

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе и
подготовке кадров высшей
квалификации ФГБОУ ВО
«Донской государственный
технический университет»

д.т.н., профессор

Бескопильный А.Н.



2019г.

Отзыв

ведущей организации - ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» - на диссертацию Лайпанова Мурата Занарустумовича «Контактное плавление и фазообразование макро-, микроразмерных систем медь-алюминий, никель-алюминий, никель-олово», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации обуславливается тем, что знание закономерностей контактного плавления (КП) твердых растворов с тугоплавкими металлами позволяет управлять процессом КП путем подбора концентраций примесей. В то же время известно, что КП широко используется во многих практически важных технологических процессах. Поэтому подобные исследования находят применение для оптимизации технологий контактно-реактивной пайки, металлизации керамик и полупроводников, создания биметаллов и новых композиционных материалов методом жидкофазного спекания. Несмотря на значительное количество работ посвященных физике контактного плавления между различными веществами, в частности металлами, а так же фазовым переходам в твердом и жидком состоянии, данных о кинетике и структурообразовании между тугоплавкими металлами с использованием современных методов исследования (растровой электронной, атомно-

силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа и др.) практически отсутствуют.

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование процессов, протекающих в контакте систем разнородных металлов медь-алюминий, никель-алюминий, никель-олово приводящих к их контактному плавлению и процессов фазообразования в контактных прослойках. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Изучение контактного плавления в системах $Cu-Al$, $Cu-AMГ-2$ и $Cu-(Al-Li)$.
2. Определение взаимосвязи между скоростью КП металлов с твердыми растворами от радиуса ячейки Вигнера-Зейтца примеси.
3. Изучение влияния формы и размеров образцов на кинетику и структуру контактных прослоек.
4. Изучение фазообразования при взаимодействии пленок меди с алюминием, никеля с алюминием и никеля с оловом.

Заявленные в работе подходы к достижению поставленной цели, используемые методики и методы исследования вполне обоснованы и отвечают современному уровню требований при решении поставленных в работе задач, что способствовало выполнению их автором диссертационной работы, Лайпановым М.З. Литературный обзор структурирован и приведен в начальных результатах каждой главы.

Анализ содержания диссертационной работы по главам.

В первой главе диссертации представлен анализ современного состояния исследований по межфазным явлениям на границе разнородных металлов. Рассмотрено КП металлов и исследования межфазных явлений в контакте разнородных металлов в рамках различных электронных теорий. Рассмотрены также взаимодействия в низкоразмерных системах Cu/Al и КП нанопленок металлических систем.

Во второй главе диссертации приводятся характеристики объектов исследования и методы их получения, рассматривается методика исследования КП металлов. Изложены также методики применения рентгенофазового анализа контактных прослоек, использования оптической, электронной и атомносиловой микроскопии.

В третьей, заключительной главе рассмотрены результаты исследования механизма КП в системе медь – чистый алюминий и кинетика роста контактной прослойки. Так же изучена кинетика контактного плавления и фазообразование в контактных прослойках системы Cu–АМГ-2 и Cu–Al-0,4 ат % Li. Рассмотрено влияние внешних воздействий на температуру жидкофазного перехода в контакте между разрыхленными пленками и наночастицами. Автором изучено влияние формы и размеров образцов на механизм фазообразования при контактном плавлении. Проведено и исследовано диффузионное взаимодействие в двухслойных пленках медь-алюминий, никель-алюминий, никель-олово, а так же межфазная энергия на границе двух разнородных металлов.

Новизна научных исследований и полученных результатов. Выводы и рекомендации:

1. Впервые с использованием растровой электронной микроскопии изучены сколы контактной прослойки, полученной при контактном плавлении меди с алюминием при температуре 570°C в нестационарно-диффузионном режиме. Выявлены фрагменты на основе интерметаллида $CuAl_2$ размером 10-15 мкм и пластинчатые фазы длиной 70-200 мкм и шириной 10 мкм.
2. Контактное плавление меди с алюминием осуществлялось при температуре 556°C в течении 26 мин (образцы располагались следующим образом: снизу медь, сверху алюминий с заостренным концом). Скорость КП $\langle v_{КП} \rangle \sim 1.42 \cdot 10^{-8}$ 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, которые являются причиной охрупчивания спая меди с алюминием.
4. Впервые получена зависимость между величиной радиуса ячеек Вигнера-Зейтца r_s атомов примеси и средней скоростью $\langle v \rangle$ контактного плавления металлов с твердыми растворами. Показано, что эта зависимость близка к линейной и по ней можно предсказывать скорости КП в том числе и при КП нанокластеров.

5. Методом растровой электронной и атомно-силовой микроскопии выявлены эвтектические и интерметаллические кубические структуры $AlCu_4$ на поверхности бинарных пленок $Cu-Al$, которые подтверждаются рентгенофазовым анализом.
6. Изучена морфология поверхности двухслойной пленки Ni/Al обнаружено, что после отжига при $650^\circ C$ появляются эвтектические структуры.
7. Изучена морфология поверхности пленки олова, напыленной на никелевую фольгу марки НП-2. Обнаружено, что при напылении на пленках образуются сферические фазы. Дополнительный отжиг биметаллических композиций Ni/Sn приводил к образованию эвтектических фаз Ni_mSn_n , что указывает на контактное плавление при диффузионном взаимодействии олова и никеля.
8. Показано, что с увеличением толщины пленки фактор разрыхленности пленок ($\delta \sim 1/h$) уменьшается, что должно приводить к росту $T_{кп}$. Давление приводит к увеличению температуры КП разрыхленных пленок.

Достоверность полученных в работе результатов обуславливается использованием комплекса взаимодополняющих экспериментальных методов и теоретических расчетов; согласием результатов, полученных различными методами; применением апробированных методик экспериментальных исследований, использованием метрологически аттестованной технологической и измерительной аппаратуры; проведением измерений большого числа образцов каждого состава, показавших хорошую воспроизводимость свойств.

Практическая значимость основных результатов обуславливается тем, что полученные экспериментальные данные могут найти применение при разработке новых и оптимизации существующих технологий контактно-реактивной пайки алюминия и его сплавов, создании новых композиционных материалов методом жидкофазного спекания, создании новых катодных материалов. Новые экспериментальные данные о КП меди с алюминием и фазообразовании в контактных прослойках могут быть использованы для развития теории высокотемпературного КП. Положительной стороной работы является использование ее результатов в учебном процессе: при чтении спецкурсов по соответствующим разделам.

В целом данная диссертационная работа производит благоприятное впечатление, отражая результаты вполне завершенных исследований, характеризующихся новизной и практической значимостью. Вместе с тем по данной диссертационной работе у нас имеются **некоторые замечания:**

1. В работе Лайпанова М.З. введение повторяет некоторые пункты автореферата. На наш взгляд, введение должно их отражать, но в виде связного единого изложения, демонстрирующего замысел работы, и полученные в ней результаты.

2. Уже в первой главе диссертации автор излагает некоторые полученные им результаты исследований. С одной стороны, это можно приветствовать. Но, с другой стороны, эти результаты излагаются фрагментарно и до рассмотрения объектов и методов исследования, что и делается в главе 2.

3. К сожалению, нет однозначного ответа на фундаментальный вопрос о механизме и природе зарождения интерметаллидов, обнаруживаемых в контактных прослойках: что первично, твердофазное их образование и приводящих к контактному плавлению или это вторичный процесс, - в жидкофазной прослойке формируются интерметаллиды? Или они формируются в процессе кристаллизации?

4. В тексте диссертации имеются отдельные опечатки, неточности и стилистические погрешности.

5. На рисунке 3.11 и 3.41 просматриваются явные максимумы в указанных зависимостях, однако в диссертации не анализируются причины их проявления.

Пожелание.

В дальнейших исследованиях желательно провести морфологический анализ контактных прослоек на предмет наличия тонких (фрактальных) структур.

Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления от данной работы, основные результаты которой опубликованы в 16 научных работах, включая 7 статей в журналах, входящих в перечень ВАК. В целом автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Заключение.

В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа выполнена на высоком научном и методологическом уровне, является законченным научным исследованием и соответствует пункту 1 Паспорта специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

По актуальности, научной новизне, практической значимости и личному вкладу соискателя диссертационная работа «Контактное плавление и фазообразование макро-, микроразмерных систем медь-алюминий, никель-

алюминий, никель-олово» соответствует требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации, Лайпанов Мурат Занарустумович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв подготовлен д.ф.-м.н., проф. Анатолием Александровичем Лаврентьевым

Отзыв обсужден и утвержден на расширенном заседании кафедр «Электротехника и электроника» и «Физики» (протокол № 3 от «31» октября 2019 г.).

Зав. кафедрой электротехника

и электроника д.ф.-м.н., проф.

А.А. Лаврентьев

Зав. кафедрой физики

д.ф.-м.н., проф.

А.В. Благин

г. Ростов-на-Дону

«31» октября 2019г.

