

На правах рукописи



ЕГОРОВ Иван Святославович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ СТАЛИ  
С ТИТАНОМ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКОЙ  
ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
СТОЙКОСТИ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН**

Специальность 2.4.4. Электротехнология и электрофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Фомин Александр Александрович**

Официальные оппоненты: **Лепешкин Александр Роальдович**,  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

**Перевалов Юрий Юрьевич**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехнологическая и преобразовательная техника» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится «27» ноября 2024 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.391.02 при СГТУ имени Гагарина Ю.А. по адресу: г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корпус 1, ауд. 319.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, СГТУ имени Гагарина Ю.А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. и на сайте [www.sstu.ru](http://www.sstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_\_» сентября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Бекренев Николай Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время растет спрос на использование ресурсосберегающих и энергоэффективных технологий металлообработки. Одними из критериев эффективности при обработке металлоизделий являются увеличение ресурса работы инструментов и уменьшение доли использования дорогостоящих материалов в этих инструментах путем замены на более дешевые с сохранением функциональных характеристик и надежности.

Титановые сплавы широко востребованы ввиду своих качеств. Известно, что при термообработке титана в кислородсодержащей атмосфере на его поверхности формируется особо твердый оксидный подслой. Твердость такого тонкого слоя превышает 40 ГПа, что позволяет утверждать о получении сверхтвердого материала. Применение титана и титановых сплавов в виде тонких покрытий на стальных конструкциях оптимально с точки зрения экономии дорогостоящего материала. В свою очередь инструментальные стали, в том числе быстрорежущие, остаются востребованными для обработки материалов с невысокой или умеренной величиной твердости.

Сплавы на основе железа и титана являются разнородными материалами, между которыми сложно получить качественное неразъёмное соединение. Методом контактной сварки возможно нанесение титана на поверхность сталей, в том числе с применением промежуточных слоев, снижающих вероятность формирования хрупких интерметаллидных фаз. Прочность полученных сварных соединений достигает прочности технического титана (около 400 МПа), а их структура практически бездефектная. Для придания износостойкости поверхности титана, нанесенного на инструментальную сталь, возможно использование непродолжительной высокотемпературной обработки, например, с помощью нагрева токами высокой частоты.

Таким образом, актуальность работы обусловлена потребностью в решении задачи, связанной с разработкой процесса нанесения титанового покрытия методом точечной контактной сварки и последующей термообработки полученной сборки токами высокой частоты. В результате данной модифицирующей термообработки сталь-титановой сборки будут получены стальные режущие пластины с рабочей поверхностью, которая представляет собой износостойкую титан-оксидную структуру, что в результате расширит масштабы применения индукционной электротехнологии в интересах инструментального производства.

**Степень разработанности темы исследования.** Процесс контактной сварки характеризуется высокотемпературным локальным нагревом с последующим оплавлением соединяемых металлов в зоне нагрева на границе соприкосновения и в большинстве производств может быть автоматизирован. Большой вклад в разработку метода сварки за счёт электронагрева сопротивлением внесли отечественные ученые М.В. Поплавко-Михайлов, Н.Н. Бенардос, С.В. Попов. Последующий процесс индукционной термообработки металлоизделий, в рассматриваемом случае сварных заготовок, заключается в бесконтактном нагреве электропроводящих материалов, находящихся в переменном магнитном поле токов высокой частоты. Метод индукционного и высокочастотного нагрева для различных технологических целей получил широкое применение благодаря отечественным школам под руководством В.В. Вологдина, М.Г. Лозинского, А.Е.

Слухоцкого, С.Е. Рыскина, Г.И. Бабата, А.В. Донского, А.Б. Кувалдина, А.Р. Лепешкина, В.Б. Демидовича, А.И. Алиферова и других ученых. Процессы индукционно-термического упрочнения и получения твердых покрытий на рабочих поверхностях титановых малогабаритных изделий разработал А.А. Фомин.

По настоящее время изучены многие аспекты контактной сварки для образования сварного соединения между конструкционными сталью и титаном, разработаны основы индукционно-термической обработки для получения твердых и износостойких диффузионных слоев и покрытий на титане. Однако отсутствуют исследования последовательного применения указанных процессов для получения режущего инструмента со слоистой сталь-титан-оксидной структурой. Исследования в данной области направлены на обеспечение прогнозируемой адгезионной прочности титанового покрытия к стальной основе, твердости и толщины диффузионного слоя на рабочей поверхности после модификации токами высокой частоты, что имеет особое значение для слоистых конструкций, применяемых в производстве металлообрабатывающих инструментов.

**Цель работы:** повышение прочности сварного соединения и износостойкости титан-оксидного слоя неперетачиваемых пластин режущего инструмента путем обоснования высокоэффективного метода последовательного применения электротехнологических процессов контактной сварки стальной основы с титановой пластиной и модифицирующей ее термообработкой токами высокой частоты.

Поставленная цель достигается при решении следующих задач:

Определить условия для получения слоистой сталь-титан-оксидной структуры с прогнозируемыми характеристиками твердой и износостойкой рабочей поверхности сменных пластин для металлообработки резанием.

Разработать математическую двумерную модель, описывающую кинетику нагрева токами высокой частоты сталь-титановой сборки, основанную на применении метода конечных элементов.

Установить влияние параметров точечной контактной сварки, а именно величины тока, типа и длительности импульса, на микротвердость и адгезионную прочность соединения стали с титаном.

Установить регрессионные зависимости твердости от параметров тока индуктора и длительности выдержки при термообработке и влияние термообработки на микротвердость, износостойкость и толщину диффузионного титан-оксидного слоя.

Определить режущую способность сменных многогранных пластин при токарной обработке конструкционной стали, а также время наработки до критического износа.

Разработать технологические рекомендации нанесения титан-оксидного покрытия методом точечной контактной сварки с последующей индукционной термообработкой сталь-титановой сборки для получения сменных многогранных пластин с высокими твердостью и износостойкостью.

**Объектом исследования** являются электротермические процессы создания слоистой сталь-титан-оксидной структуры, используемой для изготовления сменных многогранных пластин.

**Предметом исследования** являются электротехнологические режимы точечной контактной сварки и последующей индукционной термообработки, а также регрессионные зависимости, описывающие получение сменных многограных пластин с прогнозируемыми характеристиками слоистой сталь-титан-оксидной структуры с повышенными твердостью и износостойкостью.

**Методы исследования.** В работе использованы основные законы джоулева электронагрева и электромагнитной индукции. Моделирование индукционного нагрева слоистой системы осуществлялось методом конечных элементов при решении задач электродинамики и теплопроводности. Проведение экспериментальных исследований и выявление технологических закономерностей осуществлялись с применением теории планирования, статистического и регрессионного анализа. При изучении структуры и механических свойств использован ряд стандартных методов исследования: амперометрия, оптическая и растровая электронная микроскопия, одноосное растяжение и микроиндицирование (метод Виккерса), а также определение износостойкости при истирании алмазным коническим индентором Роквелла и режущей способности при металлообработке.

**Научная новизна** работы заключается в обосновании применения точечной контактной сварки для нанесения титанового слоя на стальную основу режущей пластины для металлообработки и последующей высокотемпературной обработки токами высокой частоты для создания сталь-титан-оксидной структуры с диффузионным слоем, обеспечивающие высокие износостойкость и твердость рабочей поверхности инструмента. Наиболее существенными являются следующие пункты:

1. Разработана математическая модель, позволяющая определить распределение температуры при обработке токами высокой частоты в сталь-титановой сборке при различных величине тока индуктора и геометрии элементов системы.
2. Установлено влияние режимов точечной контактной сварки, в частности величины сварочного тока, длительности и типа импульса, на величину прочности сварного соединения инструментальной быстрорежущей стали с техническим титаном.
3. Установлены регрессионные зависимости твердости сталь-титановой структуры с оксидным покрытием от параметров термообработки токами высокой частоты, позволяющие определить ток индуктора и продолжительность высокотемпературной выдержки, влияющие на микротвердость, износостойкость и толщину диффузионного титан-оксидного слоя.
4. Предложены технологические рекомендации точечной контактной сварки с последующей термообработкой токами высокой частоты, позволяющие получать сталь-титан-оксидную структуру с высокими твёрдостью и износостойкостью рабочей поверхности неперетачиваемых пластин режущего инструмента, согласно которым был разработан способ формирования на инструментальной быстрорежущей стали покрытия системы «титан-оксиды титана» (Патент РФ № 2789262).

**Теоретическая значимость.** Результаты, представленные в диссертационной работе, вносят вклад в развитие существующих электротехнологических способов формирования сварного соединения стали с титаном и образования

металлооксидных диффузионных слоев методом термической обработки токами высокой частоты. Проведенный анализ экспериментальных данных позволяет расширить представления о закономерностях формирования высококачественного соединения быстрорежущей инструментальной стали с техническим титаном и получения высокотвердого диффузионного слоя при последующей термообработке токами высокой частоты.

**Практическая значимость работы.** Определены параметры точечной контактной сварки инструментальной быстрорежущей стали с техническим титаном и последующей термической обработкой сталь-титановой сборки, обеспечивающие формирование прочного соединения (около 98–111 МПа), твердой 12–14 ГПа и износостойкой структуры «сталь-титан-оксид титана». Сменные режущие пластины изготавливаются за счет воздействия точечной контактной сварки при сварочном токе 1,2 кА с длительностью импульса 0,1 с, термообработке ТВЧ с удельной потребляемой мощностью  $j = 145 \text{ Вт/г} (\pm 1\%)$  при токе индуктора 2,1 кА и выдержке 180 с. Применение полученных режущих пластин с износостойким покрытием системы «сталь-титан-оксид титана» в качестве металлообрабатывающего инструмента при токарной обработке среднеуглеродистой конструкционной стали при режимах резания, а именно глубине резания  $h = 0,5 \text{ мм}$ , скорости резания  $v = 34,5 \text{ м/мин}$  и подаче 0,3 мм/об, не уступает в работоспособности сменным многогранным твердосплавным пластинам с покрытием TiN и TiAlN. Предложен способ формирования на инструментальной быстрорежущей стали покрытия системы «титан-оксиды титана» (Патент РФ № 2789262), позволяющий получить сменные режущие пластины слоистой структуры «сталь-титан-оксиды титана» с высокотвердой и износостойкой рабочей поверхностью.

**Личный вклад автора** состоит в проработке гипотезы и варианта развития направления точечной контактной сварки инструментальной быстрорежущей стали с техническим титаном, а также последующей термической модификации токами высокой частоты титанового слоя на стальной основе пластины, разработке общей методики исследования, анализе результатов экспериментальных исследований, выработке положений и результатов, выносимых на защиту, разработке математических моделей термообработки токами высокой частоты для слоистой системы, построении регрессионных зависимостей механических свойств от электротехнологических параметров используемых процессов. В совместных работах автору принадлежит ведущая роль при проведении экспериментальных и теоретических исследований, научном обосновании полученных результатов. В представленном патенте вклад состоит в разработке способа формирования на инструментальной быстрорежущей стали слоистой системы «титан-оксиды титана». У автора нет конфликта интересов с соавторами на предмет авторского права.

**Достоверность результатов** экспериментальных исследований обеспечивается корректным применением современного электротехнологического оборудования и аналитической аппаратуры, использованием стандартных методов испытаний, отсутствием противоречий полученных результатов исследований с данными других исследователей, соответствием теоретических зависимостей экспериментальным данным.

**Положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Предложенная математическая модель термообработки токами высокой частоты сталь-титановой сборки, основанная на применении метода конечных элементов для решения краевой задачи электродинамики и теплопередачи, позволяет установить распределение температуры в диапазоне от 900 до 1400 °C при выдержке не менее 60 с и токе индуктора в диапазоне от 1,7 до 2,3 кА.

2. Применение точечной контактной сварки инструментальной быстрорежущей стали с техническим титаном при рабочем токе 1,2–2,4 кА и длительности импульса 0,1–1,2 с обеспечивает получение соединения с прочностью от 39 до 111 МПа для последующего формообразования и модификации.

3. Использование высокотемпературного нагрева токами высокой частоты в воздушной атмосфере сталь-титановой сборки при токе индуктора 2,7–2,9 кА, температуре 1000–1250 °C и выдержке 180 с обеспечивает закалку стальной пластины и образование диффузационного слоя в титановом покрытии с повышенной твердостью 77–89 HRA и микротвердостью 9–14 ГПа.

4. Способ последовательного применения точечной контактной сварки на рабочем токе 1,2 кА с длительностью импульса 0,1 с и последующей термообработки токами высокой частоты при токе индуктора 2,7 кА, удельной потребляемой электрической мощности 145 Вт/г с выдержкой 180 с для формирования износостойкого титан-оксидного покрытия, состоящего из оксидов титана  $TiO_2$ ,  $TiO$ ,  $Ti_6O$  и твердых соединений  $TiC$ ,  $Fe_2Ti$ ,  $Fe_3Ti_3O$ .

**Апробация работы.** Полученные результаты исследования диссертационной работы представлены на научно-технических конференциях: 5, 6, 7 и 8-я Международная школа-конференция по оптоэлектронике, фотонике, инженерии иnanoструктур «Saint Petersburg OPEN» (Россия, г. Санкт-Петербург, 2018, 2019, 2020 и 2021), Международный симпозиум по оптике и биофотонике «Saratov Fall Meeting» (Россия, г. Саратов, 2018, 2019, 2020 и 2021), «Неделя науки СПбПУ 2019» (Россия, г. Санкт-Петербург), 4<sup>th</sup> International Conference on Mechanics of Composites (Испания, г. Мадрид, 2018), 60<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical (Латвия, г. Рига, 2019), Региональная конференция «Вклад молодых ученых в инновационное развитие России» (Россия, г. Пенза, 2019).

**Соответствие темы диссертации требованиям паспорта специальностей научных работников.** Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика в части: изучения механизмов взаимодействия физических тел с переменным магнитным полем в воздушной среде (пункт 2), разработки компьютерных моделей и регрессионных зависимостей для определения рациональных режимов электротехнологической обработки (пункт 4), совершенствования существующих методов в технологических приложениях и разработки новых электротехнологических процессов для обработки металлов, в том числе в области инструментального производства (пункт 5).

**Публикации.** По тематике диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ, из них 2 статьи в научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, 9 статей в международных журналах, включенных в базу Scopus/Web of Science, среди которых 1 статья в высокорейтинговом издании, а также получен 1 патент РФ.

В диссертационной работе отражены результаты, полученные при выполнении научных исследований в рамках программы «У.М.Н.И.К.-2020» (договор № 15686ГУ/2020), Стипендии Президента Российской Федерации № СП-571.2019.1 и по Гранту Президента Российской Федерации в качестве исполнителя в проекте № МД-157.2019.8.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 153 страницах текста, содержит 64 рисунка, 21 таблицу, 34 формулы и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 149 наименований и 3 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научные положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены особенности применяемых материалов для изготовления сменных многогранных пластин и их характеристики, методы получения слоистых структур из разнородных металлов и особенности процесса контактной сварки. Определено, что для нанесения титанового покрытия на стальную основу возможно применение контактной сварки. Выявлено, что процесс термического оксидирования технического титана при температуре более 1000 °C под воздействием токов высокой частоты (ТВЧ) в кислородсодержащей среде в течение 120–300 с позволяет образовать структуру поверхности титана, твердость которой достигает 10–12 ГПа.

**Вторая глава** посвящена решению краевой задачи электродинамики и теплопроводности при нагреве ТВЧ и последующей выдержке сменной режущей пластины (СРП) слоистой сборки «сталь – титан». Конечным результатом решения данной задачи является распределение температуры при обработке токами высокой частоты в СРП при различных величине тока индуктора и геометрии элементов системы. Основной целью моделирования является выявление диапазона электротехнологических параметров, в частности тока индуктора  $I_{инд}$ , которые позволяют обеспечить выдержку СРП в температурном интервале от 900 до 1250 °C.

Определены временные промежутки, в течение которых достигается стационарная температура в нагреваемом изделии. Определены зависимости плотности тока в диапазоне  $0,384\text{--}0,530 \times 10^8 \text{ А/м}^2$  и тепловыделения в диапазоне  $1,332\text{--}2,628 \times 10^9 \text{ Вт/м}^3$  в стальной основе изделия от тока индуктора в диапазоне 1,7–2,3 кА при разных толщинах основы и покрытия.

Обрабатываемая заготовка представляет собой квадратную пластину размером сторон 9,5 мм, толщиной 4,3 мм с центральным отверстием 4,6 мм (рисунок 1 $a$ ,  $\delta$ ). Верхняя часть 1 СРП выполнена из титана ВТ1-0 толщиной 0,5 мм, а основа 2 пластины выполнена из инструментальной стали Р6М5 с толщиной 4,1 и 3,8 мм соответственно выбранной толщине покрытия. Между металлами образовано неразъёмное соединение методом точечной контактной сварки (ТКС). Для нагрева заготовки в данной системе применяется медный трубчатый индуктор 3 с внешним диаметром трубки 6 мм и внутренним 4,5 мм.

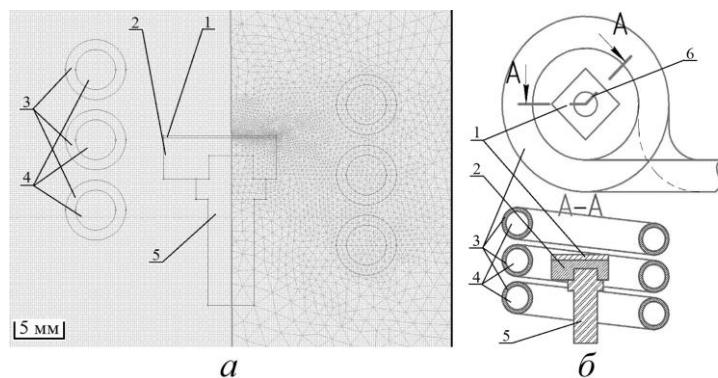


Рисунок 1 – Геометрическая модель (а), в правой части которой показана сетка конечных элементов: 1 – титановое покрытие, 2 – стальная основа, 3 – индуктор, 4 – охлаждающая жидкость, 5 – керамическая опора; схема расположения детали в индукторе (б) и сечение СРП по ломаному разрезу 6

Как известно, для необходимой эффективности применения модифицирующей термообработки (МТО) конфигурация индуктора должна повторять форму обрабатываемого изделия. Однако размеры СРП слишком малы, ввиду чего изготовление индуктора в соответствии с её формой технологически сложно. Поэтому принято решение для обработки СРП квадратной формы применить цилиндрическую конфигурацию индуктора со следующими габаритными размерами: наружный диаметр  $D_{\text{н}} = 33$  мм, внутренний  $D_{\text{в}} = 21$  мм, высота  $h_{\text{инд}} = 22,5$  мм, по которому циркулирует дистиллированная вода 4 для отвода тепла. В установленные размеры вписывались три витка с межвитковым расстоянием в 0,75 мм. В центральной части индуктора размещалось керамическое основание 5, на котором крепилась сталь-титановая пластина. На 2D модели пластина выполнена в виде асимметричного прямоугольника, соответствующего ломаному разрезу 6 (рисунок 1б). Данная конфигурация выполнена с целью определения влияния МТО на разноудаленные от индуктора части изделия.

Определены пиковые значения температуры различных участков СРП при нагреве. Так, при токе индуктора 2,1 кА СРП с толщиной основы 3,8 мм и покрытия 0,5 мм разница температур составляет 40 °C при достижении нагрева боковой грани до 1240 °C, температура центральной части боковой поверхности достигала 1200 °C в течение всей выдержки (рисунок 2а–в).

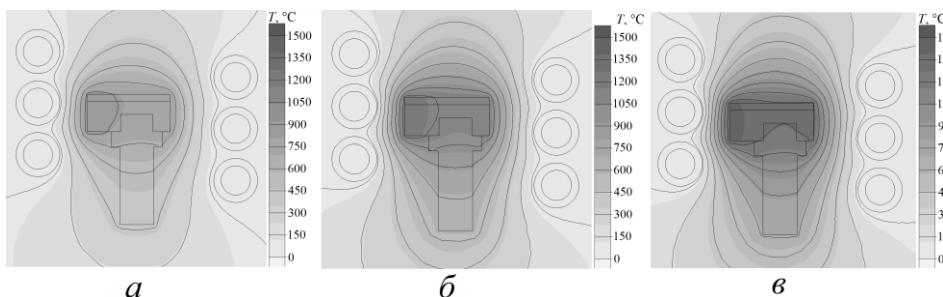


Рисунок 2 – Изображения полей распределения температуры  $T$  для стальной основы с титановым покрытием  $h = 0,5$  мм:  $I_{\text{инд}} = 1,7$  кА (а),  $I_{\text{инд}} = 2,1$  кА (б),  $I_{\text{инд}} = 2,3$  кА (в)

В результате численного моделирования определено, что при токе индуктора 1,9–2,2 кА достигаемая поверхностная температура СРП позволяет провести

процесс МТО при 1000–1250 °С в течение 100 с, а взаимное изменение размеров покрытия и стальной основы на 0,3 мм не оказывает значительного влияния.

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям и разработке конструкции образцов СРП с основой из стали марки Р6М5 и покрытия из титана марки ВТ1-0. Первоначально изучалось влияние ТКС на элементный состав, качество и физико-механические характеристики соединения стали с титаном. Согласно возможным параметрам оборудования были установлены технологические режимы ТКС. Постоянными являлись напряжение сварочного тока  $U_{\text{св}} \approx 2,5$  В и сила сжатия  $F_{\text{сж}} = 600 \pm 30$  Н. Плотность сварочного тока  $j_{\text{св}}$  изменялась в диапазоне от 60 до 310 А/мм<sup>2</sup>, а также изменялись длительность сварочного импульса  $\tau_{\text{св}}$  от 0,1 до 1,2 с и вид импульса (модулированный и постоянный).

После определения оптимальных технологических параметров ТКС было изучено влияние МТО на элементный и фазовый состав, твердость, износостойкость полученной сталь-титан-оксидной структуры. Процесс МТО проводился за счет нагрева ТВЧ в частотном диапазоне  $f_{\text{иннд}} = 80$  кГц. По истечении выдержки образец до полного охлаждения находился в камере. После обработки режимы МТО были систематизированы и отображены в табличном виде (таблица 1).

Таблица 1 – Электротехнологические режимы МТО

Удельная электрическая мощность $j_p$ , Вт/г ( $\pm 1\%$ )	Ток индуктора $I_{\text{иннд}}$ , кА	Температура нагрева $T$ , °С ( $\pm 30$ )	Длительность выдержки $t$ , с
117	2,80	1000	60
125	2,90	1100	60
140	2,75	1200	60
146	2,70	1250	60
117	2,80	1000	120
125	2,90	1100	120
140	2,75	1200	120
146	2,70	1250	120
117	2,80	1000	180
125	2,90	1100	180
140	2,75	1200	180
146	2,70	1250	180

В результате исследования элементного состава по поперечному сечению определено, что в процессе МТО кислород проникает на глубину до 300 мкм, однако повышенное содержание наблюдалось только в приповерхностном слое. Так, при температуре 1200 °С толщина насыщенного титан-оксидного слоя составила около 50 мкм, что подтверждается зафиксированными значениями твердости на поверхности и данной глубине выше 12 ГПа. А применение нагрева ТВЧ до температуры 1250 °С ( $\pm 30$ ) позволило увеличить диффузионный насыщенный кислородом слой до 150 мкм и твердость до 14–15 ГПа.

Согласно результатам элементного состава, в переходной зоне возможно наличие хрупких интерметаллических соединений и оксидных включений. По полученным графикам растяжения сталь-титанового соединения наблюдаются различия в поведении образцов под нагрузкой (рисунок 3).

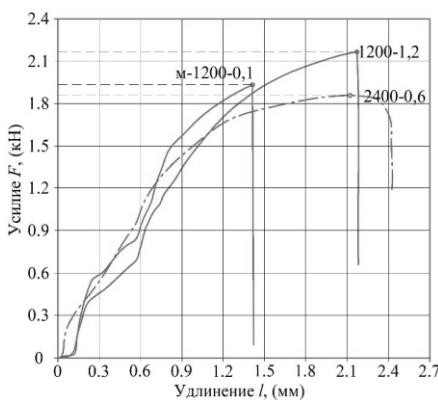


Рисунок 3 – Графики статического растяжения сварных сталь-титановых соединений

Соединение, полученное постоянным импульсом при токе 1200 А и импульсе 1,2 с (1200-1,2), показало наибольшую прочность на разрыв 2,17 кН, однако относительное удлинение имеет одно из наибольших значений, что свидетельствует о высокой пластичности и подтверждается низкой твердостью стальной основы 4–5 ГПа. При модулированном импульсе тока, равном 1200 А, и длительности импульса 0,1 с (м-1200-0,1) соединение характеризуется меньшей пластичностью при нагрузке 1,93 кН и согласно распределению микротвердости по сечению стальная основа приобрела большую твердость 8–9 ГПа. Также микроструктура данных соединений на границе двух металлов не имела существенных дефектов. Описанные два режима ТКС были выбраны при подготовке двух серий образцов для проведения МТО за счет воздействия ТВЧ.

Для измерения твердости поверхности модифицированного титана применялся метод измерения твердости вдавливанием алмазного конуса под нагрузкой 588,4 Н (шкала HRA). Данный метод позволил оценить твердость оксидного покрытия с диффузионным слоем без воздействия на стальную основу самого изделия. Результаты измерения были систематизированы и отражены в виде регрессионных моделей (рисунок 4). По их анализу видно, что применение ТКС на режиме «м-1200-0,1» обеспечивает более стабильную систему «сталь-титан», при которой идет рост твердости в зависимости от повышения технологических режимов МТО ТВЧ, а термообработка при температуре 1000–1100 °С не обеспечивает высокой твёрдости поверхности покрытия.

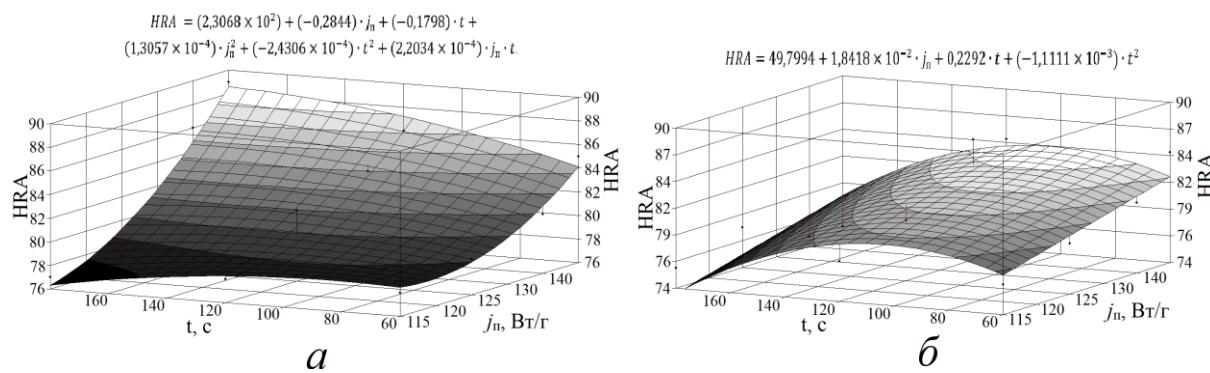


Рисунок 4 – Зависимость твердости HRA поверхности титан-оксидной структуры от удельной электрической мощности  $j_p$  и длительности  $t$  выдержки: *а* – ТКС проведена на режиме «м-1200-0,1»; *б* – ТКС проведена на режиме «1200-1,2»

По результатам испытания при токарной обработке стали 45 СРП, полученные на режиме ТКС «м-1200-0,1» и МТО при  $T = 1250^{\circ}\text{C}$  в течение 120 и 180 с, показали наилучший результат среди всех образцов. Повышенное время выдержки при МТО позволило получить СРП с износостойкостью, сравнимой с СРП из твердого сплава с титан-нитридным покрытием.

Из полученных результатов РФА было определено, что слоистая система покрытия из титана на стальной основе состоит из рутила  $\text{TiO}_2$  на 42,2% на поверхности, низших оксидов  $\text{Ti}_3\text{O}$ ,  $\text{Ti}_6\text{O}$  более 50% в центре титанового слоя, а на границе сплавления стали с титаном из рутила  $\text{TiO}_2$  (27,9%), низшего оксида  $\text{Ti}_6\text{O}$  (17%) и интерметаллида  $\text{Fe}_{0,8}\text{Ti}_{0,2}$  (13,4%). Именно такой состав и обеспечивает полученной структуре сочетание высоких твердости, прочности и износостойкости в процессе металлообработки.

**В четвертой главе** обоснована и разработана конструкция сменной многогранной пластины (СМП) со структурой «сталь-основа – титан-покрытие – оксид титана-износостойкий слой» с сегментным типом отделки вершин за счет нанесения титановых элементов методами ТКС и последующей термической модификации ТВЧ. Конфигурация данной пластины предназначена для черновой обработки резанием и соответствует типу «SAGA090401-NR1T» по ISO 1832 (рисунок 5).

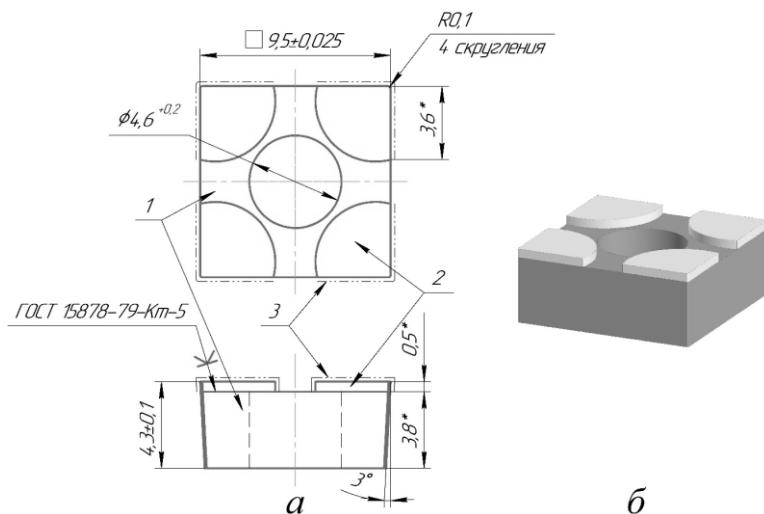


Рисунок 5 – Конфигурация СМП типа «SAGA090401-NR1T», чертеж СРП и расположение покрытия (а), 3D модель (б): 1 – сталь Р6М5; 2 – титан ВТ1-0; 3 – титан-оксидная поверхность

Определены способ и схема нанесения титанового покрытия, заключающиеся в нанесении титановых дисков на вершины СМП за несколько последовательных импульсов при усилии сжатия  $F_{сж} = 600 \text{ Н}$ , плотности тока  $j_{cb} = 60 \pm 1 \text{ А/мм}^2$  и длительности импульса  $\tau_{cb} = 0,1 \text{ с}$ .

Определены параметры обработки ТВЧ сталь-титановой сборки при удельной потребляемой мощности  $j_p = 145 \pm 1 \text{ Вт/г}$ , частоте тока  $f = 80 \text{ кГц}$ , температуре  $1250 \pm 2 \% ^{\circ}\text{C}$  и выдержке 180 с. При этом на поверхности титана образуются оксидные фазы с субмикроразмерными частицами.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Обоснован электротехнологический метод повышения стойкости режущего инструмента путем формирования ТКС соединения титановой пластины со стальной основой и её последующей термообработки ТВЧ, защищенный патентом РФ № 2789262.

1. На основе анализа научно-технической литературы сформулирована гипотеза о возможности нанесения покрытия титана на стальную основу комбинированным методом ТКС и последующей термообработки ТВЧ поверхности титанового покрытия в воздушной атмосфере. Процесс термического оксидирования технического титана при температуре более 1000 °C под воздействием ТВЧ в кислородсодержащей среде в течение 120–300 с позволяет образовать многослойную структуру из металлооксидных соединений с твердостью 10–12 ГПа. Первый слой в большей части состоит из рутила  $TiO_2$  и находится на поверхности, под ним находится второй (переходной) слой, представленный нестехиометрическими и низшими оксидами, а завершает модифицированную область диффузионный слой с твердым раствором кислорода в титане.

2. Решением краевой задачи электродинамики и нестационарной теплопередачи методом конечных элементов определено, что при токе индуктора 1,7–2,3 кА достигаемая поверхностная температура СРП позволяет провести процесс высокотемпературной модификации поверхности покрытия при 900–1400 °C в течение 60–180 с, а взаимное изменение размеров покрытия и стальной основы на 0,3 мм не оказывает значительного влияния.

3. Определены зависимости плотности тока и тепловыделения в стальной основе изделия от тока индуктора. При нагреве СРП с толщиной основы 3,8 мм и покрытия 0,5 мм до температуры 1200–1240 °C и токе 2,1 кА значение составило не более  $0,480 \times 10^8$  А/м<sup>2</sup> и  $2,034 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>. При нагреве СРП толщиной 4,1 мм и покрытия 0,2 мм до температуры 1250–1285 °C и токе 2,1 кА плотность тока достигла  $0,475 \times 10^8$  А/м<sup>2</sup> и  $2,124 \times 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>.

4. Определены пиковые значения температуры в системе «индуктор нагреваемое тело» конфигурации «сталь-титан». Так, при токе индуктора 2,1 кА СМП с толщиной основы 3,8 мм и покрытия 0,5 мм пиковое значение температуры зафиксировано в боковой грани 1240 °C, что являлось максимумом в этой задаче. С изменением толщины основы до 4,1 мм и покрытия до 0,2 мм пиковое значение температуры в боковой грани возросло до 1285 °C.

5. Разработана методика исследования сталь-титановой сборки слоистой структуры «сталь-титан-оксид титана», сформированной методом последовательных операций нанесения покрытия из технического титана методом ТКС на основу из инструментальной стали Р6М5 и модификации термообработкой ТВЧ нанесенного покрытия до титан-оксидного состояния в открытой воздушной атмосфере. В процессе исследования сформированного слоистого покрытия были использованы следующие методы: оптическая микроскопия, измерение характеристик прочности и пластичности при статическом растяжении, энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный и рентгенофазовый анализ, макро- и микроиндицирование, а также эксплуатационные испытания на режущую способность.

6. Определены и обоснованы технологические режимы основных операций нанесения покрытия толщиной 1 мм из технического титана методом

ТКС с удельной плотностью сварочного тока  $j_{cb} = 60\text{--}310 \text{ А/мм}^2 (\pm 2\%)$ , длительностью импульса  $\tau_{cb} = 0,1\text{--}1,2 \text{ с}$  на основу из инструментальной стали Р6М5 и модификации нанесенного покрытия термообработкой ТВЧ при температуре  $T = 1000\text{--}1250 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 30)$  с выдержкой 60–180 с и последующим спокойным охлаждением.

7. Применение ТКС листа толщиной 1 мм из технического титана и стальной пластины марки Р6М5 толщиной 3,8 мм при межэлектродном усилии сжатия 600 Н ( $\pm 30$ ), сварочном токе  $I_{cb} = 1200$  и 2400 А при плотности тока  $j_{cb} = 60$  и  $120 \text{ А/мм}^2 (\pm 2\%)$ , длительности импульса  $\tau_{cb} = 0,1$  и 1,2 с при модулированном и постоянном типе импульса обеспечивает образование неразъемного соединения с прочностью на разрыв от 39 до 111 МПа. Дальнейшая термообработка ТВЧ сталь-титановой сборки на частоте тока  $f = 80 \text{ кГц}$ , потребляемой электрической мощности 420–450 Вт (удельной потребляемой мощности  $j_p = 145 \text{ Вт/г} (\pm 1\%)$ ) и температуре  $T = 1200\text{--}1250 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 30)$  с выдержкой 180 с обеспечивает образование титан-оксидного покрытия и диффузационного слоя толщиной порядка 100–150 мкм с твердостью 12–14 ГПа, что сравнимо с твердостью твердых сплавов. Процесс термообработки ТВЧ также обеспечивает упрочнение титанового покрытия на глубину 500 мкм до твердости в 10–11 ГПа, а быстрое охлаждение на воздухе приводит к закалке стальной основы не менее 8–9 ГПа.

8. Применение ТКС стали с титаном и последующей термообработки ТВЧ в воздушной атмосфере позволяет сформировать многокомпонентную систему, в которой образованы различные оксидные, карбидные и интерметаллидные соединения:  $\text{Ti}_6\text{O}$ ,  $\text{TiO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Ti}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Ti}_3\text{O}$ .

9. Разработаны конструкция СМП и технологические рекомендации для ее изготовления методом ТКС при сжатии  $F_{cж} = 600 \text{ Н}$ , сварочном токе  $I_{cb} = 1200 \text{ А}$  с плотностью тока  $j_{cb} = 60 \text{ А/мм}^2 (\pm 2\%)$  и длительностью импульса  $\tau_{cb} = 0,1 \text{ с}$ , и последующей термообработки ТВЧ при удельной потребляемой мощности  $j = 145 \text{ Вт/г} (\pm 1\%)$ , частоте  $f = 80 \text{ кГц}$ , температуре  $1250 \text{ }^\circ\text{C} (\pm 30)$  с выдержкой 180 с в кислородсодержащей среде, обеспечивающие прочность покрытия к инструментальной основе 111 МПа и твердость покрытия 11–14 ГПа. Выполнена тестовая проверка функциональности в условиях токарной обработки экспериментальными СМП при следующих режимах резания: глубине резания  $h = 0,5 \text{ мм}$ , скорости резания  $v = 34,5 \text{ м/мин}$  и подаче  $0,3 \text{ мм/об}$ . Показано, что новая конструкция СМП не уступает по работоспособности традиционным сменным пластинам, которые изготовлены из быстрорежущей стали или твердого сплава с титан-нитридным покрытием.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих основных работах:**  
*Публикации, входящие в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК  
 при Минобрнауки России*

1. Егоров, И. С. Исследование влияния электротехнологических режимов контактной сварки и последующей индукционной обработки на формирование композиционной «сталь–титан–оксидной» структуры / И.С. Егоров, А.А. Фомин // Вопросы электротехнологии. – 2022. – N 1(34) – С. 13–21.

2. Егоров, И. С. Численное моделирование процесса нагрева сварной «сталь–титановой» конструкции при термообработке ТВЧ / И.С. Егоров, А. В. Войко, А.А. Фомин // Вопросы электротехнологии. – 2024. – N 2(43) – С. 35–41.

*Патенты*

3. Пат. 2789262 Российская Федерация, МПК B23K 11/11, B23K 11/20, C23C 8/10, B32B 15/18. Способ формирования на быстрорежущей стали покрытия системы титан-оксиды титана / **Егоров И.С.**, Щелкунов А.Ю., Фомин А.А. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.). – N 2022117395 ; заявл. 17.06.2022 ; опубл. 31.01.2023, Бюл. N 4. – 8 с. : ил.

*В научных изданиях, входящих в международные базы Scopus, Web of Science*

4. Composite "1.2361 tool steel – Ti – TiO<sub>2</sub>" structure and its production by resistance welding with subsequent induction heat treatment / A. Fomin, **I. Egorov**, A. Shchelkunov // Composite Structures. – 2018. – Vol. 206. – P. 467–473.

5. Optical and scanning electron microscopy of the metal-oxide inserts / **I.S. Egorov**, A.Y. Shelkunov, V.A. Koshuro // Saratov Fall Meeting 2018: Optical And Nano-Technologies For Biology And Medicine (Saratov, 24–28 September 2018). – Progress in Biomedical Optics and Imaging. – Saratov : SPIE, 2019. – Vol. 11065. – No. 110651I. – P. 110651I-1–110651I-6.

6. Structure of "Chromium steel-base - Ti-coating" and its production by the contact welding / **I. Egorov**, A. Shchelkunov, A. Fomin // Saint-Petersburg OPEN 2018: 5th International School And Conference On Optoelectronics, Photonics, Engineering And Nanostructures (Saint Petersburg, 02–05 April 2018). – Journal of Physics: Conference Series. – Saint Petersburg : IOP Publishing Ltd., 2018. – Vol. 1124. – No. 081015. – P. 1–4.

7. Study of plates with a combined "steel base – (titanium, oxide) coating" structure and preliminary tests of its wear resistance / **I. Egorov**, A. Fomin // Saint Petersburg OPEN 2019: 6th International School and Conference Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint Petersburg, 22–25 April 2019). – Journal of Physics: Conference Series. – Saint Petersburg : IOP Publishing Ltd., 2019. – Vol. 1410. – No. 012222. – P. 1–4.

8. Egorov, I. Study of the welded joint of VT1-0 titanium with 1.3343 steel / **I. Egorov**, A. Fomin // Saint Petersburg OPEN 2021: 8th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint Petersburg, 25–28 May 2021). – Journal of Physics: Conference Series. – Saint Petersburg : IOP Publishing Ltd., 2021. – Vol. 2086. – No. 012178. – P. 1–4.

9. Egorov, I. Deposition of a titanium coating on a steel base by contact welding and study of the resulting layered system structure / **I. Egorov**, A. Fomin // Saint Petersburg OPEN 2020: 7th International School and Conference Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint Petersburg, 27–30 April 2020). – Journal of Physics: Conference Series. – Saint Petersburg : IOP Publishing Ltd., 2020. – Vol. 1695. – No. 012175. – P. 1–4

10. Egorov, I. Simulation of induction heating of a steel design with a titanium coating and experimental study of structural changes of the bimetallic system / **I. Egorov**, A. Fomin, V. Koshuro // Saratov Fall Meeting 2019: 7th International Symposium on Optics and Biophotonics: Optical And Nano-Technologies For Biology And Medicine (Saratov, 23–27 September 2019). – Progress in Biomedical Optics and Imaging. – Saratov : SPIE, 2020. – Vol. 11457. – P. 1145701.

11. Egorov, I. Submicrometric structure of superhard oxide coatings on the surface of refractory metals treated with high-frequency currents / **I. Egorov**, A. Fomin, A. Shelkunov // Saratov Fall Meeting 2017: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIX (Saratov, 25–29 September 2017). – Progress in Biomedical Optics and Imaging. – Saratov : SPIE, 2018. – Vol. 10716. – P. 107161O.

12. Egorov, I. S. Influence of induction treatment on the steel-titanium layered structure to obtain a highly hard working titanium-oxide surface / **I. S. Egorov**, A. Y. Shchelkunov, A. A. Fomin // Progress in Biomedical Optics and Imaging (Saratov, 29 September – 02 October 2020). – Saratov Fall Meeting 2020: Optical and Nanotechnologies for Biology and Medicine. – Saratov : SPIE, 2021. – Vol. 11845. – No. 118451E. – P. 118451E-1–118451E-6.

*Статьи, опубликованные в иных научных изданиях*

13. Егоров, И. С. Исследование воздействия контактной сварки на процесс сплавления титана ВТ1-0 со сталью марки Р6М5 / **И.С. Егоров**, А.А. Фомин // Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки : сб. материалов Всерос. молодежной конф. / СГТУ. – Саратов, 2022. – С. 324–329.

14. Егоров, И. С. Формирование износостойких слоистых систем инструментального типа / **И.С. Егоров**, А.А. Фомин, А. Ю. Щелкунов // НЕДЕЛЯ НАУКИ СПБПУ: материалы научной конф. с международным участием, 2020. – Т.2. – С. 201–203.

15. Сверхтвердые оксидные покрытия и особенности их получения на титане обработкой токами высокой частоты / А. Ю. Щелкунов, **И. С. Егоров**, М. А. Фомина // Вопросы электротехнологии. – 2017. – № 3(16). – С. 59–65.

16. Егоров, И.С. Структура соединения образованного с применением метода контактной сварки титанового покрытия со стальной основой / **И.С. Егоров** // Современные материалы и технологии: сб. материалов Международной молодежной конф. / СГТУ. – Саратов, 2020. – С. 154–157.

Подписано в печать 11.09.2024

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 27

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел.: 8 (8452) 99-87-39, e-mail: izdat@ssitu.ru