

ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Вегеры Ивана Ивановича «Концептуальное развитие технологии и создание оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Современное машиностроение предъявляет всё более жёсткие требования к эксплуатационной надёжности, ресурсу и массовому совершенству деталей, работающих в условиях интенсивных механических и тепловых нагрузок. Традиционные методы термической обработки в камерных и шахтных печах с воздушной средой характеризуются высокой энергоёмкостью, значительными потерями металла на окалину и обезуглероживание, а также низкой производительностью. В этой связи разработка новой концепции скоростного термического упрочнения с применением индукционного, лазерного и электронно-лучевого нагрева является крайне востребованной и научно обоснованной задачей. Диссертационная работа И. И. Вегеры, выполненная в рамках ряда государственных научно-технических программ и непосредственно связанная с приоритетными направлениями инновационной деятельности Республики Беларусь, несомненно, актуальна как в научном, так и в прикладном аспектах.

В диссертации впервые установлены закономерности фазовой перекристаллизации при индукционном нагреве низкоуглеродистых сталей, содержащих локальные зоны с метастабильной дефектной структурой, образующиеся при сварке и пластической деформации. Показано, что скоростной нагрев со скоростью 50–100 °C/с до температур 920–1000 °C позволяет сформировать мелкозернистую феррито-перлитную структуру с размером зерна 5–10 мкм, что обеспечивает выравнивание механических свойств по всему объёму сварных изделий, повышает ударную вязкость до уровня $KCU^{-70} \geq 1,15 \text{ МДж/м}^2$ и исключает усталостное разрушение несущих конструкций.

Экспериментально обоснованы оптимальные режимы скоростной закалки для широкого класса конструкционных, трубных, рессорно-пружинных и коррозионностойких сталей. Выявлено, что для доэвтектоидных сталей, легированных марганцем, никелем и ванадием, температуры нагрева должны превышать печные на 50–100 °C, а для хром-, кремний- и молибденсодержащих, а также заэвтектоидных сталей – на 100–150 °C с изотермической выдержкой 3–5 с. Это обеспечивает гомогенизацию аустенита, диспергирование мартенситных составляющих до размера 5–15 мкм, образование высокодисперсных карбидных включений и частичное сохранение пластичных фаз, что позволяет повысить прочность сталей на 50–100 МПа и пластичность на 3–5 % при полном исключении окисления, угара и обезуглероживания металла.

Разработаны комбинированные технологии, сочетающие индукционную закалку с последующим лазерным или электронно-лучевым

модифицированием поверхностных слоёв. Установлено, что при легировании карбидными (Cr_3C_2 , SiC , WC), боридными (W_2B_5 , SiB_6) и нитридными порошками формируются градиентные слои толщиной до 1,7 мм с микротвердостью от 9 до 18 ГПа. В частности, для титанового сплава ВТ23 применение таких покрытий позволяет снизить интенсивность изнашивания с $173 \cdot 10^{-3}$ до $1,2\text{--}1,6 \cdot 10^{-3}$ мг/м, то есть более чем в 100 раз.

Созданы оригинальные компьютерные модели электромагнитных и температурных полей, формируемых при индукционном нагреве, учитывающие частоту, мощность, геометрию индуктора и интенсивность охлаждения. Предложены методики сквозного моделирования, позволяющие прогнозировать распределение свойств по сечению детали и рассчитывать её усталостную выносливость. Показано, что применение градиентных упрочнённых слоёв повышает коэффициент запаса прочности с 1,8–1,9 до 2,0–2,5 и увеличивает циклическую долговечность с $8,65 \cdot 10^7$ до $8,41 \cdot 10^8$ циклов по сравнению с объёмной печной закалкой.

Работа имеет ярко выраженную практическую направленность. На основе выполненных исследований разработана и внедрена в серийное производство линейка универсального индукционного оборудования (модульные преобразователи частоты на IGBT-транзисторах с КПД не менее 95 %, установки с различными кинематическими схемами, системы автоматического управления с обратной связью). Оборудование и технологии прошли апробацию и используются на ведущих предприятиях Республики Беларусь (ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «Амкодор», ОАО «БЕЛАЗ», ОАО «Бобруйскагромаш», ОАО «Могилевлифтмаш», ОАО «БМЗ») и Российской Федерации (ИЗ-КАРТЭКС, ПАО «КАМАЗ», ПАО «Уралмашзавод»). За период 2014–2025 гг. выпущено и реализовано оборудование на сумму более 24 млн белорусских рублей, а термически обработано деталей – на сумму более 6 млн рублей. Экономическая эффективность подтверждена актами внедрения.

Особо следует отметить практическую ценность разработанных режимов локального индукционного отжига и нормализации сварных швов несущих рам карьерных самосвалов, что позволило снизить структурную неоднородность и риск аварийных разрушений. Сформированные базы данных по режимам термической обработки трубных сталей (17Г2СФ, 28ГХМ, 32Г2) соответствуют требованиям ГОСТ 633-80 и международных стандартов API 5CT, API 5L.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного сертифицированного оборудования (электронные микроскопы, спектрометры, твердомеры, испытательные машины), применением апробированных методик физико-механических исследований, большим объёмом экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов и их согласованием с теоретическими моделями. Выводы и положения, выносимые на защиту, логически вытекают из полученных результатов и не противоречат современным научным представлениям.

Основные результаты диссертации докладывались на более чем 40 международных и республиканских конференциях, симпозиумах и семинарах. Опубликовано 116 печатных работ, в том числе 1 монография, 48 статей в рецензируемых журналах, 11 глав в коллективных монографиях, получено 7 патентов Республики Беларусь и 3 технических условия. Это полностью соответствует требованиям ВАК для докторских диссертаций.

Замечания по автореферату

1. В автореферате (стр. 10 – 11) при описании методик исследования следовало бы более подробно указать погрешности измерений и методы статистической обработки результатов, особенно для циклических испытаний и расчётов усталостной выносливости.

2. При обсуждении комбинированных технологий (индукционный нагрев с лазерной и/или электронно-лучевой обработкой) не приведены сравнительные данные по экономической эффективности каждого из вариантов в зависимости от типа детали и условий эксплуатации.

3. В разделе, посвящённом моделированию (глава 5), отсутствует информация о верификации разработанных моделей на независимых экспериментальных данных, что несколько затрудняет оценку их точности и универсальности.

Указанное замечание не является принципиальным и не снижает научной новизны и практической значимости работы.

Диссертация Вегеры Ивана Ивановича является законченной научно-исследовательской работой, посвящённой концептуальному развитию актуального научного направления – разработке технологии и оборудования скоростного термического упрочнения деталей машин. В работе получены принципиально новые научно обоснованные результаты теоретических и экспериментальных исследований, признанные научным сообществом, обеспечивающие приоритет белорусской школы скоростной термической обработки и подтверждённые реальным экономическим эффектом.

По своей актуальности, научной новизне, объёму и практической значимости полученных результатов диссертация полностью соответствует требованиям Положения ВАК Республики Беларусь, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки, а её автор, Вегера Иван Иванович, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук.

Профессор кафедры «Оборудование и
технология сварочного производства»
Белорусско-Российского университета,
д-р техн. наук, профессор,
Заслуженный работник образования
Республики Беларусь



В.П. Куликов
Поступил в совет
29.06.2026
Директор
Уч. секретарь.