УДК 532.61.096: 621.812; 669.3/669.2/669.1 *Оригинальная статья*

Изменение свойств диффузионно-твердеющего композиционного припоя при модификации порошком из нержавеющей стали

В.М. Скачков, С.А. Бибанаева, Н.А. Сабирзянов
ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
620077, Россия, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91
skachkov@ihim.uran.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.761

Аннотация: В статье рассмотрены изменения структуры и микротвердости диффузионно-твердеющего припоя на основе легкоплавкого сплава галлий(68%)-индий(23,5%)-олово(8,5%) и твердой компоненты из порошка сплава медь-олово(5%) в зависимости от дозировки порошка из нержавеющей стали марки ПР-06ХН28МДТ. Порошок из нержавеющей стали добавляли в количестве 5, 10, 15, 20 мас.%, образцы припоя подвергали термической обработке при температурах 125 и 600°С, и сравнивали с базовым припоем состава 30 мас.% сплава галлий-индий-олово и 70 мас.% порошка сплава медь-олово. Методом рентгенофазового анализа определены фазы, образующиеся в результате взаимодействия компонентов припоя при разных режимах термообработки. Методом дифференциально-термического анализа выявлены термические эффекты при образовании твердых растворов и интерметаллических соединений галлия с переходными металлами в температурном диапазоне 17-600°С. Показано, что термическая обработка при температурах выше 450°С способствует переходу припоя в равновесное состояние, что приводит к увеличению твердости, в том числе из-за равномерного распределения наноразмерных включений. Методом сканирующей электронной микроскопии выявлено, что нержавеющая сталь имеет ограниченную растворимость в составе диффузионно-твердеющего припоя, но после высокотемпературной обработки (600°С) снижает его твердость за счет нарушения состава твердого раствора галлий-медь.

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

Скачков Владимир Михайлович – к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
Бибанаева Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
Сабирзянов Наиль Аделевич – д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

Original paper

Change in properties of diffusion-hardening composite solder when modified with stainless steel powder

V.M. Skachkov, S.A. Bibanaeva, N.A. Sabirzyanov
The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.761

Abstract: The article discusses changes in the structure and microhardness of diffusion-hardening solder based on low-melting alloy gallium (68%) -indium (23,5%) -tin (8,5%) and a solid component from copper-tin alloy powder (5%) depending on the dosage of stainless steel powder. Stainless steel powder was added in an amount of 5, 10, 15, 20% by weight, solder samples were heat treated at temperatures of 125 and 600°C, and compared with a base solder composition of 30% by weight of gallium-indium-tin alloy and 70% by weight of copper-tin alloy powder. The X-ray phase analysis method determines the phases formed as a result of the interaction of solder components under different heat treatment modes. The method of differential thermal analysis revealed thermal effects in

© В.М. Скачков, С.А. Бибанаева, Н.А. Сабирзянов, 2026

the formation of solid solutions and intermetallic compounds of gallium with transition metals in the temperature range of 17-600°C. It has been shown that thermal treatment at temperatures above 450°C promotes the transition of the solder to an equilibrium state, which leads to an increase in hardness, in particular, due to the uniform distribution of nanoscale inclusions. Scanning electron microscopy revealed that stainless steel has limited solubility in the composition of diffusion-hardening solder, but after high-temperature treatment (600°C) reduces its hardness due to violation of the composition of the gallium-copper solid solution.
Keywords: composite diffusion-hardening solders, metal powder, properties, microhardness, differential thermal analysis.

Vladimir M. Skachkov – Ph. D., Senior Researcher, Laboratories of heterogeneous processes chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0003-2551-3235
Svetlana A. Bibanaeva – Researcher, Laboratories of heterogeneous processes chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-1181-8735
Nail A. Sabirzyanov – Dr. Sc., Chief Researcher Laboratories of heterogeneous processes chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, ORCID: 0000-0002-0304-8160

Поступила в редакцию/received: 10.04.2026; после рецензирования/revised: 29.04.2026; принята/accepted: 30.04.2026.

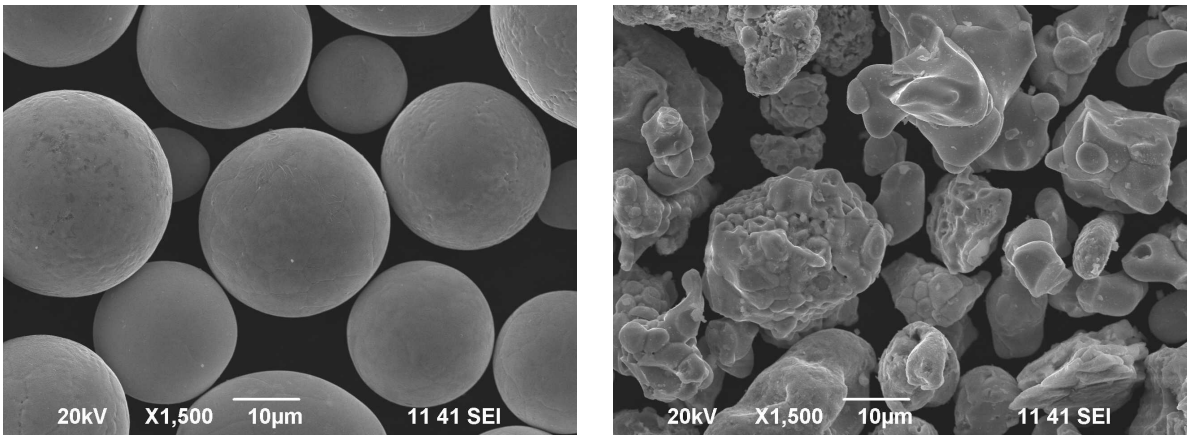
1. Введение

Главным потребителем галлия в эру всеобщей компьютеризации стало производство полупроводников [1, 2], при этом металлический галлий и его сплавы имеют ограниченное применение, при этом обладая широким спектром использования в различных приложениях [3]. Диффузионно-твердеющие припои (ДТП) на основе легкоплавких сплавов галлия для бесфлюсовой пайки разнородных материалов способны улучшит экологическую обстановку на предприятиях, но пока используются редко, что объяснимо. ДТП на основе легкоплавких сплавов галлия под действием невысоких температур (100-180°C) затвердевают медленно, за счет взаимной диффузии меди и галлия идет постепенное образование твердых растворов и интерметаллических соединений (ИМС), формируются сложные структуры [4, 5]. Без нагревания припоя процессы могут растягиваться на месяцы [6]. ДТП имеют весомые плюсы, такие как: (а) возможность соединять неметаллические материалы (стекло, керамика) и металлы (титан, цирконий), которые обычными составами соединить проблематично, (б) работа с таким припоем ведется при комнатной температуре, (в) стабильность паяного шва вплоть до 600°C [4, 5].

Выбор припоя в современной технике сложен и обоснование выбора это одна из решаемых инженерами задач [7, 8]. Модифицирование диффузионно-твердеющего припоя различными металлическими добавками [9-11] показало перспективность этого направления. Железо с галлием образует различные формы с неупорядоченными состояниями [12] и рассмотрение их влияния, особенно совместно с другими элементами стало целью данной работы, для этого рассмотрели изменение микротвердости ДТП при введении металлического порошка из нержавеющей стали (*НС*).

2. Методы исследования

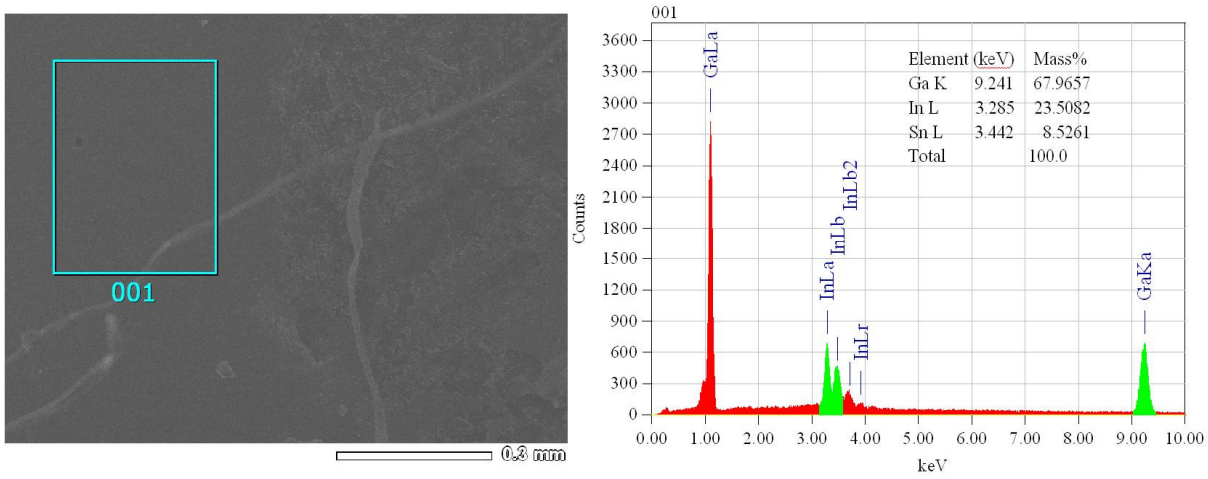
Рентгенофазовый анализ (РФА) выполнен на дифрактометре ДРОН-2,0 (излучение CuK_α, интервал углов $10° \le 2\Theta \le 80°$, шаг съемки 0,03°, время 2 сек.), идентификацию фаз осуществляли с помощью картотеки [13]. Дифференциально-термический анализ (ДТА) проведен на приборе Thermoscan-2 (ООО «Аналитприбор»), массы образцов ~3 г, эталоном служил оксид алюминия, прокаленный при 1000°С в течение 24 часов [14]. Морфологию поверхности исследуемых образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе JSM–6390 LA, JEOL (коэффициент увеличения от 5 до 30000, разрешающая способность 3,0 нм при 30 кВ) с встроенным анализатором EX-23010BU. Микротвердость по Виккерсу (H_V, МПа) измерялась на микротвердомере (ПМТ-3М) с нагрузкой 100 г (0,98 Н). ДТП готовили смешиванием при комнатной температуре жидкого сплава $Ga-In-Sn$ с порошком сплава $Cu-5\%Sn$ (ПМОСФ5) [15] (см. рис. 1 а). Добавление порошка из нержавеющей стали (ПР-06ХН28МДТ) [16] (см. рис. 1 б) в количестве 5, 10, 15 и 20 мас.% проводили от общей массы взамен порошка сплава $Cu-Sn$. Образцы подвергали термообработке в муфельной печи Nabertherm L 9/11 при температурах 125 и 600°С в течение 8 часов.



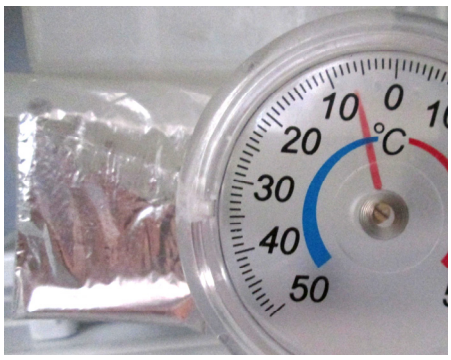
а б

Рис. 1. Микроструктура металлических порошков: а – ПМОСФ5 $Cu-5\%Sn$, б – ПР-06ХН28МДТ. Увеличение ×1500, масштаб 10 мкм.

Полученный жидкий сплав на основе галлия $68\%Ga-23,5\%In-8,5\%Sn$ (см. рис. 2 а) обладает таким свойством, как переохлаждение (см. рис. 2 б), что свойственно и самому галлию [5, 17], сплав оставался в жидком состоянии в холодильнике при температуре -10°С в течение месяца. Сплав готовили смешением навесок чистых компонентов, которые нагревали в фарфоровом тигле до температуры 250°С (выше температуры плавления Sn – 231,9°С) и фильтровали через фильтр Шота (диаметр пор 100 мкм).



а



б

Рис. 2. Фотографии сплава $68\%Ga-23,5\%In-8,5\%Sn$: а – поверхность сплава со спектром энергодисперсионного анализа, б – жидкая капля сплава в полиэтиленовом пакете при отрицательных температурах.

3. Результаты и обсуждение

Дифференциально-термический анализ припоев проводили при скорости нагрева 5°С/мин до температуры 600°С (см. рис. 3, 4), экзотермические эффекты и диапазоны температур представлены в Таблице 1.

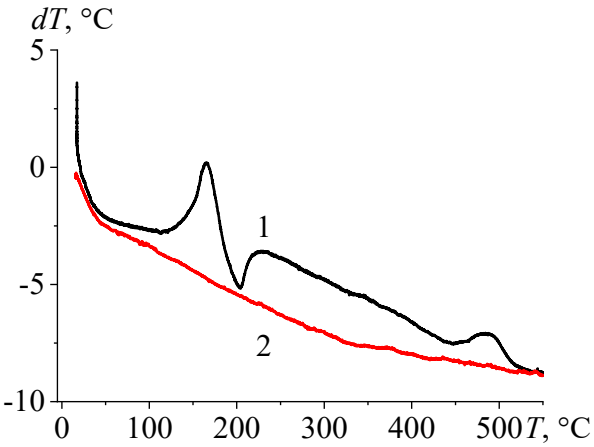


Рис. 3. ДТА до 600°С исходного припоя $30(Ga-In-Sn)+70(Cu-Sn)$: кривая 1 – первичный нагрев, кривая 2 – повторный нагрев.

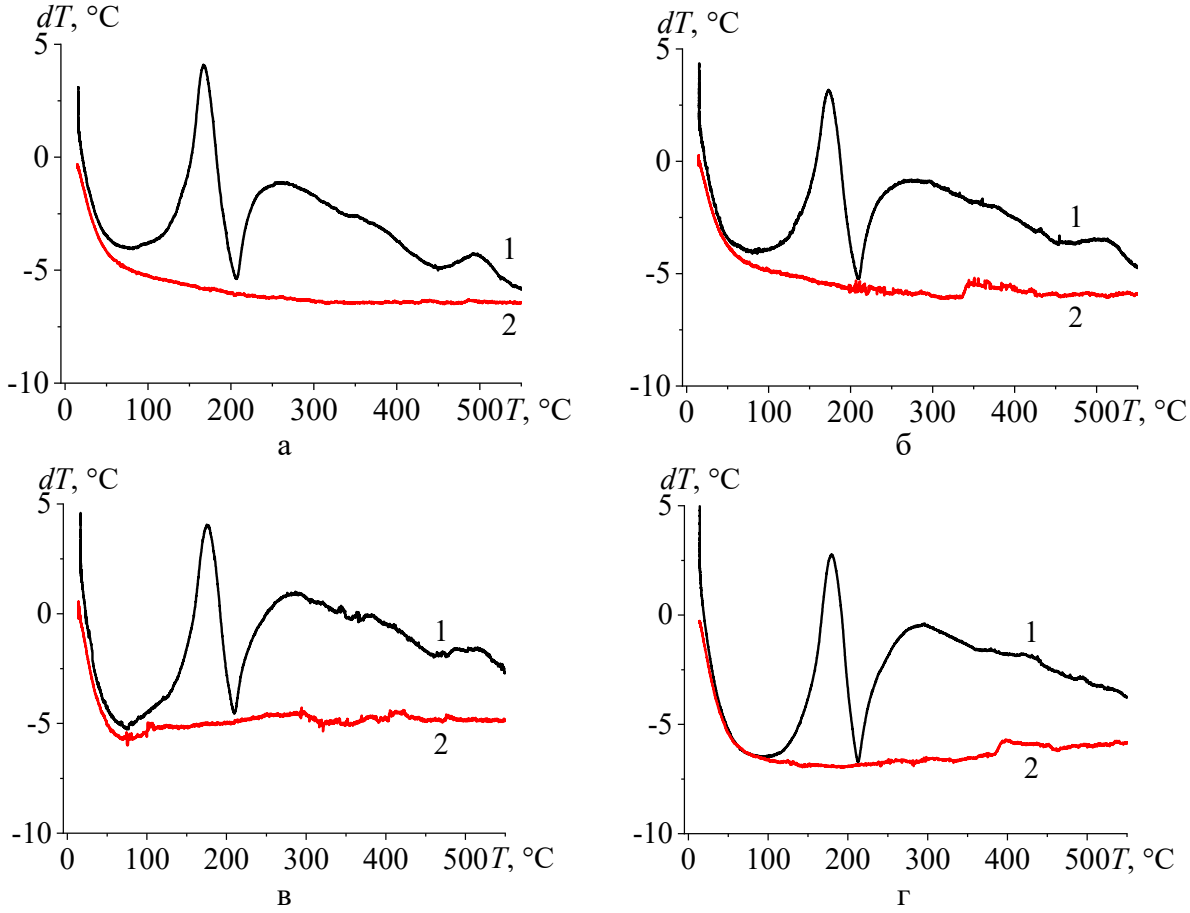


Рис. 4. ДТА до 600°С ДТП с наполнителем – порошок нержавеющей стали: кривые 1 – первичный нагрев, кривые 2 – повторный нагрев; а – $30(Ga-In-Sn)+65(Cu-Sn)+5HC$, б – $30(Ga-In-Sn)+60(Cu-Sn)+10HC$, в – $30(Ga-In-Sn)+55(Cu-Sn)+15HC$, г – $30(Ga-In-Sn)+50(Cu-Sn)+20HC$.

Таблица 1. Результаты определения термических эффектов.

№ п/п	Исследуемый образец	Температурный диапазон, °С	Термический эффект, Дж/г
1	$30(Ga-In-Sn)+70(Cu-Sn)$	115-202	12,4
		204-445	19,8
		450-521	2,8
2	$30(Ga-In-Sn)+65(Cu-Sn)+5HC$	76-205	15,2
		207-444	24,1
		453-531	1,4
3	$30(Ga-In-Sn)+60(Cu-Sn)+10HC$	83-207	14,7
		208-451	25,5
		476-542	1,0
4	$30(Ga-In-Sn)+55(Cu-Sn)+15HC$	73-208	12,1
		208-457	22,0
		480-555	1,1
5	$30(Ga-In-Sn)+50(Cu-Sn)+20HC$	102-212	12,1
		213-478	25,1
		484-499	0,03

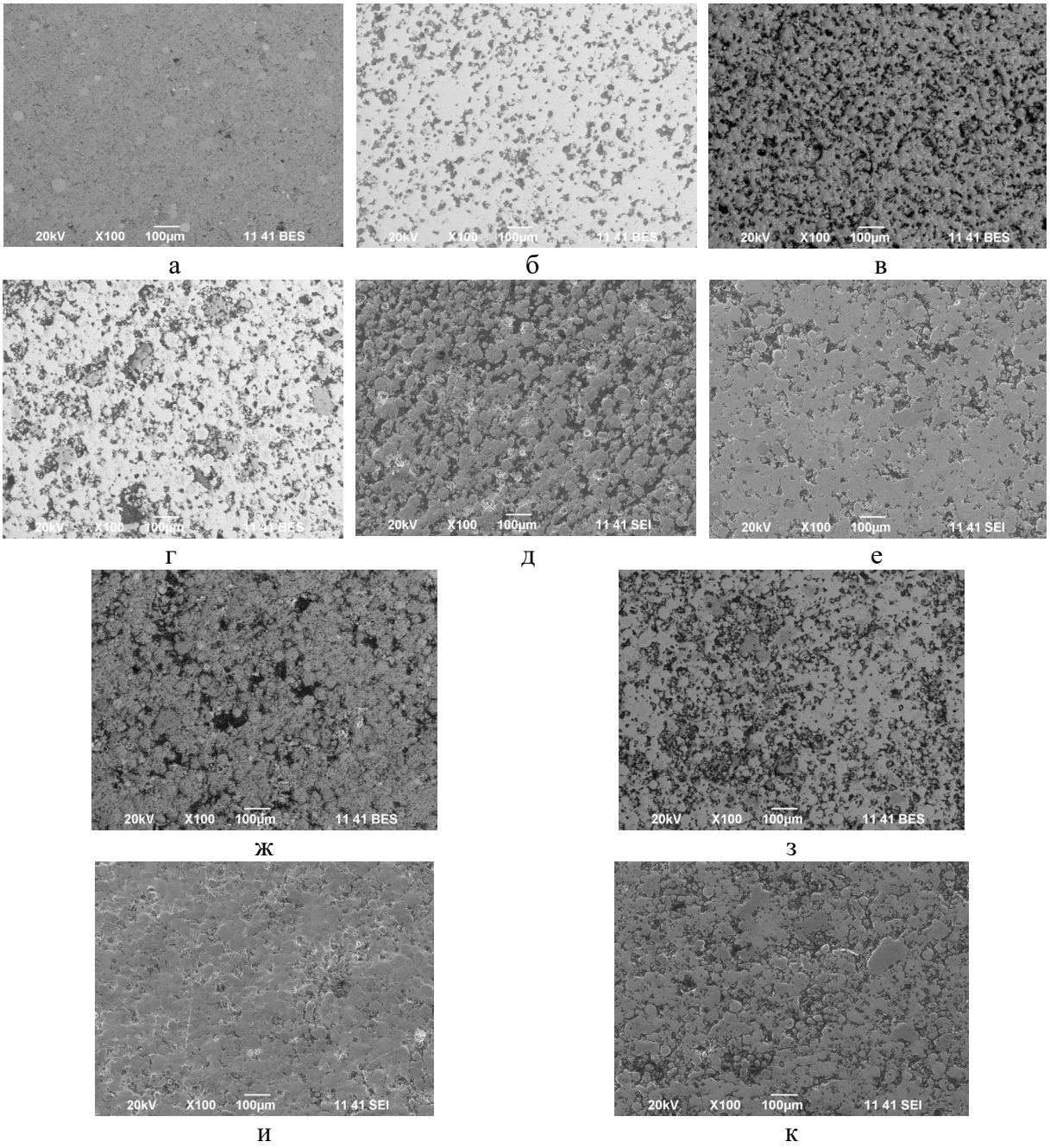


Рис. 5. Микроструктуры ДТП после различной термообработки (125 и 600°С), увеличение х100, масштаб 100 мкм,: а – $30(Ga-In-Sn)+70(Cu-Sn)$ 125°С, б – $30(Ga-In-Sn)+70(Cu-Sn)$ 600°С; в – $30(Ga-In-Sn)+65(Cu-Sn)+5HC$ 125°С, г – $30(Ga-In-Sn)+65(Cu-Sn)+5HC$ 600°С; д – $30(Ga-In-Sn)+60(Cu-Sn)+10HC$ 125°С, е – $30(Ga-In-Sn)+60(Cu-Sn)+10HC$ 600°С; ж – $30(Ga-In-Sn)+55(Cu-Sn)+15HC$ 125°С, з – $30(Ga-In-Sn)+55(Cu-Sn)+15HC$ 600°С; и – $30(Ga-In-Sn)+50(Cu-Sn)+20HC$ 125°С, к – $30(Ga-In-Sn)+50(Cu-Sn)+20HC$ 600°С.

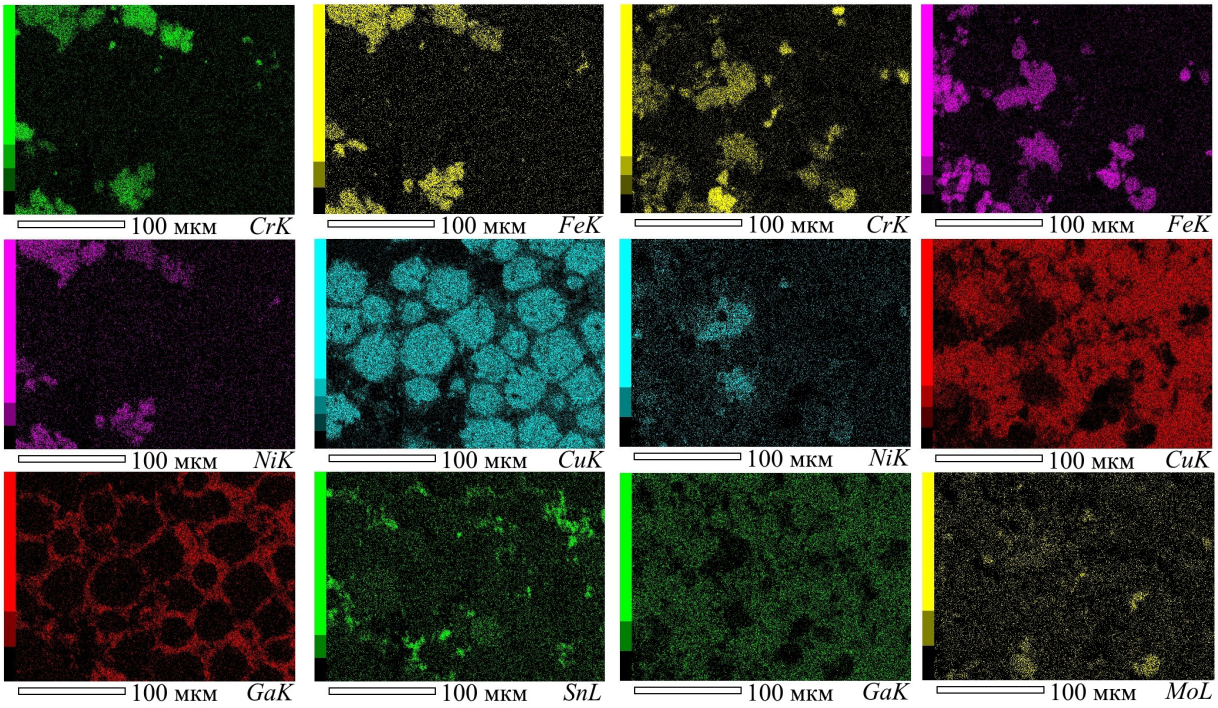
На всех дифрактограммах в районе 100°С присутствует эндотермический эффект (12-15 Дж/г), где проистекает образование твердых растворов, выделение в межзеренное пространство отдельные

нанофазы индия и олова, и частичное образование ИМС $CuGa_2$. Выше 200°С протекают взаимодействия компонентов припоя и образуются различные ИМС. Последний тепловой эффект в интервале температур 450-550°С окончательно формирует структуру и образование интерметаллидов.

Измерения микротвердости полученных образцов после термической обработки при 125 и 600°С приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерения микротвердости исследуемых образцов.

№ п/п	Исследуемый образец	Микротвердость H_V, МПа	
		Температура обработки, °С	
		125	600
1	$30(Ga-In-Sn)+70(Cu-Sn)$	450	4310
2	$30(Ga-In-Sn)+65(Cu-Sn)+5HC$	448	3820
3	$30(Ga-In-Sn)+60(Cu-Sn)+10HC$	619	3192
4	$30(Ga-In-Sn)+55(Cu-Sn)+15HC$	571	3491
5	$30(Ga-In-Sn)+50(Cu-Sn)+20HC$	592	2924



а б

Рис. 6. Карты распределения элементов ДТП $30(Ga-In-Sn)+55(Cu-Sn)+15HC$ после термообработки при температуре а – 125°С, б – 600°С.

Данные из Таблицы 2 показывают, что после термообработки при температуре 600°С микротвердость снижается по мере увеличения содержания HC, но ~ в 6 раз выше относительно низкотемпературной обработки. Добавки порошка нержавеющей стали при невысоких температурах обработки (125°С) мало взаимодействуют и микротвердость повышают за счет дисперсионного упрочнения, оптимально 10% HC.

Микроструктуры этих ДТП при разных температурах обработки представлены на рис. 5. Карты распределения некоторых элементов в ДТП представлены на рис. 6, где наглядно видно, как медно-оловянный сплав из порошка диффундирует под воздействием высоких температур и вместе с галлием образует основную матрицу, в которой размещается порошок *НС* . РФА показал, что при низкотемпературной обработке (125°С) кроме образования твердого раствора $Cu-Ga$ и небольшого количества ИМС $CuGa_2$ начинает образовываться ИМС $NiGa_3$, пока в небольших количествах 1-2%. Посте термообработки при температуре 600°С разнообразие ИМС больше, определяются $TiGa_3$, $GaCr_3$, $SnTiNi_2$, $SnCu_3$, и совсем немного, менее 1% $FeGa_3$. Индий и основная часть олова образуют эвтектический сплав с температурой плавления ~120°С и остаются наноразмерными включениями (1-20 нм) между зерен. Индий металл уникальный [18] и как «благородный» не вступает во взаимодействие с компонентами, также и молибден, входящий в состав нержавеющей стали не проявляет активности.

4. Заключение

Введение металлического порошка из нержавеющей стали ПР-06ХН28МДТ способствует упрочнению диффузионно-твердеющего припоя за счет дисперсионного упрочнения, его компоненты не взаимодействует с галлием и другими составляющими при температуре обработки 125°С, образуется только интерметаллическое соединение $CuGa_2$. При температуре обработки 600°С количество и разнообразие ИМС возрастает ($TiGa_3$, $GaCr_3$, $SnTiNi_2$, $SnCu_3$, $FeGa_3$), что способствует снижению микротвердости от повышения содержания нержавеющей стали в ДТП за счет образования большего числа дефектов на частичках порошка нержавеющей стали. Термический анализ показал, что наличие порошка нержавеющей стали в составе ускоряет процессы формирования ИМС и твердых растворов при температурах выше 200°С, снижая тем самых экзотермический эффект характерный для основного состава ДТП при температурах выше 450°С. Основным образующимся ИМС при всех составах был $CuGa_2$. Наличие ИМС увеличивая твердость, но снижают пластичность сплавов. Индий не вступает во взаимодействие с компонентами, выделяется вместе с оловом в межзеренном пространстве, и эти выделения имеют наноразмеры до 20 нм. Диффузионно-твердеющий припой с наполнителем из нержавеющей стали при температуре 600°С становятся тверже и не разрушается.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ИХТТ УрО РАН (№ 124020600007-8).

Библиографический список:

1. **Девицкий, О.В.** Современные методы получения тонких пленок $GaAs_{1-X-Y}N_XBi_Y$: обзор / О.В. Девицкий // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 636-648. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.636.
2. Mineral commodity summaries 2026 // In series: Mineral Commodity Summaries. – Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2026. – 222 p. DOI: 10.3133/mcs2026.
3. **Мараева, Е.В.** Особенности применения эвтектических расплавов на основе индия и галлия / Е.В. Мараева, Н.В. Пермяков, В.А. Мошников // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 760-776. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.760.
4. **Яценко, С.П.** Композиционные припои на основе легкоплавких сплавов / С.П. Яценко, В.Г. Хаяк // Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 186 с.
5. **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.
6. **Скачков, В.М.** Особенности динамики изменение свойств диффузионно-твердеющего припоя в различных условиях / В.М. Скачков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 699-706. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.699.
7. **Пашков, И.Н.** Выбор припоя при производстве резцов дорожных машин и исследование микроструктуры паяных соединений / И.Н. Пашков, М.Р. Гаджиев, В.А. Морозов, Т.А. Базлова // Сварочное производство. – 2024. – № 2. – С. 56-63.
8. **Галушка, И.А.** Оптимизация композиции припоя для соединения разноименного сочетания сплавов ЭП975 и ВКНА-25 с использованием современных вычислительных систем / И.А. Галушка, А.Н. Афанасьев-Ходыкин, М.Д. Пантелеев, С.Д. Зотов // Труды ВИАМ. – 2026. – № 2 (156). – С. 37-48. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-37-48.
9. **Скачков, В.М.** 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 // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2018. – Вып. 10. – С. 600-608. DOI: 10.26456/pcascnn/2018.10.600.
10. **Скачков, В.М.** Свойства диффузионно-твердеющего композиционного припоя модифицированного порошком ванадия / В.М. Скачков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 823-830. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.823.
11. **Скачков, В.М.** Свойства диффузионно-твердеющего композиционного припоя модифицированного порошками вольфрама / В.М. Скачков, Л.А. Пасечник, И.С. Медянкина, Н.А. Сабирзянов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 707-716. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.707.
12. **Дубов, Л.Ю.** Позитронная диагностика Fe–Ga сплавов / Л.Ю. Дубов, Ю.В. Штоцкий, О.В. Илюхина и др. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2026. – Вып. 17. – № 1. – С. 12-21. DOI: 10.56304/S2079562926010082.
13. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). – Режим доступа: www.url: https://www.icdd.com/pdf-2/. – 15.02.2026.
14. **Speyer, R.F.** Thermal Analysis of Materials. – New York: Marcel Dekker, 1994. – 298 p.
15. 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.
16. Порошки коррозионностойких сталей. Технические условия: ТУ 14-1-3540-83; введ. 01.10.1983. – М., 1983. – 9 с.
17. **Васильев, А.А.** Влияние магнитного поля на направленную кристаллизацию галлия / А.А. Васильев, Д.Ю. Нефедов, Е.В. Чарная и др. // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67. – № 10. – С. 1830-1836. DOI: 10.61011/FTT.2025.10.61958.272-25.
18. **Семенов, А.А.** Проблемы и перспективы извлечения индия и производства высокочистого металла / А.А. Семенов, С.А. Ухов, С.А. Семенов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: материаловедение и новые материалы. – 2025. –№ 2 (128). – С. 98-117.

References:

1. Devitsky O.V. Sovremennie metodi polucheniya tonkih pleonok $GaAs_{1-X-Y}N_XBi_Y$: obzor [Advanced methods for growth thin films of $GaAs_{1-X-Y}N_XBi_Y$: a review], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2025, issue 17, pp. 636-648. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.636. (In Russian).
2. Mineral commodity summaries 2026, *Mineral Commodity Summaries*. Reston, VA, U.S. Geological Survey, 2026, 222 p. DOI: 10.3133/mcs2026.

3. Maraeva E.V., Permiakov N.V., Moshnikov V.A. Osobennosti primeneniya e`vtekticheskix rasplavov na osnove indiya i galliya [The features of application of eutectic melts based on indium and gallium], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 760-776. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.760. (In Russian).
4. Yatsenko S.P., Hayak V.G. *Kompozitsionnye pripoi na osnove legkoplavkikh splavov* [Composite solders based on low-melting alloys]. Ekaterinburg, Ural Branch of RAS Publ., 1997, 186 p. (In Russian).
5. Yatsenko S.P., Pasechnik L.A., Skachkov V.M., Rubinshtein G.V. *Gallii: Gallij: Tekhnologii polucheniya i primenenie zhidkikh splavov: Monografiya* [Technologies for the production and application of liquid alloys]. Moscow, RAS Publ., 2020, 344 p. (In Russian).
6. Skachkov V.M. Osobennosti dinamiki izmeneniya svoistv diffuzionno-tverdeyushchij pripoj v razlichnih uslovijah [Features of dynamics change of properties of diffusion-hardening solder at various conditions], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 699-706. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.699. (In Russian).
7. Pashkov I.N., Gadzhiev M.R., Morozov V.A., Bazlova T.A. Vy`bor pripoya pri proizvodstve rezczov dorozhny`x mashin i issledovanie mikrostruktury` payany`x soedinenij [Selection of solder in the production of cutters for road machines and study of the microstructure of soldered joints], *Svarochnoe proizvodstvo [Welding International]*, 2024, no. 2, pp. 56-63. (In Russian).
8. Galushka I.A., Afanasiev-Khodikin A.N., Panteleev M.D., Zotov S.D. Optimizaciya kompozicii pripoya dlya soedineniya raznoimennogo sochetaniya splavov E`P975 i VKNA-25 s ispol`zovaniem sovremenny`x vy`chislitel`ny`x sistem [Optimization of the solder composition for joining dissimilar EP975 and VKNA-25 alloys using modern computational systems] *Trudy` VIAM [Proceedings of VIAM]*, 2026, no. 2 (156), pp. 37-48. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-37-48. (In Russian).
9. 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).
10. Skachkov V.M. Svoistva diffuzionno-tverdeyushchij kompozitsionnogo pripoj modifizirovannogo porosckom vanadij [Properties of diffusion-hardening composite solder modified with vanadium powder], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 823-830. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.823. (In Russian).
11. Skachkov V.M., Pasechnik L.A., Medyankina I.S., Sabirzyanov N.A. Svojstva diffuzionno-tverdeyushchego kompozitsionnogo pripoya modifitsirovannogo poroshkami vol'frama [Properties of diffusion-hardening composite solder modified with tungsten powders], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 707-716. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.707. (In Russian).
12. Dubov L.Yu., Shtotsky Yu.V., Ilyukhina O.V. et al. Pozitronnaja diagnostika Fe–Ga splavov [Positron diagnostics of Fe–Ga alloys], *Yadernaya fizika i inzhiniring [Physics of Atomic Nuclei]*, 2026, issue 17, no 1, pp. 12-21. DOI: 10.56304/S2079562926010082. (In Russian).
13. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). Available at: www.url: https://www.icdd.com/pdf-2/ (accessed 15.03.2026).
14. Speyer R.F. Thermal Analysis of Materials. New York, Marcel Dekker Publ., 1994, 298 p.
15. 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).
16. Poroshki korrozionnostojkikh stalei. Tekhnicheskie usloviya [Powders of corrosion-resistant steels]. Specifications RF, no. 14-1-3540-83. Moscow, 1983. 9 p. (In Russian).
17. Vasilev A.A., Nefedov D.Yu., Charnaya E.V. et al. Vliyanie magnitnogo polya na napravlennuyu kristallizaciyu galliya [Impact of magnetic field on directional crystallization in gallium], *Fizika tverdogo tela [Physics of the solid state]*, 2025, issue 67, no 10, pp. 1830-1836. DOI: 10.61011/FTT.2025.10.61958.272-25. (In Russian).
18. Semenov A.A., Ukhov S.A., Semenov S.A. Problemy` i perspektivy` izvlecheniya indiya i proizvodstva vy`sokochistogo metalla [Problems and prospects of indium recovery and production of high-purity metal], *Voprosy` atomnoj nauki i texniki. Seriya: materialovedenie i novy`e materialy` [Issues of atomic science and technology. Series: Materials Science and New Materials]*, 2025, no 2 (128), pp. 98-117. (In Russian).