


«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и инновационной  
деятельности ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский  
горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет)»  
\_\_\_\_\_ Е.А.Хадзарагова



« 24 » июня 2019 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Диссертация «Контактное плавление и фазообразование макро-, микроразмерных систем медь-алюминий, никель-алюминий, никель-олово» выполнена на кафедре физико-математических дисциплин ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)».

В период подготовки диссертации соискатель Лайпанов Мурат Занарустумович работал на кафедре физики ФГБОУ ВО «Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева» в должности старшего преподавателя.

В 2001 г. окончил физико-математический факультет Карачаево-Черкесского государственного педагогического университета по специальности «Учитель физики и вычислительной техники». В 2004 г. окончил аспирантуру этого же ВУЗа по специальности «Физика конденсированного состояния».

Справка об обучении в аспирантуре и сдаче кандидатских экзаменов выдана 25 июня 2019 г. ФГБОУ ВО «Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева».

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Созаев Виктор Адыгеевич (ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»).

Работа Лайпанова М.З. заслушивалась на совместном заседании кафедры электронных приборов и кафедры физико-математических дисциплин.

### Присутствовали:

Председатель заседания – Козырев Е. Н., доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электронных приборов (05.27.01)

Секретарь заседания – Гудиева О. В., кандидат физико-математических наук, ассистент (01.04.15)

Созаев В. А., доктор физико-математических наук, профессор (01.04.14)

Магкоев Т. Т., доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО Северо-Осетинского государственного университета (01.04.07)

Каменецкий Е. С., доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Южного математического института – филиала федерального государственного бюджетного учреждения науки научного центра «Владикавказский научный центр РАН», доцент (25.00.30)

Хасцаев Б. Д., доктор технических наук, профессор (05.11.05)

Мустафаев Г. А., доктор технических наук, профессор (05.27.01)

Гончаров И. Н., доктор технических наук, доцент (05.27.01)

Агаев В. В., кандидат физико-математических наук, доцент (01.04.10)

Касумов Ю. Н., кандидат физико-математических наук, доцент (01.04.10)

Мерзлов В. С., кандидат технических наук, доцент (05.27.01)

Дедегкаева В. В., кандидат технических наук, доцент (05.27.01)

Ширяев А. В., кандидат технических наук, доцент (05.27.01)

Гегуева М. М., лаборантка

Манукянц А.Р., кандидат физико-математических наук, доцент (01.04.07)

Лайпанов М.З. – соискатель

ВСЕГО ПРИСУТСТВОВАЛО – 15 человек, из них с правом решающего голоса – 14 специалистов, по профилю данной специальности – 2 человека.

Лайпанов М.З. сделал десятиминутный доклад, в котором изложил результаты диссертационной работы.

Рецензенты диссертации:

Магкоев Т.Т. – доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой физики конденсированного состояния ФГБОУ ВПО Северо-Осетинского государственного университета;

Каменецкий Е. С. – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Южного математического института – филиала

федерального государственного бюджетного учреждения науки научного центра «Владикавказский научный центр РАН», доцент;

Гончаров И.Н. – доктор технических наук, доцент кафедры электронных приборов ФГБОУ ВО Северо-Кавказского горно-металлургического института (ГТУ).

**Соискателю были заданы следующие вопросы:**

1. Д. ф.-м. н., проф. Козырев Е.Н.: Расскажите об актуальности диссертации.
2. Д. ф.-м. н., проф. Магкоев Т.Т.: Какова методика получения тонких пленок и какой минимальной толщины пленки вами изучались?
3. Д. ф.-м. н., проф. Козырев Е.Н.: В чем новизна Ваших результатов.
4. Д. т. н., доцент Гончаров И.Н.: Есть ли внедрение предлагаемых Вами технологий?

На заданные вопросы соискатель дал обстоятельные и исчерпывающие ответы.

С положительной оценкой работы выступили рецензенты:

Д.ф.-м.н., проф. Магкоев Т.Т.:

Диссертационная работа Лайпанова М.З. представляет собой целенаправленное законченное исследование, выполненное на интересных и сложных объектах, имеющее практическую ценность и содержащее новые результаты, достоверность которых не вызывает сомнений. Автором использован комплекс методов атомно-силовой и растровой микроскопии. Замечания по работе малочисленны. Диссертация может быть представлена к защите на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Д. ф.-м. н., проф. Козырев Е.Н.:

Работа Лайпанов М.З. содержит новые результаты. Одно из несомненных достоинств работы – авторские разработки. В целом работа может быть представлена к защите по специальности «Физика конденсированного состояния».

Д. т. н., доцент Гончаров И.Н.:

Результаты работы могут найти практическое применение, а сам Лайпанов М.З. может быть допущен к защите по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

**Личный вклад автора**

Диссертация в целом является итогом самостоятельной работы автора. Цель и задачи были поставлены научным руководителем Созаевым В.А.

Эксперименты проводились с участием сотрудников лаборатории физики межфазных границ и наноматериалов ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет).

**Достоверность результатов работы:** результаты диссертации физически обоснованы и согласуются с современными представлениями в области физики контактного плавления.

Применение современных методов анализа поверхности растровой электронной и атомно-силовой микроскопии, рентгенофазового анализа позволяют повысить надежность исследований фазообразования в контактных прослойках по сравнению с ранее известными методами.

Выносимые на защиту положения диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, относящихся к списку ВАК, доложены на Всероссийских и Международных конференциях.

**Научная новизна** полученных автором результатов заключается в:

1. Впервые с использованием растровой электронной микроскопии изучены сколы контактной прослойки, полученной при КП в нестационарно-диффузионном режиме меди с алюминием при температуре  $570^{\circ}\text{C}$ . Обнаружены фрагменты фазы  $\text{CuAl}_2$  размером 10-15 мкм и пластинчатые фазы длиной 70-200 мкм и шириной 10 мкм.
2. В нестационарно-диффузионном режиме, в вакууме  $10^{-2}$  Па при температуре  $556^{\circ}\text{C}$  в течении 26 мин осуществлялось КП меди с алюминием (образцы располагались следующим образом: снизу медь, сверху алюминий с заостренным концом). Скорость КП  $\langle v_{\text{КП}} \rangle \sim 1.42 \cdot 10^{-8}$  м/с выше, чем у образцов с плоскими торцами, что объясняется более интенсивным взаимодействием в начальный момент времени, когда может проявляться размерный эффект КП.
3. Впервые осуществлено КП меди с алюминием марки АМГ-2, содержащей от 1.8 до 2.8 масс% Mg-(щелочноземельной добавки) и меди с литий содержащим сплавом Al-0.4 атм.% Li. Показано, что добавки щелочных и щелочноземельных элементов повышают скорость КП. На шлифах контактных прослоек наблюдаются эвтектические структуры и интерметаллиды.
4. Показано, что причиной охрупчивания спая меди с алюминием являются интерметаллиды, образовавшиеся на межфазной границе.
5. Впервые получена зависимость средней скорости  $\langle v \rangle$  контактного плавления металлов с твердыми растворами от радиуса ячеек Вигнера-Зейтца  $r_s$  атомов примеси. Показано, что эта зависимость близка к линейной и по ней можно предсказывать скорости КП в том числе и при КП нанокластеров.

6. Изучена морфология поверхности двухслойной пленки Cu/Al при контактном плавлении, с использованием растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. Обнаружены эвтектики и интерметаллиды кубической формы  $AlCu_4$  на поверхности бинарных пленок Cu-Al, которые подтверждаются рентгенофазовым анализом.
7. Изучена морфология поверхности двухслойной пленки Ni/Al обнаружено, что после отжига при  $650^\circ C$  появляются эвтектические структуры.
8. Изучена морфология поверхности пленки олова, напыленной на никелевую фольгу марки НП-2. Обнаружено, что при напылении пленок на подложки НП-2, нагретые до  $200^\circ C$ , на пленках образуются сферические фазы. Дополнительный отжиг биметаллических композиций  $Ni/Sn$  при  $200^\circ C$  в вакууме в течение одного часа приводил к образованию эвтектических фаз  $Ni_m/Sn_n$ , что указывает на контактное плавление при диффузионном взаимодействии олова и никеля.

**Практическая ценность работы:** новые экспериментальные данные о КП меди с алюминием и фазообразовании в контактных прослойках могут быть использованы для развития теории высокотемпературного КП и оптимизации технологии контактно-реактивной пайки меди и алюминия.

Материалы диссертации используются при чтении спецкурса «Фазовые переходы в наноматериалах» для студентов по направлениям 03.02.03 - физика, бакалавр, 03.04.03 - физика, магистр.

**Актуальность темы исследования.**

Знание закономерностей диффузионного взаимодействия металлов позволяет управлять процессом контактного плавления, что имеет, большое значение, для получения биметаллов и получения новых композиционных материалов методом жидкофазного спекания, а так же для совершенствования технологий металлизации керамик, полупроводников и контактно-реактивной пайки. Хотя и имеется довольно весомый объем исследований по фазовым превращениям меди с разнородными высокотемпературными металлами, приводящим к контактному плавлению, но все же пока недостаточно данных по высокотемпературному контактному плавлению металлов.

На данном этапе развития нанотехнологий открываются возможности получения совершенно новых, высокодисперсных, наноструктурированных и наноконпозиционных припоев, а так же систем металлизации полупроводников и изделий из керамик.

Использование микро- и нанокристаллических порошков тугоплавких металлов и их оксидов в системах металлизации, а так же, для армирования припоев приводит к повышению капиллярных сил, увеличению массопереноса на межфазной границе припой – твердое тело, усилению растворимости и эффектов смачивания.

Всего по теме диссертации М.З. Лайпанов опубликовано 16 печатных работ, из них 7 статей в журналах, входящим в перечень ВАК РФ.

1. Коротков П. К., Лайпанов М.З., Манукянц А. Р., Понежев М. Х., Созаев В. А., Мусуков Р.А. Микроструктура межфазных границ в контакте меди с алюминием // Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы, 2013, с. 154-157.
2. Ахкубеков А.А., Елекоева К.М., Коротков П.К., Лайпанов М.З., Созаев В.А. Зависимость скорости контактного плавления металлов с твердыми растворами от радиуса ячейки Вигнера-Зейтца примеси // Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива-2013», Нальчик, КБГУ 2013 Т.4, с. 126-129.
3. Korotkov P.K., Manukyants A.R., Sozaev V.A., Ponezhev M.K., Laypanov M.Z. Microstructure of contact layers formed by the contact melting of copper and aluminum. // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014. Т. 8. № 4. С. 722-725
4. Коротков П. К., Лайпанов М. З., Манукянц А. Р., Понежев М. Х., Созаев В. А. Микроструктура контактных прослоек, образовавшихся при контактном плавлении меди с алюминием // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2014, № 7, с. 109–112 (из списка ВАК).
5. Ахкубеков А.А., Коротков П. К., Лайпанов М. З., Манукянц А. Р., Понежев М. Х., Созаев В.А. Структура контактной прослойки в системе медь-алюминий // Труды 17 международного симпозиума «Порядок, беспорядок и свойства оксидов», 5-10 сентября 2014, г. Ростов –на-Дону- п. Южный, с. 376-379.
6. Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Багов А.М., Зубхаджиев М.-А.В., Коротков П.К., Лайпанов М.З., Понежев М.Х., Созаев В.А. Влияние геометрии образцов на кинетику и структуру контактных прослоек // Известия РАН. Серия физическая, 2015, том 79, №11, с. 1548-1552.
7. Ahkubekov A.A., Korotkov P.K., Laipanov M.Z., Manukyants A.R., Ponezhev M.Kh., Sozaev V.A. Contact melting of copper with aluminium (тезис) // Abstract of International Conference High Temperature Capillarity HTC-2015, 2015.p.32.
8. Ахкубеков А.А., Коротков П.К., Лайпанов М.З., Манукянц А.Р., Понежев М.Х., Созаев В.А. Скорость контактного плавления и фазообразование в системе медь/алюминий амг-2 // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2016. № 8. С. 32-35.
9. Ахкубеков А.А., Коротков П.К., Лайпанов М.З., Манукянц А.Р., Понежев М.Х., Созаев В.А. Контактное плавление и фазообразование в системе медь/алюминий марки амг-2. // В сборнике: Физика поверхностных

- явлений, межфазных границ и фазовые переходы Труды Международного междисциплинарного симпозиума. 2016. С. 85-88.
10. Ahkubekov A.A., Korotkov P.K., Laypanov M.Z., Manukyants A.R., Ponegev M.Kh., Sozaev V.A., Khubolov B.M. The phase transformation in process of contact melting in copper-aluminum system // XV international conference on intergranular and interphase boundaries in materials (iib-2016) book of abstracts. 2016. с. 137.
  11. Ахкубекова С.Н., Кумыков В.К., Лайпанов М.З., Манукянц А.Р., Созаев В.А., Хуболов Б.М. Диффузионное взаимодействие и фазообразование в пленках никель-алюминий // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2017. № 9. С. 45-48.
  12. Елекоева К.М., Коротков П.К., Лайпанов М.З., Манукянц А.Р., Созаев В.А., Хуболов Б.М. Фазообразование на границе двухслойной пленки медь-алюминий // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2017. № 9. С. 182-188.
  13. Кумыков В.К., Лайпанов М.З., Манукянц А.Р., Созаев В.А., Хуболов Б.М. Контактное плавление в системе никель-алюминий // Труды Международного симпозиума «Упорядочение в минералах и сплавах (ОМА-20)», 2017, Вып.20, Т.1. – С.213-216.
  14. Ахкубеков А.А., Далакова Н.В., Лайпанов М.З., Манукянц А.Р., Созаев В.А., Хуболов Б.М. Диффузионное взаимодействие двухслойных пленок медь-алюминий // В трудах Международного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (PSP & PT) (Нальчик – Туапсе, 2017.)
  15. Лайпанов М.З., Манукянц А.Р., Созаев В.А., Хуболов Б.М. Диффузионное взаимодействие в системе пленка олова-никель // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2018. № 10. С. 427-433.
  16. Далакова Н.В., Кумыков В.К., Лайпанов М.З., Манукянц А.Р., Созаев В.А., Хуболов Б.М. Диффузионное взаимодействие в системы никель-алюминий // В сборнике: Порядок, беспорядок и свойства оксидов Материалы 21-й Международного междисциплинарного симпозиума. 2018. С. 132-135.

Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

**Результаты работы докладывались на:** 15 международном, междисциплинарном симпозиуме «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-15)(Лоо, 2012), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива -2013» (Нальчик 2013), 17

международном, междисциплинарном симпозиуме «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ODPO) (Туапсе, 2014), 16 международном, междисциплинарном симпозиуме «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (PSP PT) (Нальчик-Туапсе, 2015), на международной конференции «Высокотемпературная капиллярность» (НТС-2015) (Карлсруэ, Германия, 2015), на международных симпозиумах «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (PSP & PT) (Нальчик – Туапсе, 2017), «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА) (Нальчик – Туапсе, 2017), 21 международном симпозиуме «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ODPO) (г. Москва – г. Ростов-на-Дону – пос. Шепси, 2018).

## ПОСТАНОВИЛИ

**Диссертация «Контактное плавление и фазообразование макро-, микроразмерных систем медь-алюминий, никель-алюминий, никель-олово» Лайпанова Мурата Занарустумовича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».**

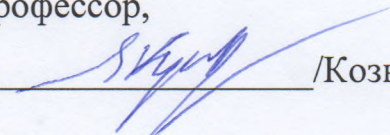
Заключение принято на совместном заседании кафедры электронных приборов и кафедры физико-математических дисциплин ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 8 от 24 июня 2019 г.

Председатель заседания кафедр

Физико-математических дисциплин и электронных приборов

ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ), д. т. н., профессор,

зав. кафедрой электронных приборов  /Козырев Е. Н./

Секретарь заседания, к. ф.-м. н., асс. кафедры

физико-математических дисциплин  /Гудиева О. В./