

**Отзыв официального оппонента**  
на диссертационную работу Суслиной Наи́ли Наилевны  
«Образование и рост промежуточных фаз в сложных металлических  
системах при контактном плавлении»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальностям 01.04.07 – физика  
конденсированного состояния и 01.04.14 – теплофизика и техническая  
теплотехника.

### *Актуальность темы диссертации*

Развитие современного материаловедения доказало, что для создания новых материалов широко используются системы на основе компонентов, образующих диаграммы эвтектического типа. В связи с этим вопросы, связанные с контактными плавлением как явлением, наблюдающимся при нагревании соприкасающихся кристаллических веществ, заслуживают фундаментального изучения с помощью современных подходов, включая и методики компьютерного эксперимента. Данная работа является логическим продолжением серии работ по изучению природы и механизмов контактного плавления, выполняемых на кафедре физики ФГАОУ «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.И. Ельцина», которые отличаются высоким профессиональным уровнем. В диссертации Н.Н. Суслиной представлены новые экспериментальные и теоретические результаты исследования физических закономерностей контактного плавления большого числа легкоплавких эвтектических систем, и решена актуальная и важная научная проблема теплофизики и физики конденсированного состояния, ориентированная в практическом отношении на разработку слоистых материалов для микроэлектроники и нанотехнологий.

### *Структура и объем диссертации*

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Изложена на 122 страницах, включая 34 рисунка и 7 таблиц. Библиографический список содержит 143 наименования.

*Во введении* обусловлена актуальность темы диссертации и общие направления работы, включая цели и задачи работы, ее научную новизну, теоретическую и практическую значимость и личный вклад диссертанта. *Первая глава* содержит аналитический обзор литературных данных по изучению взаимодействия между жидкой и кристаллической фазами в металлических системах. В конце главы изложена постановка задачи и обоснован выбор объектов исследования. *Вторая глава* посвящена описанию

методик экспериментального исследования контактного плавления в двухкомпонентных металлических системах, т.е. описаны способ приготовления образцов, экспериментальная установка. Приведены примеры практического применения эффекта контактного плавления.

Третья – пятая главы являются экспериментальными и содержат оригинальные результаты автора, выносимые на защиту.

В *третьей главе* описаны результаты по определению диффузионных характеристик на основе данных измерения ширины жидкой прослойки при контактном плавлении в системах Pb-Sn и Bi-Tl. В частности, получена система уравнений, связывающая параметры контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме для систем с промежуточными твердыми фазами. На примере системы Bi-Tl разработана методика построения концентрационной зависимости коэффициента диффузии в жидкой фазе.

*Четвертая глава* посвящена изучению состояния межфазных границ кристалл-расплав при контактном плавлении. Рассмотрены простые системы и системы с разным расположением промежуточных твердых фаз по отношению к эвтектике. В частности, исследована зависимость скорости роста жидкой прослойки для системы Pb-Sn. Определены значения скорости плавления в сложной системе Sn-Tl. Проведено сравнение эксперимента с результатами расчетов, основанных на предположении, что на границах раздела находится жидкость, состав которой соответствует ликвидусному.

В *пятой главе* представлены исследования роста промежуточных фаз в сложных металлических системах с помощью компьютерного эксперимента. Установлено, что для выяснения особенностей роста промежуточных фаз в сложных системах целесообразно применять методику клеточных автоматов. Построена модель диффузионного формирования контактной зоны. Сформулированы причины несоответствия диффузионного механизма роста фаз с реальным экспериментом.

В конце каждой из глав приведены краткие выводы. Общие результаты и выводы сформулированы в *Заключении*.

### ***Научная новизна. Обоснованность и достоверность результатов.***

Научную новизну имеют большинство результатов, полученных автором при выполнении экспериментальных и теоретических исследований закономерностей контактного плавления эвтектических композиций. В качестве наиболее интересных и важных результатов работы можно указать следующие:

1. На примере системы индий – олово скорректирована методика осуществления контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме и сформулировано требование относительно взаимного расположения образцов для предотвращения конвекционного перемешивания.

2. Разработана и запатентована новая методика построения линий солидуса на диаграммах состояний.
3. Исследованы особенности формирования межфазных границ кристалл-расплав при плавлении чистых компонентов с твердыми растворами и интерметаллидами в бинарных системах свинец-олово, таллий-олово и индий-олово.
4. По результатам контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме предложена методика расчета скорости роста жидкой фазы в сложной двухкомпонентной системе с одной промежуточной твердой фазой (олово-таллий).
5. Построена компьютерная модель формирования контактной зоны с учётом возможности образования метастабильных фаз и их распада.

*Достоверность результатов* представленной работы определяется использованием апробированных методик эксперимента, стандартных методов обработки экспериментальных данных, включая оценку погрешностей измерения. Полученные в работе результаты согласуются с имеющимися теоретическими представлениями и экспериментальными данными о природе фазовых превращений в металлических материалах.

### ***Научная и практическая значимость результатов***

Научное значение работы состоит в получении новых экспериментальных данных о природе контактного плавления металлических материалов, развитии компьютерной модели роста промежуточных фаз интерметаллического происхождения.

Практическая значимость состоит в широком использовании явления контактного плавления для разработки новых методик, позволяющих определять физические характеристики компонентов, например, температуру солидуса, составы промежуточных фаз и т.д. Знание межфазных явлений дает возможность прогнозировать создание пленочных эвтектических материалов, применяемых в микроэлектронике, а также может быть использовано при разработке новых нанотехнологий.

Несмотря на высокое качество проведённых исследований и тщательность обработки экспериментальных данных, по работе можно сделать несколько замечания.

### ***Замечания, вопросы и рекомендации***

1. В главе 2 отсутствуют данные о режимах кристаллизации образцов и не анализируется их макро- и микроструктура. Учитывая сильное влияние температуры литья и скорости охлаждения расплава на структуру твёрдой фазы, важно контролировать однородность структуры по сечению отливок. Как аттестовывались закристаллизованные образцы, и проводилась ли

дополнительная термическая обработка для устранения ликвационных явлений?

2. Результаты по исследованию межфазных границ, представленные в 4 главе, получены из предположения гомогенности жидкой фазы при любых температурах выше ликвидуса. Тем не менее, известно, что расплавы сложных систем с интерметаллидами в широком интервале температур характеризуются наличием концентрационных и структурных неоднородностей различного масштаба, т. е. являются микрогетерогенными. Можно ли учесть этот факт в рамках тех теоретических моделей, которые изложены в диссертации?

3. В тексте диссертации встречаются опечатки и неточности. Например, неправильно указаны ссылки на рисунки. 2.2 (стр.27), 2.4 (стр. 88), 4.5 и 4.1 (стр.89). Цитирование литературы начинается с работы под номером [5] (стр.11). Список литературы оформлен не по ГОСТу и т.д.

Отмеченные незначительные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

### *Общая оценка диссертационной работы*

Поставленные в диссертации цели и задачи потребовали привлечения широкого экспериментального материала и различных методических подходов, что вполне обоснованно явилось причиной представления работы по двум специальностям:

**01.04.07.** – физика конденсированного состояния (п. 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и аморфном состоянии в зависимости от их химического изотопного состава, температуры и давления» и п. 6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии материалов с определенными свойствами»)

и **01.04.14** – теплофизика и теоретическая теплотехника (п.1. «Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах»).

По материалам диссертации опубликовано 15 научных статей, в том числе 4 статьи – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ (3 статьи индексируются в международных базах цитирования Scopus и WQS). Безусловной заслугой автора является то, что часть полученных результатов - Методика построения линий солидуса диаграмм состояний - защищена патентом РФ.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

## Заключение

Диссертация Суслиной Н.Н. на тему «Образование и рост промежуточных фаз в сложных металлических системах при контактном плавлении» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на «стыке» двух специальностей: 01.04.07 и 01.04.14, и соответствует п. 9. «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842. Считаю, что Наиля Наилевна Суслина заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.07 - физика конденсированного состояния и 01.04.14- теплофизика и теоретическая теплотехника.

Бродова Ирина Григорьевна,  
Доктор технических наук, профессор  
Главный научный сотрудник лаборатории цветных сплавов  
Института физики металлов имени М.Н. Михеева  
Уральского отделения РАН

И.Г. Бродова

06.11.2015

620990 г. Екатеринбург,  
ул. С. Ковалевской, д. 18.

тел. (343)378-36-11 e-mail: [brodova@imp.uran.ru](mailto:brodova@imp.uran.ru)

