

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 23 июня 2017 года публичной защиты диссертации Чепак-Гизбрехт Марии Владимировны «Моделирование процессов в диффузионной зоне в условиях поверхностной термообработки с учетом эффекта Соре» по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 20 из 26 членов диссертационного совета, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

1. Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2. Васенин Игорь Михайлович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
3. Пикущак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
4. Архипов Владимир Афанасьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
5. Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
6. Бубенчиков Алексей Михайлович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
7. Бутов Владимир Григорьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
8. Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
9. Глазырин Виктор Парфирьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
10. Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
11. Кульков Сергей Николаевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
12. Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
13. Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
14. Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
15. Смоляков Виктор Кузьмич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
16. Старченко Александр Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
17. Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
18. Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
19. Шрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
20. Шрагер Эрнст Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14

В связи с невозможностью присутствия на заседании председателя диссертационного совета доктора физико-математических наук, профессора Гришина Анатолия Михайловича (по состоянию здоровья), по его письменному поручению заседание провёл заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить М.В. Чепак-Гизбрехт учёную степень кандидата физико-математических наук.

Заключение диссертационного совета Д 212.267.13
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 23.06.2017, № 314

О присуждении **Чепак-Гизбрехт Марии Владимировне**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Моделирование процессов в диффузионной зоне в условиях поверхностной термообработки с учетом эффекта Соре»** по специальности **01.04.14** – Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 24.03.2017, протокол № 307, диссертационным советом Д 212.267.13 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Чепак-Гизбрехт Мария Владимировна**, 1990 года рождения.

В 2013 году соискатель окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В 2016 году соискатель очно окончила аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Работает в должности программиста учебно-научной межотраслевой междисциплинарной лаборатории «Моделирование физико-химических процессов в современных технологиях» в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре физики высоких технологий в машиностроении федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Князева Анна Георгиевна**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра физики высоких технологий в машиностроении, профессор.

Официальные оппоненты:

Чернов Андрей Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория процессов переноса, ведущий научный сотрудник

Рыжков Илья Игоревич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», отдел вычислительной физики обособленного подразделения – Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт прикладной механики Российской академии наук**, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном **Беловым Петром Анатольевичем** (доктор физико-математических наук, лаборатория «Неклассические модели механики композиционных материалов и конструкций», ведущий научный сотрудник) и **Волковым-Богородским Дмитрием Борисовичем** (кандидат физико-математических наук, лаборатория «Неклассические модели механики композиционных материалов и конструкций»,

едущий научный сотрудник), указала, что актуальность диссертационной работы М.В. Чепак-Гизбрехт определяется тем, что в настоящее время математическое моделирование становится одним из основных средств исследования физико-механических эффектов, наблюдающихся в технологических процессах с использованием электронно-лучевых, пучково-плазменных и электроимпульсных видов обработки. Так, высокие градиенты температуры, которые возникают в ходе обработки, могут существенно влиять на процессы переноса легирующих примесей и приводить к их неоднородному перераспределению, создавая градиентную структуру материала. В рамках проделанной соискателем работы построены математические модели частных задач, которые имеют непосредственное отношение к исследованию проявления эффекта Соре в различных видах высокотехнологичной обработки; построены аналитические решения частных задач, которые могут быть использованы для качественной оценки вклада эффекта Соре в условиях нестационарной термообработки. Решения могут быть использованы для оценки корректности частных вариантов численных решений более сложных моделей, учитывающих взаимозависимость полей температуры, концентрации и напряжений.

Соискатель имеет 25 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 20 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 5, в зарубежных электронных научных журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus – 6, в зарубежном научном журнале – 1, в сборнике научных трудов – 1, в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций – 7. Общий объем публикаций – 11,11 п.л., авторский вклад – 7,62 п.л.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Князева А. Г. Неизотермическая диффузия в бинарной системе / А. Г. Князева, М. В. Гизбрехт (Чепак-Гизбрехт) // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 54, № 11/3. – С. 39–46. – 1 / 0,5 п.л.

2. Князева А. Г. Влияние термодиффузии на перераспределение элементов и механические напряжения при обработке поверхности металла потоком частиц / А. Г. Князева, **М. В. Чепак-Гизбрехт** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 12/2. – С. 39–45. – 0,88 / 0,44 п.л.

3. **Чепак-Гизбрехт М. В.** Диффузия между структурными элементами в условиях локального тепловыделения / М. В. Чепак-Гизбрехт // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 6/2. – С. 301–305. – 0,63 п.л.

В диссертации отсутствуют достоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На автореферат поступило 5 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **П.В. Трусов**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой математического моделирования систем и процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета, *с замечаниями* о недостаточности внимания обоснованию и объяснению принятых при постановке задач гипотез, например, не ясно, можно ли свести задачу о воздействии локальных источников тепла к одномерной; о сомнении в возможности сведения задачи исследования напряженно-деформированного состояния системы покрытие – подложка к задачам об однослойных или многослойных пластинах; об отсутствии должного внимания анализу влияния остаточных напряжений (особенно 2-го и 3-го рода), неминуемо возникающих в процессах термообработки, на рабочие характеристики обработанных деталей.
2. **Ю.О. Соляева**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Московского авиационного института (национально-исследовательского университета), *с замечанием* к результатам работы, представленным в автореферате на рис. 4 (стр. 14): уровень напряжений на границе контакта материалов составляет более 20ГПа, что превышает прочность конструкционных материалов в 10-20 раз и представляется нереалистичным.
3. **Г.В. Алексеев**, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник научно-исследовательской группы вычислительной аэрогидродинамики Института прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток, *с вопросом*: можно ли предложить способ определения коэффициентов термодиффузии, основанный на

использовании построенных в диссертации решений? 4. **К.А. Штым**, д-р техн. наук, проф., заместитель директора Инженерной школы по научной работе, заведующий кафедрой теплоэнергетики и теплотехники Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток, и **О.Н. Любимова**, канд. физ.-мат. наук, доц., профессор кафедры механики и математического моделирования Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток, *с вопросами*: В автореферате при описании результатов по анализу термодиффузии на напряжения в сопряженной системе не совсем понятно, почему коэффициент Сорэ равен нулю, и чем объясняется более высокий уровень напряжений в вязкоупругой среде по сравнению с упругой (рис. 4 б, стр. 14)? Для вязкоупругих сред (элементарного стекла, полимеров) вязкость зависит не только от температуры, но и от концентрации, учитывалась ли подобная зависимость при расчетах? 5. **А.И. Ливашвили**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Высшая математика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, г. Хабаровск, *с замечанием*: в автореферате используется линеаризованная форма для диффузионного потока без указания на область его применения; $C_1 \ll 1$.

В отзывах отмечается, что актуальность диссертационного исследования М.В. Чепак-Гизбрехт обусловлена необходимостью создания математических моделей, построению и анализу аналитических решений для установления рациональных режимов обработки поверхности и элементов конструкций с использованием электронно-лучевых, ионных и других высокоэнергетических источников нагрева, приводящих к неоднородному распределению легирующих элементов и появлению напряжений вследствие термодиффузии. В диссертационной работе автором сформулированы, решены и исследованы модели формирования диффузионной зоны с учетом эффекта Сорэ в условиях локального нестационарного нагрева в одномерном приближении. Продемонстрированы характер влияния термодиффузии на напряжения и деформации слоистых структур. Научная новизна работы заключается в построении и анализе новых аналитических решений краевых задач, описывающих влияние эффекта Сорэ на перераспределение используемых для модификации легирующих добавок в условиях нестационарного нагрева. В работе получен ряд новых научных результатов, в том числе: выявлены условия, при

которых эффект Соре влияет на массоперенос легирующих элементов, впервые сформулированы и исследованы модели формирования диффузионной зоны в условиях поверхностной термообработки с учетом эффекта Соре, найдены основные параметры и безразмерные комплексы, отражающие влияние термодиффузии на перераспределение элементов, дана оценка механических напряжений, возникающих в диффузионной зоне, показано влияние термодиффузии на напряженно-деформируемое состояние для упругих и вязкоупругих материалов. Практическая значимость работы заключается в возможности использования аналитических решений для качественного анализа влияния термодиффузии на процессы модификации поверхностных слоев, в технологических процессах поверхностной термообработки; определяется возможностью применения полученных аналитических решений в качестве тестовых для верификации результатов расчетов, получаемых с использованием численных методов моделирования в более сложной постановке. Сформулированные задачи и полученные решения представляют научный и практический интерес в области исследования воздействия высокоэнергетических потоков на материал с целью модификации его свойств, для качественного анализа термодиффузионных эффектов в технологических процессах поверхностной и локальной термообработки материалов. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием классических аналитических методов (интегральные преобразования и асимптотические разложения), их внутренней непротиворечивостью и физическим смыслом.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **А.А. Чернов** является профессором Российской академии наук и известным специалистом в вопросах математического моделирования тепло- и массопереноса, происходящих в процессах объемной кристаллизации в многофазных средах в сильно неравновесных условиях; **И.И. Рыжков** является одним из ведущих специалистов в вопросах математического моделирования тепломассообмена в многокомпонентных смесях с учетом конвективной устойчивости и вибрации, специализируется на исследовании групповых свойств дифференциальных уравнений, входящих в задачи конвекции, переноса тепла, диффузии и термодиффузии; **Институт прикладной механики РАН** известен

своими достижениями в области развития современных теоретических, вычислительных и экспериментальных подходов, исследовательских технологий в физико-химической механике прочности и разрушения твердых тел, механике структурированных и гетерогенных сред, механике высокоскоростных процессов и других областей механики.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

выявлены условия, в которых эффект Соре влияет на массоперенос компонентов. *Сформулированы* частные задачи о перераспределении с учетом эффекта Соре: компонентов между покрытием и подложкой в условиях нагрева покрытия, легирующего элемента, внедряемого при имплантации, диффузанта при соединении разнородных материалов в условиях локального нагрева, диффузанта при соединении материалов в условиях неизотермической диффузионной пайки;

построены аналитические решения сформулированных задач, *выявлены* основные параметры и безразмерные комплексы, отражающие влияние термодиффузии на перераспределение компонентов;

расчетами *показано*, что эффект Соре оказывает влияние на количество вещества, проходящее через границу контакта материалов покрытия и подложки, может приводить к оттоку компонентов от нагреваемой поверхности покрытия, способствует появлению максимумов и минимумов в распределении компонентов на некотором расстоянии от границы между покрытием и подложкой;

обнаружено, что термодиффузия приводит к оттоку имплантированных компонентов от обрабатываемой поверхности вглубь материала с образованием максимума (особенно в материалах с низкой теплопроводностью);

на примере решения задач о массопереносе с учетом термодиффузии в зоне контакта *показано*, что на начальной стадии процесса эффект Соре способствует ускорению диффузионных процессов и содействует образованию контактов между соединяемыми материалами;

на основе полученных аналитических решений задач тепло- и массопереноса, с использованием известных из теории термоупругости решений

задач о механическом равновесии для тонких упругих пластин и полученных на их основе с помощью метода аналогий решений для вязкоупругих тонких пластин *продемонстрировано* влияние эффекта Соре и вязкости на профиль распределения компонент тензора напряжений и деформаций;

выявлено, что эффект Соре приводит к возникновению экстремумов в профиле распределения компонент напряжений и деформаций, а напряжения тем выше по абсолютной величине, чем выше коэффициенты диффузии и термодиффузии. Диффузионные и термодиффузионные напряжения локализованы вблизи границы контакта материалов покрытия и подложки, их модуль превышает термические напряжения в несколько раз;

установлено, что учет вязкости существенен при рассмотрении начальной стадии термообработки; *продемонстрировано* увеличение напряжений и уменьшение деформаций по абсолютной величине при увеличении коэффициента термодиффузии.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

получены аналитические решения важных задач, которые могут быть использованы для верификации и отладки программ, написанных для решения более сложных задач термодиффузии.

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

получены решения, анализ которых позволяет оценить вклад эффекта Соре в процесс перераспределения компонентов в таких технологических процессах, как нагрев материала с покрытием электронным лучом, легирование с помощью имплантации, электроконтактное спекание и диффузионная сварка.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Полученные в рамках исследования решения и результаты их анализа рекомендуется учитывать при интерпретации данных экспериментов и при моделировании технологических процессов модификации поверхности и получения неразъемных соединений с использованием пучков заряженных частиц, магнитных и электрических полей в неравновесных условиях, в том числе с учетом химических и фазовых превращений.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

математические модели построены на основе линеаризованных соотношений, известных из термодинамики необратимых процессов;

сформулированные задачи и принятые при их построении допущения соответствуют условиям, которые реализуются в диффузионной зоне материалов, находящихся в условиях нестационарного нагрева в ходе исследуемых технологических процессов;

для решения задач использованы хорошо зарекомендовавшие себя в теплофизике методы, а именно интегральные преобразования Лапласа и асимптотические разложения по большим значениям комплексной переменной, которые соответствуют малым временам, которые характерны для исследуемых процессов;

полученные аналитические решения согласуются с известными аналитическими решениями в случае, когда эффект Соре отсутствует, они не противоречат численным решениям, полученным в случае, когда коэффициенты диффузии и термодиффузии зависят от температуры.

Анализ полученных результатов показал, что результаты качественно согласуются с данными, имеющимися в литературе.

Новизна результатов диссертационного исследования заключается в комплексном подходе к исследованию эффекта Соре в различных видах технологий, в которых в качестве источника нагрева используют потоки заряженных частиц и энергии. В работе впервые получены аналитические решения частных задач о перераспределении компонентов в переходной зоне с учетом эффекта Соре в условиях локального нестационарного нагрева, в том числе получены решения задачи о перераспределении компонентов между покрытием и подложкой в условиях поверхностного нагрева, задачи о перераспределении легирующего элемента, внедряемого в ходе имплантации, задачи о соединении разнородных материалов при локальном нагреве, задачи о соединении материалов в условиях неизотермической диффузионной пайки. Впервые продемонстрировано влияние эффекта Соре на напряжения и деформации для упругого и вязкоупругого материалов.

Личный вклад соискателя состоит в: построении аналитических решений всех частных задач, представленных в диссертации, анализе полученных результатов, их иллюстрации и формулировке научных выводов на их основе, подготовке и написанию публикаций по теме диссертации. Сопоставление решений, полученных аналитическими и численными методами, автор проводила совместно с научным руководителем и со старшим научным сотрудником лаборатории компьютерного моделирования материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск), кандидатом физико-математических наук О.Н. Крюковой. Постановку задач и построение асимптотических разложений решений в пространстве изображений автор проводила совместно с научным руководителем.

Диссертация отвечает критериям Положения о присуждении ученых степеней, установленным для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по теоретическому исследованию вклада эффекта Соре в процессы массопереноса в условиях нестационарного нагрева материалов, имеющей значение для развития теплофизики и теоретической теплотехники.

На заседании 23.06.2017 диссертационный совет принял решение присудить **Чепак-Гизбрехт М.В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета
Ученый секретарь
диссертационного совета



Христенко Юрий Федорович

Пикушак Елизавета Владимировна

23.06.2017