

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.9

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.009

СИНТЕЗ И СТРУКТУРА ПРИПОЯ Cu–Sn–Ti ДЛЯ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ МИШЕНЕЙ

Борис Федорович Демьянов^{1†}, Алексей Гранитович Никифоров²,
Михаил Дмитриевич Старостенков³, Данила Алексеевич Никифоров⁴,
Михаил Федорович Блинов⁵

^{1, 2, 3} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

^{4, 5} Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 11, 630090, Новосибирск, Россия

¹ bfdemyanov@mail.ru[†]

² akexnik0113@mail.ru

³ genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>

⁴ nkdanila@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6034-5778>

⁵ mfblinov@gmail.ru

Аннотация. Проведено исследование структуры и физико-механических свойств паяного соединения сплава 29НК (ковар) с керамикой В₄С. Разработана методика синтеза припоя Cu–Sn–Ti для изготовления электрон-позитронных мишеней ускорителей нового поколения. В среде GEANT4 проведено моделирование распределения тепловыделения в потоке жидкого свинца толщиной 28 мм для энергии первичного электронного пучка 6 ГэВ. Показано, что температура достигает максимальных значений вблизи выходного окна мишени. Приготовление припоя и пайка проводились в вакууме при давлении 10^{−4} Па. Массовое соотношение компонентов припоя составляло: 73 % Cu, 18 % Sn, 9 % Ti. Максимальная температура при синтезе припоя 1100 °С. В процессе пайки образец нагревался до температуры 800 °С и выдерживался в течение 40 минут. Затем производился нагрев до температуры 950 °С, время выдержки 10 минут. Использовался ступенчатый режим охлаждения для снятия остаточных напряжений с выдержкой при температурах 800 °С, 700 °С, 550 °С. Исследование показало возможность использования припоя Cu–Sn–Ti для пайки электрон-позитронных мишеней. Паяное соединение ковар-керамика имеет слоистую структуру, позволяющую выделить три основных слоя: интерметаллический слой, состоящий из фазы Cu₃Sn, эвтектический слой и диффузионную зону. Образование интерметаллического слоя может происходить как на поверхности ковара, так и на поверхности керамики. Интерметаллический слой на границе с керамикой препятствует диффузии бора в припой и образованию диффузионной зоны, которая обеспечивает высокую адгезию припоя с керамикой. Возможны режимы пайки, при которых интерметаллиды на поверхности керамики не образуются, что позволяет сформировать обширную диффузионную зону. При использованных режимах пайки на границе с коваром образуется интерметаллическая фаза, что может привести к хрупкому разрушению паяного соединения. Измерение микротвердости паяного соединения показали следующие значения: зона интерметаллидов – 2,5 ГПа, зона эвтектики – 1 ГПа, диффузионная зона с переменной микротвердостью, возрастающей от 1 до 5,5 ГПа.

Ключевые слова: электрон-позитронная мишень, ковар, карбид бора, фазовый состав, интерметаллид, эвтектика, микроструктура, микротвердость.

Для цитирования: Демьянов Б.Ф., Никифоров А.Г., Старостенков М.Д., Никифоров Д.А., Блинов М.Ф. Синтез и структура припоя Cu–Sn–Ti для электрон-позитронных мишеней // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 4. С. 501–507. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.009.

Original article

SYNTHESIS AND STRUCTURE OF Cu–Sn–Ti SOLDER FOR ELECTRON-POSITRON TARGETS

Boris F. Dem'yanov^{1†}, Alexey G. Nikiforov², Mikhail D. Starostenkov³,
Danila A. Nikiforov⁴, Mikhail F. Blinov⁵^{1,2,3} I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia^{4,5} Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Acad. Lavrentieva Pr., 11, Novosibirsk, 630090, Russia¹ bfdemyanov@mail.ru[†]² akexnik0113@mail.ru³ genphys@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6326-7613>⁴ nkdanila@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6034-5778>⁵ mfblinov@gmail.ru

Abstract. The structure and physico-mechanical properties of the brazed joint of 29NK alloy with B₄C ceramics were studied. A method for the synthesis of Cu–Sn–Ti solder for the manufacture of electron-positron targets of new generation accelerators has been developed. Solder preparation and soldering were carried out in vacuum at a pressure of 10–4 Pa. The mass ratio of solder components was: 73 % Cu, 18 % Sn, 9 % Ti. The maximum temperature during the synthesis of solder was 1100 °C. During soldering, the sample was heated to a temperature of 800 °C and held for 40 minutes. Then it was heated to a temperature of 950 °C, the exposure time was 10 minutes. A stepwise cooling mode was used to avoid residual stresses with holding at temperatures of 800 °C, 700 °C, 550 °C. The study showed the possibility of using Cu–Ti–Ni solder for brazing electron-positron targets. The soldered joint Kovar–Ceramics has a layered structure, which makes it possible to distinguish three main layers: an intermetallic layer consisting of the Cu₃Sn phase, a eutectic layer, and a diffusion zone. The formation of the intermetallic layer can occur both on the surface of the carpet, and on the surface of the ceramic. The intermetallic layer at the border with the ceramic prevents the diffusion of boron into the solder and the formation of a diffusion zone, which provides high adhesion of the solder to the ceramic. Soldering modes are possible in which intermetallic compounds are not formed on the ceramic surface, which allows the formation of an extensive diffusion zone. Under the used soldering modes, an intermetallic phase forms at the boundary with the insidious layer, which can lead to brittle fracture of the soldered joint. The microhardness of the solder joint was shown by the following values: the zone of intermetallic compounds – 2.5 GPa, the eutectic zone – 1 GPa, the diffusion zone with a variable microhardness increasing from 1 to 5.5 GPa.

Keywords: electron-positron target, kovar, boron carbide, phase composition, intermetallic, eutectic, microstructure, microhardness.

For citation: Dem'yanov, B. F., Nikiforov, A. G., Starostenkov, M. D., Nikiforov, D. A. & Blinov, M. F. (2023). Synthesis and structure of Cu–Sn–Ti solder for electron-positron targets. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(4), 501–507. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.009.

Введение

Создание позитронных источников высокой интенсивности для перспективных электрон-позитронных коллайдеров требует разработки мишеней, устойчивых к большим термомеханическим нагрузкам [1–3]. Многократное воздействие электронных импульсов высокой интенсивности на позитронные мишени приводят к потере механической прочности и разрушению мишеней. Предельная пиковая мощность, которую может выдержать стационарная мишень, составляет величину $2 \cdot 10^{12}$ ГэВ/мм² за импульс. В проектах будущих источников позитронов пиковая мощность первичного электронного пучка превышает эту величину. В

разрабатываемых ускорителях нового поколения могут быть использованы мишени из жидкого сплава Pb–Sn как альтернатива стационарным мишеням из тугоплавких металлов с большим атомным номером. Расплавленный сплав при температуре 330 °C циркулирует через контур. Мишень представляет собой канал прямоугольного сечения, с двумя отверстиями диаметром 10 мм, первое – в месте попадания первичного электронного пучка, второе – на выходе вторичного пучка из мишени.

В отверстия впаяны окна из карбида бора (B₄C). Данная керамика способна выдерживать импульсные механические нагрузки, которые возникают при импульсном нагреве материала мишени. Соединение окон с корпусом, изго-

товленным из сплава 29НК, осуществляется пайкой с использованием припоя Cu–Sn–Ti. Качество соединения должно обеспечить сохранение герметичности соединения при давлении в вакуумной камере ускорителя 10^{-7} Па. Распределение тепловыделения (нормированное на единичный электрон) в потоке жидкого свинца толщиной 28 мм для энергии первичного электронного пучка 6 ГэВ выполненное в программе GEANT4 показано на рис. 1 [4].

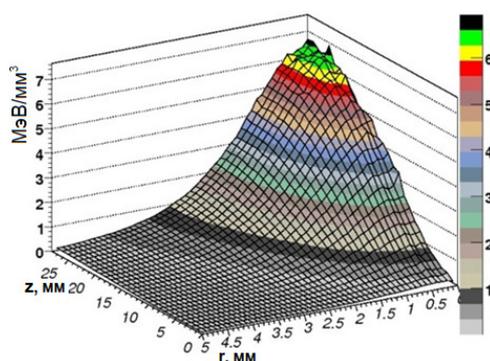


Рис.1. Распределение тепловыделения в мишени

Fig.1. Distribution of heat release in the target

Из рис.1 видно, что температура достигает максимальных значений вблизи выходного керамического окна мишени. Это окно подвержено максимальным термомеханическим нагрузкам. Таким образом, качество соединения керамических окон и ковара определяет возможность сохранять механические свойства конверсионной мишени при воздействии электронных импульсов высокой интенсивности.

При изготовлении паяного соединения необходимо учитывать наличие остаточных напряжений, смачиваемость поверхности керамики припоем, адгезионную активность при взаимодействии припоя с металлами и керамикой. Необходимая прочность соединения обеспечивается низкой дефектностью и высокой адгезией припоя с металлом и керамикой. Существенное влияние на прочность оказывает фазовый состав припоя.

Для изготовления паяных соединений из сплава 29НК (ковар) с керамикой используются высокотемпературные медные припои Cu–Ti, Cu–Ti–Ni [5-7]. Титан играет роль активного металла, который взаимодействует с керамикой и обеспечивает необходимую прочность паяного металлокерамического соединения, образуя с медью эвтектику с более низкой температурой плавления. Надежность металлокерамических спаев определяется технологическим режимом: временем пайки, температурой, составом припоя.

Анализ диаграммы состояния системы Cu–Ti показывает, что оптимальным является соотношение 28 % Ti 72 % Cu по массе [8-10]. Содержание титана более 36 % приводит к повышению температуры плавления и снижению пластичности. В этом случае возможно образование хрупких интерметаллидов, что приводит к растрескиванию паяного шва. При содержании титана менее 24 % понижается адгезионная способность припоя к керамике и прочность паяного соединения. Для трехкомпонентных припоев также возможно образование избыточных интерметаллических соединений, что может привести к снижению прочности соединения и растрескиванию паяного шва [11-18].

Целью работы является разработка методики синтеза припоя Cu–Sn–Ti и исследование физико-механических свойств паяного соединения сплава 29НК с керамикой В₄C. Массовое соотношение компонентов припоя составляло: 73 % Cu, 18% Sn, 9 % Ti. Состав сплава Cu–Sn–Ti при данном соотношении компонентов соответствует области существования двухфазного равновесия Cu₃Sn и α -Cu [19].

Приготовление припоя и пайка проводились в вакууме при давлении 10^{-4} Па. В процессе пайки образец нагревался до температуры 800 °С и выдерживался в течение 40 минут. Затем производился нагрев до температуры 950 °С, время выдержки 10 минут. Использовался ступенчатый режим охлаждения для снятия остаточных напряжений с выдержкой при температурах 800 °С (5 минут), 700 °С (5 минут), 550 °С (10 минут). Время охлаждения составляло 40 минут (рис.2а, б).

На рис.3 показана структура сплава 29 НК и керамики В₄C. В коваре проявляется структура с размером зерна от 40 до 120 мкм. На поверхности сплава могут присутствовать окисульфиды и карбонитриды титана. Внутри отдельных зерен видны двойники (рис.3(1)). Карбид бора имеет пористую структуру. Средний размер пор составляет 2,5 мкм (рис.3(2)).

Анализ микроструктуры шва паяного соединения позволяет выделить несколько областей. В процессе кристаллизации образуется фаза Cu₃Sn, которая имеет светлый контраст, твердый раствор α -Cu (серый контраст), а также диффузионные зоны взаимодействия припоя с керамикой и коваром (темный контраст). В условиях близких к равновесным, рост кристаллов интерметаллической фазы происходит преимущественно на границах контакта припой-керамика и припой-ковар. Интерметаллическая фаза формирует непрерывный слой на границе раздела. Образование интерметаллидов

происходит в жидкой фазе на поверхности спаиваемых материалов по гетерогенному механизму. Слой интерметаллидов затрудняет процесс диффузии и поэтому образование

диффузионной зоны происходит только в тех местах паяного соединения, где отсутствует прослойка интерметаллидов (рис.3(3)).

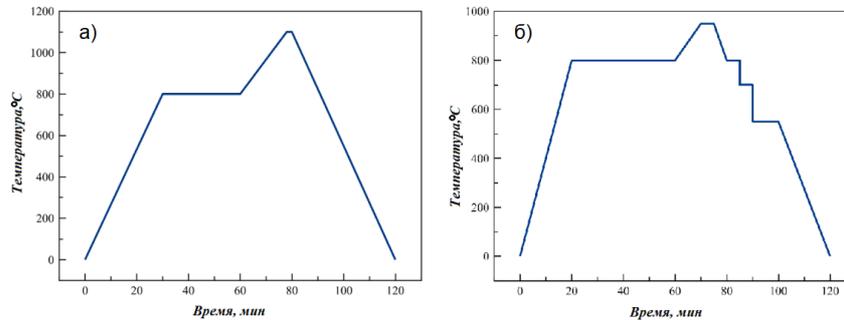


Рис.2. Термограммы синтеза припоя и пайки

Fig.2. Thermograms of solder and soldering synthesis

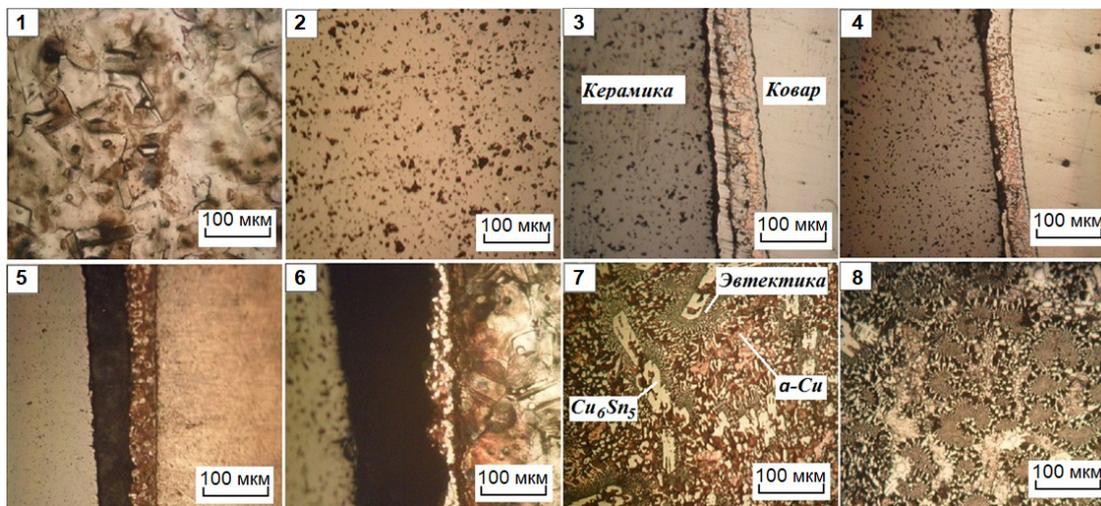


Рис.3. Микроструктура 29НК (1), B_4C (2), паяного соединения B_4C – 29НК (3-5), соединения B_4C – 29НК после испытания на сдвиг (6), припоя (7-8)

Fig.3. Microstructure of 29NK (1), B_4C (2), brazed joint B_4C – 29NK (3-5), joint B_4C – 29NK after shear test (6), solder (7-8)

На некоторых участках соединения была обнаружена неоднородность распределения компонентов припоя. На рисунке показан участок, на котором непрерывность интерметаллического слоя нарушена. В результате этого образуется диффузионный слой со стороны керамики (рис.3(4)).

В паяном шве присутствуют обширные участки, в которых интерметаллический слой со стороны керамики отсутствует (рис.3(5)). Зона припоя имеет четко выраженную структуру, состоящую из двух слоев: первый соответствует структуре припоя для данного режима кристаллизации; второй представляет собой диффузионную зону, образованную взаимодействием элементов, входящих в состав керамики и припоя. Можно предположить, что образова-

ние диффузионной зоны связано с интенсивной диффузией атомов бора и углерода из керамики в объем припоя. Ширина диффузионного слоя составляет 100 мкм. Изменение структуры диффузионной зоны обусловлено образованием карбидов и боридов титана.

Для участков шва с неоднородным распределением компонентов припоя проведено измерение микротвердости в направлении, перпендикулярном шву. Обнаружено наличие трех зон с различной микротвердостью (рис.4): 1 – зона интерметаллидов (ширина 40 мкм) с микротвердостью 2,5 ГПа, 2 – зона эвтектики (ширина 30 мкм) с микротвердостью 1 ГПа, 3 – диффузионная зона с микротвердостью, возрастающей от 1 до 5,5 ГПа [20].

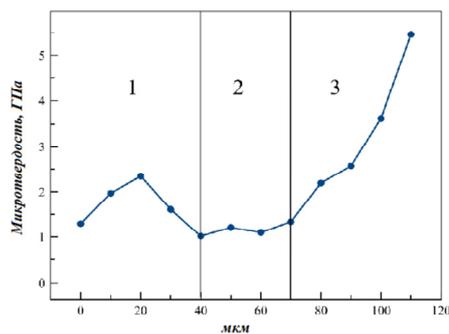


Рис.4. Микротвердость в области неоднородности паяного соединения

Fig.4. Microhardness in the region of inhomogeneity of the brazed joint

Таким образом, структура паяного соединения представляет собой слой переменной жесткости. Плавное увеличение жесткости от ковара к керамике может способствовать релаксации и уменьшению остаточных напряжений в паяном шве, что повышает его механическую прочность. Неоднородность отдельных участков соединения приводит к снижению качества соединения. Для получения соединения, удовлетворяющего эксплуатационным требованиям, необходимо определить оптимальные режимы пайки и состав припоя.

Испытание прочности паяного соединения на сдвиг показало, что разрушение происходит по границе припой-керамика (рис.3(6)), что свидетельствует о необходимости улучшения адгезионного взаимодействия припоя с керамикой изменением состава припоя и температурного режима пайки.

Использованная методика синтеза не позволила получить однородное распределение титана по всей длине паяного соединения, что привело к различному фазовому составу по объему припоя. На рис.3(7) показана типичная микроструктура участка припоя с пониженным содержанием титана. Видно, что присутствуют несколько структурных составляющих: крупные светлые кристаллы – фаза Cu_6Sn_5 , эвтектика и твердый раствор олова в меди $\alpha\text{-Cu}$. Распределение фаз имеет однородный характер. Несмотря на относительно быструю кристаллизацию, образуется эвтектическая структура с регулярным чередованием фаз Cu_3Sn и $\alpha\text{-Cu}$. Кристаллы Cu_3Sn имеют пластинчатую форму. Однородность структуры является положительным фактором, сочетающим высокую прочность припоя с достаточной пластичностью.

На рис.3(8) показана структура припоя с повышенным содержанием титана. Интерме-

таллид Cu_6Sn_5 отсутствует, основной структурной составляющей является эвтектика. Можно предположить, что частицы титана выступают центрами, стимулирующими образование эвтектических колоний. Кроме того, титан является легирующим элементом, входящим в состав фаз, а также может образовывать небольшое количество интерметаллида Cu–Sn–Ti.

В работе проведено исследование структуры и физико-механических свойств паяного соединения сплава 29НК с керамикой V_4C . Исследование показало возможность использования припоя Cu–Ti–Ni для пайки электрон-позитронных мишеней. Паяное соединение ковар-керамика имеет слоистую структуру, позволяющую выделить три основных слоя: интерметаллический слой, состоящий из фазы Cu_3Sn , эвтектический слой и диффузионную зону. Образование интерметаллического слоя может происходить как на поверхности ковара, так и на поверхности керамики. Интерметаллический слой на границе с керамикой препятствует диффузии бора в припой и образованию диффузионной зоны, которая обеспечивает высокую адгезию припоя с керамикой. Возможны режимы пайки, при которых интерметаллиды на керамике не образуются, что позволяет сформировать обширную диффузионную зону. При использованных режимах пайки на границе с коваром образуется интерметаллическая фаза, что может привести к хрупкому разрушению паяного соединения. Измерение микротвердости паяного соединения показали следующие значения: зона интерметаллидов – 2,5 ГПа, зона эвтектики – 1 ГПа, диффузионная зона с переменной микротвердостью, возрастающей от 1 до 5,5 ГПа.

Список литературы

1. Starostenko A.A., Logatchev P.V., Meshkov O.I., Nikiforov D.A., Andrianov A.V. et al. Status and prospects of the injection complex of the Budker Institute of Nuclear Physics // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2016. V. 13. N 7. P. 957–961.
2. Silvestrov G.I. Liquid Metal Targets for Intensive High-Energy Physics Beams. Workshop on New Kinds of Positron Sources for Linear Colliders, SLAC, Stanford, 4-7 March 1997, Proceedings, SLAC-R-502, 1997. P. 367.
3. Logachev P. Liquid Metal Targets. A Talk at Workshop on Positron Sources for the ILC, CCLRC Daresbury Lab, 11-16 April 2005.
4. Geant4 Collaboration. Toolkit Developers Guide: [Электронный ресурс] – Режим доступа

- http://cern.ch/geant4. Дата обращения: 16.08.2023.
- Костин А.М., Лабарткава А.В., Мартыненко В.А. Исследование процессов взаимодействия титаносодержащих припоев с оксидной керамикой и коваром // *Металлофизика новейшие технологии*. 2014. Т. 36. № 6. С. 815–827.
 - Найдич Ю.В., Сидоренко Т.В., Дуров А.В. Процессы металлизации и пайки перовскитной керамики на основе титаната бария // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2007. № 40. С. 63–69.
 - Yu Z.S., Yang P., Li R.F., Qi K. Crack formation mechanisms in Al₂O₃/Kovar brazed joint // *Materials Science and Technology*. 2006. V. 22, N 7. P. 864–866.
 - Zhou G.-J., Zhou Y., Luo Y. Phase equilibria of the Cu–Sn–Ti ternary system at 823 K // *AIP Advances*. 2017. V. 7, Is. 2. P. 1–8.
 - Wang J., Liu C., Leinenbach C., Klotz U.E., Uggowitzer P.J., Löffler J.F. Experimental investigation and thermodynamic assessment of the Cu–Sn–Ti ternary system // *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*. 2011. N 35. P. 82–94.
 - Wang J., Liu C., Leinenbach C., Klotz U.E., Uggowitzer P.J., Löffler J.F. Experimental investigation and thermodynamic assessment of the Cu–Sn–Ti ternary system // *Calphad*. 2001. V. 35. P. 82–94.
 - Naka M., Schulster J.C., Nakade I., Urai S. Determination of the Ternary System Cu–Sn–Ti // *Journal of Phase Equilibria*. 2001. V. 22, N 3. P. 352–358.
 - Li W., Liang C., Lin S. Interfacial segregation of Ti in the brazing of diamond grits onto a steel substrate using a Cu–Sn–Ti brazing alloy // *Metal. Mater. Trans.* 2002. V. 33. P. 2163–2172.
 - Namar-Thibault S., Allibert C.H. New phases in the ternary Cu–Sn–Ti system // *J. Alloys Compds*. 2001. V. 317–318. P. 363–366.
 - Ефимова Е.Д., Тациенко Т.А. Структура прецизионного никелькобальтового сплава на основе железа после высокотемпературного отжига. Ин-т физики металлов УрО РАН – Екатеринбург, 2012. 3 с.
 - Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Румянцев В.И. Динамическая прочность реакционно-спеченной керамики карбида бора // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85, Вып. 6. С. 77–82.
 - Lei J., Xinsheng W., Biao C., Hisashi I., Shufeng L., Zhenlin L., Katsuyoshi K. Microstructural evolution and competitive reaction behavior of Ti–B₄C system under solid-state sintering // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. V. 687. P. 1004–1011.
 - Hsieh Y.Z., Chen J.F., Lin S.T. Pressureless sintering of metal-bonded diamond particle composite blocks // *J. Mater. Sci.* 2000. V. 35. P. 5383–5387.
 - Григоренко М.Ф., Полуянская В.В., Черниговцев Е.П. Исследование кинетики смачивания и растекания адгезионно активных сплавов Cu–Sn–Ti по поверхностям сверхтвердых материалов из нитрида бора // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. 2007. Вып. 40. С. 20–25.
 - Бондарь А.А., Агейкова Л.Н., Демьянов Б.Ф. Рост интерметаллидов и образование переходного слоя в зоне контакта меди с жидким оловом // *Ползуновский вестник*. 2019. № 2. С. 133–137.
 - Никифоров А.Г., Евдокимова Ю.С. Изготовление металлокерамических соединений для позитронных мишеней // *Ползуновский вестник*. 2017. № 1. С. 89–94.

Информация об авторах

Б. Ф. Демьянов – доктор физико-математических наук, профессор Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. Г. Никифоров – кандидат физико-математических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

М. Д. Старостенков – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Д. А. Никифоров – младший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

М. Ф. Блинов – научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

References

- Starostenko, A. A., Logatchev, P. V., Meshkov, O. I., Nikiforov, D. A. & Andrianov, A. V. et al. (2016). Status and prospects of the injection complex of the Budker Institute of Nuclear Physics. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 13(7), 957–961.
- Silvestrov, G. I. (1997). Liquid Metal Targets for Intensive High-Energy Physics Beams. Workshop on New Kinds of Positron Sources for Linear Colliders, SLAC, Stanford, 4-7 March 1997, Proceedings, SLAC-R-502. P. 367.

3. Logachev, P. (2005). Liquid Metal Targets. A Talk at Workshop on Positron Sources for the ILC, CCLRC Daresbury Lab, 11-16 April 2005.
4. Geant4 Collaboration. Toolkit Developers Guide: [Electronic resource] – Access mode <http://cern.ch/geant4>. Date of the application: 16.08.2023.
5. Kostin, A. M., Labartkava, A. V. & Martynenko, V.A. (2014). Issledovaniye protsessov vzaimodeystviya titanosoderzhashchikh pripoyev s oksidnoy keramikoy i kovarom. *Metallofizika noveyshey tekhnologii*, 36(6), 815–827. (In Russ.).
6. Naydich, Yu. V., Sidorenko, T. V. & Durov, A. V. (2007). Protsessy metallizatsii i payki perovskitnoy keramiki na osnove titanata bariya. *Adgeziya rasplavov i payka materialov*, (40), 63–69. (In Russ.).
7. Yu, Z. S., Yang, P., Li, R. F. & Qi, K. (2006). Crack formation mechanisms in Al₂O₃/Kovar brazed joint. *Materials Science and Technology*, 22(7), 864–866.
8. Zhou, G.-J., Zhou, Y. & Luo, Y. (2017). Phase equilibria of the Cu–Sn–Ti ternary system at 823 K. *AIP Advances*, 7(2), 1–8.
9. Wang, J., Liu, C., Leinenbach, C., Klotz, U. E., Uggowitzer, P. J. & Löffler, J. F. (2011). Experimental investigation and thermodynamic assessment of the Cu–Sn–Ti ternary system. *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, (35), 82–94.
10. Wang, J., Liu, C., Leinenbach, C., Klotz, U. E., Uggowitzer, P. J. & Löffler, J. F. (2001). Experimental investigation and thermodynamic assessment of the Cu–Sn–Ti ternary system. *Calphad*, 35, 82–94.
11. Naka, M., Schulster, J. C., Nakade, I. & Urai, S. (2001). Determination of the Ternary System Cu–Sn–Ti. *Journal of Phase Equilibria*, 22(3), 352–358.
12. Li, W., Liang, C. & Lin, S. (2002). Interfacial segregation of Ti in the brazing of diamond grits onto a steel substrate using a Cu–Sn–Ti brazing alloy. *Metal. Mater. Trans.*, 33, 2163–2172.
13. Hamar-Thibault, S. & Allibert, C. H. (2001). New phases in the ternary Cu–Sn–Ti system. *J. Alloys Compds*, 317–318, 363–366.
14. Efimova, E. D. & Tatsiyenko, T. A. (2012). Struktura pretsizionnogo nikel'kobal'tovogo splava na osnove zheleza posle vysokotemperaturnogo otzhiga. In-t fiziki metallov UrO RAN – Ekaterinburg. P. 3. (In Russ.).
15. Savinykh, A. S., Garkushin, G. V., Razorenov, S. V. & Romyantsev, V. I. (2015). Dinamicheskaya prochnost' reaktsionno-spechennoy keramiki karbida bora. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 85(6), 77–82. (In Russ.).
16. Lei, J., Xinsheng, W., Biao, C., Hisashi, I., Shufeng, L., Zhenlin, L. & Katsuyoshi, K. (2016). Microstructural evolution and competitive reaction behavior of Ti–B₄C system under solid-state sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 687, 1004–1011.
17. Hsieh, Y. Z., Chen, J. F. & Lin, S. T. (2000). Pressureless sintering of metal-bonded diamond particle composite blocks. *J. Mater. Sci.*, 35, 5383–5387.
18. Grigorenko, M. F., Poluyanskaya, V. V. & Chernigovtsev, E. P. (2007). Issledovaniye kinetiki smachivaniya i rastekaniya adgezionno aktivnykh splavov Cu–Sn–Ti po poverkhnostyam sverkhтвердых материалов из нитрида бора. *Adgeziya rasplavov i payka materialov*, (40), 20–25. (In Russ.).
19. Bondar', A. A., Ageykova, L. N. & Dem'yanov, B. F. (2019). Rost intermetallidov i obrazovaniye perekhodnogo sloya v zone kontakta medi s zhidkim olovom. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 133–137. (In Russ.).
20. Nikiforov, A. G. & Yevdokimova, Yu. S. (2017). Izgotovleniye metallokeramicheskikh soyedineniy dlya pozitronnykh misheney. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 89–94. (In Russ.).

Information about the authors

B. F. Demyanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

A. G. Nikiforov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

M. D. Starostenkov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

D. A. Nikiforov – Junior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS.

M. F. Blinov – Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 16.08.2023; одобрена после рецензирования 28.07.2023; принята к публикации 07.09.2023.

The article was received by the editorial board on 16 Aug. 23; approved after reviewing 28 Aug. 23; accepted for publication 07 Sept. 23.