

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Лайпанова Мурата Занарустумовича «Контактное плавление и фазообразование макро-, микроразмерных систем медь-алюминий, никель-алюминий, никель-олово», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность выбранной темы диссертации обуславливается, прежде всего, тем, что в последние десятилетия проявляется устойчивый интерес к изучению процесса контактного плавления (КП). Вместе с тем, несмотря на значительное количество работ посвященных физике контактного плавления между различными веществами, 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 нет. Соответственно, необходимо дальнейшее изучение закономерностей КП твердых растворов с различными металлами, что позволит управлять процессом КП путем подбора концентраций примесей и оптимизировать технологии контактно-реактивной пайки, металлизации керамик и полупроводников, создания биметаллов и новых композиционных материалов методом жидкофазного спекания.

Целью данной работы являлось исследование процессов фазообразования в контактных прослойках, протекающих в контакте систем разнородных металлов медь-алюминий, никель-алюминий, никель-олово и приводящих к их контактному плавлению.

Заявленные в работе подходы к достижению поставленной цели, используемые методики и методы исследования вполне обоснованы и отвечают современному уровню требований, что способствовало выполнению диссертационной работы их автором. В результате комплексного подхода были получены следующие **новые результаты**:

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. Скорость КП $\langle v_{\text{КП}} \rangle \sim 1 \cdot 42 \cdot 10^{-8}$ м/с выше, чем у образцов с плоскими торцами, что объясняется более интенсивным

взаимодействием в начальный момент времени, когда может проявляться размерный эффект КП.

2. 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.
3. 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.
4. 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. Изучена морфология поверхности двухслойной пленки Ni/Al обнаружено, что после отжига при 650°C появляются эвтектические структуры. Так же изучена морфология поверхности пленки олова, напыленной на никелевую фольгу марки НП-2. Обнаружено, что при напылении на пленках образуются сферические фазы.
5. 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.

Анализ содержания диссертационной работы по главам.

Диссертация изложена на 103 страницах машинописного текста, состоит из введения, трех глав и выводов по работе, содержит 60 рисунков. Список используемой литературы включает 153 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цель, решаемые задачи и защищаемые положения, указаны новизна, практическая ценность и личный вклад автора, приведены сведения об апробации результатов работы и публикациях.

Первая глава является обзором литературных источников, в котором отражены основные результаты 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.

Вторая глава посвящена методике эксперимента. В ней приведено описание экспериментальной установки и обоснование выбранных технологических режимов при напылении пленок, рассматривается методика исследования КП металлов. Рассмотрены методики применения рентгенофазового анализа контактных прослоек, использования оптической, электронной и атомносиловой микроскопии.

Третья глава отражает полученные результаты исследования механизма КП в системе медь–чистый алюминий и кинетику роста контактной прослойки. Так же изучено фазообразование при контактном плавлении в системах *Cu-AMГ-2* и *Cu-Al-0,4 ат % Li*. 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. Рассмотрено влияние внешних воздействий на температуру жидкофазного перехода в контакте между разрыхленными пленками и наночастицами, а так же межфазная энергия на границе двух разнородных металлов.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием ряда взаимодополняющих современных аналитических методик, большим объемом экспериментальных данных и их корректной обработкой.

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.

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 имеются **некоторые замечания**:

1. Во второй главе диссертации описывается методика напыления пленок, но не совсем понятно как контролировалась толщина напыления и какова толщина образовавшейся пленки.

2. На рисунке 3.11 показано, что линейная зависимость квадрата толщины контактной прослойки в системе *Cu/AMГ-2* наблюдается, когда медь расположена сверху, если же *Cu* расположить снизу, то линейная зависимость $\sigma^2(t)$ как видно из рисунка нарушается. Однако в диссертации не

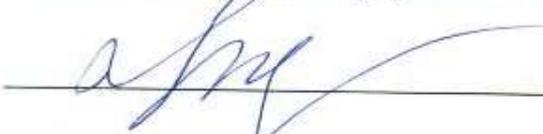
указаны причины нарушения данной линейной зависимости.

3. По тексту диссертации имеются отдельные грамматические ошибки и стилистические неточности;

Отмеченные недостатки не являются принципиальными, не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы. Тексты диссертации, основные результаты которой опубликованы в 16 научных работах, включая 7 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и автореферата написаны научным языком, понятным для широкого круга специалистов в области физики конденсированного состояния. 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 завершенным 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 (Постановление № 842 от 24.09.2013) о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации, Лайпанов Мурат Занарустумович, заслуживает присуждения **ученой степени кандидата физико-математических наук.**

Официальный оппонент, профессор кафедры общинженерных и естественнонаучных дисциплин ФГБОУ ВО «Северо-Кавказская государственная академия», доктор физико-математических наук,

профессор  Борлаков Хиса Шамилович

Почтовый адрес: 369001 г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36, тел. 89280253888, borlakov@mail.ru. На обработку персональных данных согласен.

г. Черкесск

5 ноября 2019г.

Подпись проф. Борлакова Х.Ш. заверяю

Ученый секретарь  Кулябцева В.Н.

