

## **АННОТАЦИЯ**

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D060400 – «Физика»

**Сатбаевой Зарины Аскарбековны**

**«Структурообразование в легированных сталях при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении»**

**Общая характеристика работы.** Диссертационная работа посвящена экспериментальным исследованиям изменений структурно-фазовых состояний и трибологических свойств поверхностных слоев сталей 40ХН, 20Х2Н4А и 34ХН1М при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении, а также разработке ресурсосберегающего способа электролитно-плазменного упрочнения конструкционных легированных сталей. В работе представлены результаты исследования влияния технологических параметров разработанного способа плазменно-электролитического поверхностного упрочнения на структурно-фазовые состояния и трибологические и механические характеристики легированных сталей 40ХН, 20Х2Н4А и 34ХН1М. На основе экспериментальных работ, проведенных с применением апробированных методов исследований и стандартных методов трибомеханических испытаний, было установлено, что электролитно-плазменное поверхностное упрочнение позволяет существенно повысить механические и трибологические свойства за счет формирования модифицированных слоев на поверхности материала состоящих как из основных, так и из вторичных упрочняющих фаз.

**Актуальность темы.** Постоянное совершенствование эксплуатационных характеристик оборудования и промышленной техники в основном обеспечивается с увеличением их мощности и производительности, которая требует интенсификации повышения рабочих характеристик их основных узлов и деталей. Состояние рабочего поверхностного слоя, где активно развиваются повреждения, которые уменьшают срок службы детали любой техники, дает оценку технико-экономических показателей эксплуатации техники. Для обеспечения высокой циклической долговечности, высокой износостойкости, снижения чувствительности к концентраторам напряжений необходимо создать в упрочняемом сечении детали градиент свойств, предусматривающий наличие твердой и износостойкой поверхности, вязкой, но прочной сердцевины и сжимающих напряжений в поверхностном слое. Реализация такого комплекса свойств возможна при применении метода поверхностной термообработки.

В настоящее время, наряду с металлургическими методами и термической обработкой в условиях заводов-изготовителей для повышения срока службы зубчатых колес рассматривается и местное поверхностное упрочнение изнашиваемых поверхностей с использованием различных технологий. Поверхностное термическое упрочнение стальных деталей является одним из наиболее эффективных и действенных способов увеличения ресурса работы нагруженных элементов машин и механизмов, а

также снижения их материалоемкости. При этом упрочняют только наиболее нагруженную рабочую поверхность детали, оставляя нетронутой сердцевину. При этом, прогресс в повышении качества поверхностной термообработки (закалки) рабочих поверхностей деталей связан с применением концентрированных источников энергии: электронного и лазерного луча, плазменной струи. Такие методы позволяют достигать более высокие эксплуатационные свойства и качество упрочнения. В настоящее время для поверхностного термического упрочнения зубчатых колес в промышленности широко применяют высокочастотную, газоплазменную, плазменную, электроннолучевую и лазерную обработку. При этом из всех существующих способов упрочнения по своим технико-экономическим показателям находит широкое и эффективное применение плазменное поверхностное упрочнение. Одним из разновидностей плазменного поверхностного упрочнения является электролитно-плазменное упрочнение (ЭПУ). Основной отличительной особенностью метода электролитно-плазменного упрочнения является меньшая стоимость, доступность технологического оборудования и расходных материалов, большие размеры упрочненной зоны и высокая скорость охлаждения по сравнению с традиционными методами плазменного поверхностного упрочнения. Сущность его заключается в термических фазовых и структурных превращениях, происходящих при быстром концентрированном нагреве рабочей поверхности детали плазменным воздействием с последующим быстрым охлаждением за счет теплоотвода вглубь материала и воздействия проточного электролита на нагретой поверхности материала. Образующиеся при этом структуры закалочного типа обладают высокой твердостью, износостойкостью и сопротивлением разрушению.

Анализ характеристик существующих способов и технологий модифицирования поверхности конструкционных сталей показывает, что задача разработки ресурсосберегающего способа поверхностного электролитно-плазменного упрочнения стальных деталей промышленного, инструментального и машиностроительного назначения с преимущественно высоким сроком службы является современной и актуальной.

**Целью работы** исследование закономерностей формирования структурно-фазовых состояний и изменений механических и трибологических характеристик легированных сталей при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Разработать способ и определить оптимальный режим электролитно-плазменного поверхностного упрочнения легированных сталей 40ХН, 20Х2Н4А, 34ХН1М;

2. Исследовать изменение микроструктуры и фазового состава поверхностных слоев легированных сталей 40ХН, 20Х2Н4А, 34ХН1М при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении;

3. Изучить влияние технологических параметров электролитно-плазменного поверхностного упрочнения на твердость, износостойкость и коррозионную стойкость легированных сталей 40ХН, 20Х2Н4А, 34ХН1М;

4. Изучить влияние электролитно-плазменного упрочнения на тонкую структуру поверхностного слоя легированной стали.

**Объект исследования** – легированные стали марки 40ХН, 34ХН1М, 20Х2Н4А до и после поверхностного электролитно-плазменного упрочнения.

**Предмет исследования** – особенности процесса электролитно-плазменного упрочнения, структурно-фазовые состояния и трибологические свойства упрочненных слоев конструкционных сталей 40ХН, 34ХН1М, 20Х2Н4А.

**Методы исследования.** Для изучения структурно-фазовых состояний упрочненного поверхностного слоя, полученного методом электролитно-плазменного упрочнения, применялись следующие методы экспериментального исследования: рентгеноструктурный анализ, сканирующая электронная и просвечивающая электронная микроскопии, профилометрия. Механические и трибологические характеристики упрочненного слоя определялись путем измерения микротвердости, испытания на износостойкость по схеме «шар-диск», а также испытаниями на абразивное изнашивание.

Все исследования настоящей работы были проведены на современных экспериментальных оборудовании Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхности и трибология», Национальной научной лаборатории коллективного пользования НАО ВКУ имени Сарсена Аманжолова, лаборатории инженерного профиля «IRGETAS» НАО ВКТУ имени Д. Серикбаева, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Томск, Россия).

**Научная новизна работы:**

– разработан новый способ упрочнения легированных сталей, который осуществляется в электролите на основе водного раствора карбоната натрия и карбамида путем локального плазменного воздействия на поверхность обрабатываемого материала при подачи напряжения между обрабатываемым материалов и жидким электролитным катодом 320В в течении 2 сек и охлаждения при отключении напряжения за счет теплоотвода вглубь материала и воздействия направленного потока электролита, находящегося в циркуляционном режиме.

– впервые получены систематизированные экспериментальные данные о влиянии электролитно-плазменного поверхностного упрочнения на структуру, фазовый состав и трибологические свойства конструкционных легированных сталей 40ХН, 34ХН1М, 20Х2Н4А;

– впервые установлены морфологические особенности тонкой структуры и количественные параметры дислокационной структуры легированной стали 34ХН1М до и после электролитно-плазменной поверхностного упрочнения.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный способ электролитно-плазменного поверхностного упрочнения легированных сталей. Разработанный новый способ упрочнения легированных сталей, который осуществляется в электролите на основе водного раствора карбоната натрия и карбамида путем локального плазменного воздействия на поверхность обрабатываемого материала при подачи напряжения между обрабатываемым материалов и жидким электролитным катодом 320В в течении 2 секунд и быстрого охлаждения при отключении напряжения за счет теплоотвода вглубь материала и воздействия направленного потока электролита на нагретую поверхность, позволяет получить модифицированный поверхностный слой толщиной ~0,5-1,5 мм состоящий из  $\alpha'$ -фазы,  $\gamma$ -фазы и карбида  $M_3C$ .

2. Модифицирование микроструктуры и свойств легированных сталей при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении. После электролитно-плазменной поверхностной закалки в зависимости от степени легированности сталей твердость в среднем у хромоникелевых и хромоникельмолибденовых сталей увеличивается в 1,5-2 и ~3 раза, а также параметр износостойкости имеет определенную зависимость от содержания углерода в сталях, так значения износостойкости сталей марки 40ХН, 34ХН1М и 20Х2Н4А увеличились в 10 раз, ~6 раз и 3,5 раза соответственно, по сравнению с исходными образцами.

3. Морфологические особенности и количественные параметры дислокационной структуры стали 34ХН1М до и после электролитно-плазменного поверхностного упрочнения. ЭППУ стали 34ХН1М способствует образованию тонкой структуры, состоящей из пакетного и пластинчатого мартенсита с объемными долями 60% и 40%, остаточного аустенита, цементита и сложного карбида  $M_{23}C_6$ , формирование которых, способствует повышению внутреннего напряжения сдвига от 295 МПа до 370 МПа и тем самым приводит к упрочнению поверхности материала за счет повышения скалярной плотности дислокации от  $2,20 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  до  $\rho = 3,47 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и ее высокого значения по сравнению с избыточной плотностью дислокации, которая составляет  $\rho_{\pm} = 1,97 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  в модифицированном слое.

**Научная и практическая значимость.** Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований дают новые, более глубокие представления о процессе формирования модифицированного поверхностного слоя в конструкционных легированных сталях при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении. Данная работа имеет важное практическое значение, так как разработанный способ электролитно-плазменного поверхностного упрочнения позволяет получить модифицированный поверхностный слой на конструкционных легированных сталях с улучшенными физико-механическими свойствами. Внедрение разработанного способа, увеличивающего долговечность деталей в машиностроительное производство, дает технико-экономический и экологический эффект за счет применения простого оборудования, не дорогого и экологически чистого электролита на основе карбамида и карбоната натрия, сокращения длительности процесса, повышения

производительности труда и уменьшения экологической нагрузки на окружающую среду.

Разработанный способ электролитно-плазменного поверхностного упрочнения защищен патентами Республики Казахстан на полезную модель «Способ закалки стальных изделий» (полезная модель №4891 от 28.04.2020г.) и «Установка для плазменного поверхностного упрочнения деталей из стали и чугуна» (№5354 от 04.09.2020г.). Полученные результаты исследования могут быть полезны при выборе видов и режимов упрочняющих обработок деталей из конструкционных сталей.

**Связь работы с научно-исследовательскими проектами.** Тема представленной к защите диссертации «Структурообразования в легированных сталях при электролитно-плазменном поверхностном упрочнении» соответствует приоритетному направлению развития науки «Энергетика и машиностроение», а работа выполнена по Государственной программе, в рамках грантового финансирования: AP05134936 «Разработка технологии электролитно-плазменной поверхностной закалки для повышения долговечности тяжело-нагруженных зубчатых колес», выполняемый на базе НИЦ ИПиТ ВКУ имени Сарсена Аманжолова.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора состоит в проведении эксперимента по электролитно-плазменному поверхностному упрочнению, анализе литературных данных, в проведении электронно-микроскопических, рентгеноструктурных исследований, в проведении работ по определению твердости, износостойкости сталей, а также статистической обработке результатов. Постановка задачи, анализ полученных результатов и формулировка основных выводов были проведены совместно с научными консультантами.

**Степень обоснованности и достоверности результатов, полученных в работе, обеспечивается.**

Обоснованность и достоверность результатов обеспечиваются тем, что при их получении использованы проверенные стандартные методы исследования и современные точные измерительные приборы и установки, объемом и статистикой экспериментальных данных и их сопоставлением с полученными ранее экспериментальными результатами известных ученых СНГ и дальнего зарубежья. Результаты исследований опубликованы в научных журналах, доложены и обсуждены на международных конференциях.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты доложены на: 11-ом Международном симпозиуме «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», г. Минск, Белоруссия, 10-12 апреля 2019 г.; 11-я Международная научная конференция «Хаос и структуры в линейных системах. Теория и эксперимент», г. Караганда, 22-23 ноября 2019 г.; 28<sup>st</sup> International Conference on Metallurgy and Materials «Metal 2019», Brno, Czech Republic, may 22<sup>nd</sup>-24<sup>th</sup> 2019; 14<sup>th</sup> International conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications», Tomsk, Russia, September 15-21, 2019; Международная научно-практическая конференция «Материаловедение, машиностроение и

энергетика: проблемы и перспективы развития», Барнаул, Российская Федерация, 27-28 июня 2019 г.; Международная научно-практическая конференция «Материаловедение и металлургические технологии», Челябинск, Российская Федерация, 1-3 октября 2019 г.; 29<sup>st</sup> International Conference on Metallurgy and Materials «Metal 2020», Brno, Czech Republic, may 20<sup>nd</sup>-22<sup>th</sup> 2020.

Кроме того, основные научные результаты докладывались и обсуждались на научных семинарах НИЦ «Инженерия поверхности и трибология» ВКУ имени Сарсена Аманжолова (2018-2021 годы), на кафедре физики ВКУ имени Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, (2020-2021 годы).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 14 печатных работ в соавторстве, из них: 3 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНиВО РК, 3 статьи опубликованы в журналах, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, 5 статей в сборниках материалов международных конференций, а также 1 монография в соавторстве и 2 патента на полезную модель Республики Казахстан.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Она изложена на 119 страницах, содержит 50 рисунков, 12 таблиц и список использованных источников из 183 наименований.