

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Егорова Ивана Святославовича

на тему: «Разработка технологии контактной сварки стали с титаном и последующей термообработкой токами высокой частоты для повышения стойкости режущих пластин», представленную к защите по специальности

2.4.4. Электротехнология и электрофизика на соискание ученой степени

кандидата технических наук

В диссертационной работе **актуальность темы** связана с разработкой процесса нанесения титанового покрытия методом точечной контактной сварки и последующей термообработкой полученной сборки токами высокой частоты. В результате данной модифицирующей термообработки сталь-титановой сборки получены стальные режущие пластины с рабочей поверхностью, которая представляет собой износостойкую титан-оксидную структуру, что в результате расширит масштабы применения индукционной электротехнологии. Актуальность работы подтверждается поддержкой программы «У.М.Н.И.К.» и такими фондом как Совет по грантам Президента РФ.

В работе сформулированы следующие **научные положения**:

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 °С 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 неразъемного

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 °С и выдержке 180 с обеспечивает закалку стальной пластины и образование диффузионного 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 .

Представленные положения научно обоснованы и аргументированы путем проведения экспериментальных исследований и анализа полученных данных с использованием методик статистической обработки экспериментальных данных. **Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций** в диссертационной работе Егорова И.С., также подтверждаются большим объемом согласованных данных теоретических и экспериментальных исследований, полученных с использованием современного научно-исследовательского оборудования.

Научные положения базируются на использовании современных методов математического моделирования. Основные положения диссертации прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях.

По теме 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.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается полнотой теоретических и экспериментальных исследований, применением стандартных методик измерения электротехнологических параметров процесса, физико-механических характеристик получаемых образцов и изделий. Для обработки результатов экспериментальных исследований использовались общепринятые статистические методы.

Новизна научного исследования заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель, позволяющая определить распределение температуры при обработке токами высокой частоты в сталь-титановой сборке при различной 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, позволяющая получать сталь-титан-оксидную структуру с высокой твердостью 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, представленных Егоровым И.С. результатов, заключается в развитие существующих электротехнологических способов формирования сварного соединения стали с титаном и образования металлоксидных диффузионных слоев методом термической обработки токами высокой частоты.

Практическая значимость работы обусловлена предложенными технологическими вариантами формирования слоистой структуры сталь-титан-оксид титана. Определены технологические режимы комбинированного электротехнологического процесса, позволяющего получить сменные режущие пластины с высокотвердой и износостойкой рабочей поверхностью.

Научные результаты работы могут быть использованы на предприятиях промышленности, занимающихся изготовлением металлорежущих инструментов для формирования твердых и износостойких покрытий на сменных режущих пластинах.

Диссертационная работа Егорова И.С., представленная на 153 страницах, состоит из введения, четырех глав, выводов по результатам работы, списка используемых источников в количестве 149 наименований и приложений.

Во введении отмечается актуальность работы, поставленные цели и задачи исследования, а также научная новизна и значимость исследования, изложены научные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены личный вклад автора и данные об апробации работы.

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 за счет воздействия токов высокой частоты в кислородсодержащей среде позволяет образовать высокотвердую структуру на его поверхности. Сформулированы выводы и актуальные задачи, решаемые в диссертации.

Во второй главе предложены численные модели процесса высокотемпературного нагрева токами высокой частоты и последующей выдержке слоистой сборки «сталь – титан». Показана зависимость влияния параметров потребляемой мощности процесса P_{Σ} на величину тока индуктора $I_{\text{инд}}$, соответствующему температурному диапазону при нагреве сталь-титанового изделия от 900 до 1250 °С. Определена технологическая возможность нагрева токами высокой частоты сталь-титановых изделий различной геометрии. Результатом данной главы является определение распределения температуры и пиковых значений нагрева системы «индуктор–изделие» от параметра тока индуктора для проведения процесса модифицирующей термообработки.

В третьей главе разработана методика проведения экспериментальных исследований и конструкция образцов сменных режущих пластин с основой из стали марки Р6М5 и покрытия из титана марки ВТ1-0. Определено воздействие технологических параметров точечной контактной сварки на образование и качество неразъёмного соединения стали с титаном и последующей модифицирующей термообработки на параметры химического состава и морфологию, твердость и износостойкость сталь-титан-оксидной структуры. Итогом главы является анализ и определение рациональных режимов для последующего их переноса на многогранные сменные режущие пластины для металлообработки.

В четвертой главе обоснована и разработана конструкция сменной многогранной пластины со структурой «сталь-основа – титан-покрытие – оксид титана-износостойкий слой» с сегментным типом отделки вершин за счет нанесения титановых элементов методами точечной контактной сварки и последующей термической модификации токами высокой частоты.

Определены способ и схема нанесения титанового покрытия, заключающиеся в нанесении титановых дисков на вершины стальной пластины. Определены параметры термообработки изделия «сталь-титан» в результате которой на поверхности титана образуются оксидные фазы с субмикроразмерными частицами.

В заключении изложены основные результаты диссертации.

Содержание диссертации отражает научные результаты и положения, выносимые на защиту. В целом, диссертационная работа Егорова И.С. представляет завершённое исследование актуальной задачи. Работа выполнена на высоком уровне, поставленные задачи успешно решены. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация свободна от существенных недостатков, однако можно сделать следующие замечания:

1. При постановке задачи численного моделирования процесса термообработки токами высокой частоты сталь-титановой сборки рассматривается только многovitковый индуктор в виде простой катушки из медной трубки с одной единственной геометрией. Не совсем ясно чем обоснован выбор именно такой конструкции индуктора, поскольку, нагрев сборки возможно проводить при помощи одновиткового индуктора или индуктора в виде плоской катушки с магнитопроводом, который может также эффективно нагревать образец. Также требуется уточнение является ли построенная численная модель осесимметричной.

2. При проведении численных и физических экспериментов не понятно как осуществлен выбор частоты тока индуктора, на которой происходит нагрев. При этом приводится неизменная частота 80 кГц, в свою очередь, в другом частотном диапазоне исследования не производились.

3. В рамках работы проводился нагрев ТВЧ сборки «сталь-титан» в открытой воздушной атмосфере в температурном интервале от 1000 до 1250°C. Далее осуществлялась выдержка в течении 60–180 с, в результате которой происходит диффузия кислорода в титан и формирование титан-

оксидного слоя на поверхности СРП. По завершению цикла термообработки образец охлаждался в камере нагрева до комнатной температуры, однако не совсем ясна скорость охлаждения сборки до комнатной температуры. Поскольку в сборке участвует сталь, то при нагреве стали до 1000°C и последующем охлаждении, могут происходить структурные изменения в самой стали, которые могут влиять как на свойства отдельно стали, так и на саму сборку «сталь-титан»

Сделанные замечания существенно не влияют на научную и практическую ценность достигнутых автором результатов и не меняют общей высокой оценки работы.

Таким образом, диссертация Егорова Ивана Святославовича является научно-квалификационной работой, в которой решается актуальная задача по разработке процесса нанесения титанового покрытия методом точечной контактной сварки и последующей термообработки полученной сборки токами высокой частоты для получения износостойкой и твердой слоистой структуры металлорежущего инструмента.

Диссертационная работа Егорова Ивана Святославовича на тему: «Разработка технологии контактной сварки стали с титаном и последующей термообработкой токами высокой частоты для повышения стойкости режущих пластин» соответствует паспорту специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика и отвечает требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Считаю, что автор диссертационной работы Егоров Иван Святославович полностью заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Официальный оппонент,

кандидат технических наук, доцент кафедры Электротехнологической и преобразовательной техники, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»



/ Перевалов Юрий Юрьевич /

«07» 11 2024 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

197022, Северо-Западный федеральный округ, субъект Российской

Федерации: Санкт-Петербург, город Санкт-Петербург, улица Профессора

Попова, дом 5, литера Ф.

Тел.: +7(812) 234-46-51

Адрес электронной почты: info@etu.ru

Сайт подразделения: <https://etu.ru>

Подпись Перевалова Ю.Ю. заверяю

Подпись Перевалова Ю.Ю.



П.Н. Руссо