ОТЗЫВ

дополнительного члена диссертационного совета ДС.ТПУ.07 о диссертации **Шевелёва Алексея Эдуардовича** «Формирование высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы вакуумной дуги», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Оценка актуальности темы диссертационной работы

Проблема разработки новых эффективных методов воздействия на материалы с целью направленного модифицирования их поверхностных свойств является по-прежнему актуальной и привлекает внимание многих исследователей во всём мире. Настоящая работа посвящена развитию нового метода направленного воздействия на металлические материалы с помощью высокоинтенсивных пучков заряженных частиц невысоких энергий (на уровне единиц кэВ). Создано оборудование, которое на основе плазмы дугового разряда позволяет генерировать ионные пучки с плотностью тока от нескольких десятков мА/см^2 до нескольких А/см^2, т.е. в диапазоне параметров, которые ранее не были освоены на практике. Их применение является весьма перспективным, так как в этом случае инициируется комплексное взаимодействие различных механизмов изменения структурно-фазового и элементного состояния поверхностных слоёв обрабатываемых материалов. Работа выполнялась в рамках гранта Российского научного фонда (№ 17-19-01169), что является дополнительным аргументом в подтверждение актуальности темы.

Решена комплексная задача, включающая развитие принципов формирования высокоинтенсивных ионных пучков металлов на основе плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда, в том числе разработку способов их транспортировки и фокусировки, избавления от капельной фракции, а также получение данных о влиянии этих пучков на структурно-фазовое состояние и функциональные свойства поверхностных слоёв облучаемых металлических материалов на примере никеля, титана и циркония.

Диссертация представлена на 158 страницах, содержит 56 рисунков и 6 таблиц. Она состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 177 источников.

Текст диссертации и публикации, в которых представлены результаты этой работы, свидетельствуют о том, что она в значительной степени выполнена автором. Некоторые исследования проводились совместно с коллегами, что отражено в опубликованных статьях и ссылках на них в тексте диссертации.

Оценка степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, достоверности полученных результатов

Научные положения, вынесенные на защиту, базируются на систематическом изучении процессов плазменно-иммерсионного формирования высокоинтенсивных пучков ионов, комплексном анализе результатов экспериментальных исследований, применением современных методов диагностики, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик. Поэтому их обоснованность и достоверность представляется вполне убедительной. Выявленные закономерности подтверждены полученными экспериментальными данными. Они согласуются с теоретическими положениями и с результатами других исследователей. Выводы и заключения являются логичными и последовательными. Они отражают суть проведённых исследований.

Новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Сформулированные принципы плазменно-иммерсионного формирования высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда являются новыми.

2. Разработан новый метод полной очистки фокальной области пучка от макрочастиц.

3. Предложен новый способ обеспечения условий нейтрализации высокоинтенсивного пучка металлических ионов, сформированного на основе плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда.

4. Впервые показана возможность применения пучков металлических ионов с плотностью тока от 10 до 200 мА/см^2 с энергией ионов в единицы кэВ для высокоинтенсивного легирования металлов и сплавов.

Значение выводов и рекомендаций для науки и практики

Разработан метод генерации высокоинтенсивных пучков металлических ионов на основе плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда. Показана перспективность использования пучков с обеспечиваемыми этим методом параметрами для высокоинтенсивного легирования металлов и сплавов с глубиной модифицированного слоя, существенно превышающей проективные пробеги бомбардирующих ионов. Предложен эффективный способ очистки генерируемых пучков металлических ионов от капельной фракции, являющейся нежелательным продуктом вакуумно-дугового разряда.

Основные результаты исследования опубликованы в 24 статьях, 14 из которых в рецензируемых изданиях, индексируемых в наукометрической базе Scopus, в том числе 7 статей в журналах 1 (Q1) и 2 (Q2) квартилей, не

менее 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 10 публикаций в трудах международных конференций. Публикации отражают основные результаты и выводы диссертации. Основные положения апробированы на научных конференциях разного уровня.

Замечания по диссертации.

1. Решение задачи полной очистки ионного пучка от макрочастиц есть один из наиболее важных результатов диссертационной работы. При этом система фильтрации типа «солнечное затмение» здесь сыграла очень важную роль. Однако ни в автореферате, ни в тексте диссертации, кроме ссылки на источник в научной литературе, нет описания этой системы даже в самых общих чертах.

2. В работе использован термин «термодиффузия» для объяснения механизма усиления диффузионного переноса в результате значительного повышения температуры образца в процессе облучения. Это представляется не вполне корректным, так как в научной литературе принято называть термодиффузией явление усиления массопереноса за счёт очень высоких градиентов температуры, т.е. порядка 10^9 К/м. Подобные значения градиентов температуры свойственны воздействию мощных импульсных пучков заряженных частиц, и их, скорее всего, не может быть в исследуемой ситуации.

3. Применение термина «дифракционные паттерны» вместо общепринятого «рентгенограммы» (или «дифрактограммы») представляется излишне надуманным.

4. Метод измерения температуры образцов в процессе облучения и точность этого метода не указаны в тексте диссертации. Также не ясно, что понимается автором под интегральной температурой, температурным режимом. Дело в том, что нагрев за счёт действия пучка является неравномерным, причём температура изменяется в течение времени облучения.

Заключение

Перечисленные замечания не являются принципиальными, не опровергают основные результаты работы и не снижают высокую оценку проведённого исследования.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, основные результаты и выводы по работе. Публикации автора достаточно полно это представляют. Диссертация хорошо апробирована.

Представленные в работе результаты исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы. Работа выполнена на высоком теоретическом, экспериментальном и профессиональном уровне.

Поставленные цели исследований и основные задачи соответствуют полученным результатам.

Считаю, что диссертационная работа Шевелёва А.Э. отвечает всем критериям, установленным требованиями п.п. 8-12 Порядка присуждения учёных степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (Приказ № 93/од от 06.12.2018 г.).

Основываясь на вышеизложенном, считаю, что диссертационная работа «Формирование высокоинтенсивных пучков ионов металлов низкой энергии на основе плазмы вакуумной дуги» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и содержащей значимые научные и практические результаты, а её автор Шевелёв Алексей Эдуардович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Дополнительный член диссертационного совета ДС.ТПУ.07 **Блейхер Галина Алексеевна**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга инженерной школы ядерных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, проспект Ленина, дом 30, тел. 8 (3822) 606-339, электронный адрес: bga@tpu.ru .

Подпись Блейхер Г.А. заверяю:

Учёный секретарь Учёного совета ТПУ О.А. Ананьева