ЗАКЛЮЧЕНИЕ

диссертационного совета 24.1.463.01, созданного на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физического материаловедения
Сибирского отделения Российской академии наук
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело №_____

решение диссертационного совета от 21.05.2025, № 13

О присуждении Улаханову Николаю Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Модификация структуры и свойств диффузионных бор- и алюминийсодержащих слоев на поверхности легированных сталей низкоэнергетическими импульсными электронными пучками» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 18.03.2025 г. (протокол заседания № 11) диссертационным советом 24.1.463.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 26 января 2023, № 85/нк.

Соискатель Улаханов Николай Сергеевич, «18» декабря 1990 года рождения. В 2013 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» по специальности «Технология машиностроения», специализация «Компьютерное проектирование и технология производства изделий». На момент защиты диссертации соискатель работает в должности научного сотрудника в

лаборатории физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории физического материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, и на кафедре «Технология машиностроения и основы конструирования» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат технических наук Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физического материаловедения, заведующий.

Официальные оппоненты:

Климов Александр Сергеевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», лаборатория плазменной электроники кафедры физики, ведущий научный сотрудник;

Васенина Ирина Владимировна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, лаборатория плазменной электроники отдела физики плазмы, научный сотрудник,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк в своем положительном отзыве, подписанном Громовым Виктором Евгеньевичем, доктором физико-математических наук, заведующим кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В. М. Финкеля и Мартусевич Еленой Владимировной, кандидатом технических наук, доцентом, ученым секретарем кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В. М. Финкеля, указала, что научные положения, выводы и заключения, представленные в диссертации, обоснованы и достоверны. Автор провел большой объем экспериментальных исследований, использовал современные методы анализа структуры и свойств материалов, такие как электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, дифракция обратно-рассеянных электронов и др. Полученные результаты подтверждены экспериментальными данными и согласуются с результатами других исследователей в данной области. Результаты имеют важное значение для развития научных основ поверхностной инженерии и могут быть использованы для дальнейших исследований в области модификации материалов. Практическая значимость работы заключается в разработке технологии комбинированной обработки (химико-термическая обработка + электронно-пучковая обработка), которая позволяет создавать поверхностные слои с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Эта технология может быть успешно применена в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, авиастроение и производство инструментальной оснастки. Диссертационная работа «Модификация структуры и свойств диффузионных бор- и алюминийсодержащих слоев на поверхности легированных сталей низкоэнергетическими импульсными электронными пучками» соответствует требованиям, установленным в пунктах 9-11,13,14 Положения «О присуждении учёных степеней» и утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Она является

законченной научно-квалификационной работой, в которой решена задача выявления закономерностей формирования структурно-фазового состояния при модификации диффузионных бор- и алюминийсодержащих слоев низкоэнергетическими импульсными электронными пучками, обеспечивающей комплексное повышение физико-механических свойств поверхности легированных сталей инструментального назначения, имеющая значение для развития физики конденсированного состояния. Автор диссертации Улаханов Николай Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ по теме диссертации, из них 5 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 3 работы в изданиях, входящих в реферативную базу данных Scopus; 1 патент РФ на изобретение. Общий объем 13,51 п.л., личный вклад автора 2,82 п.л. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты исследования.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Улаханов, Н. С. Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием B-Al-слоев химико-термической обработкой / Н. С. Улаханов, У. Л. Мишигдоржийн, А. Г. Тихонов, А.И. Шустов, А.С. Пятых // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. - № 12(204). – С. 557-564.

2. Улаханов, Н. С. Электронно-пучковая обработка диффузионных бороалитированных слоев на поверхности стали 5ХНМ / Н. С. Улаханов, У. Л. Мишигдоржийн, А. П. Семенов, А.С. Милонов, М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2024. – № 1(47). – С. 92-102.

3. Улаханов, Н. С. Модификация диффузионных бор- и алюминийсодержащих слоев электронно-пучковой обработкой / Н. С. Улаханов, П. В. Москвин, У. Л. Мишигдоржийн, А. П. Семенов, Н. Н. Коваль,

М. С. Воробьев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2024. – № 1 (62). – С. 62–75.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. д.т.н., профессора, заведующего кафедрой проектирования и технологии производства электронных приборов Калужского филиала ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Андреева В.В. Замечание: «целесообразным было бы дать более детальное объяснение механизмов (например, роль сжимающих напряжений и пластичности эвтектики), способствующих уменьшению твердости на стали 3Х2В8Ф после ЭПО (стр. 14, рисунок 7б)».

2. к.т.н, доцента кафедры «Материаловедение в машиностроении» Бушуевой Е.Г. и д.т.н., доцента, заведующей кафедрой «Материаловедение в машиностроении» Никулиной А.А., ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». Замечания: «1) При оценки фазового состава после химико-термической и электронно-пучковой обработки выявлены фазы BNi_2 (для стали 3Х2В8Ф) и $CrSi_2$ (для стали 5 ХНМ), не понятно почему произошло формирование силицидов хрома и боридов никеля, если никель и кремний не вводились намеренно, а в исходных сталях их количество мало? 2) В работе не поясняется, каким методом было определено количественное содержание бора в образцах и в каких процентах оно приводится? 3) На рисунке 4а в автореферате приводится карта распределения фаз в стали 5ХНМ после электронно-пучковой модификации. Однако часть, прилегающая к основному материалу, не расшифрована. Не понятно, какие фазы там формируются и могут ли они негативно влиять на свойства полученных слоев. 4) В автореферате не отображена топография эталонных материалов для триботехнических испытаний, что являлось бы существенным доказательством целесообразности применения технологии ХТО и последующей ЭПО».

3. к.т.н., научного сотрудника лаборатории плазменной эмиссионной электроники Института сильноточной электроники СО РАН Дорошкевича С.Ю. Замечание: «в разделе о методах не полностью раскрыты критерии выбора параметров ЭПО (например, длительности импульсов, плотности энергии), что может затруднить воспроизведение результатов».

4. к.т.н., доцента отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Петюкевич М.С. Замечания отсутствуют.

5. к.т.н., научного сотрудника лаборатории химии и технологии природного сырья Байкальского института природопользования СО РАН Палеева П.Л. Замечания: «1) В автореферате на рисунке 8 представлены эпюры распределения остаточных напряжений в диффузионных слоях на сталях 5ХНМ и 3Х2В8Ф после ЭПО. Из автореферата непонятно, какой вид и уровень остаточных напряжений сформирован на поверхности химико-термической обработкой? 2) В автореферате говорится о повышении формостойкости штампа, испытанного в промышленных условиях. Патент РФ, указанный в списке опубликованных работ по теме диссертации оформлен на эту технологию? Если нет, то существует ли возможность оформить патент на данную технологию?»

6. д.ф.-м.н., директора Залесского В.Г. и д.т.н., профессора, начальника отдела электронно-лучевых технологий и физики плазмы Поболя И.Л., Физико-технический институт НАН Беларуси. Замечания: «1) Автор одновременно применяет для воздействия термины «электронно-лучевое» и «электронно-пучковое». 2) Полученные результаты по режиму импульсного воздействия были бы более универсальны при варьировании не числом импульсов, а энерговкладом за определенный промежуток времени. 3) Непонятно аномальное высокое содержание углерода (7,93 вес. %) после ХТО стали 5ХНМ в спектре по линии 5, соответствующей анализу основного материала (судя по содержанию остальных легирующих элементов в этом

спектре). 4) В работе изучена стойкость полученных материалов в условиях трения скольжением без применения смазочных материалов. Как известно, штампы из сталей 5ХНМ и 3Х2В8Ф эксплуатируются при высоких температурах в условиях ударного нагружения. Вопрос, как поведут себя высокотвердые слои (1400-1500 HV) при таком режиме работы инструмента? 5) Имеются некорректные фразы: а) Химический состав ДС после ХТО и ЭПО производился с помощью...микроскопа, б) ... недостаточное качество морфологии..., в) ... производилось завешивание образов на ... весах, г) «... температурой удержания облучаемой поверхности в течении импульса...», ...при удержании на трех...импульсах температуры в диапазоне 1800 - 2100 °С...». При этом автор использует и правильный термин: «Для обеспечения поддержания температуры поверхности ... образцов...», «...поддерживается постоянная температура поверхности...».

7. к.т.н., доцента, заведующего кафедрой «Материаловедение» ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» Плохих А.И. Замечание: «в качестве недостатка следует отметить незначительные неточности по тексту автореферата. Так например, на стр. 11 сказано, что «...поверхность диффузионных слоев повергается переплаву и рекристаллизации с равномерным растекании расплава...», при этом видимо имелся ввиду процесс кристаллизации расплава».

8. д.т.н., технического директора Подшипникового завода Сансьон (Китай) Хараева Ю.П. Замечания отсутствуют.

9. к.т.н., старшего преподавателя кафедры общей и теоретической физики ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет» Германа Е.И. Замечания отсутствуют.

10. к.т.н, доцента кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» Назарова А.Ю. Замечания: «В частности, при анализе фазового состава остается неопределенной роль многих идентифицированных фаз и их влияние на получаемые свойства.

Также возможно более детальное объяснение режимов, связанных с образованием диффузионных слоев, образующихся на поверхности в результате ХТО на стали 3Х2В8Ф при температуре 1050 °С, а также на стали 5ХНМ при температуре 950 ° толщиной до 650–850 мкм как наиболее перспективных для модификации электронными пучками, исходя из каких требований были выбраны данные режимы».

Все отзывы положительные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой квалификацией в научных областях, непосредственно связанных с темой диссертации. Ведущая организация является значимым научно-образовательным центром в подготовке инженерных и научных кадров по физико-техническим направлениям, металлургии и материаловедению. Сотрудники кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В. М. Финкеля могут дать полноценную экспертную оценку научной и практической значимости результатов работы. Официальные оппоненты Климов А.С. и Васенина И.В. – являются признанными специалистами в области физической электроники и физики конденсированного состояния, известны своими исследованиями по получению новых металлических, металлокерамических, керамических и полимерных материалов с использованием пучково-плазменного воздействия и изучению их физических и механических свойств.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: **разработана** научная концепция модификации структуры и свойств диффузионных бор- и алюминийсодержащих слоев на поверхности легированных сталей низкоэнергетическими импульсными электронными пучками. Использование модернизированного источника электронов с сеточным плазменным катодом обеспечило управляемое термическое воздействие, что расширило границы применимости полученных результатов для легированных сталей инструментального назначения. **Предложен** нетрадиционный подход к модификации диффузионных бор- и алюминийсодержащих слоев, основанный на последовательном применении

химико-термической обработки и электронно-пучкового воздействия с контролируемым вводом энергии. Этот подход позволил преодолеть недостатки традиционных методов упрочнения, такие как высокая хрупкость и низкое качество поверхности, за счет формирования мелкодисперсной эвтектической структуры с благоприятным распределением твердых фаз (Fe_2B) в матрице α-Fe. **Доказана** перспективность использования низкоэнергетических импульсных электронных пучков для целенаправленной модификации структуры и свойств диффузионных слоев на сталях 5ХНМ и 3Х2В8Ф. **Введены** новые понятия, связанные с описанием процессов управляемого термического воздействия на диффузионные слои с использованием импульсных электронных пучков. В частности, уточнены трактовки терминов, описывающих структурно-фазовые трансформации в зоне переплава, и предложены характеристики мелкодисперсной эвтектической структуры с дендритами твердого раствора бора и алюминия в α-Fe.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: **доказаны** положения о целесообразности использования низкоэнергетических импульсных электронных пучков в комбинированных упрочняющих технологиях, расширяющие границы применимости полученных результатов для целенаправленной модификации структурно-фазового состояния, микротвердости, коррекции остаточных напряжений и формирования финишной шероховатости поверхности; **применительно** к проблематике диссертации эффективно использован комплекс методов физического материаловедения: оптическая и электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ, атомно-силовая микроскопия, испытания на износ по схеме «кольцо-колодка»; **изложены** условия электронно-пучковой модификации диффузионных слоев, включающие предварительный нагрев электронным пучком (500 – 700 °С) и последующее облучение 12 импульсами длительностью ~1000 мкс в диапазоне температур 1000 – 2100°С; **раскрыты** механизмы формирования мелкодисперсной структуры диффузионных бороалитированных слоев при электронно-пучковой модификации; **изучены** связи между структурой, фазовым состоянием,

параметрами электронно-пучковой обработки и свойствами диффузионных слоев.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: **разработана и внедрена** технология упрочнения формообразующих поверхностей штамповой оснастки, прошедшая промышленные испытания на АО «Улан-Удэнский лопастной завод», а также результаты работы **внедрены** в образовательный процесс в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»; **определены** перспективы практического использования диффузионных слоев, модифицированных электронно-пучковой обработкой; **создана** система практических рекомендаций по выбору режимов электронно-пучковой обработки для формирования необходимых значений микротвердости, остаточных напряжений и шероховатости; **представлены** предложения по дальнейшему совершенствованию технологий упрочнения путем расширения применения электронно-пучковой модификации как финишной окончательной обработки формообразующих поверхностей деформирующих инструментов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: **для экспериментальных работ** результаты получены на современном и сертифицированном оборудовании (микроскопы MultiMode 8, JSM-6510LV JEOL, JIB-4501 JEOL, установка для определения остаточных напряжений УДИОН-2); **теория** электронно-пучковой модификации диффузионных слоев построена на известных фактах и согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации; **идея** комбинированного упрочнения диффузионных слоев базируется на обобщении передового опыта в области химико-термической обработки и исследований в области модификации материалов низкоэнергетическими импульсными электронными пучками; **использовано** сравнение авторских данных с результатами других авторов, чьи исследования были посвящены модификации металлов концентрированными потоками энергии и представленными в независимых источниках по тематике

диссертации; **использованы** современные методики сбора и обработки экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя состоит в: постановке задач, выборе экспериментальных и теоретических методов исследований, подготовке образцов, разработке способов упрочняющей обработки и их реализации, выполнении структурных исследований и испытаний свойств слоев, анализе полученных результатов, формулировке выводов, подготовке научных публикаций и выступлений на конференциях.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Соискатель Улаханов Николай Сергеевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел достаточную аргументацию значимости проведенных исследований и полученных результатов.

На заседании 21 мая 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Улаханову Николаю Сергеевичу ученую степень кандидата технических наук за решение научной задачи по комплексному повышению физико-механических свойств поверхности легированных сталей инструментального назначения, имеющей значение для развития машиностроительной отрасли.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них 10 докторов наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния участвовавших в заседании, из 12 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - 11, против - 0.

Председатель
диссертационного совета Номоев Андрей Валерьевич

Ученый секретарь
диссертационного совета Зеленая Анна Эдуардовна

21 мая 2025 года