

Обзорная статья
УДК 621.791.2(035); 546.682
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.030

КОМПОЗИЦИОННЫЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ ЛЕГКОПЛАВКИХ СПЛАВОВ И ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ

Ирина Сергеевна Медянкина¹, Владимир Михайлович Скачков², Лилия Александровна Пасечник³, Наиль Адемович Сабирзянов⁴

^{1, 2, 3, 4}*Институт химии твёрдого тела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия*

¹*lysira90@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8636-3755>*

²*skachkov@ihim.uran.ru*

³*pasechnik@ihim.uran.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0631-5287>*

⁴*sabirzyanov@ihim.uran.ru*

Аннотация

Применение Hg и амальгам в мире запрещено. Хорошим заменителем Hg могут явиться жидкие сплавы на основе нетоксичного Ga, имеющие широкие области жидкого состояния и обладающие высокой электро- и теплопроводностью, устойчивостью на воздухе и при взаимодействии с порошками металлов с образованием композитов. Указаны стадии процесса формирования диффузионно-твердеющего композита (ДТК), определено время взаимодействия основных компонентов при различных режимах термообработки. Показано положительное влияние введения в ДТК небольшого количества порошков материалов.

Ключевые слова:

металлический порошок, композиционные диффузионно-твердеющие композиты, припои, структура, свойства, микротвердость

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук № АААА-А19-119031890028-0.

Для цитирования:

Композиционные составы на основе легкоплавких сплавов и порошков металлов / И. С. Медянкина [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 2. С. 160–166. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.030

Original article

COMPOSITE COMPOSITIONS BASED ON FUSIBLE ALLOYS AND METAL POWDERS

Irina S. Medyankina¹, Vladimir M. Skachkov², Lilia A. Pasechnik³, Nail A. Sabirzyanov⁴

^{1, 2, 3, 4}*Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg, Russia*

¹*lysira90@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8636-3755>*

²*skachkov@ihim.uran.ru*

³*pasechnik@ihim.uran.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0631-5287>*

⁴*sabirzyanov@ihim.uran.ru*

Abstract

The use of Hg and amalgams is prohibited in the world. A good substitute for Hg can be liquid alloys based on non-toxic Ga, having wide areas of liquid state and having high electrical and thermal conductivity, resistance to air, interaction with metal powders to form composites. The stages of the process of forming a diffusion-hardening composite (DTC) are indicated, the interaction time of the main components under various heat treatment modes is determined. The positive effect of introducing a small amount of powders of materials into the DTC is shown.

Keywords:

metal powder, composite diffusion-hardening composites, solders, structure, properties, microhardness

Acknowledgments:

the article was prepared with the support of the federal budget topic of the state assignment for the Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No. АААА-А19-119031890028-0.

For citation:

Composite compositions based on fusible alloys and metal powders / I. S. Medyankina [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 2. P. 160–166. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.030

Введение

Существует большое разнообразие способов соединения разнородных материалов (стекла, керамики, рубина, ситалла и других) между собой и с металлами. Во многих случаях при известных методах пайки приходится использовать напыление металла на поверхность, вжигание или высокотемпературное лужение поверхности, а для предотвращения окисления использовать плавкие флюсы. В ряде областей техники перспективным является применение диффузионно-твердеющих композиций (ДТК), получаемых смешением жидкого металлического сплава с твердыми мелкодисперсными металлическими порошками и некоторыми наполнителями. В отличие от обычных припоев такой состав исходной пасты самопроизвольно затвердевает при небольшом нагревании (до 150 °С) и затем может служить в качестве неразъемного соединения при температурах до 700 °С. Соединения деталей с помощью ДТК является относительно новым из используемых в современной технике методов неразъемного соединения разнородных деталей. Низкая температура соединения, широкий круг материалов, смачиваемых жидким сплавом, и высокая температура распая позволяют применить эту технологию соединения к материалам с самыми различными физико-химическими свойствами. Полученные таким способом соединения обладают удовлетворительной механической прочностью, электропроводностью и коррозионной стойкостью. Особенно перспективным представляется использование ДТК в приборостроении, радиоэлектронике, электровакуумной технике. Основные технологические свойства припоев (консистенция пасты после приготовления, время технологичности пастообразного состояния и затвердевания при выбранной температуре термообработки) зависят от состава композиции, исходного порошка, режимов термообработки, смачивания и условий подготовки поверхностей, использования технических приёмов для активации поверхности, введения ингредиента, изменяющего коэффициент термического расширения, и др. Применяя ДТК, авторы успешно решали задачи по применению таких составов для неразъемного соединения деталей твердотельных гироскопов, оптико-волоконных линий связи, пластин солнечных батарей, стержней в пакетах термобатарей, малых вакуумных камер для опто- и микроэлектроники и др. В данной работе на нескольких примерах приведены результаты применения ДТК для неразъемного соединения деталей в различных изделиях.

Экспериментальная часть

Основными требованиями к ДТК в первую очередь являются высокие эксплуатационные характеристики и приемлемые технологические свойства: простота приготовления и применения, отсутствие токсичности, невысокая стоимость компонентов и используемого оборудования. Применяемый жидкий сплав должен иметь температуру плавления не выше 50 °С и обладать достаточной смачивающей способностью, а образующиеся интерметаллические соединения (ИМС) и твердые растворы с порошками-наполнителями должны обладать повышенными температурами плавления. Сплавы составов, мас. %: Bi — 40; Pb — 20; In — 20; Sn — 11; Cd — 6; Ga — 3 имеют температуру плавления $40 \pm 0,3$ °С (авторское свидетельство СССР № 464643), а без токсичного кадмия состава: Bi — 42,0; Sn — 14,7; In — 25,5; Pb — 16; Ga — 1,8 — 47,5 °С, сплавы на основе галлия: Ga — 64,0; In — 21,5; Sn — 12,7; Zn — 1,8 имеют ещё более низкую температуру — 9,0 °С и к тому же легко переохлаждаются [1]. Эти сплавы обладают хорошей смачивающей способностью с титаном, нержавеющей сталью (X18H10T), никелем, молибденом и могут использоваться в качестве жидкой матрицы с порошками металлов и сплавов. Введение в сплавы присадки редкоземельного металла улучшает смачивание прежде всего неметаллических материалов (стекла, кварца, керамики). Изучение взаимодействия этих сплавов с медным порошком (марка ПМСФ-40 с размером частиц 20–40 мкм, содержание порошка до 67 %) проводилось на образцах, которые готовили перемешиванием составов во фторопластовой ампуле в вибросмесителе (Amalgamator Z-1B, USA) при температуре ~ 50 °С в течение 25 ± 10 с до получения пастообразного состояния. Из пасты формировали образцы, которые подвергали термообработке при разных температурах и времени выдержки. Шлифы готовили по стандартной методике, травили и изучали структуру при увеличении (до $\times 600$) [2]. Микротвердость измеряли на ПТМ-3М. Коэффициент термического расширения — на dilatометре (Linseis L75/1250, USA). Матрицу ДТК готовили сплавлением исходных металлов при температуре на ~ 100 °С выше плавления наиболее тугоплавкого компонента с перемешиванием и выдержкой не менее одного часа. Образующуюся плёнку затем удаляли фильтрованием через стеклянные фильтры Шотта (диаметр пор ~ 100 мкм). Исходные образцы к соединению подготавливали («зашкуривали», травили и т. п.). Тугоплавкие металлы желательно электрохимически покрывать галлием, а керамику

для повышения прочности на отрыв — кварц-напылением (хромом, никелем). При использовании соединения «в стык» необходимо использовать приспособления (например, струбину). Если соединяемая конструкция внутри отверстия / обода, то при термообработке состав расширяется и создаёт необходимое давление, способствующее проникновению ДТК в поры. На начальной стадии термообработки при нанесенной ДТК вокруг частицы меди образуется тонкий слой (~ 1 мкм) фазы, состоящей из легкоплавкого сплава, насыщенного медью. По мере увеличения продолжительности термообработки происходит нарастание слоя фазы, более богатой медью (табл. 1).

Таблица 1

Толщина диффузионного слоя на медных частицах (диаметр 40–20 мкм) в зависимости от температуры (числитель, °C) и продолжительности (знаменатель, ч) термообработки

Порошок меди, %	Режим обработки	Толщина слоя, мкм	Порошок меди, %	Режим обработки	Толщина слоя, мкм
30	80/10	Не затвердел	57	80/10	До 5,0
-//-	120/10	-//-	-//-	120/10	До 10,0
45	80/10	-//-	67	80/10	До 5,0
-//-	120/10	До 3,0	-//-	120/15	> 10,0
-//-	180/6	>15,0	-//-	180/6	> 16,0

Толщина слоя при температурах 120 °C и выше для выдержки более 6 ч приводит к уменьшению размера частиц порошка меди и образованию вокруг них оболочек из ИМС с галлием, цинком, оловом и другими компонентами сплава, а также с твердыми растворами между ними. Процесс взаимодействия компонентов делится на стадию образования диффузионного слоя и стадию массопереноса во взаимно противоположных направлениях до затвердевания состава и полного «расходования» жидкой фазы. При термообработке 180 °C и выше в шве наблюдается значительная пористость, объясняемая существенной разностью коэффициентов диффузии меди и составляющих легкоплавкого сплава. Наличие пор свидетельствует о том, что массоперенос атомов в направлении легкоплавкий сплав → медь происходит со значительно большей скоростью. Снижение температуры термообработки позволяет выровнять коэффициенты диффузии и снизить порообразование. Этому может способствовать также использование порошков-наполнителей с повышенной активностью и реакционной способностью [3], а также применение порошков из сплавов, например CuSn (ПМОСФ5, ТУ48-1318-03-84) и др. Изучение структуры образцов показало, что при выборе оптимального состава (порошка сферического в количестве 55–60 %) дисперсностью 20–40 мкм, режима термообработки 120 °C и времени выдержки 10–12 ч в припое исключается наличие не провзаимодействующей с порошком жидкой фазы. Механическая прочность на отрыв образцов металлов, соединенных составом Bi-In-Pb-Sn-Ga-Cu, имеет значения, МПА: Ni-Ni 9–10; Ti-Ti 8–10; нержавеющая сталь — нержавеющая сталь 10–18, присадка до 1 % церия в состав пасты существенно повышает прочность на отрыв керамических образцов (табл. 2).

Таблица 2

Предел прочности на отрыв образцов неметаллических материалов, соединенных составами многокомпонентных сплавов с медным сферическим порошком, МПа

Состав припоя	Стекло — стекло	Кварц — кварц	АОК — АОК*	Медь — рубин
In-Sn-Pb-Bi-Cd-Cu	2,0 — 4,0	2,0 — 3,0	3,0 — 4,0	6,0 — 8,0
In-Sn-Pb-Bi-Cd-Ce-Cu	8,0 — 9,0	5,0 — 8,0	6,0 — 8,0	8,0 — 10,0
Bi-Pb-In-Sn-Cd-Ga-Ce-Cu-	10,0 — 11,0	7,0 — 10,0	8,0 — 9,0	9,0 — 11,0

* АОК — алюмооксидная керамика. Состав пасты, мас. %: (In — 19,1; Sn — 8,3; Pb — 22,6; Bi — 44,7; Cd — 5,3; жидкая матрица — 45 %) + 55 % Cu; температура плавления матрицы — 47 °C.

Время затвердевания шестикомпонентной матрицы (Bi-Pb-In-Sn-Cd-Ga) с медным порошком (60 %) при температуре 70 °C составляет 100 ч, а при 150 °C для аналогичного состава — 10 ч. Соединения изделий из стекла (К-8) с деталями из кобальта (29НК) или титана (ВТ-5) в изделиях радиоэлектронной аппаратуры успешно работают в диапазоне температур от -60 до +500 °C. Механическая прочность на отрыв соединений стекла и керамики составляет ~ 150 кг/см², а на разрыв соединенных металлов — 780 кг/см². Удельное электросопротивление приведенных составов, а также составов с порошками

из сплавов меди с оловом, серебром, кобальтом измеряли четырехзондовым методом в ультратермостате: оно изменяется в пределах $(90-180) \cdot 10^{-8}$ Ом·м, а температурный коэффициент — $(7,8-10,0) \cdot 10^{-4}$ мкм·см/град. Для вакуумплотных соединений лучшей температурой термообработки является температура не выше 120 °С. Пористость соединительного шва при этом была на много ниже 3 %. Повышение химической активности путём введения редкоземельного элемента (церия) не только улучшает значения прочности на отрыв образцов, но и снижает температуру термообработки (на 10–20 °С) и продолжительность экспозиции образцов (на 3–7 ч) в термостате. Этот факт имеет значение, например, при использовании в соединениях волоконно-оптических кабелей с защитными эпоксиакрилатными покрытиями, некоторых полупроводников, пьезокерамики, ряда термоэлектрических материалов и др. Важной характеристикой паяного шва является температура распая, определяемая нами при скорости нагревания 8 грд./с и растягивающем напряжении 0,2 г/мм². Температура распая независимо от температуры затвердевания для приведенных составов (см. табл. 2) равна 740 ± 10 °С. Стендовые испытания полупроводниковых термомодулей проводили на тепловом стенде. Прочность и герметичность швов соединений полупроводниковых термомодулей испытывали с помощью воздействия линейных нагрузок (до 20 г), вибрационных (в диапазоне до 4900 Гц), одиночных ударов (100 г), тепло- и холодоустойчивости (от +125 до -60 °С). Соединения термомодулей этими составами выдержали испытания в указанных условиях [4]. Нанесение на основание термомодулей утолщенных слоёв ДТК позволяет компенсировать разновысотность «столбиков» термоэлементов в модуле. Перспективным является применение ДТК для запайки микрокамер в системе геттер — вакуумный прибор до периода активации геттерной пленки [5]. Герметичность швов проверяли давлением гелия до 4 атм в температурном интервале от комнатной до 500 °С на соединениях кварца и ситалла с молибденовым корпусом. При этом учитывали натекание газа за счёт газоотделения со стенок (например, из ситалла при температуре до 500 °С выделялось в количествах 10^{-6} л. мм рт. ст./см²: CO₂ — 26,1; (CO + N₂) — 30,5; CH₄ — 27,3; H₂O — 5,7; SnHn — 7,4; C₂H₂ — 1,6; H₂ — 1,2). Установлено, что натекание гелия через шов в соединениях разнородных материалов не превышает натекания этого газа через стенку кварца (КВ) толщиной 1 мм, обработанного по классу точности 14. Предложенные составы ДТК позволяют гарантировать в области герметизации волоконно-оптических линий связи значения герметичности при давлении воды до 6,0 МПа в течение 3 ч при температуре 20–25 °С после воздействий: при выдержке -50 и +50 °С (по 3 ч) с последующим термоциклированием. Герморазъёмы оптико-волоконных кабелей в наконечниках из ковара и нержавеющей стали показывают отсутствие разгерметизации при воздействии давления до 10 атм гелия и остаточном давлении 10^{-5} мм рт. ст. В месте соединения кварцевого волокна к поверхности ДТК герметизирующий состав обладает большей отражающей способностью вследствие высокой адгезии к поверхности кварца, что улучшает характеристики линии связи. Значения пористости соединений и герметичности соединений в зависимости от температуры отжига для двух видов стекла приведены в табл. 3. Использование не сфероподобных порошков (автоклавного медного с удельной поверхностью от 290 до 1140 см²/г, насыпным весом от 1,06 до 2,8 г/см³ [6]) с этими жидкими матрицами приводит к снижению содержания медного порошка в пасте и температуры распая (до 580–600 °С), увеличению пористости шва и натеканию газа, а также к существенному повышению механической прочности на срез (до 50 кг/см²).

Таблица 3

Зависимость герметичности соединений стекла
с коваром и двумя стеклами при 150 °С

Соединяемый материал	Температура отжига, °С	Пористость шва ДТК, %	Герметичность	
			Па	Торр
Стекло б/с-ковар	100	4,8	0,14	10^{-5}
-//-	200	8,2	$1,4 \cdot 10^2$	10^{-2}
Стекло н/к-ковар	100	5,2	0,14	10^{-5}
-//-	250	9,4	$1,4 \cdot 10^2$	10^{-2}
Стекло б/с-стекло б/с	100	4,6	0,14	10^{-5}
-//-	200	8,0	$1,4 \cdot 10^2$	10^{-2}

Примечание. б/с — боросиликатное стекло; н/к — натрий-калиевое стекло.

Важной характеристикой при соединении разнородных материалов является коэффициент термического расширения. Измерения проводили dilatометрическим методом на образцах диаметром 5 мм и высотой 10 мм в интервале до 150 °С и скорости нагрева 1,0 град/мин с использованием кварцевого пьезодатчика и автоматической регистрацией кривой деформации. Установлена линейная зависимость изменения длины от температуры. Для приведенных выше составов коэффициент линейного термического расширения лежит в интервале $(15\text{--}25) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ и существенно зависит от температуры термообработки для затвердевания. Введение в состав ДТК диоксида кремния (SiO₂) позволяет варьировать коэффициент термического расширения в интервале от $14 \cdot 10^{-6}$ (для состава Ga-In-Sn-Ag-Cu-10 % SiO₂) до $24,4 \cdot 10^{-6}$ (для 16,1Bi-8,0Pb-8,0In-4,4Sn-2,5Cd-1,1Ga-60,0Cu) град⁻¹. Замена медного порошка на железный также снижает коэффициент термического расширения состава до $13,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

Большой объём исследований был проведен на образцах из титана (BT-23) и нержавеющей стали (марки X18H10T) для заделки дефектов литья типа пор в подготовленных изделиях после прохождения окончательной механической обработки. Крышки после «залечивания» испытывались на герметичность давлением 190 кгс/см². Гарантия неизменности поверхности после заделки пор и раковин 18 лет. Рекомендованы составы, мас. %: Bi 16,1–18,1; Pb 8,0–9,0; In 8,0–9,0; Cd 2,5–2,6; Sn 4,4–5,0; Ga 1,0–1,3; Cu 60–55 (точность взвешивания $\pm 0,05$ г). Временное сопротивление разрыву (не менее 35 МПа) определялось на образцах-свидетелях размером 4 × 4 × 4 мм, выполненных на тех же составах. Хранение приготовленных композиций в твердом состоянии при комнатной температуре не более одной недели. Растворимость галлия в сплаве Вуда (мас. %: 50,0-Bi; 25,0-Pb; 12,5-Sn; 12,5-Cd при 20 °С) равна $0,75 \pm 0,05$ % [7]. Многокомпонентные составы с низким содержанием галлия (например, Bi — 19,7; Pb — 9,8; In — 9,8; Sn — 5,4; Cd — 2,8; Ga — 1,3; Ni — 13,3; Cu — 37,9) можно использовать для соединений в виде ленты, которую готовят прокаткой на вальцах с использованием фторопластовых пластин.

Матрица на основе галлиевого сплава

В отличие от бинарных систем галлия в системе Ga-In-Sn при температурах, близких к плавлению, установлено существенное взаимодействие между компонентами [8, 9]. Плавление эвтектического состава (76,0-Ga; 12,5-Sn; 20,5-In) происходит при температуре 10,6 °С, причём сплав легко переохлаждается. Галлий хорошо смачивает многие металлы и сплавы, и этим можно воспользоваться путем электрохимического осаждения его на электропроводящие поверхности. Электрохимическое галлирование можно проводить из щелочного натрий-галлатного раствора (NaOH 50–180, Ga 10–60 г/дм³) или сернокислого электролита (Ga₂(SO₄)₃ — 120–200; Na₂SO₄ — 150–190; H₂SO₄ до 55 г/дм³). Режим работы электролизера: температура 30–50 °С, плотность тока подбирается визуально, чтобы за определённое время получить нужное покрытие, анодом могут служить галлий, никель или нержавеющая сталь. Избыточный галлий стекает на дно электролизера. Для соединений ДТК деталей удобно использовать состав, мас. %: Ga — 23,4; Sn — 4,4; In — 7,2; Cu — 65. Время технологичности пасты до 1 ч. Приготовленную пасту в ампуле амальгамосмесителя можно разделить на небольшие порции и заморозить при температуре -5 ... -10 °С. Замороженная паста может сохраняться при этой температуре в течение нескольких недель. Использование замороженной пасты осуществляется после её прогрева при температуре 40–50 °С. Если поверхность соединяемых деталей предварительно не галлировалась, то смачивание проводится небольшим количеством приготовленной пасты с помощью ультразвукового паяльника или специального инструмента (вручную). Наносимый слой пасты должен покрывать деталь равномерно. Смешение порошка Cu + Sn (ТУ 48-1318-03-89) с частицами < 40 мкм и матрицы сплава (Ga-In-Sn) приводит к образованию ИМС CuGa₂, олово выделяется в виде отдельной фазы с образованием кристаллов размером меньше 1 мкм. Если пасту не подвергать термообработке, то через 2–3 ч после смешения появляется промежуточная фаза твёрдого раствора галлия в олове, которая через 5–6 ч исчезает с образованием конечного продукта — In₃Sn. Взаимодействие твёрдого раствора индия в меди с матрицей через несколько часов даёт фазу InSn₄, кристаллизующуюся монокристаллами. Активация состава [3] позволяет получать материал, пригодный для пломбирования жевательной группы зубов в стоматологии (патент РФ № 2024251). Предложенный материал «Металлодент-С» обладает хорошими адгезионными свойствами и прочностью, превышающей пределы пломбировочных амальгам (Degussa, Германия; ССТА-01, РФ). Прочность «Металлодента-С» через 1 ч — 160 МПа, через 24 ч — 400 МПа.

Состав ДТК можно привести к нужному коэффициенту термического расширения путём введения наполнителей с низким КТР, например циркония или гафния (их КТР $5,1\text{--}5,8 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹). Соединения диванодатов меди или цинка обуславливают отрицательный или близкий к нулевому объёмы

термического расширения в интервале температур от 20 до 400 °С (патент РФ №2438844). Сжатие и разворот ванадий-кислородных диортогрупп сопровождается распрямлением зигзагообразных металл-кислородных цепочек при неизменных расстояниях между слоями, что и является причиной аномального КТР [10]. Следовательно, КТР составов ДТК можно менять в широком интервале, однако механические свойства неразъёмного соединения при введении большого количества наполнителя значительно снижаются. Добавка 16,7 мас. % $\text{Cu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ в состав пасты снижает микротвердость (HV) шва на 140 ед. тв. [11].

Выводы

Экспериментально показана перспективность различных направлений использования диффузионно-твердеющих композиций на основе жидкой металлической матрицы из многокомпонентных сплавов цветных металлов с порошками меди, её сплавов и рядом наполнителей. На основе более легкоплавкой матрицы из галлиевых сплавов и порошков медных сплавов, подвергнутых механохимическому синтезу, получены стоматологические пломбировочные материалы, отличающиеся от амальгам нетоксичностью и более высокими адгезионными и механическими свойствами. Предлагаемые наполнители в ДТК позволяют изменять коэффициент термического расширения в широком интервале, что даёт возможность значительно снизить термические напряжения при соединениях разнородных материалов.

Список источников

1. Яценко С. П., Пасечник Л. А., Скачков В. М., Рубинштейн Г. М. Галлий: Технологии получения и применение жидких сплавов: монография. М.: РАН, 2020. 344 с.
2. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления: справочник. М.: Metallurgia, 1988. 400 с.
3. Григорьева Т. Ф., Барина А. П., Ляхов Н. З. Механохимический синтез в металлических системах. Новосибирск: Параллель, 2008. 311 с.
4. Новиков А. И., Яценко С. П. Пайка полупроводниковых термомодулей композиционными припоями // Сб. тр. Пермского ун-та «Химия, технология и промышленная экология неорганических материалов». Пермь, 2003. № 6. С. 134–140.
5. Chuntunov K. A., Yatsenko S. P. Recent Patents on Materials Science. Bentham Sci. Publishers. 2013, 6, p. 29–39.
6. Кобжанов Л. С., Курбатов А. П., Романов Г. А. Влияние состава электролита и температуры на электроосаждение порошков меди // Промышленность Казахстана. 2005. № 3 (30). С. 80–81; № 5 (32). С. 78–79.
7. Стельмах С. И. Физико-химические исследования легкоплавких сплавов индия и галлия: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Киев: ИОНХ, 1974. 36 с.
8. Яценко С. П. Галлий: Взаимодействие с металлами. М.: Наука, 1974. 229 с.
9. Яценко С. П., Хаяк В. Г. Композиционные припои на основе легкоплавких сплавов. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 186 с.
10. Ротермель М. В., Красненко Т. И., Петрова С. А., Захаров Р. Г. Термоактивные преобразования стабильных и метастабильных модификаций пированадата меди // Ж. неорган. химии. 2009. Т. 54, № 1. С. 22–26.
11. Яценко С. П., Скачков В. М. Способ бесфлюсовой пайки разнородных материалов // Ж. прикладной химии. 2011. Т. 84, вып. 11. С. 1917–1918.

References

1. Yatsenko S. P., Pasechnik L. A., Skachkov V. M., Rubinshtein G. V. *Gallii: Tehnologii polucheniya i primeneniye zidkikh splavov* [Technologies for the production and application of liquid alloys]. Moscow, RAS Publ., 2020, 344 p. (In Russ.).
2. Beckert M., Klemm H. *Sposoby metallograficheskogo travleniya* [Methods of metallographic etching]. Moscow, Metallurgy, 1988, 400 p. (In Russ.).
3. Grigor'eva T. F., Barinova A. P., Lyahov N. Z. *Mekhanohimicheskij sintez v metallicheskih sistemah*. [Mechanochemical synthesis in metal systems]. Novosibirsk, Parallel, 2008, 311 p. (In Russ.).
4. Novikov A. I., Yatsenko S. P. *Paika poluprovodnikovih termomodulei kompozitsionnymi priпойami* [Soldering of semiconductor thermomodules with composite solders]. *Sb. tr. Permskogo un-ta "Himiya, tekhnologiya i promyshlennaya ekologiya neorganicheskikh materialov"* [Proceedings of Perm University "Chemistry, technology and industrial ecology of inorganic materials"]. Perm, 2003, no. 6, pp. 134–140. (In Russ.).
5. Chuntunov K. A., Yatsenko S. P. Recent Patents on Materials Science. Bentham Sci. Publishers, 2013, 6, pp. 29–39.
6. Kobzhanov L. S., Kurbatov A. P., Romanov G. A. *Vliyanie sostava elektrolita i temperatury na elektroosagdeniye poroshkov medi* [Influence of electrolyte composition and temperature on electrodeposition of copper powders]. *Promyshlennost' Kazakhstana* [Industry of Kazakhstan], 2005, no. 3 (30), pp. 80–81; no (32), pp. 78–79. (In Russ.).
7. Stelmakh S. I. *Fiziko-khimicheskie issledovaniya legkoplavkikh splavov indiya i galliya* [Physico-chemical studies of low-melting alloys of indium and gallium]: autoref. dis. cand. chemical sciences [Abstract dissertation. PhD. chemical Sciences]. Kyiv, IONX, 1974, 36 p.
8. Yatsenko S. P. *Gallij. Vzaimodeystvie s metallami* [Gallium: Interaction with metals]. Moscow, Nauka, 1974, 220 p. (In Russ.).
9. Yatsenko S. P., Hayak V. G. *Kompozitsionnye pripoi na osnove legkoplavkikh splavov* [Composite solders based on low-melting alloys]. Yekaterinburg, Ural Branch of RAS Publ., 1997, 186 p. (In Russ.).

10. Rotermeľ V. M., Krasnenko T. I., Petrova S. A. etc. Termoaktivnye preobrazovaniya stabil'nyh i metastabil'nyh modifikacij pirovanadata medi [Thermoactive transformations of stable and metastable modifications of copper pyrovanadate]. *Zhurn. neorgan. himii* [Journal of inorganic chemistry], 2009, vol. 54, no 1, pp. 22–26. (In Russ.).
11. Yatsenko S. P., Skachkov V. M. *Sposob besflyusovoj pajki raznorodnyh materialov* [A method of flux-free soldering of dissimilar materials]. *Zh. prikladnoj himii* [Journal of applied chemistry], 2011, vol. 84, iss. 11, pp. 1917–1919. (In Russ.).

Информация об авторах

И. С. Медянкина — научный сотрудник;

В. М. Скачков — кандидат химических наук, старший научный сотрудник;

Л. А. Пасечник — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник;

Н.А. Сабирзянов — доктор технических наук, главный научный сотрудник.

Information about the authors

I. S. Medyankina — Researcher;

V. M. Skachkov — Ph. D., Senior Researcher;

L. A. Pasechnik — Ph. D., Leading Researcher;

N. A. Sabirzyanov — Dr. Tc., chief Scientific Officer.

Статья поступила в редакцию 30.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 30.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.