

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ С ТВЕРДЫМИ ПОДЛОЖКАМИ: РОЛЬ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ В ПРОЦЕССАХ СМАЧИВАНИЯ И РАСТЕКАНИЯ

\*Ахкубеков А.А.<sup>1</sup>, Ахкубекова С.Н.<sup>2</sup>, Узденов Э.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова*

<sup>2</sup>*Кабардино-Балкарский аграрный университет им. В.М. Кокова*

\*dis1@kbsu.ru

*В работе рассматриваются физико-химические аспекты взаимодействия между жидкими металлами и поверхностями твердых металлических подложек, приводящие к смачиванию и растеканию, а также анализируется влияние зарождения и роста интерметаллидов на эти процессы. Анализ показал, что указанные процессы подвержены влиянию как структуры, так и физико-химического состояния поверхности подложки, которая может представлять собой чистый металл, сплав переменного состава или интерметаллид. Установлено, что роль интерметаллидов в каждом конкретном случае различна: могут как ускорять процессы так и замедлять их, а в отдельных случаях вообще не взаимодействовать с жидкостью. Предпринята попытка объяснить механизм и природу указанных зависимостей.*

**Ключевые слова:** интерметаллиды, подложка, смачивание, растекание, структура, жидкость, процессы.

## INTERACTION OF METAL MELTS WITH SOLID SUBSTRATES: THE ROLE OF INTERMETALLIDES IN WETTING AND SPREADING PROCESSES

Akhkubekov A.A.<sup>1</sup>, Akhkubekova S.N.<sup>2</sup>, Uzdenov E.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Kabardino-Balkarian State University*

<sup>2</sup>*Kabardino-Balkarian Agrarian University named after V.M. Kokov*

*The paper examines the physico-chemical aspects of the interaction between liquid metals and the surfaces of solid metal substrates, leading to wetting and spreading, and analyzes the effect of the nucleation and growth of intermetallides on these processes. The analysis showed that these processes are influenced by both the structure and the physico-chemical state of the substrate surface, which can be a pure metal, an alloy of variable composition or an intermetallic compound. It has been established that the role of intermetallides in each specific case is different, they can both accelerate and slow down processes, and in some cases do not interact with the liquid at all. An attempt is made to explain the mechanism and nature of these dependencies.*

**Keywords:** intermetallides, substrate, wetting, spreading, structure, liquid, processes.

### Введение

Смачивание – это физический процесс способности жидкой фазы распределяться по поверхности твердого тела в результате межмолекулярных взаимодействий [1, 2]. Как известно, смачивание бывает двух видов: иммерсионное (вся поверхность твёрдого тела контактирует с жидкостью) и контактное (состоит из трёх фаз – твердая, жидкая, газообразная).

Смачивание жидкими металлами металлических подложек является фундаментальным физическим процессом и объектом научных исследований [3, 4], и имеющим значительное влияние на множество технологий.

Первой кинетической стадией формирования переходного слоя является протекание химических реакций. Вторая стадия – смачивание и растекание расплавов, является следствием образования химических (металлических) связей в зоне контакта твердой и жидкой фаз. Под растеканием подразумевается процесс самопроизвольного распространения жидкости в виде фазового слоя по поверхности твердой фазы [5].

Цель статьи заключается в более глубоком анализе влияния химических соединений (интерметаллидов), возникающих в процессе взаимодействия смачивающего металлического расплава с твердой подложкой, растворяясь в которой (и / или растворяя подложку) зарождается и растет интерметаллид [6–10]. Также рассматриваются процессы смачивания и растекания, когда подложкой является интерметаллид [11–13]. Ожидается отличие в механизме процесса смачивания и растекания в последнем случае. К сожалению, в исследованиях, посвященных указанной выше проблеме до сих пор не все изучено, и не до конца раскрыто. Решение данной проблемы усугубляется еще и тем, что пока не до конца разработан вопрос о механизме, природе зарождения и роста интерметаллидов как специфического процесса [14], так как свойства образующегося объекта (интерметаллида) существенным образом отличаются от исходных компонентов.

Таким образом, не сформирован единый взгляд на процессы смачивания и растекания расплава по поверхности подложек как чистых металлов, так и подложек переменного состава и интерметаллида. Поэтому этот вопрос является актуальным и требует дальнейших исследований.

Проанализируем более подробно случаи влияния образования интерметаллидов на смачивание и растекание при взаимодействии жидкости с поверхностью твердого тела [6–10]. Процессы, происходящие в этом случае, протекают за счет взаимного проникновения атомов (молекул) как из жидкости в твердое тело, так и из твердого в жидкое.

В работе [6] рассматривается механизм процесса смачивания и растекания алюминия по никелю, который имеет сложный характер и проходит в несколько стадий. Смачивание начинается с контакта расплавленного алюминия с поверхностью никеля, где в первую очередь происходит удаление оксидной пленки. Для этого требуется понижение поверхностной энергии никеля, что достигается за счет взаимодействия между алюминием и никелем. Граница расплавленного алюминия и никеля образует интерфейс, на котором взаимодействуют атомы и ионы. На стадии растекания, в области низких температур процессы растворения и диффузии на межфазной границе алюминий-никель играют важную роль. В области высоких температур, лимитирующим процессом является реактивная диффузия с образованием интерметаллидных фаз в зоне взаимодействия припоя с подложкой.

В процессе смачивания происходит также зарождение и рост интерметаллидных фаз  $Ni_2Al_3$  и  $NiAl_3$ . Эти фазы имеют значительную долю ионной составляющей химической связи, что приводит к понижению смачиваемости расплавом припоя. Образование интерметаллидных фаз изменяет условия смачивания и влияет на дальнейший процесс растекания.

Таким образом, согласно [6] «... процесс растекания алюминия по никелю в условиях пайки имеет сложный характер. Это связано с протеканием химического взаимодействия на границе алюминий – никель. Рост интерметаллидных фаз в результате реактивной диффузии, активируемой увеличением температуры, сдерживает растекание в области высоких температур. Это можно объяснить изменением условий смачивания в результате зарождения и роста интерметаллидных фаз состава  $Ni_2Al_3$  и  $NiAl_3$ , имеющих значительную долю ионной составляющей химической связи и, как следствие, пониженную смачиваемость расплавом припоя».

В работе [7] изучали взаимодействие припоя на основе алюминия при пайке титановых и титано-алюминиевых конструкций. Указанная система является сложной эвтектической системой, т.е в этой системе образуются промежуточные интерметаллиды. С целью вызвать каталитическое действие в реакции образования интерметаллида  $TiAl_3$  был использован свинец, так как образующийся интерметаллид влияет на смачивание и растекание. Как указывается в работе, энергия активации образования и роста интерметаллида  $TiAl_3$  при введении паров свинца снижается в 2,5–3 раза. При этом наблюдается избирательное смачивание с образованием перед фронтом растекания ореола из фазы, обогащенной алюминием.

Таким образом, смачивание сопровождается образованием интерметаллида  $TiAl_3$ , который с повышением температуры и увеличением времени выдержки ускоряет его рост, одновременно происхо-

дит растворение в жидкой фазе, резко активизирует этот процесс за счёт снижения энергии активации роста интерметаллида  $TiAl_3$ , что способствует интенсификации процессов смачивания и растекания.

В работе [8] исследовано растекание расплава различных концентраций на основе алюминия по поверхности стали Ст3 и меди. Установлено влияние зарождения и роста интерметаллида на смачивание и растекание. Изучены особенности микроструктуры формирующихся диффузионных слоёв. Оказалось, что максимальная скорость растекания расплавов по стали соответствует температуре 900 °С, что связано с возникновением интерметаллидной фазы. Изменение концентрации сплавов и подложки так же сказывается и на смачивании и растекании. Так же отмечается расслоение металла с вытеснением медной фазы на периферию образца.

Работа [9] посвящена способу формирования слоистых композиционных материалов в системе Ti–Al. Установлено влияние температурных режимов в жидкой фазе на скорость смачивания титанового пакета алюминиевым расплавом, что связано с протеканием химической реакции, в результате которой образуется интерметаллид  $TiAl_3$ .

Показано, что количество интерметаллидных фаз в зоне контакта увеличивается с повышением температуры. Причем, при более высоких температурах смачиваемость незначительно уменьшается.

С нашей точки зрения незначительное уменьшение смачивания при высоких температурах связано так же со следующими моментами.

При нагревании металла до определенной температуры ниже температуры плавления может происходить рост зерен в его структуре. Это может привести к изменениям в микроструктуре поверхности и визуально проявиться в виде микрошероховатости [15].

При поднятии температуры атомы в металлической структуре могут начать перемещаться, что может приводить к диффузии – процессу перемещения атомов внутри материала. Это может стимулировать рекристаллизацию, при которой металл может изменять свою структуру и формировать новые зерна с различной ориентацией. Эти процессы могут вызывать некоторую шероховатость на микроуровне.

Однако в определенных ситуациях микрошероховатость или неровности на поверхности могут создавать воздушные карманы или уменьшать фактическую площадь контакта между поверхностью и жидкостью. Это может снижать общее смачивание.

В исследовании [10] были проведены эксперименты в системе Fe–Sn, с целью изучения влияния интерметаллических соединений на смачивание и растекание, которые зарождаются и растут при взаимодействии расплавов с твердой металлической поверхностью. Отмечается, что образование интерметаллидов приводит к замене оксидного слоя и созданию чистой поверхности из интерметаллида. Это изменение поверхности значительно улучшает смачивание, так как интерметаллиды лучше смачиваются жидкими металлами, чем оксидные слои.

Таким образом, формирование интерметаллических соединений способствует разрушению оксидного слоя на поверхности подложки, что в результате улучшает процесс растекания.

Эти результаты имеют важное значение для понимания процессов смачивания и могут быть использованы в различных промышленных и научных областях, где важно взаимодействие между металлическими поверхностями и жидкими металлами.

Исходя из проведенных исследований [6–10], можно сделать вывод, что образование интерметаллидных фаз имеет значительное влияние на процессы смачивания и растекания жидких металлов на твердых металлических подложках. Интерметаллиды изменяют условия смачивания и могут способствовать интенсификации процессов расплавления и растекания, а также улучшению смачиваемости поверхности путем разрушения оксидного слоя. Однако необходимо провести дальнейшие исследования, чтобы полностью понять механизмы и влияние интерметаллидов на эти процессы.

В ряде работ [16–21] рассматриваются механизмы зарождения и рост интерметаллидов в контакте жидкой фазы с твердой металлической подложкой. Однако, к сожалению, при этом не акцентируются процессы смачивания и растекания, хотя, на наш взгляд, взаимодействие жидкой фазы с твердой, как обязательное, сопровождается процессом смачивания, так как силы взаимодействия между молекулами (атомами) жидкой фазы меньше сил взаимодействия между молекулами (атомами) жидкости и твердого тела. С другой стороны, это можно объяснить тем, что, видимо, авторы не ставили перед собой задачу рассматривания этих процессов.

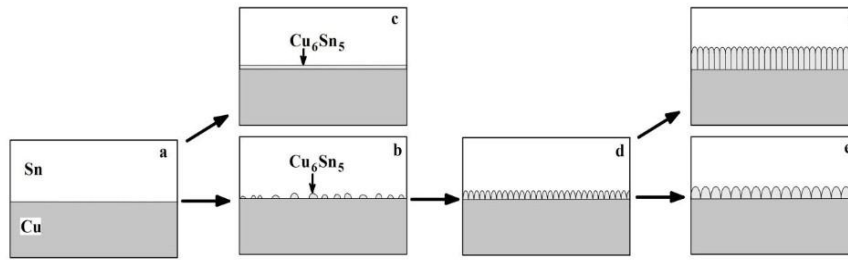


Рис. 1. Возможные варианты образования интерметаллида  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  на границе раздела Cu/Sn [16]

Для примера рассмотрим работу [16]. Показано, что на границе раздела твердая медь/жидкое олово (рис. 1а) образуются интерметаллические фазы  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  и  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ . Структура этих фаз имеет столбчатую форму (рис. 1, d-f), а рост слоя  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  происходит из нескольких центров (рис. 1b), перпендикулярно границе раздела.

Измерена скорость роста интерметаллических фаз и выяснено, что на начальной стадии рост слоя происходит быстро, но при достижении толщины около 10 мкм скорость роста уменьшается. Это связано с тем, что на начальной стадии диффузия атомов меди в олово происходит через жидкую фазу, а на второй стадии – через твердый слой  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ .

Таким образом, данная работа посвящена природе и механизму образованию интерметаллидов при взаимодействии жидкой фазы с твердой, что очень важно при рассмотрении процессов смачивания и растекания

Во многих работах, например [22–27], также обсуждаются политермы углов смачивания расплавами различной природы (щелочные, переходные, низкотемпературные, [25] и др.) и подложек (пористые, переменного состава, не металлические [26] и др.), в которых отмечается образование интерметаллидов, однако, не рассматривается их роль в этих процессах. В работе [27] рассматривается природа сил, влияющих на процессы смачивания и растекания, при этом не конкретизируется возникновение интерметаллидов и их влияние на эти процессы.

Наконец, рассмотрим роль и влияние интерметаллидной подложки на процессы смачивания и растекания. Как отмечалось выше, работ, посвящённых данной проблеме, немного [11–13], соответственно данное направление недостаточно исследовано и требует дальнейшего, более углубленного изучения.

В работе [11] рассматривается процесс взаимодействия поверхности стали жидким алюминием и влияние интерметаллидных слоев, возникавших при этом, на процесс смачивания стали алюминием. Образование интерметаллидов играет важную роль в процессе смачивания стали алюминием. Интерметаллиды на границе раздела металлов, такие как  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,  $\text{FeAl}_2$ ,  $\text{FeAl}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Al}$  и  $\alpha$ -фазы, играют существенную роль при смачивании и растекании. При этом переходный интерметаллидный слой может включать в себя различные фазы в зависимости от состава интерметаллида и условий процесса.

Уникальность данного исследования состоит в том, что «для проведения исследования смачивания алюминием переходных слоев были изготовлены интерметаллиды следующих фаз:  $\text{FeAl}_3$ ;  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ;  $\text{FeAl}_2$ ;  $\text{FeAl}$ ;  $\text{Fe}_3\text{Al}$ . Интерметаллиды изготавливались путем сплавления стали 08кп и алюминия марки А7 в индукционной печи в атмосфере аргона. Затем из интерметаллида изготавливались пластинки размером 40x40 и толщиной 3 мм. Исследование смачивания интерметаллида алюминием марки А7 проводилось в соответствии с ГОСТ 23904-79 «Пайка. Метод определения смачивания материалов припоями» [11].

Установлено, что интерметаллид  $\text{Fe}_3\text{Al}$ , содержащий минимальное количество алюминия, демонстрирует наименьшую площадь растекания алюминия по поверхности. Это означает, что при использовании данного интерметаллида, процесс смачивания стали алюминием будет менее интенсивным.

Оказалось, что тип интерметаллида и подбор активатора повышают эффективность смачивания, что увеличивает площади растекания. Структура интерметаллидов и использование флюсов на основе эвтектической системы  $\text{KF}-\text{AlF}_3$  и  $\text{KF}-\text{LiF}$  позволяет достичь максимальных значений характеристик смачивания (рис. 2).

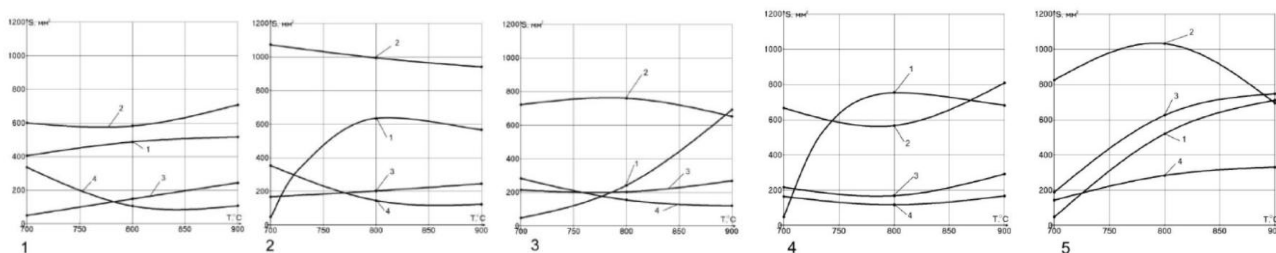


Рис. 2. Зависимость площади от температуры процесса при активации поверхности:  
 1 – Fe<sub>3</sub>Al, 2 – FeAl, 3 – FeAl<sub>2</sub>, 4 – Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, 5 – FeAl<sub>3</sub> флюсами 1 – KCl–NaCl–Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>–NaF,  
 2 – KF–Li, 3 – K<sub>2</sub>F<sub>6</sub>Ti, 4 – K<sub>2</sub>F<sub>6</sub>Zr [11]

Таким образом, выбор интерметаллида и активатора флюса является важным фактором для оптимизации процесса смачивания стали алюминием. Исследования показывают, что использование интерметаллида Fe<sub>3</sub>Al и флюсов на основе эвтектической системы KF–AlF<sub>3</sub> и KF–LiF позволяет достичь наилучших результатов в этом процессе.

Анализ работы [12] показывает, что концентрационное распределение и структура взаимодействующих металлов имеют существенное влияние на поверхностные характеристики расплавов. Например, форма и размер пятен на подложке при смачивании и растекании существенно отличаются в зависимости от концентрации компонентов и их местоположения вдоль подложки.

Также было установлено, что в контактных прослойках, полученных в нестационарно-диффузионном режиме, образуются новые фазы, такие как интерметаллиды, которые также оказывают влияние на поверхностные характеристики расплавов. Концентрации этих фаз указываются на диаграмме состояния и проявляются в структуре контактных прослоек.

Связь между диаграммой состояния и поверхностными характеристиками расплавов при смачивании и растекании позволяет более точно понять и предсказать поведение расплавов на поверхности подложек переменного состава. Это важно для разработки эффективных методов получения и нанесения дозированных капель металлических жидкостей одинакового размера.

В исследовании [13] было уделено внимание изучению смачивания интерметаллидных подложек FeNi, NiNi, NiAl и Ni<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>, краевых углов смачивания и работы адгезии (рис. 3).

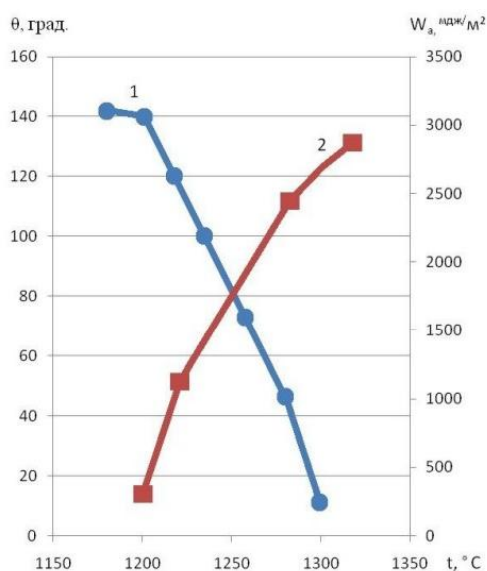


Рис. 3. Температурная зависимость краевого угла смачивания (1) и работы адгезии (2) в системе (Cu–Fe–Ni) – карбид титана (TiC)

Исследование показало, что система (Cu–Fe–Ni) – интерметаллид характеризуется удовлетворительным смачиванием ( $\theta < 90^\circ$ ) и низкими значениями межфазной энергии. Это говорит о том, что

«d таких системах разница химических потенциалов компонентов в твердой и жидкой фазах приводит к частичному растворению интерметаллида и локальному охлаждению металлического расплава».

Таким образом, исследование смачивания интерметаллидов в системе Cu–Fe–Ni – интерметаллид позволяет оценить их совместимость с расплавами и определить их влияние на микроструктуру сплава при литье в песчаную форму.

### Заключение

Интерметаллиды изменяют условия смачивания и могут способствовать интенсификации процессов смачивания и растекания

Путем разрушения оксидного слоя, что способствует значительному улучшению смачивания.

Микроструктура формирующихся диффузионных слоев также играет значительную роль при повышении температуры, в процессах смачивания и растекания, что связано с ростом зерен в металлической структуре и диффузией атомов внутри материала и возникновением микрошероховатости.

Структура интерметаллида и активатора флюса так же является важным фактором для оптимизации процесса смачивания.

Таким образом, образование интерметаллидных фаз играет важную роль в процессах смачивания и растекания жидких металлов на твердых металлических подложках. Исследования в этой области помогут разработать эффективные методы и оптимизировать процессы смачивания и растекания для различных промышленных и научных приложений.

### Библиография

1. Пиралишвили Ш.А., Шалагина Е.В., Каляева Н.А., Попкова Е.А. Молекулярная физика. Термодинамика. Конденсированные состояния. СПб.: Лань, 2022. 200 с.
2. Попова А.А., Попова Т.Б. Физическая химия. СПб.: Лань, 2021. 496 с.
3. Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. Смачиваемость поверхностей твердых тел расплавами щелочных металлов и сплавами с их участием. Теория и методы исследования // ТВТ. 1994. Т. 34, № 4. С. 590–626.
4. Алчагиров Б.Б., Дышекова Ф.Ф., Коков З.А., Кясова О.Х., Таова Т.М., Бесланеева З.О., Хоконов Х.Б. Экспериментальная установка для изучения смачиваемости жидкометаллическими расплавами поверхностей твердых тел // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 5. С. 703–708.
5. Аллас А.А. Лазерная пайка в производстве радиоэлектронной аппаратуры / под ред. В.П. Вейко, В.С. Новосадова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 134 с.
6. Чуларис А.А., Чумаченко Г.В., Селезнев П.И. Кинетика растекания алюминия на никеле в условиях пайки // Вестник ДГТУ. 2006. Т. 6, № 2. С. 110–114.
7. Шашкин О.В. Вакуумная контейнерная пайка титановых и титано-алюминевых конструкций припоями на основе алюминия: автореф. дис... канд. тех. наук. Тольятти, 2006. 24 с.
8. Виттюнин М.А. Растекание расплава на основе алюминия по поверхности твердых тел и особенности микроструктуры закристаллизованных материалов: автореф. дис... канд. хим. наук. Челябинск, 2009. 19 с.
9. Ковтунов А.И., Миямин С.В. Исследование технологических свойств слоистых титаноалюминивых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом // Авиационные материалы и технологии. Область науки: Технология материалов. 2013. № 1. С. 9–12
10. Protsenko P., Terrain A., Tracking V., Eustathopoulos N. The role of intermetallics in wetting in metallic systems // Scripta Materialia. 2001. P.1439–1445.
11. Ковтунов А.И., Мямин С.В., Меджидов К.И. Исследование процессов смачивания алюминием интерметаллидных сплавов системы железо-алюминий // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях. 2015. С. 75–78.
12. Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., Гуфан Ю.М., Лайпанов М.З. Влияние структурно-фазового состояния поверхности подложки переменного состава на растекание расплава и их связь с диаграммой состояния // Известие РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84, № 9. С. 1350–1354.
13. Заборовский А.О., Стригина Е.С. Роль поверхностных явлений при формировании мелкозернистой структуры сплавов системы Cu–Fe–Ni // Сб. докл. 8 Всерос. конф. «Молодежь и наука». Красноярск, 2012. С. 101–106.
14. Савин В.С. Фазовые переходы первого рода в контакте разнородных металлов: дис... док. физ-мат. наук. Екатеринбург, 2007. 303 с.

15. Владимиров Г.Г. Физика поверхности твердых тел. СПб.: Лань, 2022. 349 с.
16. Бондарь А.А., Агейкова Л.Н., Демьянов Б.Ф. Рост интерметаллидов и образование переходного слоя в зоне контакта меди с жидким оловом // Ползуновский вестник. 2019. № 2. С. 133–137.
17. Choudhury S.F., Ladani L. Grain growth orientation and anisotropy in  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  intermetallic: nanoindentation and electron backscatter diffraction analysis // J. Electron. Mater. 2014. V. 4, N 4. P. 996–1004.
18. Jiang L., Jiang H., Chawla N. The effect of crystallographic orientation on the mechanical behavior of  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  by micro-pillar compression testing // J. Electron. Mater. 2012. V. 41, N 8. P. 2083–2088.
19. Мнойн Т.Ш., Колпакова В.А., Косарев В.Ю., Демьянов Б.Ф. Образование и ориентированный рост интерметаллида  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  при жидкофазной реакции в двухслойном биметалле Cu/Sn // Ползуновский Альманах. 2016. № 4. С. 137–141.
20. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Жоров А.Н., Гурулев Д.Н., Локтюшин В.А. Структурообразование в титано-алюминиевых композитах в присутствии жидкой фазы // Журнал функциональных материалов. 2008. Т. 2, № 4. С. 153–157.
21. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Жоров А.Н., Арисова В.Н. Диффузионное взаимодействие титано-алюминиевом биметалле ВТ1-АД1 в присутствии жидкой фазы // Известие ВолГТУ. 2005. С. 9–12.
22. Кашежев А.З., Понежев М.Х., Созаев В.А., Хасанов А.И., Мозговой А.Г. Экспериментальное исследование смачивания реакторных сталей расплавленными свинцом и висмутом // ТВТ. 2010. Т. 48, № 5. С. 793–795.
23. Камболов Д.А. Поверхностные свойства расплавов на основе свинца, цинка, олова и образование микро(нано)фаз при их взаимодействии с медью, алюминием и специальными сталями: автореф. дис... канд. тех. наук. Нальчик, 2014. 26 с.
24. Камболов Д.А., Манукянц А.Р., Созаев В.А. Поверхностные свойства металлических систем на основе Sn, Pb, In и смачивание ими алюминия и меди // Известия КБГУ. Нальчик, 2020 Т. X, № 3. С. 19–27.
25. Кашежев А.З., Кутуев А.З., Манукянц А.Р., Понежев М.Х., Созаев В.А. Политермы углов смачивания пористых Ni и Cu расплавами Sn–Ba и In–Na // Сб. тр. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Вып. 6. Тверь, 2014. С. 149–154.
26. Самсонов В.М., Каплунов И.А., Иванов А.М., Талызин И.В., Третьяков С.А. О смачиваемости поверхности кварца расплавом германия // Сб. тр. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Вып. 9. Тверь, 2017. С. 422–429.
27. Новосадов В.С. Физико-химические и реологические закономерности смачивания и растекания в металлических системах (обзор) // Сб. мат. межд. конф. «ПАЙКА-2018». Изд-во Тольяттинского гос. ун-та, 2018. С. 101–120.