

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор по науке и инновациям,

И.И. Комаров

11 октября 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертационную работу Егорова Ивана Святославовича на тему: «Разработка технологии контактной сварки стали с титаном и последующей термообработкой токами высокой частоты для повышения стойкости режущих пластин» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Актуальность темы

В настоящее время в области разработок инструментальных материалов существует большая потребность в исследовании и разработке технологий формирования защитных покрытий на рабочей поверхности металлорежущего инструмента с многослойно-композиционной и наноразмерной структурой, где каждый из слоев имеет различный состав и функциональное назначение.

В данной работе решается задача, связанная с разработкой процесса нанесения титанового покрытия на стальную основу методом точечной контактной сварки с последующей термообработкой токами высокой частоты полученной сборки. В результате модифицирующей термообработки сталь-титановой сборки будут получены стальные режущие пластины с рабочей поверхностью, которая представляет собой титан-оксидную структуру с повышенной износостойкостью и твердостью в отличие от инструментальных сталей.

Процесс нанесения покрытия титана на стальную основу комбинированным методом контактной сварки с последующим окислением поверхности титанового покрытия методом нагрева в кислородосодержащей среде имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными методами нанесения покрытий: технологическая простота, экологичность процессов, формирование многослойной прочной высокотвердой структуры, не требующей применения дорогостоящего оборудования. Представленная технология позволяет расширить применение индукционной электротехнологии в интересах инструментального производства.

Диссертационная работа Егорова И. С. посвящена разработке электротехнологического процесса получения твердых износостойких «титан-оксидных» покрытий на стальной основе за счет комбинированного метода точечной контактной сварки и последующей модифицирующей термообработки при нагреве токами высокой частоты. Разработка указанных процессов позволяет получить сменные режущие пластины слоистой структуры «сталь-титан-оксиды титана» с высокотвердой и износостойкой рабочей поверхностью и определяет научно-технологическую актуальность темы диссертационной работы.

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, заключается в следующем:

1. Разработана математическая электротепловая модель термообработки токами высокой частоты сталь-титановой сборки, позволяющая определить распределение температуры системе «индуктор – основа – нагреваемое изделие» 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 неплетачиваемых пластин режущего инструмента, согласно которым был разработан способ формирования на инструментальной быстрорежущей стали покрытия системы «титан-оксиды титана» (Патент РФ № 2789262).

Материал, представленный в диссертационной работе, относится к научному направлению теоретической и практической электротехнологии, связанному с исследованием влияния электротехнологических параметров обработки на физико-механические свойства сталь-титан-оксидных сменных пластин для обработки металлов резанием.

Значимость результатов исследования

Теоретическая значимость полученных автором результатов связана с развитием технологии сварки стали с титаном методом электронагрева сопротивления и высокотемпературной упрочняющей электротермической обработки сталь-титановой сборки с формированием диффузионного оксидного слоя, пленки или покрытия на техническом титане за счет установления функциональных связей между параметрами технологического режима точечной контактной сварки и индукционной высокотемпературной обработки с физико-механическими свойствами, полученных в виде регрессионных уравнений.

Практическая ценность работы состоит в определении параметров точечной контактной сварки инструментальной быстрорежущей стали с техническим титаном и последующей термической обработки сталь-титановой сборки, обеспечивающие формирование прочного соединения (около 98–111 МПа), износостойкой структуры «сталь-титан-оксиды титана» с твердостью 12–14 ГПа. Разработаны технологические рекомендации для формирования прочной, твердой и износостойкой сталь-титан-оксидной структуры сменных режущих пластин.

Использование результатов диссертационного исследования целесообразно осуществить на предприятиях приборо- и машиностроительной промышленности, а также изделий инструментального назначения. Рекомендуется использование полученных результатов в

учреждениях высшего образования при подготовке специалистов в области материаловедения и электротехнологии по профильным дисциплинам Б.1.1.18 «Общее материаловедение и технология материалов» и Б.1.2.6 «Физико-технические основы обработки материалов и изделий» в виде лекционных курсов и практических занятий.

Обоснованность и достоверность научных результатов

Обоснованность и достоверность научных положений, теоретических и экспериментальных результатов подтверждаются использованием математических методов и физических законов, положенных в основу разработанных математических моделей, соответствием теоретических зависимостей экспериментальным данным. Достоверность экспериментальных результатов достигается применением современных электротехнологических систем для нагрева токами высокой частоты, измерительного оборудования и аналитической аппаратуры, использованием стандартных методов испытаний, отсутствием противоречий полученных результатов исследований с данными других исследователей.

Оценка содержания диссертационной работы

Содержание диссертации изложено на 153 страницах (с тремя приложениями) текста. Диссертация состоит из введения, четырех глав и списка литературы, включающего 149 наименований, а также приложений.

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. Выявлено, что процесс термического оксидирования технического титана при температуре более 1000 °С под воздействием токов высокой частоты в кислородсодержащей среде позволяет образовать высокотвердую структуру на поверхности технического титана.

Во второй главе решена краевая задача электродинамики и теплопроводности при нагреве токами высокой частоты и последующей выдержке пластины слоистой сборки «сталь-титан». Конечным результатом решения данной задачи является распределение температуры при обработке токами высокой частоты пластины «сталь-титан» при различной величине тока индуктора и геометрии элементов системы.

Определены временные промежутки, в течение которых достигается стационарная температура в нагреваемом изделии. Определены зависимости плотности тока и тепловыделения в стальной основе изделия от тока индуктора в диапазоне 1,7–2,3 кА при разных толщинах основы и покрытия, а также значения температуры различных участков изделия при выдержке.

В третьей главе разработана методика экспериментальных исследований воздействия технологических параметров точечной контактной сварки и высокотемпературной индукционной обработки на прочность, элементный и фазовый составы, морфологию, твердость и износостойкость сталь-титан-оксидной структуры. Определены и обоснованы технологические режимы основных операций нанесения покрытия толщиной 1 мм из технического титана электроконтактным нагревом с удельной плотностью сварочного тока $j_{\text{св}} = 60\text{--}310 \text{ А/мм}^2$, длительностью импульса $\tau_{\text{св}} = 0,1\text{--}1,2 \text{ с}$ на основу из инструментальной стали Р6М5 и модификации нагревом токами высокой частоты нанесенного покрытия при температуре $T = 1000\text{--}1250 \text{ °С}$, соответствующей удельной потребляемой электрической мощности $j_{\text{п}} = 117\text{--}145 \text{ Вт/г}$, продолжительностью процесса 60–180 с с последующим спокойным охлаждением.

ждением. Повышенное время выдержки при термообработке позволило получить пластины с износостойкостью, сравнимой с пластинами из твердого сплава с титан-нитридным покрытием.

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. Определены способ и схема нанесения титанового покрытия, заключающиеся в нанесении титановых дисков на вершины сменной многогранной пластины за несколько последовательных импульсов при усилии сжатия $F_{сж} = 600$ Н, плотности тока $j_{сж} = 60 \pm 1\%$ А/мм² и длительности импульса $t_{сж} = 0,1$ с. Определены параметры обработки токами высокой частоты сталь-титановой сборки при удельной потребляемой мощности $j_n = 145 \pm 1\%$ Вт/г, частоте тока $f = 80$ кГц, температуре 1250 °С и выдержке 180 с. При этом на поверхности титана образуются оксидные фазы с субмикроразмерными частицами.

Положительно оценивая диссертационную работу Егорова И.С., имеются следующие замечания и дискуссионные моменты:

1. В работе отсутствует методика выбора электротехнологического оборудования для нагрева токами высокой частоты с целью термообработки сталь-титановой сборки.
2. Из работы не вполне понятно на основании каких соображений были выбраны размеры сменных пластин и каким образом результаты работы могут быть распространены на более широкий диапазон номенклатуры сменных пластин.
3. Из текста работы не вполне понятно каковы механизмы образования интерметаллидных соединений на границе соединения стали и титана, а также то, какие существуют способы минимизации их образования в процессе сварки.
4. В главе 3 (разделы 1 и 3) при описании методики измерения тока индуктора не показана уточненная схема измерения электрических параметров (ток, частота и др.).
5. В результатах исследования не раскрывается механизм процесса формирования оксидного слоя или покрытия на поверхности титана. Также отсутствует объяснение того, что в модифицированном слое нет нитридов титана.
6. В работе использовано несколько методов измерения твердости. Нет четкого понимания, по какой причине автор применяет метод измерения микротвердости и инженерный метод измерения макротвердости по методу Роквелла (шкала А).
7. В работе недостаточно описан технологический процесс доработки поверхности, в частности, процесс удаления окалина при получении высокотвердых и износостойких оксидных покрытий, а также процесс удаления дефектного слоя с рабочей поверхности сменных пластин.

Отмеченные недостатки не снижают общую высокую оценку представленной диссертационной работы.

Соответствие автореферата основным положениям диссертации

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертационной работы, выводы и рекомендации отражены в автореферате. Текст диссертационной работы и автореферата оформлен согласно требованиям, предъявляемым к ним. Рисунки, таблицы, обозначения физических величин соответствуют требованиям ГОСТа.

Содержание диссертации и автореферата изложены ясным и технически грамотным языком, при обработке экспериментальных и теоретических данных использованы современные методы статистической обработки экспериментальных результатов.

Публикации и апробация диссертации

Результаты диссертационной работы обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: 7-я и 8-я Международная школа-конференция по оптоэлектронике, фотонике, инженерии и наноструктурам «Saint Petersburg OPEN» (Россия, Санкт-Петербург, 2020, 2021), Международный симпозиум по оптике и биофотонике «Saratov Fall Meeting» (Россия, Саратов, 2018, 2019, 2021), 4-я Международная конференция по механике композитов «MECHCOMP4» (Мадрид, Испания, 2018), 60-я Международная научная конференция по энергетике и электротехнике Рижского технического университета (Рига, Латвия, 2019), Международная молодежная конференция «Современные материалы и технологии» (Саратов, Россия, 2020), II Всероссийская молодежная конференция «Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки» (Саратов, Россия, 2023).

По теме диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ, из них 2 статьи в научном журнале, входящем в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 9 статей в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Получен 1 патент РФ на изобретение.

Работы, опубликованные по теме диссертации, полностью отражают ее основные положения.

Заключение

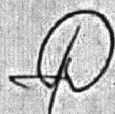
Таким образом, диссертационная работа Егорова Ивана Святославовича на тему: «Разработка технологии контактной сварки стали с титаном и последующей термообработкой токами высокой частоты для повышения стойкости режущих пластин» является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические решения актуальной задачи придания новых свойств и повышения физико-механических характеристик сменных режущих пластин для металлообработки резанием, повышая их надежность и долговечность, за счет разработки комбинированной технологии нанесения титанового покрытия на стальную основу и его дальнейшая модификация высокотемпературной обработкой токами высокой частоты, обеспечивающей создание оксидных покрытий, пленок и диффузионных слоев с высокими значениями твердости и износостойкости, имеющей важное значение для развития знаний в области электротехнологических процессов.

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.

Автор диссертационной работы Егоров И.С. полностью заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры Электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» 28 октября 2024 года, протокол № 5.

Профессор кафедры Электроснабжения
промышленных предприятий
и электротехнологий
федерального
государственного
бюджетного
образовательного
учреждения высшего
образования «Национальный исследова-
тельский
университет «МЭИ»,
доктор технических наук, доцент



Федина М.А. Андреевич

Подпись доктора технических наук, профессора кафедры Электроснабжения про-
мышленных предприятий и электротехнологий Федина М.А. заверяю

ПОДПИСАТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
КАБИНЕТА С ПЕРСОНАЛОМ
Л.М. ПОЛЕВАЯ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д.14, стр.1

Тел.: +7 495 362-70-01.

E-mail: universe@mpei.ac.ru, сайт организации: <https://mpei.ru/>