

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.391.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 27 ноября 2024 г. № 3

О присуждении **Егорову Ивану Святославовичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка технологии контактной сварки стали с титаном и последующей термообработкой токами высокой частоты для повышения стойкости режущих пластин» по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика принята к защите 11 сентября 2024 г. (протокол заседания № 2), диссертационным советом 24.2.391.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) Министерства науки и высшего образования РФ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета № 72/нк от 26 января 2023 г.

Соискатель Егоров Иван Святославович, «01» июля 1994 года рождения, в 2016 г. окончил бакалавриат СГТУ имени Гагарина Ю.А. по направлению «Металлургия». В 2018 г. окончил магистратуру СГТУ имени Гагарина Ю.А. по направлению «Металлургия». В 2022 г. Егоров И.С. окончил аспирантуру очной формы обучения.

С 2020 г. по настоящее время соискатель Егоров И.С. является ассистентом кафедры «Материаловедение и биомедицинская инженерия».

Диссертация выполнена в СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и биомедицинская инженерия» СГТУ имени Гагарина Ю.А. Фомин Александр Александрович.

Официальные оппоненты:

1. Лепешкин Александр Роальдович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

2. Перевалов Юрий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», в своем **положительном отзыве**, подписанном профессором кафедры электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий доктором технических наук, доцентом **Фединым Максимом Андреевичем**, утвержденном проректором по научной работе доктором технических наук **Комаровым Иваном Игоревичем**, указала, что диссертация является завершенным научно-квалификационным исследованием, обладает научной новизной и практической значимостью. Работа 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, а ее автор, **Егоров Иван Святославович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Соискатель имеет 16 опубликованных работ по теме диссертационного исследования общим объемом 5,69 п.л., вклад соискателя 1,67 п.л., из них 2 статьи в научном журнале, входящем в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 9 статей, индексируемых в базах Web of Science / Scopus, 1 патент на изобретение. Работы, опубликованные по теме диссертации, полностью отражают ее основные положения и результаты.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Composite "1.2361 tool steel – Ti – TiO₂" structure and its production by resistance welding with subsequent induction heat treatment / A. Fomin, **I. Egorov**, A. Shchelkunov, M. Fomina, V. Koshuro, I. Rodionov // Composite Structures. – 2018. – Vol. 206. – P. 467–473.

2. **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.

3. Пат. 2789262 Российская Федерация, МПК В23К 11/11, В23К 11/20, С23С 8/10, В32В 15/18. Способ формирования из быстрорежущей стали покрытия системы титан-оксида титана / **Егоров И.С.**, Щелкунов А.Ю., Фомин А.А. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального 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..

4. **Егоров, И. С.** Численное моделирование процесса нагрева сварной «сталь-титановой» конструкции при термообработке ТВЧ / **И.С. Егоров**,

Личный вклад соискателя связан с разработкой технологии точечной контактной сварки инструментальной быстрорежущей стали с техническим титаном и последующей термической модификации токами высокой частоты титанового слоя на стальной основе пластины. Разработана методика, проведены экспериментальные исследования твердой и прочной слоистой структуры «сталь-титан-оксид титана», выполнена математическая обработка полученных данных. Разработана математическая модель для описания высокотемпературной модификации сталь-титановых пластин, получены регрессионные зависимости изменения твердости, прочности, элементного и фазового состава, толщины диффузионного слоя от технологических параметров контактной сварки и высокотемпературного нагрева токами высокой частоты, положенные в основу определения рациональных электротехнологических режимов.

На автореферат поступило 6 положительных отзывов от:

- Водолазского Ф.В., к.т.н., доцента, доцента кафедры «Термообработка и физика металлов», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

- Герасименко А.Ю., д.т.н., доцента, профессора Института биотехнических систем, начальника научно-исследовательской лаборатории «Биомедицинские нанотехнологии», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Москва.

- Калгановой С.Г., д.т.н., доцента, руководителя научно-исследовательского центра, акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Контакт», г. Саратов.

- Телышева Д.В., д.т.н., доцента, директора института бионических технологий и инжиниринга, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет)», г. Москва.

- Венига С.Б., д.ф.-м.н., профессора, директора института физики, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов.

- Рафаловича А.Д., к.т.н., заместителя генерального директора по научно-техническому развитию, акционерное общество «Научно-производственное предприятие «АЛМАЗ», г. Саратов.

В отзывах отражены актуальность темы диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, отмечены достоинства работы. Часть замечаний связана с ограниченностью объема автореферата и носит рекомендательный характер. При-

сутствуют также замечания, касающиеся влияния температурных напряжений при термообработке на адгезионных характеристик покрытия, и распространения представленной технологии на более широкую номенклатуру инструментов. Другие замечания, не затрагивающие основных положений и практических рекомендаций, касаются физики процессов образования слоистой структуры сталь–титан–оксид титана и оценки эксплуатационных возможностей. На все замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой научной квалификацией, соответствующей профилю рассматриваемой диссертации и подтвержденной публикациями в ведущих рецензируемых журналах. Официальные оппоненты не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем. Ведущая организация не имеет договорных отношений с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана математическая модель, позволяющая определить распределение температуры при обработке токами высокой частоты в сталь-титановой сборке с учетом величины тока индуктора, геометрических размеров и формы элементов системы;

предложен новый, защищенный патентом РФ способ, на основе которого разработаны технологические рекомендации применительно к точечной контактной сварке с последующей термообработкой токами высокой частоты, позволяющие получать сталь-титан-оксидную структуру с высокой твердостью и износостойкостью рабочей поверхности неперетачиваемых пластин режущего инструмента, согласно которым был разработан способ формирования покрытия с системой «титан-оксиды титана» на инструментальной быстрорежущей стали;

доказано, что точечная контактная сварка листа толщиной 1 мм из технического титана и стальной пластины марки Р6М5 толщиной 3,8 мм при постоянном межэлектродном усилии сжатия 600 Н, при плотности тока 60 и 120 А/мм², длительности импульса 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 токами высокой частоты сталь-титановой сборки при частоте тока 80 кГц, удельной потребляемой мощности 145 Вт/г и температуре 1230±20°С с выдержкой 180 с обеспечивает образование титан-оксидного покрытия и диффузионного слоя толщиной 100–150 мкм с твердостью 12–14 ГПа;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что формирование твердых диффузионных слоев в титане обеспечивается при условии определенного соотношения тока индуктора, частоты, импульсов и продолжительности выдержки с учетом толщины титанового покрытия;

применительно к решенной задаче диссертации эффективно использован численный метод моделирования высокотемпературного нагрева токами высокой частоты сталь-титановых изделий, а также комплекс методов

исследования состава, структуры и физико-механических свойств слоистого покрытия, полученного по предложенной комбинированной технологии;

интерпретированы результаты экспериментального исследования оксидных диффузионных слоев и титанового покрытия на стальной основе, сформированных комбинированным процессом точечной контактной сварки при удельной плотности сварочного тока $60\text{--}310\text{ А/мм}^2$, длительности импульса $0,1\text{--}1,2\text{ с}$, с последующей высокотемпературной обработкой с использованием токов высокой частоты при удельной потребляемой электрической мощности $117\text{--}145\text{ Вт/г}$, температуре от $1000\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$ и продолжительности выдержки $60\text{--}180\text{ с}$;

раскрыт механизм формирования износостойких диффузионных слоев и твердых оксидных покрытий на поверхности технического титана, заключающийся в обосновании ограничения температурного диапазона в пределах от $1210\text{ до }1250\text{ }^\circ\text{C}$;

обоснованы взаимосвязи тока индуктора, геометрии нагреваемого сталь-титанового изделия и продолжительности выдержки со стационарной температурой обработки токами высокой частоты;

проведена модернизация конструкции сменных многогранных режущих пластин и технологического процесса при формировании сегментного типа отделки вершин за счет нанесения титановых листовых элементов методом точечной контактной сварки с последующей термообработкой токами высокой частоты, которая позволяет обеспечить требуемые показатели качества металлообрабатывающих инструментов с субмикроразмерной структурой рабочей поверхности.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны технологические рекомендации и запатентован способ формирования на инструментальной быстрорежущей стали покрытия системы «титан-оксиды титана» (Патент РФ № 2789262), позволяющий получать сталь-титан-оксидную структуру с высокой твёрдостью и износостойкостью рабочей поверхности неперетачиваемых пластин режущего инструмента.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс для направлений 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» 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;

определены перспективы практического применения разработанных процессов в электротехнологии для получения износостойких слоев и твердых титан-оксидных покрытий на стальных изделиях;

создана численная модель процесса модифицирующей обработки посредством нагрева токами высокой частоты в кислородосодержащей среде, позволяющая установить рациональные диапазоны воздействия тока индуктора, скорость выхода на квазистационарную температуру и её распределение, а также продолжительность выдержки для прямоугольных стальных

пластин с титановым покрытием, что обеспечивает эффективное использование разработанной технологии;

разработана технология формирования сталь-титан-оксидной структуры с высокой твёрдостью и износостойкостью рабочей поверхности в виде сменных металлорежущих пластин, в которой предусмотрена контактная точечная сварка стали с титаном при сварочном токе 1,2 кА с длительностью импульса 0,1 с с последующей термообработкой токами высокой частоты при удельной потребляемой мощностью 145 Вт/г, токе индуктора 2,1 кА и выдержке не менее 180 с, в результате которой формируется функционально-градиентное титан-оксидное покрытие на стальной основе с прочностью соединения 98–111 МПа, твердостью 77–89 HRA с толщиной не менее 0,5 мм.

Оценка достоверности результатов исследования выявила хорошее совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований, адекватность разработанных результатов расчета по регрессионным зависимостям, экспериментальных данных, обоснованность применения выбранных методов испытаний, отсутствие противоречий полученных результатов с данными других исследователей. Экспериментальные работы выполнены с применением современных электротехнологических комплексов, измерения осуществлены на высокоточном измерительном оборудовании и аналитической аппаратуре.

Личный вклад соискателя состоит в разработке научной гипотезы и развитии направления упрочняющей обработки нагревом токами высокой частоты сталь-титановых конструкций, разработке общей методики исследований, проведении экспериментальных работ и математической обработке полученных данных, разработке численной модели высокотемпературной модификации титанового слоя на стали, построении регрессионных зависимостей изменения микротвердости от технологических параметров контактной точечной сварки и высокотемпературной обработки, а также формулировании основных положений и результатов, выносимых на защиту.

В ходе защиты диссертации не было высказано критических замечаний, затрагивающих научные положения и практические результаты исследований. На все задаваемые в ходе заседания вопросы, связанные с математическими зависимостями параметров электротехнологической обработки, методикой экспериментальных исследований, взаимосвязью режимов высокотемпературной индукционной обработки и полученных физико-механических свойств титан-оксидных покрытий на стали, выбора рационального режима получения износостойких покрытий для сменных режущих пластин, соискатель **Егоров И.С.** дал исчерпывающие аргументированные ответы.

На заседании 27 ноября 2024 г. диссертационный совет постановил: за решение научной задачи, имеющей значение для развития электротехнологии и электрофизики, а именно разработку и научное обоснование нового электротехнологического процесса получения износостойкого титан-оксидного покрытия с диффузионным приповерхностным слоем на поверхности стали, позволяющего повысить функциональные качества сменных режущих пластин, присудить **Егорову Ивану Святославовичу** учёную сте-

пень кандидата технических наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика.

Области исследования соответствуют паспорту специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика (пункты 2, 4, 5) и требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 10 человек, из них 10 докторов наук по специальности 2.4.4. Электротехнология и электрофизика, участвовавших в заседании, из 12 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 10, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета
«27» ноября 2024 г.



Зимняков
Дмитрий Александрович

Бекренев
Николай Валерьевич