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**

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

выпуск 10

ТВЕРЬ 2018

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 Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

www.physchemaspects.ru

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – 708 с.

ISBN 978-5-7609-1395-1

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011.

Сборник составлен из оригинальных статей 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. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

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

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1395-1

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2018

© Тверской государственной
университет, 2018

УДК 544.72.05:546.82-661.635.41:669.71:617.3

**ДИФфуЗИОННО-ТВЕРДЕЮЩИЙ ПРИПОЙ НА ОСНОВЕ СПЛАВА
ГАЛЛИЙ-ИНДИЙ-ОЛОВО И ПОРОШКА МЕТАЛЛОВ ПМОСФ5,
УПРОЧНЕННЫЙ ТИТАНОМ**

В.М. Скачков, Л.А. Пасечник, О.В. Скачкова, С.П. Яценко
ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения
Российской академии наук»
620990, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91
skachkov@ihim.uran.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.600

Аннотация: В статье рассмотрен новый состав диффузионно-твердеющего припоя на основе легкоплавкого галлиевого сплава и порошка медно-оловянного сферического (ПМОСФ5). Исследовано влияние состава порошкового наполнителя – титана на структуру и свойства припоя для расширения областей использования. Изучены прочностные свойства, микроструктура, термическая стойкость полученных образцов.

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

Исследование и разработка бессвинцовых припоев не прекращается уже более двух десятилетий [1]. Неразъемное соединение разнородных материалов диффузионно-твердеющими припоями (ДТП) путем нанесения паст при комнатной температуре с последующей низкотемпературной обработке (до 180 °С) широко применяется в новой технике (гироскопы, оптические квантовые генераторы, солнечные батареи, электронные системы и др.). Введение в состав такой пасты-композиата гетеродисмических соединений позволяет получить соединительный шов, обладающий промежуточным значением коэффициента термического расширения между соединяемыми деталями [2, 3]. Механохимическая активация обеспечивает генерацию неравновесных структур дефектов, что позволяет резко повысить реакционную способность и синтезировать новые фазы с высокой химической активностью. Создан нетоксичный пломбировочный материал, имеющий удобное время технологичности и превышающий механические показатели токсичных амальгам, «металлодент»/серебряная амальгама: предел прочности на сжатие через 1 час 160/110 МПа, микротвердость через 24 часа 2000/1200 МПа [4]. Затвердевание композиций на основе матрицы из галлиевых сплавов с порошками меди или меди с оловом, цинком, серебром, индием, висмутом и др. происходит в основном с образованием среднетемпературных (450–550 °С) соединений. Разработан способ электролитического нанесения компонентов и обсуждено влияние различных факторов на прочность соединений [5-7].

Смачивание легкоплавким сплавом металлической (медной или медно-оловянной) составляющей и изменение объема за счет фазовых

переходов влияют на форму и структуру диффузионно-твердеющего припоя [8] также как и при контактно-реактивной пайке [9]. На первой стадии затвердевания композита образуется тонкий слой фазы легкоплавкого сплава, насыщенного медью, а затем идет образование интерметаллического соединения $CuGa_2$ и других соединений (Cu_9Ga_4), но уже с меньшей скоростью, причем модификация оставшегося галлия при кристаллизации будет меняться в зависимости от геометрии пространства [10]. Менее химически активные компоненты из твердого раствора в меди или из галлиевого сплава обеспечивают протекание других реакций, например, из твердого раствора медь-индий-олово образуется In_3Sn .

Пастообразное состояние композита позволяет намного проще решить многие актуальные вопросы неразъемного соединения разнородных материалов (металлы, сплавы, стекло, керамика, ситаллы, полупроводники и др.). Традиционная пайка обычно требует применения флюсов, что приводит к загрязнению шва, а температура пайки и распая шва близки. Пайка при температуре выше 300 °С приводит к образованию внутренних напряжений, снижающих прочность. Прочность сцепления галлиевых припоев с подложками после термообработки, кг/мм²: $Ga/SiO_2 = 1,5$; $(Ga + In)/SiO_2 = 1,5$; $(Ga + Sn)/SiO_2 = 1,6$; $(Ga + In + Sn)/SiO_2 = 1,7$; $Ga/Al_2O_3 = 0,8$; $Ga/C = 0,2$; для металлических материалов $Ni - Ni, Cu - Cu, Ti - Ti, Ti - Ni$, нержавеющая сталь (НС) - нержавеющая сталь, ковар-никель и др.) = 0,8–4,4; германиевых и кремниевых пластин, кг/см²: 3,9–8,0.

У авторов имеется большое число примеров успешного применения галлиевых композитов для решения прикладных задач в технике: замена стыка металл-резина на герметичные соединения при посадке кварцевых люков кабин и обойм стержней оптического квантового генератора (ОКГ) на корпус, «залечивание» раковин и трещин на изделиях титановых и других отливок, герметизация переходных узлов волоконно-оптической линии связи, посадка тонких пластин, в том числе солнечных батарей или столбиков термоэлементов на подложки, соединение кварцевых частей волнового твердотельного гироскопа, введение сверхтвердых наполнителей (синтетические алмазы) для буровых колонок, запайка микрокамер вакуумной оптоэлектроники и др.

Почти все составы диффузионно-твердеющих припоев получены эмпирическим путем, и полного понимания закономерностей взаимодействия находящихся в твердом состоянии металлов и жидкой составляющей припоя до сих пор нет. Часто неизвестно, какое из интерметаллических соединений образуется первым, если, согласно равновесным диаграммам состояния, в системе освобождающихся элементов может существовать несколько интерметаллических соединений

[11]. Жидкий галлий «растворяет» большинство металлов, образуя сплавы и интерметаллиды с довольно низкими механическими свойствами, именно поэтому соприкосновение с галлием приводит многие конструкционные материалы к потере прочности, но ИМС галлия с медью и оловом приобретают удовлетворительную прочность и химическую стойкость, почему и выбираются именно эти составы.

Приготовление диффузионно-твердеющей пасты (припоя) заключается в помещении взвешенных на аналитических весах компонентов жидкого сплава и порошков во фторопластовую ампулу. Смешение компонентов осуществляется в ампуле, вставляемой в амальгаматор (Amalgamator Z-18, MFG. Englewood NY 07631), в течении 10–20 сек (см. рис. 1).

Рис. 1. Внешний вид амальгаматора.

Объем смешиваемых компонентов не должен превышать $1/3$ объема ампулы, имеющей форму усеченного конуса. Для приготовления 2 см^3 пасты требуется ампула размером $\varnothing_{\text{наружн.}} = 20$ и $L_{\text{наружн.}} = 40$ мм. Получаемая паста сохраняет свои технологические свойства, т.е. свою консистенцию пригодную для нанесения на образцы в течение ~ 30 мин. Продление времени использования пасты достигается путем быстрой ее заморозки и последующей разморозки перед использованием. В этом случае паста сохраняет свои свойства в твердом виде в течение нескольких недель. Для соединения нержавеющей стали и сплавов никеля с керамикой, кварцем, стеклом рекомендуется припой (ГИОМ): эвтектический сплав $\text{Ga} - \text{In} - \text{Sn}$ с $\text{Cu} - \text{Sn}$ порошком марки ПМОСФ5-40 (ТУ 48-1318-03-89), данные по механической прочности соединений приведены в Таблице 1.

Введение в пастообразный припой материалов, слабо

взаимодействующих при выбранной температуре, в том числе титановый порошок марки ПТК-2 (ТУ 14-22-57-92), требует обеспечения полного взаимодействия жидкой фазы матричного сплава со всеми вводимыми порошками (смачивание). Микроструктура сплава после низкотемпературной термообработки при варьировании содержания титанового порошка в исходной пасте, состоящей из медно-оловянного порошка и галлий-индий-оловянного сплава, представлена на рис. 2.

Таблица 1. Механическая прочность соединений различных материалов

Соединяемые материалы	Прочность на разрыв, кг/мм ²	Соединяемые материалы	Прочность на разрыв, кг/мм ²
Никель-никель	1,0-1,6	НС-титан	0,8-1,2
Латунь-латунь	2,0-3,0	НС-ковар	0,9-1,3
Медь-медь	2,9-4,4	Титан-титан	1,0-1,5
НС-никель	0,9-1,2	Титан-ковар	1,0-1,5
НС-Ст3	0,8-1,0	Титан-никель	0,9-1,2
НС-керамика	0,6-0,8	Ковар-ковар	1,2-1,8
НС-НС	1,1-1,3	Ковар-никель	0,9-1,3

Примечание: Существенный разброс значений прочности зависит как от лужения поверхности соединяемых деталей, так и от используемой пасты. Применение пасты после длительного хранения в замороженном виде (до 30 дней) снижает показатели прочности на 15–20 %.

Рис. 2. Микроструктура припоя с порошком титана: а – 5 %, б – 10 %, в – 15 %, увеличение $\times 500$.

При применении пайки диффузионно-твердеющими припоями имеется особенность, заключающаяся в использовании многокомпонентных легкоплавких сплавов и порошков различных металлов, которые после изотермической выдержки (50–150 °С) образуют новые фазы со значительно более высокими температурами распая (твердые растворы, интерметаллические соединения и др.). Для улучшения свойств таких припоев используют твердые порошкообразные наполнители, что приводит к изменению свойств диффузионно-твердеющих припоев [12]. Продолжение исследований

показало, что повторная термообработка при повышенной температуре, близкой к температуре распая, изменяет механические свойства припоя. Результаты измерения микротвердости полученных композиций в зависимости от состава и температурной обработки приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Изменение микротвердости диффузионно-твердеющего припоя (ДТП) при термообработке и введении порошкового титана как наполнителя

№ п/п	Состав припоя	Температура термообработки, °C	
		150	500
		Микротвердость, МПа	
1	<i>Ga–In–Sn</i> 70 % - <i>Cu–Sn</i> 30 %	59	111
2	<i>Ga–In–Sn</i> 70 % - <i>Cu–Sn</i> 30 %	62	206
3	<i>Ga–In–Sn</i> 70 % - <i>Cu–Sn</i> 25 % - <i>Ti</i> 5 %	42	96
4	<i>Ga–In–Sn</i> 70 % - <i>Cu–Sn</i> 20 % - <i>Ti</i> 10 %	133	195
5	<i>Ga–In–Sn</i> 70 % - <i>Cu–Sn</i> 15 % - <i>Ti</i> 15 %	68	140

Как видно из Таблицы 2 наибольшую твердость после прокатки получил состав с добавкой титана 10 масс.%. Титан растворяется в галлии с образованием интерметаллида Ga_3Ti , и его растворимость: $9,5 \cdot 10^{-3}$ при температуре 400 °C и $3,9 \cdot 10^{-2}$ ат.% при 500 °C [13].

Дифференциально-термический анализ (ДТА) различных припоев был проведен на приборе Thermoscan-2 (ООО «Аналит-прибор») (см. рис. 3-6).

Рис. 3. – ДТА ДТП без добавки наполнителя.

Рис. 4. – ДТА ДТП–Ti (5 масс.%).

Термический эффект показывает взаимодействие меди с галлием, согласно диаграмме состояний *Cu–Ga* [14] происходит фазовый переход. Несомненно, интересны следующие фазы этой системы: α -фаза (*Cu*) (твердый раствор галлия в меди с кристаллической решеткой типа A2);

γ -фаза (Cu_9Ga_4 с решеткой типа γ -латуни) и ζ -фаза (Cu_3Ga с кристаллической решеткой типа А3). У α - и γ -фаз при нагреве идет непрерывный рост параметра кристаллической решетки, а у ζ -фазы проявляется аномалия с параметром c , два максимума значений этого параметра при 130 и 430 °С, возможно, связаны с частичным процессом упорядочения атомов.

Рис. 5. – ДТА ДТП–Ti (10 масс.%).

Рис. 6. – ДТА ДТП–Ti (15 масс.%).

Вероятно, в этих твердых галлиевых растворах протекает взаимодействие между титаном и медью [15], которые образуют между собой ИМС, например, α -TiCu₄ существует при температуре < 400 °С, а образуется при температурах между 400 и 500 °С. И последнее, так как процесс нагрева происходит в атмосфере воздуха, то идет окисление компонентов припоя, в том числе титана, как активного металла.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ИХТТ УрО РАН (№ АААА-А16-116122810213-2).

Библиографический список:

1. Шепелевич, В.Г. Структура быстрозатвердевших сплавов висмут олово, дополнительно легированных индием / В.Г. Шепелевич // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2016. – № 8. – С. 404-409.
2. US Patent №4695125, G02B 6/36; G02B 7/26. Hermetic optical attenuator / Sinclair W.J., Kovats T.F.I., Straus J.; Northern Telecom Limited, Montreal, Canada. 22.09.1987. – 4 p.
3. Патент 2438844 Российская Федерация, МПК B23K35/24 (2006.01). Диффузионно-твердеющий припой / Красненко Т.В., Яценко С.П., Андрианова Л.В., Леонидова О.Н., Скрыбнева Л.М., Пасечник Л.А.; заявитель и патентообладатель Институт химии твердого тела УрО РАН. – № 2010118798/02; заявл. 11.05.10; опубл. 10.01.12, Бюл. № 1. – 5 с.
4. Яценко, С.П. Композиционные припои на основе легкоплавких сплавов /

- С.П. Яценко, В.Г. Хаяк. - Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 186 с.
5. **Yatsenko, S.P.** Method of fluxless soldering of dissimilar materials / S.P. Yatsenko, V.M. Skachkov // Russian Journal of Applied Chemistry. - 2011. - V. 84. - I. 11. - P. 2002-2004.
6. **Скачков, В.М.** Влияние твердой компоненты диффузионно-твердеющих припоев на свойства соединительного слоя / В.М. Скачков, С.П. Яценко, Л.А. Пасечник, Н.А. Сабирзянов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2015. – Вып. 7. – С. 463-470.
7. **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.
8. **Фридман, Я.Б.** Механические свойства металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – Ч. 1: Деформация и разрушение. – 472 с. – Ч. 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. – 368 с.
9. **Ахкубеков, А.А.** Контактное плавление меди с алюминием / А.А. Ахкубеков, П.К. Коротков, А.Р. Манукянц, М.Х. Понежев, В.А. Созаев // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2015. – Вып. 7. – С. 59-62.
10. **Латышева, Е.Н.** Полиморфизм сплавов *Ga–In* в условиях наноконфайнмента / Е.Н. Латышева, А.Л. Пирозерский, Е.В. Чарная, Ю.А. Кумзеров и др. // Физика твердого тела. – 2015. – Т. 57. – Вып. 1. – С. 124-128.
11. **Казаков, В.С.** Разработка галлиевых паст-припоев для низкотемпературной пайки медных и титановых сплавов с керамикой: автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06: защищена 14.11.07 / Казаков Владимир Сергеевич. – Красноярск: СФУ, 2007. – 24 с.
12. **Шелег, В.К.** Циклическая и длительная прочность паяных композиционным припоем соединений из меди / В.К. Шелег, Е.Ю. Латыпова, Ю.А. Цумарев, Т.С. Латун // Вестник Полоцкого государственного университета. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение. – 2009. – Серия В. – № 8. – С. 71-77.
13. **Пасечник, Л.А.** Интерметаллические соединения в жидком галлии / Л.А. Пасечник, В.М. Скачков, С.П. Яценко // V Российская научно-техническая конференция «Физические свойства металлов и сплавов», Екатеринбург, 16-18 ноября 2009 года: тезисы докладов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ. – С. 68.
14. **Дриц, М.Е.** Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справочник / М.Е. Дриц, Н.Р. Бочвар, Л.С. Гузей и др.; отв. ред. Н.Х. Абрикосов. – М.: Наука, 1979. – 248 с.
15. **Лякишев, Н.П.** Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3 т. / Н.П. Лякишев. – М.: Машиностроение, 1997. – Т. 2. – 1024 с.

References:

1. **Shepelevich, V.G.** Struktura bystrozatverdevshih splavov vismut olovo, dopolnitel'no legirovannyh indiem / V.G. Shepelevich // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2016. – no. 8. – P. 404-409.
2. **US Patent №4695125, G02B 6/36; G02B 7/26.** Hermetic optical attenuator / Sinclair W.J., Kovats T.F.I., Straus J.; Northern Telecom Limited, Montreal, Canada. 22.09.1987. – 4 p.
3. **Patent 2438844 Rossijskaya Federaciya, MPK B23K35/24 (2006.01).** Diffuzionno-

- tverdeyushchij pripoj / Krasnenko T.B., Yacenko S.P., Andrianova L.V., Leonidova O.N., Skryabneva L.M., Pasechnik L.A.; zayavitel' i patentoobladatel' Institut himii tverdogo tela UrO RAN. – no. 2010118798/02; zayavl. 11.05.10; opubl. 10.01.12, Byul. no. 1. – 5 p.
4. **Yatsenko, S.P.** Kompozicionnye pripoi na osnove legkoplavkikh splavov / S.P. Yatsenko, V.G. Hayak. Ekaterinburg: UrO RAN, 1997. – 186 p.
5. **Yatsenko, S.P.** Method of fluxless soldering of dissimilar materials / S.P. Yatsenko, V.M. Skachkov // Russian Journal of Applied Chemistry. - 2011. - V. 84. - I. 11. - P. 2002-2004.
6. **Skachkov, V.M.** Vliyanie tverdoj komponenty diffuzionno-tverdeyushchih pripoev na svoystva soedinitel'nogo sloya / V.M. Skachkov, S.P. Yatsenko, L.A. Pasechnik, N.A. Sabirzyanov // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2015. – I. 7. – P. 463-470.
7. **Skachkov, V.M.** Kompozicionnyj pripoj na osnove poroshkov metallov i gallievogo splava / V.M. Skachkov, N.A. Shevyrev, L.A. Pasechnik, S.P. Yatsenko // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2017. – I. 9. – P. 455-464.
8. **Fridman, Ya.B.** Mekhanicheskie svoystva metallov. – M.: Mashinostroenie, 1974. – Ch. 1: Deformatsiya i razrushenie. – 472 p. – Ch. 2. Mekhanicheskie ispytaniya. Konstrukcionnaya prochnost'. – 368 p.
9. **Ahkubekov, A.A.** Kontaktnoe plavlenie medi s alyuminiem / A.A. Ahkubekov, P.K. Korotkov, A.R. Manukyants, M.H. Ponezhev, V.A. Sozaev // Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov. – 2015. – I. 7. – P. 59-62.
10. **Latysheva, E.N.** Polimorfizm splavov *Ga–In* v usloviyah nanokonfajmenta / E.N. Latysheva, A.L. Pirozerskij, E.V. Charnaya, Yu.A. Kumzerov i dr. // Fizika tverdogo tela. – 2015. – V. 57. – I. 1. – P. 124-128.
11. **Kazakov, V.S.** Razrabotka gallievyh past-pripoev dlya nizkoterturnoj pajki mednyh i titanovyh splavov s keramikoj: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.06: zashchishchena 14.11.07 / Kazakov Vladimir Sergeevich. – Krasnoyarsk: SFU, 2007. – 24 p.
12. **Sheleg, V.K.** Ciklicheskaya i dlitel'naya prochnost' payanyh kompozicionnym pripoem soedinenij iz medi / V.K. Sheleg, E.Yu. Latypova, Yu.A. Cumarev, T.S. Latun // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. Mashinovedenie. – 2009. – Seriya V. – no. 8. – P. 71-77.
13. **Pasechnik, L.A.** Intermetallicheskie soedineniya v zhidkom gallii / L.A. Pasechnik, V.M. Skachkov, S.P. Yatsenko // V Rossijskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Fizicheskie svoystva metallov i splavov», Ekaterinburg, 16-18 noyabrya 2009 goda: tezis dokladov. – Ekaterinburg: UGTU-UI. – P. 68.
14. **Dric, M.E.** Dvojnye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi: spravochnik / M.E. Dric, N.R. Bochar, L.S. Guzej i dr.; otv. red. N.H. Abrikosov. – M.: Nauka, 1979. – 248 p.
15. **Lyakishev, N.P.** Diagrammy sostoyaniya dvoynyh metallicheskih sistem: Spravochnik v 3 vol. / N.P. Lyakishev. – M.: Mashinostroenie, 1997. – V. 2. – 1024 s.

**DIFFUZIONNO-HARDENING SOLDERS BASED ALLOY GALLIUM-INDIUM-TIN AND
POWDER OF METAL PCTSP5 REINFORCED WITH TITANIUM**

V.M. Skachkov, L.A. Pasechnik, O.V. Skachkova, S.P. Yatsenko

The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.600

Abstract: The paper considers a new composition of diffusion-hardening solder based on a low-melting gallium alloy and copper-tin spherical powder (PCTSP5). The influence of the powder

filler – titanium composition on the structure and properties of solder for expanding the areas of use is investigated. Strength properties, microstructure, thermal stability of the samples were studied.

Keywords: metal powder, composite diffusion-hardening alloys, solders, structure, 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., старший научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук»

Скачкова Ольга Владимировна – инженер лаборатории химии гетерогенных процессов ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук»

Яценко Сергей Павлович – д.х.н., профессор, 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

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

Olga V. Skachkova – Engineer, Laboratory of Heterogeneous Processes, The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

Sergey P. Yatsenko – Dr. Sc., Professor, Laboratory of Heterogeneous Processes, The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS