

На правах рукописи

СУСЛИНА Наиля Наилевна

**ОБРАЗОВАНИЕ И РОСТ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ФАЗ В СЛОЖНЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРИ КОНТАКТНОМ ПЛАВЛЕНИИ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре физики ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор, **Повзнер Александр Александрович**;
доктор физико-математических наук,
доцент, **Саввин Владимир Соломонович**

Официальные оппоненты: **Попель Петр Станиславович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный педагогический университет», профессор кафедры физики и математического моделирования;

Бродова Ирина Григорьевна, доктор технических наук, профессор, ФГБУН Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, главный научный сотрудник лаборатории цветных сплавов

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», г. Нальчик

Защита состоится «27» ноября 2015 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.02 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, зал Ученого совета (И-420)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Алексей Владимирович Ищенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Процессы появления и роста промежуточных фаз, возникающих при сплавлении различных металлов для получения интерметаллидов и гетерогенных смесей, до сих пор не изучены полностью. При этом особый теоретический и практический интерес представляет выяснение условий массообмена на границах сосуществующих фаз. Это связано с тем, что свойства межфазных границ во многом определяют свойства всего сплава.

Эффективным методом изучения взаимодействия фаз является контактное плавление, при котором появляется и растет жидкая фаза в контакте разнородных твердых образцов при температуре выше температуры минимума на линии или поверхности ликвидуса. Поэтому контактное плавление – это удобный метод изучения межфазного равновесия и жидкой фазы, а также один из методов построения элементов диаграмм состояния. Способом контактного плавления можно измерять коэффициенты диффузии и самодиффузии.

Процессы, происходящие при контактном плавлении на межфазных границах, во многих работах рассматривают на основе диффузионной гипотезы. Суть диффузионной гипотезы состоит в том, что возникновению новых порций жидкости при контактном плавлении предшествует проникновение путем диффузии чужеродных атомов в плавящийся кристалл и образование в приконтактной области плавящегося кристалла фазы солидусного состава, пересыщение которого ведет к плавлению. Диффузионная гипотеза естественным образом объясняет существование квазиравновесного состояния на межфазных границах при контактном плавлении. Однако существуют факты, которые невозможно объяснить с помощью диффузионной гипотезы, например, быстроту появления жидкости после приведения образцов в контакт, также наблюдаемость контактного плавления в системах, в которых взаимная растворимость вообще отсутствует. Для проверки применимости диффузионной гипотезы к описанию процессов контактного плавления необходимы дополнительные эксперименты по измерению роста жидкой прослойки, возникающей в контакте разнородных веществ.

Альтернативой диффузионного механизма контактного плавления является адгезионная гипотеза. Согласно этой гипотезе в местах непосредственного контакта, взаимодействующих поверхностей кристаллов, возникают тангенциальные напряжения из-за несоответствия параметров кристаллических решеток, повышающие упругую энергию поверхности. Однако адгезионная гипотеза не может объяснить тот факт, что минимальная температура контактного плавления не зависит от состава веществ, приводимых в контакт.

Таким образом, не сформирован единый взгляд на природу контактного плавления. Поэтому актуальным является накопление экспериментального материала, позволяющее построить адекватную модель роста промежуточной фазы.

Результаты, достигнутые в понимании формирования контактной зоны при контактном плавлении, имеет смысл распространить на твердофазную контактную зону. На данном этапе исследований такое расширение можно получить путем компьютерного моделирования роста контактной зоны. Работ, в которых проводится численное моделирование процессов формирования контактной зоны, пока еще недостаточно. Компьютерные исследования формирования роста промежуточных фаз в сложных системах, с несколькими интерметаллидами, вообще отсутствуют.

Экспериментальное изучение и компьютерное моделирование процессов, происходящих на межфазных границах при контактном плавлении, актуально для построения полной физической картины образования и роста промежуточных фаз.

Степень разработанности проблемы исследования

Контактное плавление является известным и хорошо разработанным методом определения коэффициентов диффузии в жидкой фазе. В то же время процессы, происходящие на межфазных границах при контактном плавлении, окончательно не изучены. Особый интерес представляет природа и механизмы формирования промежуточных фаз при контактном плавлении. В связи с этим большая дискуссия сохраняется по вопросам применимости диффузионной гипотезы контактного плавления. Для решения этих вопросов необходимо продолжить накопление экспериментального материала по измерению роста жидкой прослойки, возникающей в контакте разнородных веществ.

Контактное плавление уже использовалось при построении линий ликвидуса и определения эвтектической температуры диаграмм состояния. В настоящей работе это направление будет продолжено для разработки методики построения линии солидуса диаграмм состояния, выяснения процессов появления и роста промежуточных фаз, возникающих при сплавлении разнородных металлов. При этом будут развиты имеющиеся подходы к компьютерному моделированию роста промежуточных фаз, охватывающие не только рост жидкой фазы между твердыми фазами, но и рост любых, в том числе твердых промежуточных фаз.

Цель и задачи работы

Целью работы является выяснение особенностей образования и роста новых фаз на межфазных границах разнородных металлов, возникающих посредством процессов массопереноса, образования и распада метастабильных состояний при контактном плавлении.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать универсальную методику исследования контактной зоны при контактном плавлении, которую можно применять к сложным системам с широкими областями твердых растворов и промежуточными фазами с обеих сторон от промежуточной жидкой фазы.

2. Разработать способ оценки концентрационной зависимости коэффициента диффузии при контактном плавлении на примере системы висмут–таллий.

3. С помощью контактного плавления исследовать взаимодействие жидкой и твердых фаз в простой эвтектической системе олово–свинец и в системе с одной промежуточной твердой фазой олово–таллий.

4. Применить разработанную методику исследования роста контактной зоны к сложной металлической системе индий–олово, в которой широкие области твердых растворов и промежуточные твердые фазы существуют по обе стороны от жидкой фазы.

5. Путем обобщения полученных результатов и данных литературных источников разработать модель возникновения и роста промежуточных фаз, адекватную экспериментальным результатам.

6. В целях подтверждения приемлемости предлагаемой схемы формирования контактной зоны построить компьютерную модель рассматриваемых процессов, произвести компьютерные эксперименты и сопоставить полученные результаты с результатами реального эксперимента.

Научная новизна

В процессе выполнения работы впервые получены следующие научные результаты:

1. Показано, что при исследовании контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме снизу следует располагать образец с бóльшим значением плотности в жидком состоянии.

2. Разработана новая методика расчета параметров, характеризующих рост жидкой прослойки при контактном плавлении в сложной двухкомпонентной системе, содержащей промежуточные твердые фазы по обе стороны от жидкой фазы по результатам контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме.

3. С помощью оригинальной методики произведена оценка концентрационной зависимости коэффициента диффузии в системе висмут–таллий.

4. Впервые исследовано контактное плавление в нестационарно-диффузионном режиме в системах свинец–олово, олово–таллий и индий–олово, причем исходными образцами служили как чистые металлы, так и твердые растворы и интерметаллиды различных составов.

5. Предложена возможная последовательность процессов, происходящих в сложных двухкомпонентных системах, содержащих несколько промежуточных твердых фаз, адекватная экспериментальным результатам, при контактном плавлении.

6. Разработана новая методика компьютерного эксперимента, имитирующего формирование контактной зоны в сложной двухкомпонентной системе с несколькими промежуточными фазами. Полученные результаты согласуются с результатами реального эксперимента.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана и запатентована новая методика построения линий солидуса диаграмм состояния. Разработанная методика применена на практике для оценки адекватности диаграмм состояния системы олово–таллий.

2. Предложенная в работе методика изучения состава жидкой фазы на границе с твердой фазой применяется для исследования образования фаз при контактном плавлении.

3. Методика компьютерного эксперимента, разработанная для исследования формирования контактной зоны в сложной двухкомпонентной системе с несколькими промежуточными фазами, применяется для исследования фазообразования в контактной зоне.

4. Изучение процессов формирования промежуточных фаз необходимо для создания материалов с определенными свойствами, поскольку межфазные явления во многом определяют коррозионные и механические свойства конструкционных материалов, свойства композиционных и нано материалов. Детальное изучение межфазных явлений важно для разработки различных электронных приборов. Исследование фазообразования на межфазных границах необходимо для разработки и совершенствования высокоградиентных устройств, композиционных и наноматериалов и устройств, содержащих слои с различными свойствами.

Степень достоверности результатов работы:

Результаты и выводы, изложенные в диссертационной работе, обоснованы, их достоверность сомнений не вызывает, поскольку в работе использованы апробированные методики эксперимента и стандартные методики оценки погрешностей измерений, полученные результаты согласуются с известными аналогами, не противоречат известным представлениям о фазовых переходах. Результаты обсуждались на всероссийских и международных конференциях и были опубликованы в рецензируемых журналах. Отдельные результаты защищены патентом РФ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод контактного плавления позволяет построить линии солидуса на диаграммах состояния.

2. При контактном плавлении в условиях конкурентного роста жидкой фазы образование промежуточной твердой фазы или твердого раствора солидусного состава в макроскопических количествах путем диффузии чужеродных атомов из жидкости в твердый образец не происходит;

3. Концентрационные интервалы жидкой прослойки, возникающие при контактном плавлении в системах свинец–олово, индий–олово, олово–таллий, соответствуют интервалам гомогенности жидкой фазы диаграмм состояния при температурах исследования;

4. Соответствие концентрационного интервала жидких прослоек, полученных при контактном плавлении, интервалам гомогенности жидкой фазы на диаграммах состояния обусловлено тем, что квазиравновесие на межфазной границе кристалл/жидкость возникает в результате распада метастабильной жидкости, прилегающей к твердому образцу;

5. Метастабильная жидкость, прилегающая к твердому образцу неравновесного состава, распадается на стабильную жидкость ликвидусного состава и промежуточную твердую фазу, смежную с жидкостью по диаграмме состояния, причем образовавшаяся фаза имеет солидусный состав.

Апробация результатов работы:

Основные положения диссертации обсуждались на кафедре физики УрФУ, на всероссийских и международных конференциях:

1. V, VI и VII Российская научно-техническая конференции «Физические свойства металлов и сплавов» (г. Екатеринбург, 2009, 2011, 2013)
2. XIV Liquid and Amorphous Metals Conference, Rome, 11–16 July 2010, "Sapienza" – University of Rome.
3. «Информационная школа молодого ученого» Екатеринбург, ЦНБ УрО РАН, 2011.
4. Международная молодежная научная конференция «Математическая физика и ее приложения». Пятигорский государственный гуманитарно-технологический университет, 28.06.2012 г. – 30.06.2012 г.
5. Первый Международный междисциплинарный симпозиум "Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы" (ФПЯ и ФП) "Physics of surface phenomena, interfaces boundaries and phase transitions" (PSP & PT-2012). 18–23 сентября 2012 г. п. Лоо.
6. Всероссийская молодежная конференция «Физика и химия наноразмерных систем» Екатеринбург, 13–17 ноября 2012 г.

Личный вклад автора:

На всех этапах работы (литературный обзор, постановка задачи, получение и обсуждение результатов) автором внесен значимый вклад. Постановка задачи, обсуждение и интерпретация полученных результатов были проведены совместно с научными руководителями.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 3 из которых индексируются в международных базах цитирования Scopus и WOS. Отдельные результаты работы защищены патентом РФ.

Объем и структура и диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Она изложена на 122 страницах, включая 34 рисунка, 7 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 143 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность диссертационного исследования, кратко раскрывается содержимое решаемых в ней задач, формулируется цель работы, отмечается научная новизна и практическая ценность результатов исследования.

В **первой главе** анализируется взаимодействие между жидкой и кристаллической фазами в металлических системах. Дан критический обзор представлений о природе взаимодействия кристаллической и жидкой фаз. Сформулированы проблемы, связанные с обоснованием диффузионной и адгезионной гипотез контактного плавления.

Первая глава завершается постановкой задачи и выбором объектов исследования.

Во **второй главе** описана методика контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме, экспериментальная установка и способ приготовления образцов.

Сформулировано правило расположения образцов при контактном плавлении в нестационарно-диффузионном режиме, позволяющее предотвратить конвективное перемешивание компонентов в жидкой прослойке: снизу располагается образец, имеющий большую плотность в жидком состоянии при температуре диффузионного отжига.

Разработан и запатентован новый метод построения линий солидуса диаграмм состояний.

Недостатки известных методов связаны с неточностью фиксации точки перегиба на термограмме при появлении жидкости в процессе нагрева образца методом термографии и отсутствии точного критерия наличия закристаллизованных участков жидкости при использовании металлографического изучения сплава. Предложенный нами метод основан на использовании контактного плавления. Два образца, один из которых является исследуемым сплавом, образуют систему, характеризуемую эвтектической диаграммой состояния. Образцы приводят в контакт в термостате при температуре выше эвтектической, где происходит процесс контактного плавления, и судят о положении фигуративной точки исследуемого сплава относительно солидуса по состоянию жидкой прослойки, образующейся между образцами.

Метод апробирован на примере построения участка линии солидуса диаграммы системы свинец–олово.

Предложенный способ применен нами для выбора адекватной диаграммы состояния, примененной при исследовании системы олово–таллий.

В **третьей главе** получена система уравнений, связывающая параметры контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме для случая, когда составы обоих исходных образцов отделены от жидкой фазы промежуточными твердыми фазами, приводятся результаты измерения диффузионных характеристик в расплавах системы висмут–таллий.

Применена методика контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме [2], когда вертикально расположенные в термостате твердые цилиндрические образцы в процессе диффузионного отжига не перемещаются, а растущая между твердыми образцами жидкая прослойка заключена в стеклянную трубку, внутренний диаметр которой равен диаметрам твердых образцов. В отличие от рекомендаций [2], где предлагается сверху

размещать менее плотный твердый образец, сделано уточнение, что для предотвращения гравитационной конвекции сверху помещают образец, расплав которого имеет меньшую плотность, что актуально, например, для исследованной нами системы индий–олово.

Многokратно экспериментально установленная, в том числе и в наших опытах, пропорциональность протяженности жидкой прослойки корню из времени контактного плавления, – параболический закон [2], свидетельствует не только о лимитирующей роли процесса диффузии в жидкости на рост жидкой фазы, но и о постоянстве составов на границах жидкой фазы. Оценка толщины промежуточной твердой фазы, конкурирующей с жидкой фазой в контактной прослойке, сделанная на основе первого закона Фика, приводит к результату:

$$\Delta z^{(\gamma)} \leq \frac{D^{(\gamma)}}{(\lambda^{(L/\gamma)})^2} \frac{n_A^{(\gamma/L)} - n_A^{(\gamma/\beta)}}{n_A^{(\gamma/L)}} \Delta z^{(L)}, \quad (1)$$

где $\Delta z^{(\gamma)}$ и $\Delta z^{(L)}$ – протяженности промежуточных твердой и жидкой фаз; $D^{(\gamma)}$ – коэффициент диффузии в промежуточной твердой фазе; $\frac{n_A^{(\gamma/L)} - n_A^{(\gamma/\beta)}}{n_A^{(\gamma/L)}}$ – относительная концентрационная ширина области гомогенности твердой фазы; $\lambda^{(L/\gamma)}$ – кинетический множитель в параболическом законе, связывающем координату $z^{(L/\gamma)}$ межфазной границы жидкость/промежуточная твердая фаза со временем t :

$$z^{(L/\gamma)} = \lambda^{(L/\gamma)} \sqrt{t} \quad (2)$$

Подстановка типичных значений в (1) показывает, что, в условиях конкурентного роста с жидкой фазой, промежуточная твердая фаза за достижимое для реального эксперимента время путем диффузии атомов из жидкой прослойки в исходный твердый образец сформироваться не может. Аналогичное рассмотрение процесса проникновения чужеродных атомов из растущей жидкой прослойки в исходный образец показывает невозможность образования твердого раствора солидусного состава за время реального эксперимента.

Обобщена методика нахождения ширины концентрационного интервала жидкой фазы и определения коэффициента диффузии в жидкой фазе на случай, когда с обеих сторон от жидкой фазы на диаграмме состояния присутствуют промежуточные твердые фазы. Применяя первый и второй законы Фика в приближении независимости коэффициента диффузии в жидкой прослойке от состава и с учетом объемного эффекта плавления получили

$$\begin{aligned}
n_B^{(L/[A])} &= P_B + Q_B \cdot \operatorname{erf}(\psi^{(L/[A])}), \\
n_B^{(L/[B])} &= P_B + Q_B \cdot \operatorname{erf}(\psi^{(L/[B])}), \\
-\frac{Q_B}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\psi^{(L/[A])}\right)^2\right] &= \left(n_B^{(L/[A])} - n_B^{([A] \rightarrow L)}\right) \psi^{(L/[A])}, \\
-\frac{Q_B}{\sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\psi^{(L/[B])}\right)^2\right] &= \left(n_B^{(L/[B])} - n_B^{([B] \rightarrow L)}\right) \psi^{(L/[B])},
\end{aligned} \tag{3}$$

где $n_B^{(L/[A])}$, $n_B^{(L/[B])}$ – молярные концентрации (моль/м³) компонента B в двухкомпонентном жидком растворе A – B на границах с исходными твердыми образцами, находящимися по отношению к жидкой прослойке со стороны компонентов A и B соответственно, которые могут быть чистыми веществами, твердыми растворами или промежуточными твердыми фазами, P_B и Q_B – постоянные, характеризующие распределение компонента B вдоль жидкой прослойки,

$$\begin{aligned}
\psi^{(L/[A])} &= \frac{\lambda^{(L/[A])} - \lambda_0}{2\sqrt{D^{(L)}}}, \\
\psi^{(L/[B])} &= \frac{\lambda^{(L/[B])} - \lambda_0}{2\sqrt{D^{(L)}}}.
\end{aligned} \tag{4}$$

$\lambda^{(L/[A])}$ и $\lambda^{(L/[B])}$ – кинетические множители, характеризующие перемещение соответствующих межфазных границ (см. (2)), λ_0 – поправка на объемный эффект плавления, $D^{(L)}$ – коэффициент диффузии, характеризующий перемещение атомов в жидкой фазе.

Система уравнений (3) связывает между собой величины, характеризующие рост жидкой прослойки при контактном плавлении в нестационарно-диффузионном режиме. В частности, по результатам опыта может быть найден коэффициент диффузии $D^{(L)}$. Для этого, измерив протяженность жидкой прослойки Δz , образовавшейся за определенное время t , рассчитываем кинетический множитель $\Delta\lambda = \lambda^{(L/[B])} - \lambda^{(L/[A])} = \Delta z / \sqrt{t}$. Задав граничные концентрации $n^{(L/[A])}$ и $n^{(L/[B])}$, решаем систему (3) относительно $\psi^{(L/[A])}$ и $\psi^{(L/[B])}$, Затем из (4) получаем

$$D^{(L)} = \left[\frac{\Delta\lambda}{2\left(\psi^{(L/[B])} - \psi^{(L/[A])}\right)} \right]^2 \tag{5}$$

С целью разработки и апробации методики оценки концентрационной зависимости коэффициента диффузии в расплаве осуществлено контактное плавление в системе висмут–галлий при 473 К. На диаграмме состояния исследуемой системы в интервале температур 198–213 °С имеются две области жидкости, разделенные δ -фазой. Именно этим обстоятельством мы воспользовались для получения представлений о концентрационном ходе

коэффициента диффузии. Для этого по результатам контактного плавления пар $Bi-\delta$ и $\delta-Tl$ были определены коэффициенты диффузии, характеризующие жидкость в двух разных концентрационных областях. Для каждой из этих пар получены коэффициенты диффузии по результатам контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме в приближении независимости коэффициента диффузии от концентрации. Основанием для такого приближения является узость концентрационной протяженности жидкой прослойки, концентрационными границами которой являются ликвидусные составы.

Для более полного представления о концентрационном ходе D привлечены значения коэффициентов самодиффузии для чистых висмута и таллия [3, 4]. Возможность такого сопоставления основана на том, что для чистых веществ исчезает различие между видами коэффициентов диффузии.

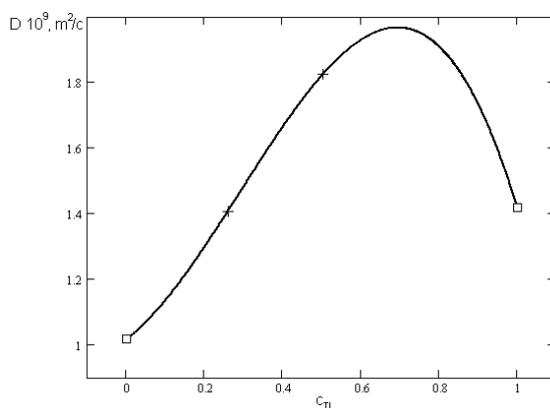


Рисунок 1 – Концентрационная зависимость коэффициента диффузии в жидких растворах системы $Bi-Tl$ при 483 К по результатам контактного плавления (+) и литературным источникам [3, 4] (□)

Совокупность результатов наших измерений и литературных данных по самодиффузии показана на рисунке 2. Полученный результат позволяет сделать оценку физической природы частиц, осуществляющих перенос вещества в процессе диффузии.

Таким образом, 1) применен новый метод оценки концентрационной зависимости коэффициента диффузии в металлическом расплаве; 2) на основе полученных результатов оценены радиусы диффундирующих частиц.

В **четвертой главе** приводятся результаты исследования концентрационных интервалов жидкой прослойки, полученной в результате контактного плавления, в простой эвтектической системе свинец–олово, в системе с односторонним по отношению к эвтектике расположением промежуточных твердых фаз олово–таллий и в системе с двухсторонним расположением промежуточных твердых фаз индий–олово.

Сравнение результатов расчетов с использованием (3) с результатами эксперимента позволяет сделать заключение о концентрационном интервале жидкой прослойки, полученной при контактном плавлении.

Исследовано контактное плавление в простой эвтектической системы свинец–олово. Температура плавления эвтектики этой системы равна 456 К.

Растворимость атомов олова в твердом свинце при этой температуре достигает 28,1 % олова, а растворимость атомов свинца в твердом олове – 1,3 % свинца. Диффузионный отжиг осуществлялся при температуре термостата 463 К. Продолжительность диффузионного отжига обычно составляла три часа. За это время протяженность жидкой прослойки достигает ~ 2,5 мм. Во всех опытах образец [B] представлял собой чистое олово. Состав [A] в разных опытах изменялся от чистого свинца до твердого раствора с 24,8 % олова. Результаты измерений $\Delta\lambda$ показаны на рисунке 3.

Для указанных расчетов необходимо знание коэффициента диффузии $D^{(L)}$. Поэтому, на первом этапе расчетов получили значение коэффициента диффузии для расплавов свинец–олово при 463 К. Для этого воспользовались результатами контактного плавления между α твердым раствором с 24,8 % олова и чистым оловом.

Так как состав этого твердого раствора близок к предельно возможному при температуре опыта составу твердого раствора, то есть к солидусному составу со стороны свинца, то естественно предположить, что в этом случае ликвидусная концентрация на границе с α -фазой обеспечивается принудительно. Поэтому приняли, что молярная доля свинца в жидкости на границе с образцом α -фазы равна соответствующему ликвидусному значению по диаграмме состояния при 463 К, то есть $c_{Pb}^{(L/\alpha)} = 0,280$.

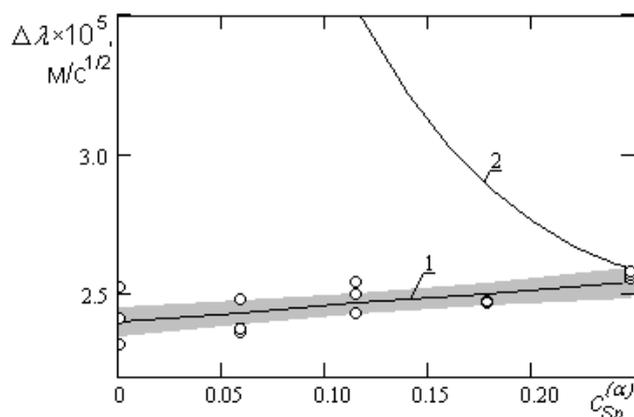


Рисунок 2 – Кинетический множитель, характеризующий рост жидкой прослойки при контактом плавлении в системе свинец–олово при температуре 463 К в зависимости от состава образца [A]. \circ – результаты измерений, затемненная полоса – 95 % доверительная область, характеризующая результаты измерений, 1 и 2 – результаты расчета в предположении равенства состава жидкости на границе с α твердым раствором значению, соответствующему стабильному $c_{Sn}^{(L/\alpha)} = c_{Sn}^{(L/\alpha_s)}$ и метастабильному $c_{Sn}^{(L/\alpha)} = c_{Sn}^{(L/\alpha_m)}$ ликвидусу при температуре опыта соответственно

Решение системы уравнений (3) относительно коэффициента диффузии приводит к результату $D^{(L)} = (0,84 \pm 0,02) \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Указанная здесь погрешность представляет собой 95% доверительную границу и учитывает только погрешность измерения кинетического множителя $\Delta\lambda_{\text{exp}}$ при данном составе α твердого раствора.

На втором, заключительном, этапе с помощью системы уравнений (3) произведен расчет кинетического множителя $\Delta\lambda$ для различных составов α -твердого раствора. При вычислении $\Delta\lambda$ применили коэффициент диффузии, полученный на первом этапе расчетов. В процессе получения результатов воспользовались нечувствительностью коэффициента диффузии в расплавах свинец–олово к составу жидкости, выявленной в работе [5]. На рисунке 2 результаты расчетов представлены линией 1. В целях демонстрации чувствительности результата расчета $\Delta\lambda$ к составу жидкости на границе с α -фазой вычислены кинетические множители для случая, когда жидкость со стороны α -фазы ограничена метастабильным ликвидусом, равновесным по отношению к различным досолидусным составам твердого раствора от чистого свинца до солидусного состава. Результаты расчетов показаны кривой 2 (Рисунок 2).

Результаты расчетов показывают адекватность предположения о соответствии концентрационного интервала жидкой прослойки интервалу гомогенности жидкой фазы на диаграмме состояния при температуре отжига.

Аналогичным образом исследованы еще две системы. Система олово–таллий характеризуется односторонним расположением промежуточных твердых фаз по отношению к эвтектике. Диаграмма показывает наличие в системе эвтектики, двух перитектик, эвтектоида и двух инконгруэнтно плавящихся твердых промежуточных фаз. Между жидкой фазой и твердыми растворами на основе олова нет промежуточных фаз. После пересечения жидкой фазы в сторону таллия изотерма 455 К пересекает промежуточную фазу SnPb с очень узким интервалом гомогенности, γ -фазу с очень широким интервалом гомогенности и два участка твердых растворов на основе β -таллия и α -таллия. Контактное плавление проводили при температуре термостата 455 К, что на 14 К выше эвтектической температуры. Можно ожидать отклонения состава жидкости на границе с образцом [Pb] от стабильного ликвидуса из-за невозможности формирования промежуточных твердых фаз путем диффузии атомов из жидкости в твердый образец.

Выяснили, что концентрационный интервал жидкой прослойки в системе олово–таллий соответствует интервалу гомогенности жидкой фазы на диаграмме состояния.

Наибольшие отклонения концентрационного интервала жидкой прослойки от интервала гомогенности диаграммы состояния можно ожидать в системах с двухсторонним расположением твердых промежуточных фаз по отношению к эвтектике. В качестве такой системы исследована система индий–олово. Контактное плавление осуществлялось в нестационарно-диффузионном режиме при температуре 400 К. Изотерма, соответствующая температуре исследования, пересекает на диаграмме состояния области твердого раствора на основе индия (In), β -фазы, жидкого раствора L , γ -фазы и твердого раствора на основе олова (Sn).

Использовали образцы с различным содержанием компонентов, – от чистых металлов до сплавов, состав которых приближается к солидусу. Из

результатов контактного плавления между образцами β и γ -фаз составов близких к солидусу, получили коэффициент диффузии $D^{(L)} = (1,32 \pm 0,07) \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Опираясь на полученное значение коэффициента диффузии рассчитали, используя (3) и (5), кинетические множители для различных контактируемых пар и сравнили с результатами эксперимента. Результаты сравнения показаны на рисунке 3. Коэффициент корреляции между расчетными и полученными путем измерений значениями кинетического множителя составляет 0,995.

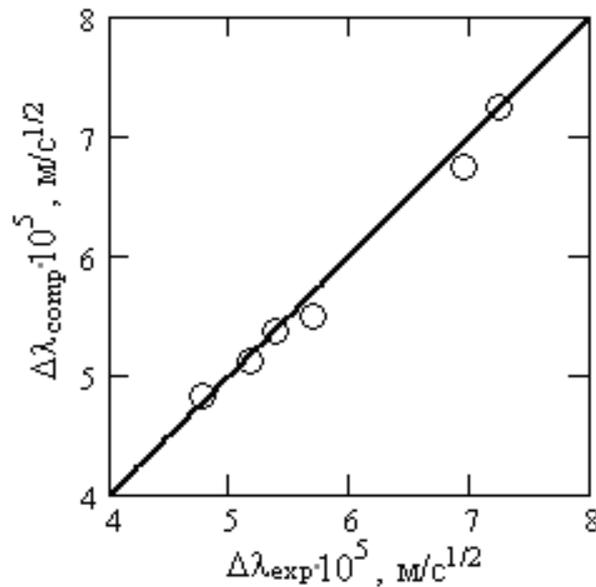


Рисунок 3 – Корреляция между расчетными $\Delta\lambda_{\text{comp}}^{(L)}$ и измеренными $\Delta\lambda_{\text{exp}}^{(L)}$ значениями кинетического множителя, характеризующего рост жидкой прослойки в системе In–Sn при 400 К и различных составах контактируемых образцов. Сплошная линия соответствует равенству сравниваемых величин

Таким образом, концентрации на границах жидкости с твердыми образцами соответствуют ликвидусным значениям диаграммы состояния.

Выводы о невозможности установления солидусного состава на границе с жидкостью в условиях роста жидкой фазы путём диффузии атомов из жидкой фазы в твёрдую и экспериментально установленное соответствие концентрационного интервала жидкой прослойки интервалу гомогенности жидкой фазы на диаграмме состояния находятся в кажущемся противоречии. Для разрешения этого противоречия разработана последовательность процессов, учитывающая невозможность образования квазиравновесного состояния на межфазных границах путем диффузии атомов из жидкости в твердую фазу при одновременном соответствии жидкой прослойки интервалу гомогенности жидкой фазы диаграммы состояния. Впервые в рамках указанной последовательности сформулировано правило, позволяющее указать фазы, выделяемые в процессе распада метастабильных участков жидкой прослойки.

Суть указанных представлений заключается в следующем. После приведения исходных твердых образцов в контакт при температуре,

превышающей температуру плавления эвтектики, происходят адсорбционные процессы на контактной поверхности. Образовавшийся поверхностный слой является термодинамически неустойчивым, вследствие чего его толщина возрастает. Таким образом, поверхностный слой, разделяющий исходные образцы, является зародышем промежуточных фаз, стабильных и метастабильных. Скорость роста жидкой фазы существенно выше, чем твердых фаз, что приводит к отсутствию промежуточных твердых фаз в образующейся контактной прослойке. Так как составы твердых образцов на границах с жидкостью не соответствуют солидусу, жидкость в приграничных с твердыми образцами областях оказывается пересыщенной компонентами смежных образцов. Поэтому метастабильные участки жидкости распадаются на насыщенные твердые растворы или промежуточные твердые фазы солидусного состава, и жидкость ликвидусного состава. Таким образом, возникает квазиравновесная межфазная граница жидкость/кристалл.

В дальнейшем за счет переноса вещества в жидкости происходит контактное плавление твердой фазы солидусного состава. Скорость плавления лимитируется переносом вещества в жидкости. Продолжительность этой стадии процесса существенно больше, чем время метастабильного плавления и время распада метастабильной жидкости. Поэтому в среднем концентрационный интервал жидкой прослойки заключен между линиями ликвидуса. После того, как твердый раствор или промежуточная фаза солидусного состава расплавится, образуется метастабильный контакт между жидкостью и твердой фазой, и все стадии роста контактной прослойки повторятся.

Важным является вопрос о последовательности выпадения фаз в метастабильной зоне жидкой контактной прослойки. В рассматриваемом нами случае логично предположить, что зародыши новых фаз появляются не в объеме жидкости, то есть не гомогенно, а гетерогенно – на поверхности твердой фазы. Жидкий раствор на этой поверхности является наиболее пересыщенным по отношению к твердой фазе, ближайшей к ликвидусу. Поэтому именно эта фаза растет с наибольшей скоростью, подавляя рост остальных фаз. При этом на поверхности между возникшей твердой фазой и исходным образцом по-прежнему равновесие отсутствует, но на границе новая фаза/жидкость достигает квазиравновесное состояние между солидусным и ликвидусным составами.

В **пятой главе** изложены материалы по разработке компьютерного эксперимента по исследованию роста промежуточных фаз в контакте разнородных металлов в двухкомпонентных системах. В ряде работ осуществлено моделирование контактного плавления с помощью методики клеточных автоматов (например [6]). Новым является применение разработанной методики к проблеме формирования контактной зоны, состоящей из твердых фаз.

Сформулированы противоречия между выводами диффузионной гипотезы роста промежуточных фаз в контактной зоне и результатами

реальных экспериментов. На основе методики клеточных автоматов построена модель формирования контактной зоны. В отличие от диффузионной модели предусмотрена возможность метастабильных состояний на границах фаз и введен вероятностный характер возникновения промежуточных фаз. В соответствующем компьютерном эксперименте удалось воспроизвести возможность отсутствия квазиравновесия на межфазных границах и отсутствие некоторых промежуточных фаз в зоне контакта, что часто наблюдается в реальных экспериментах.

Для моделирования контактной зоны применяли методику клеточных автоматов. Рассматривается одномерная модель – цепь ячеек клеточного автомата. Каждая ячейка с номером i характеризуется молярной долей компонента $A - c_i$ и фазовым четырехкомпонентным вектором $(ph_\alpha, ph_\beta, ph_\gamma, ph_\delta)$. Каждая компонента вектора выражает долю соответствующей фазы в ячейке, следовательно, $ph_\alpha + ph_\beta + ph_\gamma + ph_\delta = 1$. Чтобы избежать излишнего усложнения модели и, соответственно, программы, принято, что ячейка не может содержать более двух фаз. Соответственно, каждая ячейка состоит из двух частей, составы которых характеризуются долями cl_i и cr_i , которые удовлетворяют соотношению

$$ph_{li} \cdot cl_i + ph_{ri} \cdot cr_i = c_i,$$

где l и r характеризуют части ячеек со стороны исходных образцов A и B . Если ячейка гомогенна (обе части принадлежат одной фазе), то $cl_i = cr_i = c_i$.

Суммарное количество вещества во всех ячейках одинаково и постоянно. Изменяется соотношение компонентов. В простейшем случае, когда соседние ячейки соприкасаются одинаковыми фазами, правило обмена формулируется так:

$$\Delta c_i = -\sigma_k \cdot (cr_{i+1} - cl_i),$$

где Δc_i – количество вещества, передаваемое из i -й ячейки в $(i+1)$ -ю, σ_k – коэффициент обмена в k -й фазы. Если ячейки соприкасаются разными фазами, то правило обмена зависит от выбранной модели.

В целях тестирования методики использовали алгоритм, соответствующий диффузионной гипотезе. Составы на границах фаз при этом устанавливаются в соответствии с диаграммой состояния, поэтому обмен между i -й и $(i+1)$ -й ячейками, соприкасающимися разными фазами, происходит по правилу

$$\Delta c_i = -\sigma_r (c^{(l/r)} - cr_i) - \sigma_l (cl_{i+1} - c^{(r/l)}),$$

где l и r – идентификаторы соприкасающихся фаз в i -й и $(i+1)$ -й ячейках, соответственно, $c^{(l/r)}$ и $c^{(r/l)}$ – стабильные равновесные составы соприкасающихся фаз по отношению друг к другу, выраженные в долях компонента A (Рисунок 4).

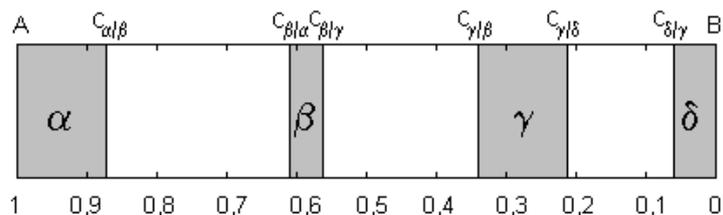


Рисунок 4 – Фрагмент диаграммы состояния модельной двухкомпонентной системы $A-B$. По горизонтали отложены доли компонента A . Затемненные участки соответствуют областям гомогенности фаз α , β , γ и δ . Незатемненные участки диаграммы соответствуют смесям фаз.

На верхней горизонтальной шкале показаны доли компонента A на границах фаз

На каждой итерации происходил расчет Δc_i , нового состава ячеек $c_i = c_i + \Delta c_{i-1} - \Delta c_i$ и выяснялось фазовое состояние ячейки в соответствии с диаграммой состояния. Если состав ячейки попадает в область гомогенности некоторой фазы, то ячейка является однофазной. В противном случае, ячейка гетерофазна, количество каждой из фаз определяется правилом рычага, а составы каждой фазы приравниваются равновесным составам диаграммы состояния.

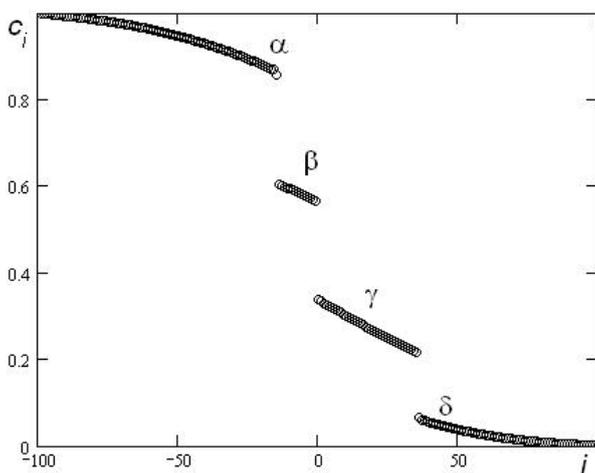


Рисунок 5 – Контактная зона модельной системы в соответствии с диффузионной гипотезой. i – номер ячейки, c_i – доля компонента A в i -ой ячейке. Коэффициенты обмена (аналог коэффициентов диффузии) $\sigma_\alpha = 0,12$, $\sigma_\beta = 0,18$, $\sigma_\gamma = 0,15$, $\sigma_\delta = 0,09$. Число итераций $t = 10000$

На рисунке 5 приведен результат расчета контактной зоны, соответствующей диффузионной гипотезе. Перемещение фазовых границ происходит по параболическому закону, – координата границы изменяется пропорционально корню из "времени". Роль времени играет номер итерации. Видно, что в контактной зоне сформированы все фазы присутствующие на диаграмме состояния. Выше отмечалось, что наличие в контактной зоне всех фаз, пересекаемых соответствующей изотермой на диаграмме состояния, обычно не соответствует реальному эксперименту.

Для получения результатов, адекватных реальному эксперименту, был разработан и применен алгоритм, который учитывает возможность формирования метастабильных зон. Действительно, установление равновесия в разных фазах происходит с разной скоростью, что, прежде всего, определяется разными коэффициентами диффузии, а для модели – разными коэффициентами

обмена. Кроме того, вещество "не знает" чему равна стабильная равновесная концентрация, – равновесие возникает в результате динамического обмена веществом, то есть при определенном соотношении концентраций в фазах потока данного компонента в обоих направлениях выравниваются. Поэтому если установление равновесия в одной из фаз происходит быстрее, чем в другой, то это равновесие оказывается метастабильным.

В модели предусмотрена возможность того, что ячейка с α -фазой становится гетерофазной раньше, чем достигнет насыщения до стабильного состояния. При этом учтено, что часть инородного вещества, поступившего в эту ячейку, растворится в α -фазе. Взаимодействие двух смежных ячеек с разными фазами запрограммировано следующим образом. Для определенности предположим, что коэффициент обмена в β -фазе больше, чем в α -фазе. Это предполагает, что β -фаза распространяется в α -фазу, причем состав β -фазы метастабильен по отношению к α -фазе. По заданной диаграмме зависимости молярной энергии Гиббса от состава выясняются предельные возможные составы α - и β -фазы, отвечающих метастабильному равновесию β -фазы по отношению к α -фазе. Так из рисунка 6 следует, что метастабильный состав β -фазы может находиться в пределах от $c_1^{(\beta-m)}$ до $c^{(\beta-s)}$, а соответствующий состав α -фазы – в пределах от 1 до $c^{(\alpha-s)}$, причем составы взаимодействующих фаз связаны между собой однозначно. Кроме того, задан состав ячейки в целом – c_i . При этом, однако, соотношение количества фаз и их составы остаются неоднозначными.

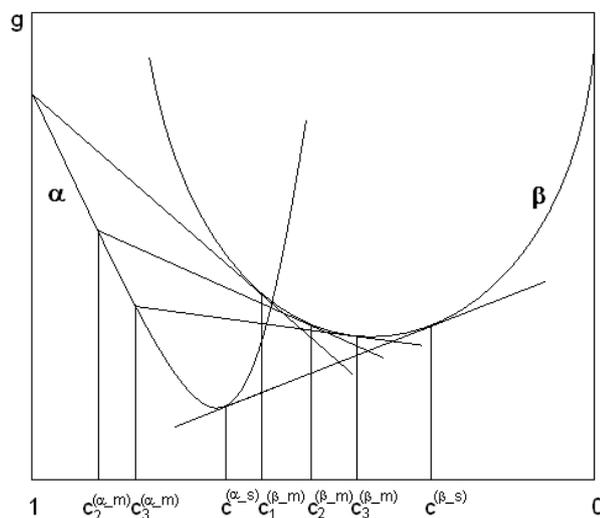


Рисунок 6 – Иллюстрация к моделированию процесса достижения равновесия между фазами. g – молярная энергия Гиббса, c – доля компонента A

Основываясь на случайном характере зарождения фаз, в программе предусмотрено применение генератора случайных чисел для решения вопроса о фазовом составе ячейки и вероятности распада и зарождения той или иной фазы. В качестве примера, на рисунке 7 приведены результаты счета. Наблюдается одна промежуточная фаза, что соответствует эксперименту. Перемещение границ происходит по параболическому закону.

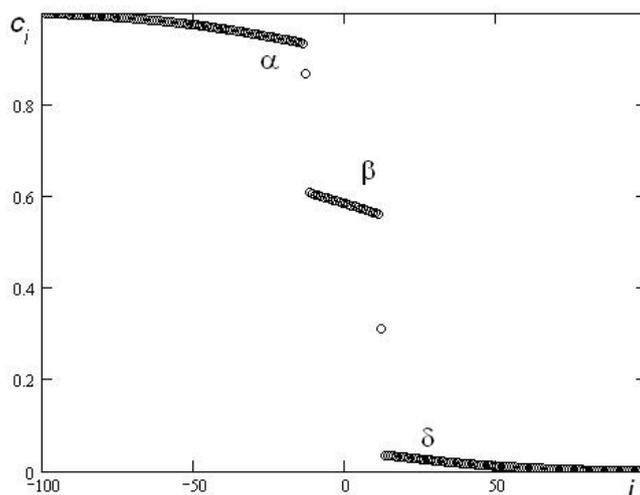


Рисунок 7 – Результат компьютерного моделирования контактной зоны с учетом возможности образования метастабильных участков фаз и их распада – γ -фаза отсутствует. Параметры модели приведены в подписи к рисунку 5

Таким образом, предложена компьютерная модель формирования контактной зоны между разнородными веществами двухкомпонентной системы, адекватная экспериментальным наблюдениям. Решающим отличием этой модели от диффузионной является возможность формирования метастабильных участков фаз и их дальнейший распад на вещества стабильных составов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрены особенности возникновения, формирования и развития новых фаз на межфазной границе разнородных металлов. Основным выводом и результатом работы является построение модели формирования контактной зоны между разнородными веществами двухкомпонентной системы на основе экспериментального наблюдения и компьютерного моделирования, которая основана не только на диффузионных процессах, но и возможности формирования метастабильных фаз и их дальнейшем распаде на вещества стабильных составов.

Целесообразно отметить следующее:

1. Результаты исследования контактного плавления позволяют построить линии солидуса, путем отдельного термостатирования цилиндрических образцов, составляющих эвтектическую систему, один из которых имеет исследуемый состав, а другой состоит из чистого вещества. Образцы приводят в соприкосновение при температуре исследования, превышающей эвтектическую температуру, и судят о положении фигуративной точки исследуемого сплава относительно солидуса по состоянию жидкой прослойки, образующейся между образцами.

2. Образование насыщенных твердых растворов и промежуточных фаз солидусного состава при конкурентном росте промежуточной жидкой фазы путем диффузии чужеродных атомов из жидкости в твердый образец в

результате контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме не возможно.

3. Получена система уравнений, связывающая параметры контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме для случая, когда составы обоих исходных образцов по диаграмме состояния отделены от жидкой фазы промежуточными твердыми фазами

4. С помощью контактного плавления получено представление о концентрационном ходе коэффициента диффузии в системе Bi-Tl, применен новый метод оценки концентрационной зависимости коэффициента диффузии в металлическом расплаве, на основе полученных результатов оценены радиусы диффундирующих частиц.

5. Протяженность жидкой прослойки в системах свинец–олово, индий–олово, олово–галлий растет со временем по параболическому закону.

6. Концентрационная протяженность жидких прослоек в системах свинец–олово, индий–олово, олово–галлий, полученных посредством контактного плавления в нестационарно-диффузионном режиме, соответствует интервалам гомогенности жидкой фазы диаграмм состояния при температурах исследования

7. Соответствие концентрационного интервала жидких прослоек, полученных при контактном плавлении, интервалам гомогенности жидкой фазы на диаграммах состояния обусловлено тем, что квазиравновесие на межфазной границе кристалл/жидкость возникает в результате распада метастабильной жидкости, прилегающей к твердому образцу.

8. Метастабильная жидкость, прилегающая к твердому образцу неравновесного состава, распадается на стабильную жидкость ликвидусного состава и промежуточную твердую фазу, смежную с жидкостью по диаграмме состояния, причем образовавшаяся фаза имеет солидусный состав.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшее исследование процессов на границах разнородных конденсированных фаз требует применения методов прямого экспериментального исследования их структуры и состава, позволяющих получить информацию о процессах, непосредственно происходящих в процессе возникновения и роста фаз в контактной зоне (например, с помощью синхротронного излучения). Необходима также дальнейшая разработка методик компьютерного моделирования изучаемых процессов на атомарном уровне.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Суслина Н.Н. Формирование квазиравновесного состояния на межфазной границе жидкость/кристалл при контактном плавлении на примере системы олово-галлий / В.С. Саввин, Н.Н. Суслина, А.А. Повзнер // Теплофизика и аэромеханика, 2014, том 21, № 5. С. 663–670. (0,5 п.л./0,17 п.л.)

Suslina N.N. The formation of a quasi-equilibrium state at liquid/crystal

interphase at contact melting by the example of tin–thallium system / V.S. Savvin, **N.N. Suslina**, A.A. Povzner // Thermophysics and Aeromechanics, 2014, Vol. 21, No. 5. P. 663–670. (0,5 п.л./0,17 п.л.)

2. Суслина (Анохина) Н.Н. Процессы на границе жидкость/кристалл при контактном плавлении в системе с промежуточными твердыми фазами / В.С. Саввин, **Н.Н. Суслина (Анохина)**, А.А. Повзнер // Физика металлов и металловедение. 2012. Т. 113. Вып. 4. С. 428 – 433. (0,38 п.л./0,13 п.л.)

Suslina (Anokhina) N.N. Processes in the interlayer liquid/crystal in contact melting in the system with solid phases / V.S. Savvin, **N.N. Suslina (N.N. Anokhina)**, A.A. Povzner // Physics of metals and metallography. 2012. Vol. 113. № 4, pp. 428–432. (0,38 п.л./0,13 п.л.)

3. Суслина Н.Н. Компьютерное моделирование формирования контактной зоны между разнородными металлами / В.С. Саввин, **Н.Н. Суслина** // Известия РАН. Серия физическая, 2012. Т. 76. № 13. С. 75–78. (0,25 п.л./0,13 п.л.)

4. **Suslina (Anokhina) N.N.** Contact melting in simple eutectic system / V.S. Savvin, Ye.Yu. Pomytkina, **N.N. Suslina (Anokhina)** // The European Physical Journal Web of Conferences. 2011. Vol. 15. 01020. P. 1–6. (0,38 п.л./0,13 п.л.)

Патент:

5. Пат. 2472140 Российская Федерация. Способ построения солидуса / В.С. Саввин, **Н.Н. Суслина**; зарегистрирован в Государственном реестре изобретений РФ 10 января 2013 г.; заявка № 2011147973/04 от 24.11.2011.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

6. Суслина (Анохина) Н.Н. Контактное плавление в системе индий–олово / **Н.Н. Суслина (Анохина)**, Е.Ю. Помыткина, В.С. Саввин // Физические свойства металлов и сплавов: сборник научных трудов V Российской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. Ч.1. С. 201–205. (0,31 п.л./0,15 п.л.)

7. **Suslina (Anokhina) N.N.** Contact melting in simple eutectic system / V. S. Savvin, Ye. Yu. Pomytkina, **N. N. Suslina (Anokhina)** // XIV Liquid and Amorphous Metals Conference, Rome, 11-16 July 2010, "Sapienza" – University of Rome. Abstracts. P. 103. (0,1 п.л./0,03 п.л.)

8. Суслина (Анохина) Н.Н. Контактное плавление в системе таллий – олово / **Н.Н. Суслина (Анохина)**, Е.П. Иванова // Физические свойства металлов и сплавов: сборник научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2010. С. 202–207. (0,38 п.л./0,19 п.л.)

9. Суслина (Анохина) Н.Н. Процессы происходящие на межфазной границе при контактном плавлении в системе таллий – олово / **Н.Н. Суслина (Анохина)** // Информационная школа молодого ученого: сборник научных трудов / Екатеринбург, ЦНБ УрО РАН. 2011. С. 203 – 207. (0,31 п.л.)

10. Суслина (Анохина) Н.Н. Исследование диффузионных процессов в расплавах системы Bi–Tl / **Н.Н. Суслина (Анохина)**, В.С. Саввин // Физические свойства металлов и сплавов: сборник трудов VI Всерос. науч.-техн. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2011. С. 169 – 180. (0,75 п.л./0,38 п.л.)

11. Суслина Н.Н. Компьютерное моделирование контактного плавления в двухкомпонентной мультифазной системе / В.С. Саввин, Н.Н. Суслина // Математическая физика и ее приложения: материалы междунар. молодеж. конф. Пятигорск: СКФУ, 2012. Т. 4. С. 60–62. (0,19 п.л./0,1 п.л.)
12. Суслина Н.Н. Компьютерное моделирование формирования контактной зоны между разнородными металлами / В.С. Саввин, Н.Н. Суслина // Physics of surface phenomena, interfaces boundaries and phase transitions: труды международного междисциплинарного симпозиума. Нальчик – Лоо, 2012. С. 115–116. (0,13 п.л./0,06 п.л.)
13. Суслина (Анохина) Н.Н. Процессы на границе жидкость/кристалл при контактном плавлении в простой эвтектической системе / В.С. Саввин, Н.Н. Суслина (Анохина) // Расплавы. 2012. № 1. С. 38–49. (0,75 п.л./0,38 п.л.)
14. Суслина Н.Н. Компьютерное моделирование роста промежуточных фаз в нанопрослойке контакта разнородных металлов / В.С. Саввин, Н.Н. Суслина // Физика и химия наноразмерных систем: сборник научных трудов Всерос. молодеж. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 84–89. (0,38 п.л./0,19 п.л.)
15. Суслина Н.Н. Способ построения линий солидуса с помощью контактного плавления / Н.Н. Суслина, В.С. Саввин // Физические свойства металлов и сплавов: сборник трудов VII Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 169–173. (0,31 п.л./0,15 п.л.)
16. Суслина Н.Н. Построение линий солидуса с помощью контактного плавления / В.С. Саввин, Н.Н. Суслина // Вестник Академии наук Чеченской Республики, 2014. № 3 (24). С. 21–24. (0,25 п.л./0,13 п.л.)

Список цитируемой литературы

1. Savvin V. S., Kazachkova Yu. A. and Povzner A. A. Phase formation in contact of dissimilar metals // Journal of Physics: Conference Series Volume 98, 2008 052002 <http://www.iop.org/EJ/toc/1742-6596/98/5>
2. Савинцев П.А., Рогов В.И. Определение коэффициентов диффузии в эвтектических расплавах методом контактного плавления // Заводская лаборатория. 1969. Т. 38. № 2. С. 195–199.
3. Döge G. Über die Messung der Selbstdiffusionskoeffizienten von Blei und Wismut in verschiedenen Metallschmelzen // Zeitschrift für Naturforschung. 1965. V. 20a. S. 634–636.
4. Barras R.E., Walls H.A., Hines A.L. Liquid Thallium Self-Diffusion Measurements // Metall. Trans. 1975. V. 6B. June. P. 347–348.
5. Хайрулин Р.А., Станкус С.В., Кошелева А.С. Взаимная диффузия в расплавах системы олово–свинец эвтектического и околоэвтектического составов // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. № 2. С. 239.
6. Саввин В.С., Азави А.К., Повзнер А.А. Компьютерное моделирование роста промежуточной жидкой фазы в простой эвтектической системе // Теплофизика высоких температур. 2007. № 3.