

Восточно-Казахстанский государственный технический  
университет им Д.Серикбаева

УДК 669.1.017:620.18

На правах рукописи

**БАЯТАНОВА ЛЯЙЛА БОЛАТКАНОВНА**

**Формирование модифицированных слоев на  
поверхности низкоуглеродистой стали методом воздействия  
электролитной плазмой**

6D072300- Техническая физика

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора философии (Ph.D)

Научные консультанты:

Скаков М.К., доктор физико-  
математических наук, профессор

M. Scheffler, dr.rer.nat., Professor

Республика Казахстан  
Усть-Каменогорск, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| <b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ</b> .....  | 4   |
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....  | 6   |
| <b>1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛЕЙ</b> .....                              | 12  |
| 1.1 Электролитно-плазменное модифицирование металлов.....  | 12  |
| 1.2 Фазовый состав, структура и эксплуатационные свойства сталей и сплавов, обработанных путем нагрева в электролите.....    | 15  |
| 1.3 Изменение тонкой структуры сталей в результате химико-термической обработки.....   | 30  |
| 1.4 Постановка задач.....  | 33  |
| <b>2 МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....  | 34  |
| 2.1 Материал исследования.....   | 34  |
| 2.2 Установка и методика электролитно-плазменной обработки.....  | 34  |
| 2.3 Подготовка образцов.....   | 37  |
| 2.4 Оптическая металлография.....  | 37  |
| 2.5 Рентгеноструктурный анализ.....  | 37  |
| 2.6 Растровый элементный анализ.....   | 38  |
| 2.7 Просвечивающая электронная микроскопия.....  | 39  |
| 2.8 Испытания на микротвердость.....   | 48  |
| 2.9 Испытания на износостойкость.....  | 48  |
| 2.10 Определение шероховатости.....  | 49  |
| <b>3 ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛИ 18ХНЗМА-Ш</b> ..... | 50  |
| 3.1 Изменения микроструктуры поверхности стали 18ХНЗМА-Ш в результате электролитно-плазменной обработки.....                 | 50  |
| 3.2 Влияние электролитно-плазменной обработки на фазовый состав поверхностного слоя стали.....                               | 62  |
| 3.3 Влияния физико-химических процессов электролитно-плазменной обработки на формирование упрочненного слоя стали.....       | 68  |
| 3.4 Выводы.....  | 75  |
| <b>4 ТОНКАЯ СТРУКТУРА УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ СТАЛИ 18ХНЗМА-Ш ДО И ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ</b> .....               | 76  |
| 4.1 Исходная субструктура стали.....   | 76  |
| 4.2 Количественные оценки дислокационной структуры в исходной стали.....   | 94  |
| 4.3 Внутренние поля напряжений и их источники в исходной стали.....  | 95  |
| 4.4 Структура и фазообразование стали 18ХНЗМА-Ш при электролитно-плазменной нитроцементации.....                             | 99  |
| 4.5 Фазовый состав приповерхностного и переходного слоев стали 18ХНЗМА-Ш после электролитно-плазменной нитроцементации.....  | 103 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.6      | Дислокационная структура и дальнедействующие поля напряжений, их источники и локализация в стали 18ХНЗМА-Ш при электролитно-плазменной нитроцементации..... | 120        |
| 4.7      | Выводы.....   | 123        |
| <b>5</b> | <b>ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 18ХНЗМА-Ш ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ПЛАЗМОЙ .....</b>   | <b>126</b> |
| 5.1      | Изменение поверхностной микротвердости и глубины упрочненного слоя стали 18ХНЗМА-Ш после электролитно-плазменной обработки..                                | 126        |
| 5.2      | Влияние электролитно-плазменной обработки на трибологические свойства стали.....  | 133        |
| 5.3      | Влияние электролитно-плазменной обработки на шероховатость поверхности стали.....   | 139        |
| 5.4      | Выводы.....   | 142        |
|          | <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.....</b>  | <b>143</b> |
|          | <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>  | <b>146</b> |

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- ВКГТУ - Восточно-Казахстанский государственный технический университет  
НИИ НиНМ - Научно-исследовательский институт «Нанотехнологии и новые материалы»  
ХТО - химико-термическая обработка  
ЭПО - электролитно-плазменная обработка  
ЭПА - электролитно-плазменное азотирование  
ЭПН - электролитно-плазменная нитроцементация  
ПГО - парогазовая оболочка  
ИП - источник питания  
ПК - персональный компьютер  
ОЦК - объемноцентрированная кубическая решетка  
ГЦК - гранецентрированная кубическая решетка  
ГПУ - гексагональная плотноупакованная решетка  
ПЭМ - просвечивающая электронная микроскопия  
ОНГ – ось наклона гониометра  
 $\theta_{hkl}$  – угол дифракции  
 $\lambda$  - длина волны излучения  
 $a$  – параметр кристаллической решетки  
 $(hkl)$  – индексы отражения  
 $(D)$  - средний размер зерен, измеренных по отдельным изображениям микрошлифа  
 $\bar{d}$  - средний размер зерна, определенный по отдельному изображению участка микрошлифа  
 $\delta_D$  - среднеквадратичное отклонение  
 $P_V$  - доля объема, занятая соответствующей структурной составляющей  
 $P_S$  - доля площади, занятая соответствующей структурной составляющей  
 $\rho$  - скалярная плотность дислокаций  
 $M$  - увеличение микрофотографии  
 $t$  - толщина фольги  
 $n_1$  и  $n_2$  – число пересечений дислокациями горизонтальных линий  
 $l_1$  и  $l_2$  – число пересечений дислокациями вертикальных линий  
 $\rho_{\pm}$  - избыточная плотность дислокаций  
 $\rho_+$  - плотность положительно заряженных дислокаций  
 $\rho_-$  - плотность отрицательно заряженных дислокаций  
 $\chi$  - амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки  
 $\Delta l$  - смещение экстинкционного контура  
 $\Delta\varphi$  - угол наклона фольги  
 $\bar{g}$  - вектор действующего отражения  
 $b$  – вектор Бюргерса  
 $\tau_D$  - величина дальнедействующих полей напряжения  
 $G$  - модуль сдвига

$\alpha_c$  - коэффициент Струнина

$\Delta P_V$  - объемная доля морфологической составляющей  $\alpha$ -фазы стали

$\Delta V_\gamma$  - объемная доля  $\gamma$ -фазы

## ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию воздействия электролитной плазмы на структуру, фазовый состав, твердость и износостойкость конструкционной низкоуглеродистой стали 18ХНЗМА-Ш. Данная марка стали используется в долотной промышленности в качестве материала деталей буровых инструментов. Как известно, процесс катодного нагрева в электролитной плазме является одним из современных методов химико-термической обработки (ХТО).

Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) осуществляется при нагреве катода в специальных электролитах - водных растворах. При этом катодом является обрабатываемая деталь.

Преимуществами ЭПО перед традиционным оборудованием термических цехов являются: малые габариты, готовность к работе по требуемому режиму практически сразу после включения, возможность обработки локальных участков детали, высокие скорости нагрева и диффузионного насыщения, простота в эксплуатации и техническом обслуживании, более низкая стоимость.

Поверхностная термическая и химико-термическая обработка за последние годы получает все большее распространение. Нагрев стальных деталей в электролитной плазме при катодном процессе позволяет осуществить высокоскоростную термическую и химико-термическую обработку, что дает возможность сократить время обработки от нескольких часов до нескольких минут. Физико-химические особенности процессов, протекающих в парогазовой оболочке — нагревательном элементе системы, дают возможность осуществить диффузию элементов, входящих в состав электролита в обрабатываемую деталь. Данный способ целесообразно использовать при ремонтных работах для упрочнения единичных деталей, благодаря тому, что подготовка установки, закрепление детали и заправка рабочей камеры электролитом, как и сам процесс обработки, составляет несколько минут.

Непрерывный технический прогресс и развитие новых отраслей промышленности требуют новых высокопрочных и стойких материалов. Эксплуатационные характеристики многих деталей машин связаны с их поверхностными свойствами, поэтому разработка технологий поверхностной модификации является одной из главнейших задач современного металловедения.

Повышение эффективности производства и качества выпускаемой продукции в долотной промышленности неразрывно связано с более полным использованием возможностей, которые заложены в конструкционных материалах, из которых изготавливаются буровые долота и технологии обработки этих материалов.

Проблема повышения эксплуатационной надежности буровых долот является комплексной и предполагает привлечение современных методов химико-термической обработки. Важнейшей частью этой проблемы является

улучшение свойств материала поверхностного слоя деталей, в частности, за счет упрочнения.

**Актуальность темы исследования.** Вопросы использования ЭПО, и прежде всего катодного нагрева, как в научном, так и в практическом плане являются весьма актуальными.

Исследования показали эффективность применения электролитно-плазменной обработки для конструкционных сталей. Традиционно обрабатываемые материалы из этого класса сталей обладают повышенной хрупкостью поверхностного слоя и относительно низким комплексом свойств сердцевины. Использование ЭПО позволит значительно повысить свойства модифицированного слоя и сердцевины. Особенности формирования структуры конструкционной низкоуглеродистой стали 18ХНЗМА-Ш позволяют предложить новые режимы, расширяющие технологические возможности упрочняющей термообработки.

До настоящего времени структуру модифицированного слоя стали 18ХНЗМА-Ш изучали методами микроскопии невысокого разрешения, чаще оптической. Значительно более углубленные и продвинутые результаты могут быть достигнуты при применении электронной микроскопии, особенно просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Использование этого метода в исследованиях процесса показывает большую перспективность такого подхода. Это относится и к методической, и к практической, и к фундаментальной стороне вопроса. Поэтому в настоящей работе был развит и использован для задач обработки в электролитной плазме новый подход – использование метода просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Это позволит получить принципиально новые и углубленные результаты, позволяющие выявить фундаментальные особенности структуры модифицированного слоя.

**Цель работы:** разработать технологию и оптимальные режимы поверхностного упрочнения низкоуглеродистой стали 18ХНЗМА-Ш в электролитной плазме, обеспечивающих сочетание высоких характеристик механических свойств и повышенную износостойкость поверхности; исследование фазовых превращений, структуры и свойств стали, подвергнутой воздействию электролитной плазмы.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать технологию и оптимальные режимы поверхностного упрочнения в электролитной плазме материала бурового инструмента из стали 18ХНЗМА-Ш и выдать практические рекомендации;
2. Исследовать структуру, фазовый состав, изменения твердости и износостойкости поверхностных слоев низкоуглеродистой стали 18ХНЗМА-Ш в зависимости от режимов электролитно-плазменной обработки;
3. Изучить особенности формирования тонкой структуры стали 18ХНЗМА-Ш при электролитно-плазменной обработке;
4. Установить количественные закономерности, характеризующие субструктуру исходной и обработанной в электролитной плазме стали 18ХНЗМА-Ш.

**Предмет исследования** – фазовый состав, структура, механические свойства модифицированных слоев стали 18ХНЗМА-Ш после электролитно-плазменной обработки.

**Объект исследования** – конструкционная низкоуглеродистая сталь 18ХНЗМА-Ш до и после воздействия электролитной плазмой, используемая при изготовлении деталей буровых инструментов.

**Методы исследования.** Оптическая микроскопия, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, методы определения твердости и износостойкости материалов.

**Научная новизна.**

Достижение сформулированной цели, в соответствии с общим планом исследований практически полностью отражает научную новизну данных, полученных в диссертации.

Получены новые экспериментальные данные о влиянии воздействия катодного нагрева в электролитной плазме на структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях стали 18ХНЗМА-Ш.

Выявлены закономерности формирования структуры и свойств модифицированного слоя стали 18ХНЗМА-Ш при воздействии электролитной плазмой.

Впервые получены новые результаты по изучению тонкой структуры приповерхностного и переходного слоев стали 18ХНЗМА-Ш после обработки в электролитной плазме.

Определены оптимальные режимы технологии электролитно-плазменного упрочнения поверхности низкоуглеродистой стали 18ХНЗМА-Ш с возможностью контроля температуры нагрева, модифицирования поверхности, обеспечения высокой кинетической эффективности процесса диффузионного насыщения.

Показано, что формирование градиентной аустенитно-мартенситной структуры приповерхностного слоя и структуры пакетного мартенсита переходного слоя в результате нитроцементации в электролитной плазме позволяет получать повышенную твердость и износостойкость стали 18ХНЗМА-Ш.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Технология электролитно-плазменной обработки и оптимальные режимы, обеспечивающие повышение толщины модифицированного слоя и прочностных свойств низкоуглеродистой стали путем скоростного нагрева;
2. Основные закономерности структурно-фазовых превращений в стали 18ХНЗМА-Ш при электролитно-плазменной обработке;
3. Научно-обоснованные рекомендации по технологии электролитно-плазменного упрочнения стали 18ХНЗМА-Ш, как материала бурового инструмента.



### **Научная и практическая значимость работы.**

Определены оптимальные режимы электролитно-плазменной обработки для модификации поверхности низкоуглеродистой стали с повышенными эксплуатационными свойствами.

Установлено, что после электролитно-плазменной обработки, в материале образуются карбиды и карбонитриды, которые способствуют упрочнению поверхностных слоев стали, и поэтому сведения о них важны для повышения рабочего ресурса работы изделия и его восстановления.

Результаты исследования тонкой структуры и свойств стали 18ХНЗМА-Ш, параметры субструктуры, выявленные в настоящей работе, оказывающие определяющие влияния на поверхностное упрочнение стали, могут быть учтены и применены при исследованиях модифицированных слоев других материалов.

Предложенные технология электролитно-плазменной обработки и оптимальные режимы для стали 18ХНЗМА-Ш защищены авторскими свидетельствами на изобретения, и они рекомендованы для использования на практике при изготовлении буровых инструментов АО «Востокмашзавод».

**Личный вклад автора** заключается в проведении большинства экспериментальных и теоретических исследований, обработке результатов измерений, их анализе на основе существующих представлений физики конденсированного состояния и физического материаловедения.

### **Связь темы с планами научно-исследовательских программ.**

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем: «Инновационная технология электролитно-плазменной обработки материала подшипникового узла бурового инструмента», финансируемой АО «Национальное агентство по технологическому развитию» по договору №475/189-209-11 в 2010-2013 гг., «Разработка и внедрение инновационной технологии электролитно-плазменного упрочнения материала бурового инструмента» по договору №6/186-209-10, финансируемой АО «Фонд науки» КН МОН РК. Основные результаты диссертации отражены в итоговом отчете по проекту «Инновационная технология электролитно-плазменного упрочнения материала подшипникового узла бурового инструмента».

**Степень обоснованности и достоверности результатов, полученных в работе, обеспечивается:** корректностью постановки решаемых задач и их физической обоснованностью, использованием современных методов и методик исследования, большим объемом экспериментальных данных и их статистической обработкой, сопоставлением установленных в работе закономерностей с фактами, полученными другими исследователями. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых зарубежных научных журналах входящих в базу данных компаний Thomson Reuters и Scopus.

**Источниками исследования** являются основные экспериментальные и теоретические положения современной физики конденсированного состояния, физики металлов и сплавов, экспериментальные результаты оригинальных

научных работ последних лет, приведенные в списке использованных источников.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию Независимости Республики Казахстан «20 лет Развития Казахстана – путь к инновационной экономике: достижения перспективы»: ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г Усть-Каменогорск, 23-25 ноября, 2011; XII Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых «Творчество молодых инновационному развитию Казахстана», ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г Усть-Каменогорск, 19-20 апреля, 2012; III –Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых «Инновационные технологии и экономика в машиностроении», Юргинский технологический институт (филиал) НИ ТПУ, г.Томск, 24-25 мая, 2012; IFOST2012 «The 7th International forum on strategic technology 2012» National Research Tomsk Polytechnic university, September 17-21, 2012; 32<sup>th</sup> All-Polish Tribology conference Autumnal school of Tribology 2012, Wroclaw University of Technology Institute of Machine Design and Operation, Wroclaw, Poland, 18-21 September, 2012; International Conference on Materials Science and nanotechnology (ICMSN2012) Guangzhou, China, November 16-18, 2012; International Conference on Management, Manufacturing and Materials Engineering (ICMMM2012) Beijing, China, September 21-23, 2012; 15-ой Международной научно-практической конференции "Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика", Научно-производственная фирма «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия, 16 - 19 апреля 2013 г.; Международной конференции студентов и молодых ученых «Мир Науки», КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, 17 – 19 апреля 2013 г.; XIII Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов и молодых ученых “Творчество молодых инновационному развитию Казахстана”, Усть-Каменогорск, Казахстан, 22-25 апреля 2012 г.; IV международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых, Юрга, Россия, 23 – 25 мая 2013 г.; X Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, 5-7 июня, 2013; Международной школе - семинаре «Инновационные технологии и исследования, направленные на развитие зеленой энергетики и глубокую переработку продукции», ВКГУ им. С.Аманжолова, г.Усть-Каменогорск, 27-30 июня, 2013; 5<sup>th</sup> World Tribology Congress, Torino, Italy, 9-13 September, 2013; Международной объединенной IV конференции «Электрохимические и электролитно-плазменные методы модификации металлических поверхностей», Плётс, Ивановская область, Россия, 16–20 сентября 2013 г.; 9-ой Международной научной конференции «Ядерная и радиационная физика», ИЯФ НЯЦ РК, г Алматы, 24-27 сентября, 2013 г.; Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современное состояние и проблемы естественных наук», Юрга, Россия. 17-18 апреля 2014 г.

Кроме того, основные результаты докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры технической физики, объединенных научных семинарах факультета машиностроения и транспорта ВКГТУ им. Д.Серикбаева, на 1-ом и 2-ом Казахско–Немецком семинаре докторантов, Университет им. Отто-фон-Гуерике, Магдебург, Германия, 28 сентября 2012 г., 8 октября 2013 г., в объединенном научном семинаре докторантов во Вроцлавском Политехническом Университете, Вроцлав, Польша, 17 октября 2013 г.

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликованы 25 печатных работ в соавторстве, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 1 статья опубликована в зарубежном журнале с ненулевым импакт-фактором, входящем в базу данных Thomson Reuters, 3 статьи в зарубежных изданиях, входящих в базу данных Scopus, 9 статьи и 4 тезиса в сборниках материалов международных конференций, 2 статьи в сборниках материалов республиканских конференций, 2 авторских свидетельства на изобретения.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников. Она изложена на 158 страницах, содержит 100 рисунков, 21 таблицу и список использованных источников из 182 наименований.

**Bayatanova Lyaila Bolatkanovna**

**Formation of Modified Layers on low carbon Steel Surface by a Plasma Electrolytic Effects Method**

**ABSTRACT**

Dissertation submitted in fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 6D072300 Technical Physics

**Urgency of research**

Questions of use the electrolytic-plasma treatment, especially cathode heating, both in scientific and in practical terms are highly relevant.

Studies showed efficiency of electrolytic-plasma treatment for structural steels. Traditionally treated materials out of this class of steels possess increased fragility of the surface layer and the relatively low complex of properties of the transition layer. Use of electrolytic-plasma treatment will significantly improve the properties of the modified layer and the core. Structure formation features of 18CrNi3Mo structural low carbon steel allow offering new regimes that enhance the technological capabilities of the hardening heat treatment.

To date structure of 18CrNi3Mo steel modified layer were studied by microscopy methods, low resolution, more optical. Significantly more profound and advanced results can be achieved when using electron microscopy, in particular transmission electron diffraction microscopy. Using this method in process studies showed great promise of this approach. This applies to the methodological and practical, and a fundamental side of the question. Therefore in the present work was developed and used for processing tasks in plasma electrolyte new approach - the use of the transmission electron diffraction microscopy method. This will get the essentially new and in-depth results that help identify basic features of modified layer structure.

**Purpose of work:** develop the technology and the optimal modes of 18CrNi3Mo steel surface hardening in plasma electrolyte, providing a combination of high performance mechanical properties and high wear resistance of surface; research of phase transformations, structure and properties of steel exposed to the electrolyte plasma.

To achieve the purpose were as follows **tasks:**

1. Develop technology and optimal modes of surface hardening in plasma electrolyte for 18CrNi3Mo steel the material drilling tool and to give practical recommendations;
2. Investigate the structure, phase composition, hardness and wear resistance changes of 18CrNi3Mo low carbon steel surface layers depending on the mode of electrolytic-plasma treatment;
3. Research the fine structure formation features of 18CrNi3Mo steel by electrolytic-plasma treatment;

4. Establish the quantitative laws, when characterizing the 18CrNi3Mo steel substructure initial and treated in the plasma electrolytic.

**Subject of research** – phase composition, structure and mechanical properties of 18CrNi3Mo steel modified layers after electrolytic-plasma treatment.

**Object of research** – 18CrNi3Mo structural low carbon steel before and after exposure to the plasma electrolyte used in the manufacture of parts for drilling tools.

**Methods of research.** Optical microscopic, scanning electron microscopic and transmission electron microscopy, X-ray structural analysis, methods for the determination of hardness and wear resistance of materials.

**Scientific novelty.**

Achievement of formulated purpose in accordance with the research general plan is almost entirely reflects the scientific novelty of the data obtained in the dissertation.

Obtained new experimental data about effect of cathode heating in the electrolyte plasma exposure on the structural and phase transformations in 18CrNi3Mo steel surface layers.

Disclosed laws formation of 18CrNi3Mo steel modified layer structure and properties by the electrolyte plasma influence.

First time forth new results on the study of surface and transition layers fine structure of 18CrNi3Mo steel after treatment in plasma electrolyte.

Determined the optimal mode technology for electrolytic-plasma surface hardening of 18CrNi3Mo low carbon steel with the ability to control the heating temperature, surface modification, ensuring high kinetic efficiency of diffusion saturation process.

Is shown that the formation of a gradient austenitic-martensitic structure in the surface layer and the packet martensite structure in the transition layer as a result of nitrocarburizing in plasma electrolyte allows to obtain increased hardness and wear resistance of 18CrNi3Mo steel.

**Main provisions submitted within presentation of the thesis:**

1. Electrolytic-plasma treatment technology and the optimal modes providing increase of modified layer thickness and strength properties of low carbon steel by high-speed heating;

2. Basic laws of structural phase transitions in 18CrNi3Mo steel by electrolytic-plasma treatment;

3. Scientifically based recommendations for the electrolytic-plasma hardening technology for 18CrNi3Mo steel as material drilling tools.

**Scientific and practical significance of the work.**

Determined the optimal mode of electrolytic-plasma treatment for low carbon steel surface modification with high performance properties.

Established that after electrolytic-plasma treatment in material formed carbides and carbonitrides, which help strengthen of steel surface layers, and therefore information about them is important to improve the working life of the product and its recovery.

Fine structure, properties and substructure parameters study results of 18CrNi3Mo steel identified in present work, has a decisive influence on steel surface hardening can be taken into account and used at researches the modified layers of other materials.

The proposed electrolytic-plasma treatment technology and optimal modes for 18CrNi3Mo steel protected by copyright certificates on inventions, and are recommended for use in practice by manufacturing drilling tools of "Vostokmashzavod" JSC.

**Publications.** Total relating to the dissertation published 25 printed works co-authored, 4 of which were published in journals recommended by the Committee for Control of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, 1 paper published in journal with non-zero impact factor, is part of Thomson Reuters database, 3 papers in international journals included in Scopus database, and 9 papers 4 theses in the proceedings of international conferences, 2 papers in the proceedings of republican conferences, 2 inventor's certificates.

**Structure and volume of the thesis.** The work consists of an introduction, five chapters, conclusion and list of references. It stated on 158 pages, contains of 100 figures, 21 tables and 182 references.

**Баятанова Ляйла Болаткановна**

**Электролитті плазмалық әсер ету әдісімен аз көміртекті болат бетінде түрлендірілген қабаттар қалыптастыру**

6D072300-Техникалық физика мамандығы бойынша философия докторы (Ph.D.) ғылыми дәрежесін алу үшін дайындалған диссертациясына

**АННОТАЦИЯ**

**Зерттеу тақырыбының өзектілігі.** Электролитті плазмалық өңдеуді қолдану мәселелері, ең алдымен катодты қыздыру ғылыми жағынан да және практикалық жағынан да өзекті болып табылады.

Зерттеулер электролитті плазмалық өңдеуді конструкциялық болаттар үшін қолданудың тиімділігін көрсетті. Болаттың осы класс түрлерінен жасалған дәстүрлі жолмен өңделетін материалдар беттік қабаттың жоғарғы морттығы мен ортаңғы бөлік қасиеттерінің төмендігіне ие. Электролитті плазмалық өңдеуді қолданы түрлендірілген қабат пен ортаңғы бөлік қасиеттерін айтарлықтай жоғарылатуға мүмкіндік береді. Конструкциялық аз көміртекті 18ХНЗМА-Ш болатының құрылымының қалыптасуының ерекшеліктері беріктендіретін термиялық өңдеудің технологиялық мүмкіндіктерін кеңейтетін жаңа режимдер ұсынуға мүмкіндік береді.

Осы уақытқа дейін 18ХНЗМА-Ш болатының түрлендірілген қабатының құрылымын ажыратқыштығы төмен микроскопия әдістері арқылы зерттеді, көбінесе оптикалық. Айтарлықтай терең әрі ерекше нәтижелер электронды микроскопия, әсіресе көрінетін дифракциялық электронды микроскопия әдісін қолдану кезінде алынады. Бұл әдісті зерттеу процесі кезінде қолдану зор мүмкіншіліктер тудырады. Бұл мәселенің әдістемелік, тәжірибелік, және іргелі жағына да қатысты. Сондықтан бұл жұмыста электролитті плазмалық өңдеу міндеттері үшін жаңа әдіс дамытылды және қолданылды, ол көрінетін дифракциялық электронды микроскопия әдісін қолдану болып табылады. Ол өз кезегінде түрлендірілген қабат құрылымының іргелі ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік беретін жаңа әрі терең нәтижелер алуға жол ашады.

**Жұмыстың мақсаты:** беткі қабаттың механикалық қасиеттері мен жоғарғы төзімділігінің үйлесімділік сипаттамаларын қамтамасыз ететін аз көміртекті 18ХНЗМА-Ш болатын электролитті плазмада беріктендіру технологиясы мен оптималды режимдерін жасап шығару; электролитті плазма әсеріне ұшыраған болаттың фазалық ауысуларын, құрылымы мен қасиеттерін зерттеу.

Көрсетілген мақсатқа жету үшін келесі **міндеттер** қойылды:

1. Аз көміртекті 18ХНЗМА-Ш болатынан жасалған бұрғылау құралының электролитті плазмада беріктендіру технологиясы мен оптималды режимдерін жасап шығару және практикалық кеңестер беру;

2. Аз көміртекті 18ХНЗМА-Ш болатының электролитті плазмалық өңдеу режимдеріне қатысты беткі қабаттарының құрылымын, фазалық құрамын, микроқаттылығы мен төзімділігінің өзгерістерін зерттеу;

3. Электролитті плазмалық өңдеу кезіндегі аз көміртекті 18ХНЗМА-Ш болатының жұқа құрылымының қалыптасу ерекшеліктерін анықтау;

4. 18ХНЗМА-Ш болатының бастапқы және электролитті плазмада өңделген күйіндегі субқұрылымын сипаттайтын сандық заңдылықтарын орнату.

**Зерттеу бұйымы** – электролитті плазмалық өңдеуден кейінгі 18ХНЗМА-Ш болатының түрлендірілген қабаттарының фазалық құрамы, құрылымы, механикалық қасиеттері.

**Зерттеу нысаны** – электролитті плазмалық өңдеуге дейінгі және кейінгі бұрғылау құралдарының бөлшектерін дайындауда қолданатын конструкциялық аз көміртекті 18ХНЗМА-Ш болаты.

**Зерттеу әдістері.** Оптикалық микроскопия, растрлы және электронды трансмиссионды микроскопия, рентгенді құрылымдық талдау, материалдардың қаттылығы мен төзімділігін анықтайтын әдістер.

#### **Ғылыми жаңалығы.**

Зерттеулердің жалпы жоспарына сай қойылған мақсатқа жету диссертацияда алынған мәліметтердің ғылыми жаңалығын толығымен ашады.

18ХНЗМА-Ш болатының беткі қабаттарындағы құрылымды-фазалық түрленулерге электролитті плазмадағы катодты қыздыру әсері бойынша жаңа экспериментті мәліметтер алынды .

Электролитті плазмалық әсер ету кезіндегі 18ХНЗМА-Ш болатының беткі қабаттарының құрылымы мен қасиеттерінің қалыптасу заңдылықтары анықталды.

Бірінші рет электролитті плазмада өңдеуден кейінгі 18ХНЗМА-Ш болатының беткі және аралық қабаттарының жұқа құрылымын зерттеу бойынша жаңа ғылыми нәтижелер алынды.

Қыздыру температурасын бақылауда ұстауға, бетті түрлендіруге, мүмкіндік беретін, диффузиялық қанықтандыру процесінің жоғарғы кинетикалық тиімділігін қамтамасыз ететін 18ХНЗМА-Ш болатының бетін электролитті плазмалық беріктендіру технологиясының оптималды режимдері анықталды.

Электролитті плазмада нитроцементациялау нәтижесінде беткі қабаттың градиентті аустенит-мартенситті құрылымының және аралық қабаттың пакетті мартенсит құрылымының қалыптасуы 18ХНЗМА-Ш болатының жоғарғы қаттылығы мен төзімділігін алуға мүмкіндік беретіндігі көрсетілді.

#### **Қорғауға шығарылған негізгі жағдайлар:**

1. Аз көміртекті болаттың түрлендірілген қабатының қалыңдығы мен беріктік қасиеттерінің жоғарылауын жылдам қыздыру әдісімен қамтамасыз ететін электролитті плазмалық өңдеу технологиясы мен оптималды режимдері;



2. Электролитті плазмалық өңдеудегі 18ХНЗМА-Ш болатындағы құрылым-фазалық түрленулердің негізгі заңдылықтары;

3. 18ХНЗМА-Ш болатының бұрғылау құралының материалы ретінде электролитті плазмалық беріктендіру технологиясы бойынша ғылыми негізделген нұсқаулар.

#### **Жұмыстың ғылыми және практикалық маңыздылығы.**

Эксплуатациялық қасиеттері жоғары аз көміртекті болат бетін түрлендіру үшін электролитті плазмалық өңдеудің оптималды режимдері анықталған.

Электролитті плазмалық өңдеуден кейін материалда болаттың беткі қабаттарының беріктендіруін қамтамасыз ететін карбидтер және карбонитридтер пайда болатындығы анықталды, және олар туралы мәліметтер бұйым жұмысы мен оны қалпына келтірудің еңбек ресурсын жоғарылату үшін маңызды.

Осы жұмыста анықталған, болаттың беттік беріктендіруіне белгілі түрде әсер ететін 18ХНЗМА-Ш болатының жұқа құрылымы мен қасиеттерін, субқұрылым параметрлерін зерттеу нәтижелері басқа материалдардың түрлендірілген қабаттарын зерттеу кезінде қолданылуы және пайдалы болуы мүмкін.

18ХНЗМА-Ш болаты үшін ұсынылған электролитті плазмалық өңдеу технологиясы мен оптималды режимдер екі авторлық куәлікпен қорғалған, және «Востокмашзавод» АҚ-да бұрғылау құралдарын дайындау кезінде тәжірибеде қолдануға ұсынылды..

**Мақалалар.** Диссертация тақырыбы бойынша барлығы 25 жұмыс басып шығарылды, оның 4-уі ҚР БЖҒМ білім беру және ғылым саласындағы бақылау Комитеті бекіткен ғылыми басылымдарда, 1 мақала импакт факторы нөлге тең емес Thomson Reuters базасына енген шет елдік басылымда, 3 мақала Scopus базасына енген шет елдік басылымдарда, 9 мақала және 4 тезис халықаралық конференция материалдарының жинақтарында, 2 мақала республикалық конференция материалдарының жинақтарында, 2 инновациялық патент жарияланған.

**Диссертациялық жұмыстың көлемі мен құрылымы.** Жұмыс кіріспе, бес бөлім, қорытынды және қолданылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Ол 158 беттен, 100 суреттен, 21 кестеден және 182 қолданылған әдебиеттер тізімінен тұрады.

## АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени «доктора философии» (Ph.D)  
по специальности 6D072300-Техническая физика  
**Баятанова Ляйла Болаткановна**

### **Формирование модифицированных слоев на поверхности низкоуглеродистой стали методом воздействия электролитной плазмой**

#### **Актуальность исследования**

Вопросы использования ЭПО, и прежде всего катодного нагрева, как в научном, так и в практическом плане являются весьма актуальными.

Исследования показали эффективность применения электролитно-плазменной обработки для конструкционных сталей. Традиционно обрабатываемые материалы из этого класса сталей обладают повышенной хрупкостью поверхностного слоя и относительно низким комплексом свойств сердцевины. Использование ЭПО позволит значительно повысить свойства модифицированного слоя и сердцевины. Особенности формирования структуры конструкционной низкоуглеродистой стали 18ХНЗМА-Ш позволяют предложить новые режимы, расширяющие технологические возможности упрочняющей термообработки.

До настоящего времени структуру модифицированного слоя стали 18ХНЗМА-Ш изучали методами микроскопии невысокого разрешения, чаще оптической. Значительно более углубленные и продвинутые результаты могут быть достигнуты при применении электронной микроскопии, особенно просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Использование этого метода в исследованиях процесса показывает большую перспективность такого подхода. Это относится и к методической, и к практической, и к фундаментальной стороне вопроса. Поэтому в настоящей работе был развит и использован для задач обработки в электролитной плазме новый подход – использование метода просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Это позволит получить принципиально новые и углубленные результаты, позволяющие выявить фундаментальные особенности структуры модифицированного слоя.

**Цель работы:** разработать технологию и оптимальные режимы поверхностного упрочнения низкоуглеродистой стали 18ХНЗМА-Ш в электролитной плазме, обеспечивающих сочетание высоких характеристик механических свойств и повышенную износостойкость поверхности; исследование фазовых превращений, структуры и свойств стали, подвергнутой воздействию электролитной плазмы.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать технологию и оптимальные режимы поверхностного упрочнения в электролитной плазме материала бурового инструмента из стали 18ХНЗМА-Ш и выдать практические рекомендации;

2. Исследовать структуру, фазовый состав, изменения твердости и износостойкости поверхностных слоев низкоуглеродистой стали 18ХНЗМА-Ш в зависимости от режимов электролитно-плазменной обработки;

3. Изучить особенности формирования тонкой структуры стали 18ХНЗМА-Ш при электролитно-плазменной обработке;

4. Установить количественные закономерности, характеризующие субструктуру исходной и обработанной в электролитной плазме стали 18ХНЗМА-Ш.

**Предмет исследования** – фазовый состав, структура, механические свойства модифицированных слоев стали 18ХНЗМА-Ш после электролитно-плазменной обработки.

**Объект исследования** – конструкционная низкоуглеродистая сталь 18ХНЗМА-Ш до и после воздействия электролитной плазмой, используемая при изготовлении деталей буровых инструментов.

**Методы исследования.** Оптическая микроскопия, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, методы определения твердости и износостойкости материалов.

**Научная новизна.**

Достижение сформулированной цели, в соответствии с общим планом исследований практически полностью отражает научную новизну данных, полученных в диссертации.

Получены новые экспериментальные данные о влиянии воздействия катодного нагрева в электролитной плазме на структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях стали 18ХНЗМА-Ш.

Выявлены закономерности формирования структуры и свойств модифицированного слоя стали 18ХНЗМА-Ш при воздействии электролитной плазмой.

Впервые получены новые результаты по изучению тонкой структуры приповерхностного и переходного слоев стали 18ХНЗМА-Ш после обработки в электролитной плазме.

Определены оптимальные режимы технологии электролитно-плазменного упрочнения поверхности низкоуглеродистой стали 18ХНЗМА-Ш с возможностью контроля температуры нагрева, модифицирования поверхности, обеспечения высокой кинетической эффективности процесса диффузионного насыщения.

Показано, что формирование градиентной аустенитно-мартенситной структуры приповерхностного слоя и структуры пакетного мартенсита переходного слоя в результате нитроцементации в электролитной плазме позволяет получать повышенную твердость и износостойкость стали 18ХНЗМА-Ш.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Технология электролитно-плазменной обработки и оптимальные режимы, обеспечивающие повышение толщины модифицированного слоя и прочностных свойств низкоуглеродистой стали путем скоростного нагрева;

2. Основные закономерности структурно-фазовых превращений в стали 18ХНЗМА-Ш при электролитно-плазменной обработке;

3. Научно-обоснованные рекомендации по технологии электролитно-плазменного упрочнения стали 18ХНЗМА-Ш, как материала бурового инструмента.

#### **Научная и практическая значимость работы.**

Определены оптимальные режимы электролитно-плазменной обработки для модификации поверхности низкоуглеродистой стали с повышенными эксплуатационными свойствами.

Установлено, что после электролитно-плазменной обработки, в материале образуются карбиды и карбонитриды, которые способствуют упрочнению поверхностных слоев стали, и поэтому сведения о них важны для повышения рабочего ресурса работы изделия и его восстановления.

Результаты исследования тонкой структуры и свойств стали 18ХНЗМА-Ш, параметры субструктуры, выявленные в настоящей работе, оказывающие определяющие влияния на поверхностное упрочнение стали, могут быть учтены и применены при исследованиях модифицированных слоев других материалов.

Предложенные технология электролитно-плазменной обработки и оптимальные режимы для стали 18ХНЗМА-Ш защищены авторскими свидетельствами на изобретения, и они рекомендованы для использования на практике при изготовлении буровых инструментов АО «Востокмашзавод».

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликованы 25 печатных работ в соавторстве, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, 1 статья опубликована в зарубежном журнале с ненулевым импакт-фактором, входящем в базу данных Thomson Reuters, 3 статьи в зарубежных изданиях, входящих в базу данных Scopus, 9 статьи и 4 тезиса в сборниках материалов международных конференций, 2 статьи в сборниках материалов республиканских конференций, 2 авторских свидетельства на изобретения.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников. Она изложена на 158 страницах, содержит 100 рисунков, 21 таблицу и список использованных источников из 182 наименований.