Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственной
университет, 2021

УДК 532.61.08:621.91.3; 669.71/669.719

Оригинальная статья

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ДИФфуЗИОННО-ТВЕРДЕЮЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПРИПОЕВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СМЕСЬЮ ПОРОШКОВ Ti – Mo

В.М. Скачков, Л.А. Пасечник, И.С. Медянкина, Н.А. Сабирзянов
ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения
Российской академии наук»
620990, Россия, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91
skachkov@ihim.uran.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.392

Аннотация: В статье обсуждается возможность регулирования свойств диффузионно-твердеющего припоя на основе легкоплавких сплавов галлий-олово, галлий-индий-олово, галлий-олово-цинк и твердой компоненты состоящей из порошка сплава медь-олово посредством введения смеси инертных порошков металлического титана и молибдена после термической обработки при различных температурах. Оценена микротвердость и термическая устойчивость композиционных диффузионно-твердеющих припоев. Показано, что термическая обработка при более высоких температурах способствует переходу припоя в равновесное состояние, при этом происходит резкое увеличение твердости. Методом рентгенофазового анализа определены образующиеся в результате диффузионного твердения фазы. Показано, что при различных температурах обработки образуются разные фазы – наноразмерные интерметаллические соединения. За счет небольших добавок наполнителей, инертных или слабовазаимодействующих с галлием, но хорошо им смачиваемых, характеристики диффузионно-твердеющего припоя значительно улучшаются.

Ключевые слова: композиционные диффузионно-твердеющие припои, металлический порошок, свойства, микротвердость, дифференциально-термический анализ.

1. Введение

Использование в промышленности, приборостроении и электронике бесфлюсовой пайки позволяет в большинстве случаев отказаться от традиционных $Sn-Pb$ припоев, что может значительно улучшить экологическую обстановку на предприятиях [1]. Разработано много композиционных припоев с низкими температурами плавления [2], в том числе и на основе легкоплавких сплавов галлия [3]. Важную роль в пайке диффузионно-твердеющими припоями играют твердые растворы и интерметаллические соединения (ИМС), которые обладают более сложными структурами, чем простые эвтектические сплавы-припои. Поведение ИМС в системах $Ga-Sn$ и $Ga-Cu-Sn$ является предметом научных исследований [4, 5].

Влияние различных металлических добавок к диффузионно-твердеющим припоям (ДТП) рассмотрены нами в работе [6], а введение порошков титана и молибдена по-отдельности в работах [7, 8]. Целью же данной работы стало изучение изменения характеристик композиционных диффузионно-твердеющих припоев, получаемых смешиванием при комнатной температуре жидких сплавов $Ga-Sn$, $Ga-In-Sn$ и $Ga-Sn-Zn$ с

© В.М. Скачков, Л.А. Пасечник, И.С. Медянкина, Н.А. Сабирзянов, 2021

порошком сплава $Cu-Sn$ (ПМОСФ5 -40) [9] при введении порошков: металлического Ti , полученного дроблением и измельчением титановой губки [10] (см. рис. 1) и металлического Mo [11], каждого по 5 мас. %.

Рис. 1. Микрофотография порошка Ti , полученного измельчением титановой губки. Увеличение $\times 100$, масштаб 100 мкм.

2. Методы исследования

Жидкий сплав на основе галлия готовили смешением навесок чистых компонентов, помещенных в тигель, с последующим нагреванием в муфельной печи Nabertherm L 9/11 до температуры немного выше плавления наиболее тугоплавкого компонента – Sn ($231,9^{\circ}C$) или Zn ($419,6^{\circ}C$), далее выдержкой при этой температуре не менее двух часов. Сплавы охлаждали до температуры, при которой эвтектика находится в жидком состоянии ($25^{\circ}C$) и фильтровали через фильтр Шота (условный диаметр пор спеченного стекла 100 мкм).

Измельчение титановой губки производили в вибрационной мельнице (MLW 4000 KM 1) с агатовой ступкой и шариком. Смешивание компонентов диффузионно-твердеющего припоя осуществлялось следующим образом: взвешивание на аналитических весах компонентов жидкого сплава и порошков, помещение навесок во фторопластовую ампулу [12], которая вставляется в амальгаматор (Amalgamator Z-18, MFG. Englewood NY 07631). Получаемые пасты сохраняли свою консистенцию не менее 30 мин. Далее формовались образцы в виде таблеток диаметром 1 см и подвергались термической обработке при температурах 125 и $500^{\circ}C$ в течение 4–6 часов. Дифференциально-термический анализ (ДТА) различных составов ДТП проведен на приборе Thermoscan-2 (ООО «Аналитприбор»). Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов выполнен на дифрактометре ДРОН-2,0 (излучение CuK_{α} , интервал углов $10^{\circ} \leq 2\theta \leq 70^{\circ}$, шаг съемки $0,03^{\circ}$, время 2 сек.), идентификацию фаз осуществляли с помощью картотеки [13]. Морфологию поверхности исследуемых

образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе JSM–6390 LA, JEOL (коэффициент увеличения от 5 до 300000, разрешающая способность 3.0 нм при 30 кВ). Микротвердость (в ед. тв.) полученных образцов измерялась на микротвердомере (ПМТ-3М) с нагрузкой 100 г (0,98 Н).

3. Результаты и обсуждение

Припои имели следующий состав: 30 мас.% жидкий сплав и 60 мас.% $Cu-Sn$ сплав, порошки 5 мас.% Ti и 5 мас.% Mo . Значения микротвердости полученных образцов после термической обработки приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения микротвердости исследуемых образцов.

№ п/п	Исследуемый образец	Микротвердость, ед.тв.	
		Температура обработки, °С	
		125	500
1	$30Ga - Sn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$	70	121
2	$30Ga - In - Sn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$	37	334
3	$30Ga - Sn - Zn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$	94	359

Сравнивая полученные данные по микротвердости с данными нашей предыдущей статьи, следует, что отсутствие индия в галлиевом сплаве и наличие цинка способствует увеличению твердости ДТП при низкотемпературной обработке, однако уже при 500°С картина меняется, и цинк и индий уже способствуют увеличению твердости, как и добавки порошков Ti и Mo . Эти добавки при невысоких температурах мало взаимодействуют с компонентами ДТП. При высокотемпературной обработке (500°С) микротвердость композиционного ДТП $30Ga - Sn - Zn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$ возросла до 359 ед. тв., микроструктуры этого ДТП представлены на рис. 2. Образующиеся (кроме основной фазы $CuGa_2$) в результате диффузионного твердения некоторые дополнительные ИМС представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Найденные РФА дополнительные фазы ИМС.

№ п/п	Исследуемый образец	ИМС	
		Температура обработки, °С	
		125	500
1	$30Ga - Sn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$	Cu_9Ga_4 , $GaMo_3$	Cu_9Ga_4 , Sn_5Ti_6 , $CuGa_5Ti_2$
2	$30Ga - In - Sn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$	Cu_9In_4 , $InSn_{19}$, $Mo_{7,62}Ga_{41}$	$Cu_{41}Sn_{11}$, $In Sn_{19}$
3	$30Ga - Sn - Zn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$	$Ga_{0,1}Ti_{0,9}$, Cu_6Sn_5	Cu_9Ga_4 , Cu_3Ti , $Mo_{7,396}Ga_{40,392}$

На микрофотографиях видны сферические частички $Cu-Sn$ сплава, которые уменьшились в 1,5–2 раза (с 40 мкм до 15–30 мкм), медь при повышенной температуре образует новые сплавы с галлием и ИМС, главным образом $CuGa_2$, а частички порошков титана и молибдена располагаются в межзеренном пространстве практически без изменений, лишь их незначительная часть провзаимодействовала. И как показывает РФА наноразмерный в плоском сечении металлический титан легче, чем сферический микронный молибден (92% зерен размером менее 5 мкм) взаимодействует с галлием.

Дифференциально-термический анализ свежеприготовленных паст композиционных припоев проводили при скорости нагрева $10^\circ/\text{мин}$ до 500°C , массы исследуемых образцов в среднем 3 г, в качестве эталона был оксид алюминия, прокаленный при 1000°C в течение 24 часов [14], графики ДТА представлены на рис. 3-5. Экзотермические эффекты и диапазоны температур представлены в Таблице 3.

Рис. 2. Микроструктура ДТП $30Ga-Sn-Zn+60Cu-Sn+5Ti+5Mo$ после термообработки: а – 125°C , б – 500°C . Увеличение $\times 1000$, масштаб 10 мкм.

Рис. 3. ДТА до 500°C ДТП $30Ga-Sn+60Cu-Sn+5Ti+5Mo$: кривая 1 – первичный нагрев, кривая 2 – повторный нагрев.

Рис. 4. ДТА до 500°C ДТП $30Ga - In - Sn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$: кривая 1 – первичный нагрев, кривая 2 – повторный нагрев.

Рис. 5. ДТА до 500°C ДТП $30Ga - Sn - Zn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$: кривая 1 – первичный нагрев, кривая 2 – повторный нагрев.

Таблица 3. Результаты определения термических эффектов.

№ п/п	Исследуемый образец	Температурный диапазон, °С	Термический эффект, Дж/г
1	$30Ga - Sn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$	60-221	19,2
		222-343	9,6
		389-402	0,08
		415-430	0,06
		434-446	0,04
		449-463	0,05
Повторный нагрев		216-236	-0,13
2	$30Ga - In - Sn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$	82-198	9,4
		200-420	15,0
		437-500	0,94
Повторный нагрев		368-394	0,1
3	$30Ga - Sn - Zn + 60Cu - Sn + 5Ti + 5Mo$	60-216	21,6
		218-348	12,3
		432-500	1,0
Повторный нагрев		220-240	-0,13

При повторном нагреве у образцов № 1 и № 3 наблюдаются небольшие эндотермические эффекты, всего по $-0,13$ Дж/г, что свидетельствует о наличии обратимых процессов в кристаллах, связанных с перестройкой в структуре сплава. В образце № 2 этот эффект не наблюдается, и можно сделать предположение, что это связано с наличием в системе индия.

4. Заключение

Небольшое количество металлических порошков, аддитивно снижающих коэффициент термического расширения и повышающих механическую прочность композиционных диффузионно-твердеющих припоев на основе сплавов галлия целесообразно использовать при соединении разнородных материалов с отличающимися коэффициентами термического расширения. Галлий в таких сплавах с оловом и индием, а также цинком, взаимодействует с медью и образует, кроме основного ИМС $CuGa_2$ другие ИМС, а компоненты припоя дают еще ряд соединений, определенных РФА: Cu_9Ga_4 , $GaMo_3$, Sn_5Ti_6 , $CuGa_5Ti_2$, Cu_9In_4 , $InSn_{19}$, $Mo_{7,62}Ga_{41}$, $Cu_{41}Sn_{11}$, $InSn_{19}$, $Ga_{0,1}Ti_{0,9}$, Cu_6Sn_5 , Cu_3Ti , $Mo_{7,396}Ga_{40,392}$. Образование ИМС снижает пластичность сплавов, но появляются другие свойства, благоприятствующие их техническому использованию. Разработанные припои имеют температуру разрушения не ниже $600^\circ C$, не токсичны и не взрывоопасны, экологически намного безвредней $Sn-Pb$ припоев. Пастообразная консистенция первоначального состава сохраняется около 30 мин, времени достаточно, чтобы качественно обработать припоем соединяемые элементы. Это также исключает растрескивание и деформацию в результате термообработки, так как нагрев и охлаждение можно проводить плавно и без тепловых ударов. Использование наноразмерных порошков позволяет включать их во взаимодействие, даже такие химически стойкие, как титан.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ИХТТ УрО РАН.

Библиографический список:

1. Новосельцева, М.М. Социально-экономические мероприятия в промышленности, направленные на охрану труда / М.М. Новосельцева // Заметки ученого. – 2020. – № 8. – С. 238-245.
2. Яценко, С.П. Композиционные припои на основе легкоплавких сплавов / С.П. Яценко, В.Г. Хаяк // Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 186 с.
3. Яценко, С.П. Галлий: Технологии получения и применение жидких сплавов: Монография / С.П. Яценко, Л.А. Пасечник, В.М. Скачков, Г.М. Рубинштейн. – М.: РАН, 2020. – 344 с.
4. Nagy, E. Investigation of intermetallic compounds in $Sn-Cu-Ni$ lead-free solders / E. Nagy, F. Kristcaly, A. Gyenes, Z. Gaácsi // Archives of Metallurgy and Materials. – 2015. – V. 60. – I. 2b. – P. 1511-1515. DOI: 10.1515/amm-2015-0163.

5. Гойда, Э.Ю. О микротвердости композита $Ga-Cu-Sn$, полученного мультивибрационной обработкой его жидкотвердой смеси / Э.Ю. Гойда, И.Э. Игнатьев, А.Б. Шубин // Бутлеровские сообщения. – 2018. – Т. 56. – № 10. – С. 112-117. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/18-56-10-112.
6. Скачков, В.М. Композиционный припой на основе порошков металлов и галлиевого сплава / В.М. Скачков, Н.А. Шевырев, Л.А. Пасечник, С.П. Яценко // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2017. – Вып. 9. – С. 455-464. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.455.
7. Скачков, В.М. Диффузионно-твердеющий припой на основе сплава галлий-индий-олово и порошка металлов ПМОСF5, упрочненный титаном / В.М. Скачков, Л.А. Пасечник, О.В. Скачкова, С.П. Яценко // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 600-608. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.600.
8. Скачков, В.М. Изучение свойств диффузионно-твердеющего композиционного припоя $GaSn-CuSn-Mo$ / В.М. Скачков, Л.А. Пасечник, С.П. Яценко // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 722-730. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.722.
9. Порошок сплава медь-олово сферической формы. Технические условия: ТУ 48-1318-03-89. – Взамен ТУ 48-1318-03-84; введ. 25.05.1989. – М., 1989. – 9 с.
10. Титан губчатый. Технические условия: ГОСТ 17746-96. – Взамен ГОСТ 17746-79; введ. 01.07.2000. Минск, 1996. – 6 с.
11. Молибден металлический высокой чистоты: ТУ 48-19-69-80. – Взамен ТУ 48-19-69-73; введ. 01.07.1980. – М., 1980. – 32 с.
12. Шубин, А.Б. Получение металлических композиций из смесей медь-содержащего порошка и галлиевого расплава: определение оптимальных параметров виброобработки / А.Б. Шубин, Е.В. Игнатьева, И.Э. Игнатьев // Бутлеровские сообщения. – 2016. – Т. 45. – № 3. – С. 116-121.
13. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). – Режим доступа: www.url:https://www.icdd.com/pdf-2/. – 15.06.2021.
14. Speyer, R.F. Thermal Analysis of Materials. – New York: Marcel Dekker, 1994. – 298 p.

References:

1. Novoseltseva M.M. Socio-economic measures in industry aimed at labor protection [Social and economic measures in industry aimed at labor protection], *Zametki Uchenogo [Scientist's Notes]*, 2020, no. 8, pp. 238-245. (In Russian).
2. Yatsenko S.P., Hayak V.G. *Kompozicionnye pripoi na osnove legkoplavkikh splavov* [Composite solders based on low-melting alloys]. Ekaterinburg, Ural Branch of RAS Publ., 1997, 186 p. (In Russian).
3. Yatsenko S.P., Pasechnik L.A., Skachkov V.M., Rubinshtein G.V. *Gallii: Tehnologii polucheniya i primeneniye zhidkikh splavov* [Technologies for the production and application of liquid alloys]. Moscow, RAS Publ., 2020, 344 p. (In Russian).
4. Nagy E., Kristály F., Gyenes A., Gaácsi Z. Investigation of intermetallic compounds in $Sn-Cu-Ni$ lead-free solders, *Archives of Metallurgy and Materials*, 2015, vol. 60, issue 2b, pp. P. 1511-1515. DOI: 10.1515/amm-2015-0163.
5. Goyda E.Yu., Goyda E.Yu., Ignatiev I.E., Shubin A.B. O mикротвердости kompozita $Ga-Cu-Sn$, poluchennogo multivibratsionnoy obrabotkoy ego zhidkotverdoj smesi [On the microhardness of the composite $Ga-Cu-Sn$ obtained multivibration the processing idkategori mixture], *Butlerovskie Soobshcheniya [Butlerov Communications]*, 2018, vol. 56, no. 10, pp. 112-117. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/18-56-10-112. (In Russian).
6. Skachkov V.M., Shevyrev N.A., Pasechnik L.A., Yatsenko S.P. Composite solders on the basis of metal powders and gallium alloy, *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2017, issue 9, pp. 455-464. DOI: 10.26456/pcascnn/2017.9.455. (In Russian).
7. Skachkov V.M., Pasechnik L.A., Skachkova O.V., Yatsenko S.P. Diffuzionno-tverdeyushchij pripoj na osnove splava gallij-indij-olovo i poroshka metallov PMOSF5, uprochnennyj titanom [Diffuzionno-hardening solders based alloy gallium-indium-tin and powder of metal PCTSP5 reinforced with titanium], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2018, issue 10, pp. 600-608. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.600. (In Russian).
8. Skachkov V.M., Pasechnik L.A., Yatsenko S.P. Izuchenie svojstv diffuzionno-tverdeyushchego kompozitsionnogo pripoya $GaSn-CuSn-Mo$ [Study of properties of diffusion-hardening composite solder $GaSn-CuSn-Mo$], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical*

- and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2020, issue 12, pp. 722-730. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.722. (In Russian).
9. *Poroshok splava med'-olovo sfericheskoi formy. Tekhnicheskie usloviya* [Spherical copper-tin alloy powder. Specifications]. Specifications RF, no. 48-1318-03-89. Moscow, 1989. 9 p. (In Russian).
10. *Titan gubchatyj Tekhnicheskie usloviya: GOST 17746-96* [Sponge titanium. Specifications: State Standard 17746-96]. Minsk, 1996. 6 p. (In Russian).
11. *Molibden metallicheskiy vysokoi chistoty* [High Purity Molybdenum Powder]. Specifications RF, no. 48-19-69-80. Moscow, 1980. 32 p. (In Russian).
12. Shubin A.B., Ignatieva E.V., Ignatiev I.E. Poluchenie metallicheskih kompozitsij iz smesey med'-soderzhashchego poroshka i gallievogo raspava: opredelenie optimal'nykh parametrov vibroobrabotki [Producing of the metallic compositions from the mixes of copper-containing powders and gallium melts: determination of optimum vibration treatment parameters], *Butlerovskie soobtscheniy [Butlerov Communications]*, 2016, vol. 45, no. 3, pp. 116-121. (In Russian).
13. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). Available at: <https://www.icdd.com/pdf-2/> (accessed 15.06.2021).
14. Speyer R.F. *Thermal Analysis of Materials*. New York, Marcel Dekker Publ., 1994, 298 p.

Original paper

STUDY OF THE PROPERTIES OF DIFFUSION-HARDENING COMPOSITE SOLDERS MODIFIED WITH A Ti-Mo POWDER MIXTURE

V.M. Skachkov, L.A. Pasechnik, I.S. Medyankina, N.A. Sabirzyanov

The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.392

Abstract: The article discusses the possibility of regulating the properties of diffusion-hardening solder based on low-melted gallium-tin, gallium-indium-tin, gallium-tin-zinc alloys and a solid component consisting of a copper-tin alloy powder by introducing a mixture of inert powders of metallic titanium and molybdenum after the heat treatment at various temperatures. The microhardness and thermal stability of composite diffusion-hardening solders are evaluated. It is shown that the heat treatment at higher temperatures contributes to the transition of the solder to an equilibrium state, while a sharp increase in hardness occurs. The phases formed as a result of diffusion hardening were determined by the method of X-ray phase analysis. It is shown that at different processing temperatures, different phases are formed - nanoscale intermetallic compounds. Due to small additives of fillers that are inert or weakly interacting with gallium, but are well wetted by it, the characteristics of the diffusion-hardening solder are significantly improved.

Keywords: composite diffusion-hardening solders, metal powder, properties, microhardness, differential thermal analysis.

Скачков Владимир Михайлович – к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук»
Пасечник Лилия Александровна – к.х.н., ведущий научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук»
Медянкина Ирина Сергеевна – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук»

Сабирзянов Наиль Аделевич – д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук»

Vladimir M. Skachkov – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Heterogeneous Processes, The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

Liliya A. Pasechnik – Ph. D., Leading Researcher, Laboratory of Heterogeneous Processes, The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

Irina S. Medyankina – postgraduate student, Junior Researcher, Laboratory of Heterogeneous Processes, The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

Nail A. Sabirzyanov – Dr. Sc., Chief Researcher, Laboratory of Heterogeneous Processes, The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

Поступила в редакцию/received: 18.07.2021; после рецензирования/revised: 20.08.2021; принята/accepted 24.08.2021.