивающего создание в поверхностных слоях деталей требуемого распределения магнитного поля, формирующего индукционные токи различной плотности для реализации локальной термической обработки и получения упрочненных слоев определенной конфигурации с требуемыми физико-механическими свойствами;

- предложены универсальные алгоритм, математические и компьютерные модели использования CALS-технологий для расчета физико-механических и эксплуатационных свойств деталей, подвергнутых скоростной индукционной термообработке, и прогнозирования жизненного цикла изделий.

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

Научные положения, выносимые на защиту, включают:

- 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 равномерность 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 значительное 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 6–18 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 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 новые технологии и инновационное оборудование скоростной индукционной термообработки деталей из сталей и сплавов различного назначения, эффективно используемые на предприятиях Республики Беларусь.

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

Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений, поскольку они базируются на общепринятых научных положениях и понятиях, получены с использованием новейших апробированных методик исследований и современного исследовательского и технологического оборудования. Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается достаточным количеством публикаций в профильных научных изданиях, апробацией более, чем на 40 на международных и республиканских научно-технических конференциях, а также практическим применением результатов исследований в технологических процессах. Заключительные выводы основаны на результатах, приведенных в диссертационной работе.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации

Научная значимость основных результатов работы состоит в:

- установленных закономерностях процесса 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, обеспечивающей формирование в сварном шве мелкозернистой рекристаллизованной феррито-перлитной структуры, равномерность физико-механических свойств по всему объему изделия, повышение пластичности, что, позволяет повысить 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 с сохранением высокой пластичности;

- установленных особенностях структурных и фазовых превращений в некоторых доэвтектоидных и заэвтектоидных легированных сталях при скоростной индукционной закалке, состоящее в диспергировании мартенситных составляющих до размера 5–15 мкм, образовании высокодисперсных карбидных включений, что способствует повышению прочности сталей на 50–100 МПа и пластичность на 3–5 %;

- разработанных режимах комплексного упрочнения за счет использования скоростной термической обработки с последующим лазерным легированием карбидными, боридными, силицидными соединениями, позволивших получить в

изделиях поверхностный слой толщиной 100-200 мкм с микротвердостью 6-18 ГПа;

- разработке методик моделирования температурных и электромагнитных полей, формируемых по сечению детали при индукционном нагреве, а также методик расчета оптимальных электрофизических и технологических параметров индукционного оборудования и алгоритма расчета усталостной выносливости упрочненных индукционной закалкой деталей, позволяющего определять оптимальные параметры упрочненных слоев, повышающих эксплуатационные характеристики термообработанных деталей.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в разработке технологий скоростного термического упрочнения деталей из целого ряда различных сталей, в создании модельного 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. Выпускаемое индукционное оборудование функционирует на целом ряде предприятий машиностроительных холдингов Беларуси (ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Амкодор», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Бобруйскагроماش», ОАО «БМЗ» и др.) и России (ПАО «КАМАЗ», ПАО «Уралмашзавод», ИЗ-КАРТЭКС» и др.). 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.

Экономическая значимость работы заключается в увеличении производительности операций термической обработки деталей машин, повышении эффективности машиностроительного производства и конкурентоспособности отечественной машиностроительной продукции за счет выпуска и реализации за период 2019-2025 годы оборудования индукционного нагрева на сумму 24,486 млн. белорусских рублей, а также оказания услуг по термической обработке деталей машиностроения на сумму 6,634 млн. белорусских рублей.

Социальная значимость работы состоит в увеличении производительности обработки, повышении качества изделий машиностроения из закаленных сталей, улучшении условий труда на термических производствах и экологической ситуации в сфере машиностроения, что, соответственно, призвано обеспечить запросы общества и улучшить качество жизни людей.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Материалы диссертации отражены в 116 печатных работах, включая: 1 монографию, 12 глав в 12 коллективных монографиях, 48 статей в научных журналах и сборниках, рекомендованных ВАК Республики Беларусь, 43 статьи и докла-

да, а также 3 тезисов в сборниках трудов и материалов конференций, в том числе за рубежом. Новизна технических решений подтверждена 6 патентами Республики Беларусь и 1 патентом Евразийского патентного ведомства.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертация изложена в рекомендованной ВАК логической последовательности и состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав с краткими выводами по каждой из них, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений. Полный объем диссертации составляет 260 страниц. Работа включает 150 иллюстраций, 18 таблиц, библиографию из 263 наименований, включающую список использованных источников из 147 наименований и список публикаций соискателя из 116 наименований.

Основное содержание работы изложено в объеме, достаточном для понимания сути исследований и полученных результатов, материал диссертации и автореферата изложен в соответствии с принятой терминологией.

Автореферат и опубликованные работы в достаточной степени отражают содержание диссертации. Диссертационная работа и автореферат в целом оформлены в соответствии с требованиями ВАК.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени

Совокупность 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 п.20 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий.

9. Замечания по диссертации

1 Скоростное термическое упрочнение металлов требует очень быстрого нагрева поверхностного или сквозного слоя до температур фазовой перекристаллизации с последующим ускоренным охлаждением. В зависимости от варианта технологии, для скоростного нагрева применяют различные методы (индукционный, лазерный, электронно-лучевой, электролитный, электроконтактный и др.). При том, что в одном из разработанных соискателем вариантов технологий скоростного термического упрочнения, наряду с основным индукционным нагревом, дополнительно используются лазерный или электронно-лучевой вид нагрева с целью легирования поверхностного слоя детали, однако весь комплекс исследований как в части разработки различных технологий скоростного термического упрочнения деталей машин, так и в части создания всей линейки технологического оборудования для реализации этих технологий базируется на использовании индукционного нагрева. В связи с этим, представляется, что в названии диссертации эту особенность работы следовало бы отразить, не обобщая в данном случае все виды скоростного нагрева.

2 Соискателем недостаточно тщательно проведен анализ современного состояния вопросов, связанных с изучаемой темой, так, в первой главе приведено только 130 ссылок, из них только 46 ссылок опубликованы после 2000 года, причем из них только 32 научные издания, остальное - патенты и ГОСТы, и только 13 ссылок на зарубежные издания. Отсутствуют также данные о структурных и фазовых превращениях при скоростной термообработке, полученные ранее другими исследователями.

3 Соискателем экспериментально установлен эффект фазовой перекристаллизации зон с метастабильной дефектной структурой в сварном шве изделий из низкоуглеродистых конструкционных сталей при индукционном нагреве со скоростями 50–100 °C/с до температур 920–1000 °C с трансформацией микроструктуры шва из столбчатых дендритов феррита и перлита с вытянутыми зернами в мелкозернистую феррито-перлитную структуру, обеспечивающую повышенную пластичность ($\delta \geq 20\%$) материала шва. При этом для лучшего понимания и управления подобными процессами, вероятно, следовало бы глубже раскрыть механизм подобной эволюции структуры, ее движущие силы и активирующие факторы.

4 Соискателем проведен большой объем экспериментов по исследованию влияния скоростной обработки на структуру и свойства различных сталей, однако отсутствует обоснование выбора марок сталей для изготовления конкретных деталей машин, не в полной мере описан механизм структурных и фазовых изменений при скоростной термической обработке в зависимости от химического состава сталей, что не позволяет создать полную картину по прогнозированию режимов скоростной термической обработки.

5 В диссертационной работе недостаточно уделено внимание обоснованию отличительных особенностей полученных автором результатах от полученных другими авторами ранее. В частности, утверждения о том, что нагрев при скоростной термической обработке необходимо проводить при более высоких температурах, чем при печном нагреве, а также имеет место исключение или уменьшение окисления, угара и обезуглероживания металла по сравнению с печной термической обработкой уже было описано в работах Кидина И.Н, Вологодина В.П. и др.

6 Во 2 пункте новизны автор ошибочно утверждает, что к γ -стабилизирующим легирующим элементам относится ванадий. Ванадий относится к α -стабилизирующим легирующим элементам (см. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.).

7 На стр. 166 в таблице 5.1 в качестве первого пункта алгоритма разработки технологии скоростной индукционной обработки автор предлагает проводить расчет необходимых физико-механических и технологических свойств деталей. Однако необходимый комплекс физико-механических и технологических свойств деталей определяется условиями их эксплуатации, и, как правило, задается конструктором узла машин и механизмов.

7 В работе отсутствуют документы, подтверждающие разработку новых технологий высокоскоростной термической обработки (номера технологических процессов и технические условия) и их внедрение (акты внедрения).

Однако вышеуказанные замечания не подвергают сомнению научную и практическую значимость работы.

10. Заключение

Диссертационная работа Вегеры И.И. «Концептуальное развитие технологии и создание оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин» является законченной квалификационной научной работой, самостоятельно подготовленной соискателем, по уровню научной новизны и практической значимости соответствующей требованиям п.20 Положения ВАК Беларуси, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки», а ее автору может быть присвоено искомое звание доктора технических наук за концептуальное развитие актуального научного направления – новые эффективные методы упрочнения сталей различного направления и инновационное оборудование для их реализации, включающее:

- 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 с сохранением высокой пластичности;

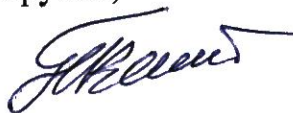
- установленные особенности структурных и фазовых превращений в ряде легированных сталей при скоростной индукционной закалке, включающие растворение карбидных фаз, равномерное распределение углерода и легирующих элементов с обеспечением диспергирования мартенситных составляющих до размера 5–15 мкм, образование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

- разработке 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;

- новом подходе к созданию технологий скоростного термического упрочнения деталей с формированием необходимой градиентной структуры, предусматривающем выбор параметров нагрева на основе сформированной базы данных, компьютерное моделирование электромагнитных и температурных полей и экспериментальную проверку оптимальности выбранных технологических режимов термообработки,

что в совокупности позволило решить крупную народнохозяйственную проблему по промышленному освоению технологий и оборудования скоростного термического упрочнения и повышению качества и конкурентоспособности отечественной машиностроительной продукции за счет выпуска и реализации за период 2019-2025 годы оборудования индукционного нагрева на сумму 24,486 млн. белорусских рублей, а также оказания услуг по термической обработке деталей машиностроения на сумму 6,634 млн. белорусских рублей

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник – консультант
Государственного научного учреждения
«Институт порошковой металлургии
имени академика О.В. Романа НАН Беларуси»,
академик НАН Беларуси,
доктор технических наук, профессор



П.А. Витязь

*Подпись главного научного сотрудника – консультанта Витязя П.А. проставлено
руководителем секретариата по кадровым вопросам*



Поступил в совет 02.07.2026



Лукешин О.К. у.г. секретарь совета