

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
(МИНОБРНАУКИ РОССИИ)  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Рыбинский государственный авиационный  
технический университет  
имени П. А. Соловьева»  
(РГАТУ имени П. А. Соловьева)

Пушкина ул., д. 53, Рыбинск,  
Ярославская обл., 152934.

Тел. (4855) 28-04-70. Факс (4855) 21-39-64.

E-mail: [root@rsatu.ru](mailto:root@rsatu.ru)

29.09.2021\_ № 0806/2993\_

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке и цифровой  
трансформации,  
канд. техн. наук, доцент



А.Н. Сутягин

» 2021 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева" на диссертационную работу Дьякова Ильи Геннадьевича «Теория и практика анодного электролитно-плазменного насыщения стальных и титановых сплавов азотом и углеродом», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

**Актуальность темы диссертационной работы.** В последние годы анодное электролитно-плазменное насыщение (АЭПН) поверхности машиностроительных деталей из сплавов на основе железа и титана различными элементами, такими, как азот, углерод, бор и др, сочетающее возможности поверхностного упрочнения, полирования и создания защитных покрытий получает все большее распространение, благодаря ряду преимуществ, главными из которых является: высокая скорость обработки, позволяющая снизить продолжительность операции до нескольких минут, возможность сочетания диффузионного насыщения с закалкой без повторного нагрева, удобство выполнения локальной обработки погружением в электролит рабочей поверхности заготовки или подачей на нее струи электролита, отсутствие необходимости использования специального дорогостоящего оборудования и простота его обслуживания. Однако широкое распространение данной технологии в промышленности ограничивается отрывочным характером

имеющихся экспериментальных и производственных данных, наличием пробелов в теоретических основах описания явления анодного нагрева. Как правило, применяющиеся режимы обработки и составы электролитов подбираются в производственных условиях экспериментально. Поэтому исследование физико-химического механизма диффузионного насыщения металлов в условиях плазменного электролиза и совершенствование технологии поверхностной модификации заготовок из сплавов на основе железа и титана для повышения их коррозионной стойкости и износостойкости несомненно является актуальной задачей.

**Общая характеристика работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 8 глав, выводов по работе, библиографического списка из 249 наименований и приложений. Работа изложена на 403 страницах, содержит 235 рисунков и 30 таблиц.

Автором выполнено глубокое информационно-аналитическое и экспериментальное исследование процессов протекающих в различных сплавах при анодном электролитно-плазменном насыщении, что позволило установить основные закономерности образования упрочненных слоев после диффузионного насыщения сталей азотом и углеродом. Было показано, что распределение диффундирующих элементов в модифицированном слое определяется совокупностью процессов окисления поверхности парами воды и анионами электролита, анодным растворением металла и диффузией азота и/или углерода, а толщина оксидного слоя зависит от температуры обработки и концентрации активных компонентов электролита, что подтверждает участие высокотемпературного окисления в парах воды и электрохимических реакций с анионами электролита, эмитированными в парогазовую оболочку.

Показана возможность управления толщиной цементованного слоя в процессе анодного электролитного нагрева изменением состава электролита и режимов науглероживания. Это дает возможность улучшить характеристики малоуглеродистых сталей, в частности сформировать в ходе закалки мартенситный слой толщиной от 80 до 160 мкм (за 10 мин обработки) и повысить условный предел прочности от  $420 \pm 20$  до  $930 \pm 50$  МПа.

Установлено, что структура поверхностного слоя конструкционных сталей после их электролитно-плазменного насыщения азотом и углеродом содержит оксиды железа в наружном слое, мартенсит с нитридами или карбонитридами железа и твердый раствор насыщающих компонентов в железе. Подтверждена тормозящая роль оксидного слоя и возможность уменьшения его толщины интенсификацией анодного растворения. Показана возможность реализации поверхностной закалки управлением толщиной мартенситного слоя, который образуется только в области проникновения азота, понижающего температуру аустенитизации.

Предложено теоретическое описание процесса теплообмена при АЭПН, отличающееся от известных моделей учетом рассеивания тепла в окружающую среду через выступающую из электролита часть образца. Результаты расчета качественно объясняют характер вольт-амперных и вольт-температурных характеристик (на восходящей ветви), зависимость толщины ПГО от параметров процесса и роль интенсивности обтекания образца электролитом. Выявлены критерии подобия параметров процесса, представляющие собой безразмерную энергию, выделяющуюся в оболочке, и отношение плотностей тепловых потоков из оболочки в электролит и в образец-анод. Все это позволило предложить методику расчета параметров процесса, обеспечивающую достижение требований, предъявляемых к обрабатываемым деталям по комплексу эксплуатационных характеристик.

**Научная новизна.** В результате проведенных исследований автором вполне обосновано, сформулирован и реализован комплексный подход к решению научной проблемы уточнения физико-химического механизма диффузионного насыщения металлов в условиях плазменного электролиза и совершенствованию технологии поверхностной модификации заготовок из сплавов на основе железа и титана.

Показано, что варьирование состава электролита и режимов обработки позволяет управлять толщиной нитридно-мартенситного слоя, который образуется в зоне проникновения азота, снижающего температуру аустенитизации, обосновано влияние концентраций компонентов электролитов, температуры и продолжительности обработки на структурные характеристики слоя, его микротвердость и шероховатость. Доказано, что скорость диффузии углерода снижается образующимися в слое оксидами железа по сравнению с процессами цементации в газовой атмосфере или в твердом карбюризаторе. Предложена оригинальная модель расчета собственных и перекрестных коэффициентов одновременной диффузии азота и углерода, подтверждающая повышение термодинамической активности углерода в аустените под влиянием азота. Предложено теоретическое описание теплообмена при АЭПН, позволяющее объяснить характер вольт-амперных и вольт-температурных характеристик (на восходящей ветви) зависимостью толщины парогазовой оболочки от параметров процесса, включая интенсивность обтекания образца электролитом. Впервые выявлены критерии подобия параметров процесса, представляющие собой безразмерную энергию, выделяющуюся в оболочке, и отношение плотностей тепловых потоков из оболочки в электролит и в образец-анод. Установлено, что повышение износостойкости конструкционных сталей с помощью электролитно-плазменного азотирования, цементации и нитроцементации достигается сочетанием наружного слоя, обладающего хорошей прирабатываемостью за счет оксидов железа и остаточного аустенита, и твердого мартенситного подслоя. Установлено, что коррозионная стойкость образцов из кон-

струкционных сталей после их анодного насыщения азотом и углеродом определяется защитным действием наружного оксидного слоя и содержанием нитридов железа в зоне соединений. Выявлено положительное влияние оксидного слоя, содержащего рутил  $TiO_2$ , на трибологические свойства титановых сплавов ВТ1-0, ВТ2-0 и ВТ6 при их анодной цементации и нитроцементации. Установлены зависимости массового износа и установившегося коэффициента трения от параметров анодного насыщения.

### **Практическая значимость**

Несомненным достоинством работы является тот факт, что основные научные результаты доведены до практического применения, в частности автором разработаны технологические основы для реализации электролитно-плазменных процессов азотирования, цементации и нитроцементации, включая режимы обработки, составы электролитов, для повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости ряда конструкционных и инструментальных сталей, а также титановых сплавов ВТ1-0, ВТ6 и ВТ22 (патент РФ 2 572 663), предложен и опробован в условиях производства технологический процесс повышения коррозионной стойкости и износостойкости конструкционных сталей и титановых сплавов путем анодного электролитно-плазменного насыщения азотом и углеродом с последующей закалкой в том же электролите.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность полученных автором результатов обеспечена корректным использованием базовых теоретических положений металловедения, современных сертифицированных методик и оборудования при проведении экспериментальных исследований, включающих методы электронной и оптической микроскопии, рентгеноструктурный анализ, обратное ядерное рассеяние протонов, электрохимические коррозионные и трибологические исследования и подтверждается положительным результатом при экспериментальной проверке и практическом использовании разработок в условиях производства.

**Подтверждение опубликования основных результатов исследования.** Основные результаты диссертационного исследования достаточно полно представлены в публикациях в научных рецензируемых журналах, сборниках научных трудов и материалах конференций, в частности, выносимые на защиту результаты прошли апробацию на 41 научно-технической конференции, опубликованы в 120 печатных работах, в том числе в 23 статьях рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в WoS и Scopus, получен один патент на изобретение.

Личный вклад автора состоит в выполнении патентно-аналитических исследований, в научной постановке цели и задач исследования, анализе литературных данных и результатов исследований, проведении экспериментов по подго-

товке образцов из углеродистых конструкционных и титановых сплавов, выполнении статистической обработки экспериментальных результатов, построении математических моделей, оптимизации режимов обработки, анализе полученных результатов, внедрении полученных результатов в производство.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание работы. Оформление диссертационной работы отвечает установленным требованиям. Диссертация написана грамотным, доступным техническим языком, что подтверждает высокую эрудицию и квалификацию автора

#### **Замечания по диссертационной работе:**

- в работе автором не обоснован выбор перечня сталей и титановых сплавов на которых были проведены все исследования, кроме того рассмотрение обработки аустенитных и инструментальных сталей ограничено только одной маркой стали каждого вида;

- в ряде случаев, например, при описании влияния варьирования состава электролита при анодной обработке титанового сплава ВТ1-0 нет обоснования выбранной температуры насыщения;

- из текста автореферата и диссертации осталось не ясным, для каких сталей и титановых сплавов можно рекомендовать исследованные режимы обработки заготовок и в каких случаях;

- при разработке тепловой математической модели процесса целесообразно было бы более строго сформулировать условия однозначности, накладывающие ограничения и определяющие их универсальность;

- было бы целесообразно в заключительной части работы сформулировать универсальный алгоритм по выбору метода и параметров обработки для деталей из разных сплавов с целью достижения предъявляемых к ним требований.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации.**

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при обработке и использовании малогабаритных изделий из сталей и титановых сплавов и могут быть рекомендованы для внедрения на предприятиях АО НПО «Стрела» г. Оренбург, НПО «Энергомаш» им. Академика В.П. Глушко.

#### **Заключение**

В целом представленная диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, является самостоятельной законченной научно квалификационной работой в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения по режимам анодного электролитно-плазменного насыщения легкими элементами сталей и титановых сплавов, разработаны

По научному уровню и полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Дьяков Илья Геннадьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры материаловедения, литья и сварки, протокол № 2 от «28» сентября 2021 года. На заседании присутствовало 9 членов из 9. Результаты голосования: «за» – 9, «против» – нет, воздержавшихся – нет.

Заместитель заведующего кафедрой Материаловедения, литья и сварки. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»  
док. техн. наук, профессор



В.А. Изотов

Адрес организации: 152934, Ярославская область, Рыбинский р-н, г. Рыбинск, ул. Пушкина, дом № 53.

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева"

Электронный адрес: [rector@rsatu.ru](mailto:rector@rsatu.ru)

Телефон: +7 (4855) 280-470