

Технология

Technology

Научная статья

УДК 621.791.37

DOI: 10.14529/engin250204

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТАНТАЛА И СТАЛИ 12Х18Н10Т

С.П. Дровосеков, Н.А. Ордин, О.В. Титова, Ю.Г. Смирнов[✉], М.В. Малых

*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия*

[✉] yu.smirnov@vniitf.ru

Аннотация. В статье представлены результаты отработки технологии пайки деталей из тантала и нержавеющей стали 12Х18Н10Т с использованием припоя ВПр4. Конструкция паяемого узла представляет собой телескопическое соединение, в котором кольцо из стали 12Х18Н10Т охватывает tantalовое диаметром 52 мм. Поскольку tantal со многими металлами образует интерметаллиды, наличие которых приводит к хрупкому разрушению паяных соединений, необходимо было определить условия, позволяющие предотвратить образование сплошных интерметаллидных прослоек в паяном шве. Одним из таких условий является отсутствие контакта tantalа с компонентами припоя и стали.

В качестве такого решения было выбрано защитное медное покрытие, получаемое наплавкой на tantalовую деталь с последующей механической доработкой. В ходе работы проведены эксперименты по определению необходимой толщины медного покрытия при взаимодействии с расплавленным припоеем. Анализ проведен на металлографических шлифах образцов припоя – медь и паяных соединений с помощью электронной микроскопии зоны взаимодействия. При выбранных режимах пайки (выдержка при 1050 °C в течение шести минут, среда – аргон) взаимодействие припоя в виде цилиндра высотой 1 мм и диаметром 5 мм с медной пластинкой 3 мм происходит на глубину до 0,6 мм. Уменьшение толщины припоя до 0,3 мм, что соответствует паяльному зазору, образующемуся при нагреве деталей до температуры пайки, не привело к сквозному проникновению компонентов припоя через пластину меди толщиной 0,6 мм. Таким образом, по результатам экспериментов определена достаточная толщина медного слоя (не менее 0,6 мм), которая исключит проникновение к tantalу элементов, образующих с ним интерметаллиды при пайке данной конструкции.

Выполнена пайка образцов для механических испытаний на изгиб и натурных деталей. Рентгеноспектральным микроанализом шлифов подтверждено отсутствие интерметаллидов в системе tantal – медь – припой – сталь после пайки по выбранным режимам. Прочность паяных образцов с медным покрытием практически в два раза выше (398 МПа), чем прочность образцов без покрытия (212 МПа).

Для других конструкций (габариты, материалы) и температурно-временных режимов пайки потребуется оценка минимальной толщины защитного покрытия, аналогично проведенной в этой работе.

Ключевые слова: пайка, нержавеющая сталь, tantal, интерметаллид, механические свойства, рентгеноспектральный микроанализ

Для цитирования: Разработка технологии пайки деталей из tantalа и стали 12Х18Н10Т / С.П. Дровосеков, Н.А. Ордин, О.В. Титова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2025. Т. 25. № 2. С. 40–51. DOI: 10.14529/engin250204

Original article

DOI: 10.14529/engin250204

THE ENGINEERING OF TECKNOLOGY OF SOLDERING PARTS FROM TANTALUM AND STEEL 12CR18NI10TI

S.P. Drovosekov, N.A. Ordin, O.V. Titova, Yu.G. Smirnov[✉], M.V. Malyh

*Russian Federal Nuclear Center – All Russian Researching Institute of Technical Physics
named after Academ. E.I. Zababakhin, Snezhinsk, Russia*

[✉] yu.smirnov@vniitf.ru

Abstract. The article presents the results of developing a soldering technology of tantalum and stainless steel parts using VPR4 solder. The soldered assembly design is a telescopic joint where a stainless steel ring encloses a tantalum ring with a diameter of 52 mm. Since tantalum forms intermetallic compounds with many metals, which lead to brittle fracture of soldered joints, it was necessary to determine the conditions that prevent the formation of continuous intermetallic layers in the solder joint. One of such conditions is an absence of contact between tantalum and the components of the solder and steel.

As such a solution, a protective copper coating was selected. The coating was formed by surfacing followed by mechanical refinement. Experiments were carried out to determine the required thickness of copper coating when exposed to molten solder. Analysis was performed using electron microscopy on metallographic cross-sections of solder – copper samples and soldered joints to examine the interaction zone. Under the selected soldering parameters (holding at 1050 °C for 6 minutes in an argon atmosphere), the interaction between a cylindrical solder specimen (1 mm height, 5 mm diameter) and a 3 mm-thick copper plate resulted in a penetration depth of up to 0.6 mm. When the solder thickness was reduced to 0.3 mm, which corresponds to the soldering gap formed during heating the parts to the soldering temperature, no penetration through the 0.6 mm copper plate was observed. Based on experimental results, a minimum copper layer thickness of 0.6 mm was determined, which will exclude penetration to tantalum of elements forming intermetallic compounds during soldering of this assembly.

Soldering of specimens for mechanical tests and required parts was performed. SEM and EDS of metallographic cross-sections confirmed the absence of intermetallic compounds in the tantalum – copper – solder – steel system after soldering under the selected parameters. The strength of copper-coated soldered specimens was almost twice as high (398 MPa) compared to uncoated specimens (212 MPa).

For other constructions (dimensions, materials) and soldering temperature and time parameters it will be necessary to estimate the minimum thickness of protective coating, following the methodology applied in this study.

Keywords: soldering, stainless steel, tantalum, intermetallic compound, mechanical properties, X-ray spectral microanalysis

For citation: Drovosekov S.P., Ordin N.A., Titova O.V., Smirnov Yu.G., Malyh M.V. The Engineering of tecknology of soldering parts from tantalum and steel 12Cr18Ni10Ti. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2025:25(2):40–51. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin250204

Введение

Тантал как конструкционный материал находит широкое применение в космической, атомной и других областях техники [1, 2]. Одной из проблем, стоящих при его использовании, является получение прочных и герметичных соединений с другими конструкционными материалами, например, с нержавеющими сталью. Для получения соединений разнородных материалов активно используют пайку [3–6].

Известно, что с большинством металлов tantal образует хрупкие интерметаллидные соединения [7, 8], которые значительно ухудшают механические характеристики соединений, получаемых пайкой или сваркой [9–14].

Из всего многообразия металлов, используемых в качестве припоев, тантал не образует интерметаллидов с медью, серебром, хромом [15–19]. Эти металлы используют в качестве припоев или барьерных покрытий [20], наносимых на тантал различными методами (напылением, наплавлением, гальваническим осаждением и др.). При пайке тантала с нержавеющей сталью широко применяется медь как в виде припоя, так и в качестве барьерного покрытия [21–23].

По результатам проведенного поиска было установлено следующее. Для получения паяного соединения без интерметаллидов при пайке тантала с 12Х18Н10Т медным припоеем ограничивают время нахождения припоя в расплавленном состоянии до 1,5 с при скорости нагрева паяемых деталей до 200 °С/с [21]. Авторы патента [22] для предотвращения образования интерметаллидов в паяном шве поверхность тантала покрывают слоем меди толщиной до 1 мм с подслоем никеля, полученным гальваническим осаждением, и пайку проводят припоеем системы Cu–Ni–Mn с температурой плавления ниже температуры плавления меди.

Недостатком первого технического решения является сложность создания условий при пайке массивных деталей (как в нашем случае), обеспечивающих необходимую скорость нагрева и время нахождения припоя в расплавленном состоянии. К недостаткам второго способа пайки относятся технические трудности при нанесении гальваническим способом меди толщиной до одного миллиметра осаждаемого металла [24].

Цель данной работы заключалась в разработке технологии пайки узла высотой 10 мм и общей массой 440 г, в состав которого входит наружное кольцо из стали 12Х18Н10Т и внутреннее кольцо из тантала наружным диаметром 52 мм. В процессе исследований необходимо было определить нужную толщину барьерного медного покрытия, температурно-временные режимы пайки, прочностные характеристики паяного соединения, его герметичность и структуру паяного соединения на предмет образования интерметаллидов в паяном шве.

При исследовании микроструктуры и состава зон сварных и паяных соединений широко используется электронная микроскопия, совмещенная с энергодисперсионной спектроскопией [1, 25–29], как наиболее наглядный и информативный метод анализа. В данной работе рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) использован как для определения оптимальной толщины медного слоя, так и для исследования структуры паяного соединения на наличие или отсутствие интерметаллидных слоев.

Экспериментальная часть

Для решения поставленной задачи был выбран вариант, включающий нанесение медного покрытия на тантал методом наплавления в вакууме; в качестве припоя использовали припой системы Cu–Ni–Mn (ВПр4). Припой имеет температуру плавления 940–980 °С и предназначен для пайки нержавеющих сталей в среде аргона. Рекомендованная температура пайки составляет 1050 °С [19].

Для оценки взаимодействия припоя с медной подложкой при температурно-временных режимах пайки были проведены эксперименты по смачиванию припоеем медных пластинок размером 20×20 мм и толщиной 2,2 мм в соответствии с ГОСТ 23904-79. Припой в виде цилиндра высотой 1 мм и диаметром 5 мм размещали в центре пластины. Образец нагревали в печи в среде аргона до температуры 1050 °С (до расплавления припоя) и выдерживали шесть минут. Рентгеноспектральный микроанализ зоны взаимодействия припоя с медной подложкой проводили на шлифах образцов.

Определив глубину растворения тантала в припое по данным РСМА, были проведены эксперименты по расплавлению меньшего количества припоя (высота 0,3 мм) по медной пластине толщиной 0,6 мм. Данная высота припоя была выбрана в соответствии с величиной паяльного зазора, образующегося после нагрева соединяемых деталей до температуры 1050 °С. Величина зазора рассчитывается по формуле

$$\Delta = d \cdot \Delta T(\alpha_2 - \alpha_1),$$

где Δ – величина зазора, мм; d – диаметр зоны соединения, мм; ΔT – разность температур, °С; α_1, α_2 – коэффициенты линейного расширения тантала и стали в диапазоне (20–1000) °С, равных соответственно $7,6 \times 10^{-6}$ 1/°С и $19,3 \times 10^{-6}$ 1/°С [19]. Для рассматриваемой конструкции эта величина составляет порядка 0,6 мм на диаметр (0,3 мм на сторону) при внутреннем диаметре детали из нержавеющей стали, равном 52 мм.

Определение прочностных характеристик паяных соединений проводили на образцах, представляющих собой пластины из стали 12Х18Н10Т и тантала размером $50 \times 7 \times 2,5$ мм, соединенных между собой по торцевой поверхности припоеем. Припой в виде пластины размером $7 \times 2,5$ мм и толщиной 0,3 мм размещали между образцами. На образцы из тантала наплавляли слой меди в вакуумной печи при температуре 1120 °С и времени выдержки при данной температуре в течение 3 мин с последующей механической доработкой. Пайку образцов как с медным покрытием, так и без него осуществляли в вертикальном положении в среде аргона при температуре 1050 °С и времени выдержки 6 мин. Фиксацию образцов обеспечивали специальным приспособлением. После механической доработки паяных соединений (удаление наплывов припоя и галтелей) образцы как с медным, так и без медного покрытия испытывали на изгиб по методике ГОСТ 24167-80. Испытания на изгиб паяных соединений позволяют оценить влияние хрупких прослоек в паяном шве на его свойства.

По результатам отработки технологии на образцах была запаяна партия изделий. Наплавку медного слоя на танталовое кольцо проводили в графитовой оправке в вакууме при температуре 1120 °С и времени выдержки при данной температуре в течение 3 мин. Последующей механической доработкой обеспечивали необходимую толщину медного покрытия. Пайку колец осуществляли в среде аргона при температуре 1050 °С с выдержкой в течение 6 мин. Припой ВПр4 в виде кольца размещали в галтельной части паяного соединения. Скорость нагрева деталей составляла 10 °С/мин, охлаждение – с печью.

После механической доработки сборки проводили контроль паяного соединения на герметичность методом обдува по методике ГОСТ 28517-90 в специальном приспособлении. Сборку через резиновые уплотнители зажимали между двумя фланцами так, что представлялась возможность обдува гелием паяного соединения. На втором фланце имелся штуцер, через который внутренний объем кольца соединялся с теческкателем. Чувствительность прибора находится на уровне $1 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \times \text{Па/с}$.

Результаты

Результаты РСМА зоны взаимодействия припоя (высота 1 мм, диаметр 5 мм) с медной пластиной толщиной 2,2 мм приведены на рис. 1. На рис. 1а приведен макрошлиф образца, показывающий вид припоя после его растекания по медной пластине. Высота капли припоя составляет 0,6 мм, краевой угол смачивания порядка 17 градусов. На рис. 1б приведено линейное распределение характеристических рентгеновских излучений химических элементов в зоне контакта припоя – медь, из которого следует, что общая протяженность припоя (661 мкм) вместе с зоной растворения меди в припое составляет 1250 мкм. Таким образом, компоненты припоя проникают в медную подложку на глубину до 590 мкм.

Внешний вид медной пластины с расплавленным на ней припоеем приведен на рис. 2. При толщине медной пластины 0,6 мм проникновения припоя на всю толщину пластины не наблюдается (рис. 2б).

Таким образом, медное покрытие толщиной более 0,6 мм при величине паяльного зазора 0,3 мм обеспечивает защиту тантала от компонентов расплавленного припоя, в частности никеля, марганца и кобальта, образующих интерметаллидные соединения с танталом.

На рис. 3 приведены результаты рентгеноспектрального микроанализа паяного соединения Та – сталь 12Х18Н10Т. Из рис. 3 следует, что на поверхности тантала интерметаллидных соединений не образуется.

На рис. 4 приведены паяные образцы и диаграммы их нагружения. Прочность при изгибе образцов с медным покрытием составила 398 МПа, а без покрытия – 212 МПа. Из диаграмм нагружения следует, что характер разрушения паяных швов с медным слоем носит пластичный характер, без медного покрытия хрупкий, и происходит по интерметаллидному слою: тантал – никель – кобальт. Об этом свидетельствуют полученные данные, приведенные на рис. 5. Аналогичные результаты показаны и в других работах, например, [30], где отмечается, что разрушение паяного соединения также происходит по границе медь – припой.

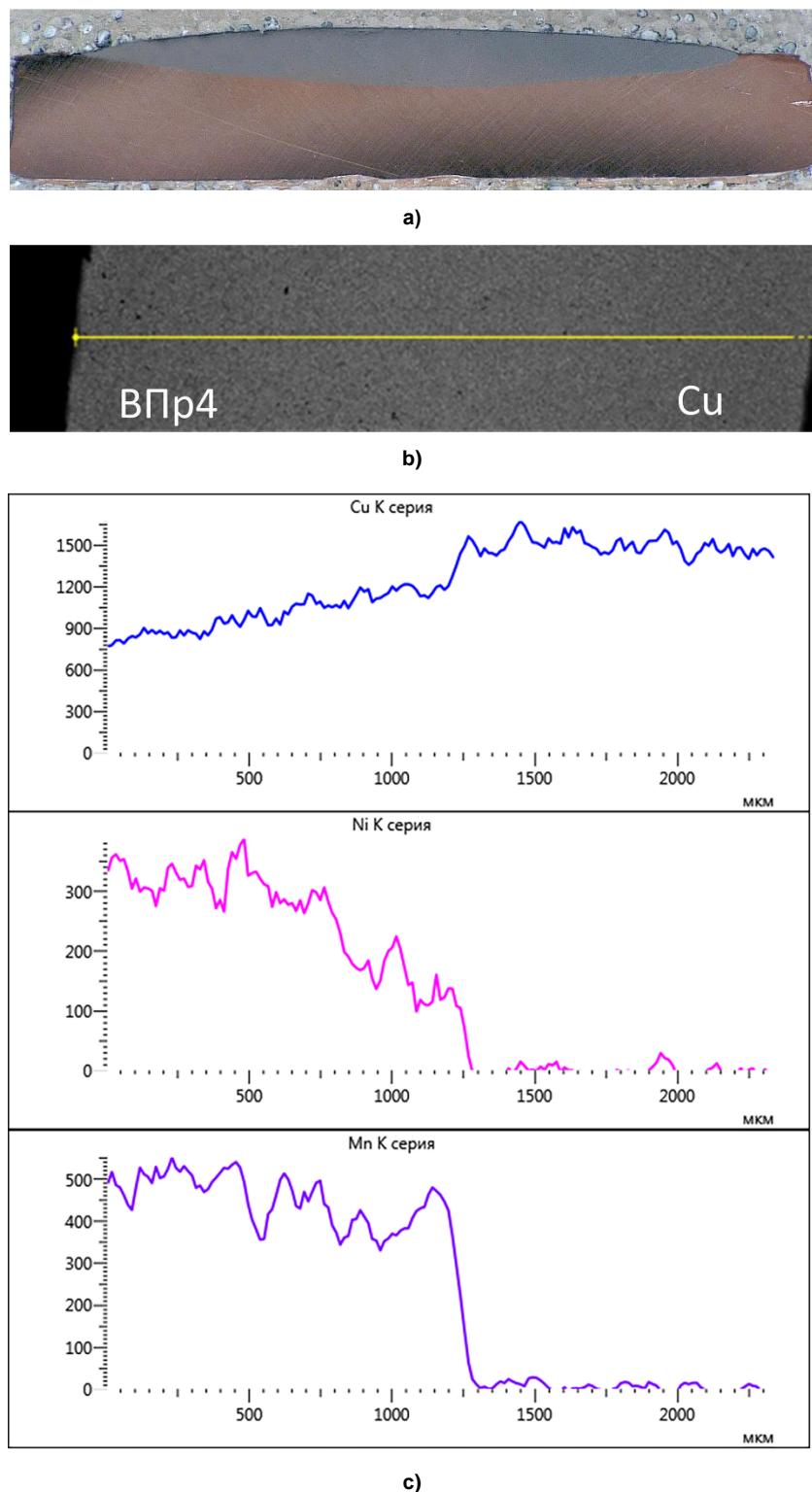


Рис. 1. Припой на меди: а – шлиф; б – фрагмент; в – линейное распределение излучений по линии фрагмента

Fig. 1. Solder on copper: a – ground surface; b – fragment; c – linear distribution of x-ray emissions along the fragment



Рис. 2. Образец меди толщиной 0,6 мм после расплавления припоя: а – вид со стороны припоя; б – вид с обратной стороны

Fig. 2. Copper sample (0.6 mm thick) after solder melting: a – solder side view; b – reverse side view

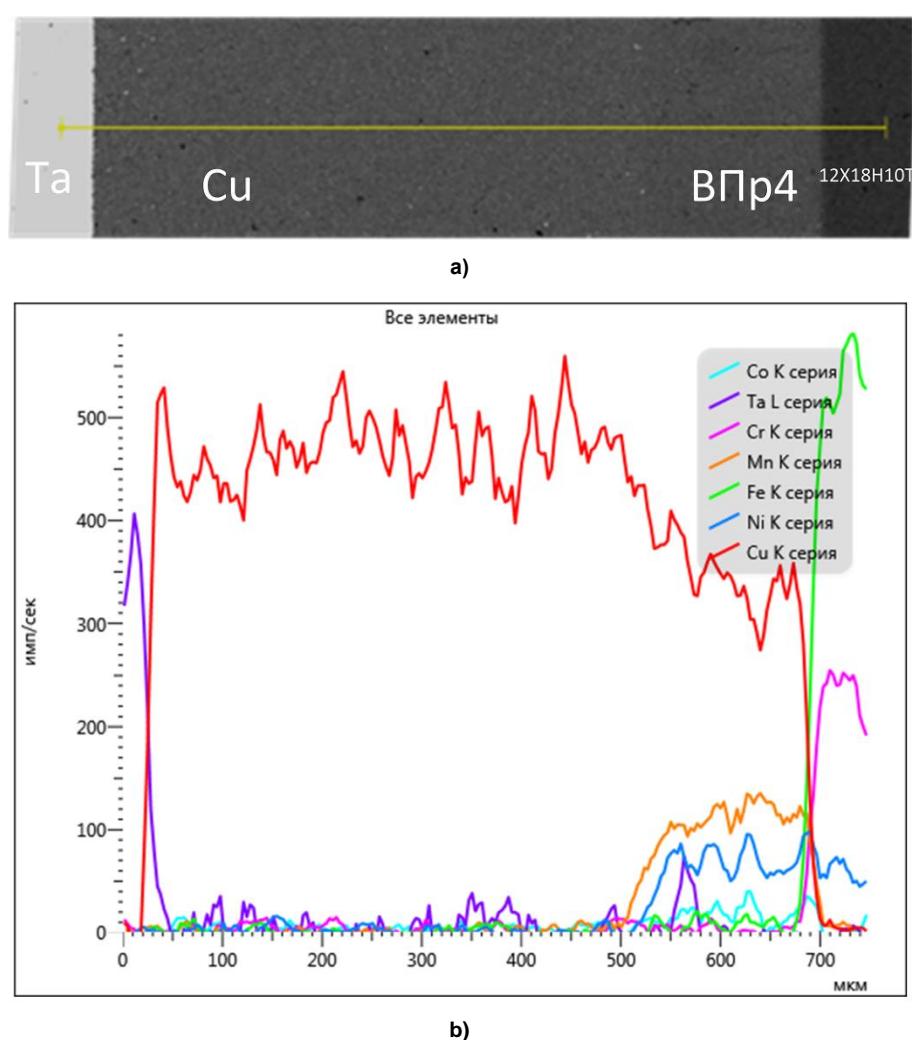


Рис. 3. Паяное соединение тантал – сталь 12Х18Н10Т: а – микроструктура (снимок в отраженных электронах); б – распределение характеристических рентгеновских излучений элементов по сечению

Fig. 3. Tantalum – stainless steel soldered joint: a – microstructure (BSE image);
b – cross-sectional distribution of x-ray emission of elements

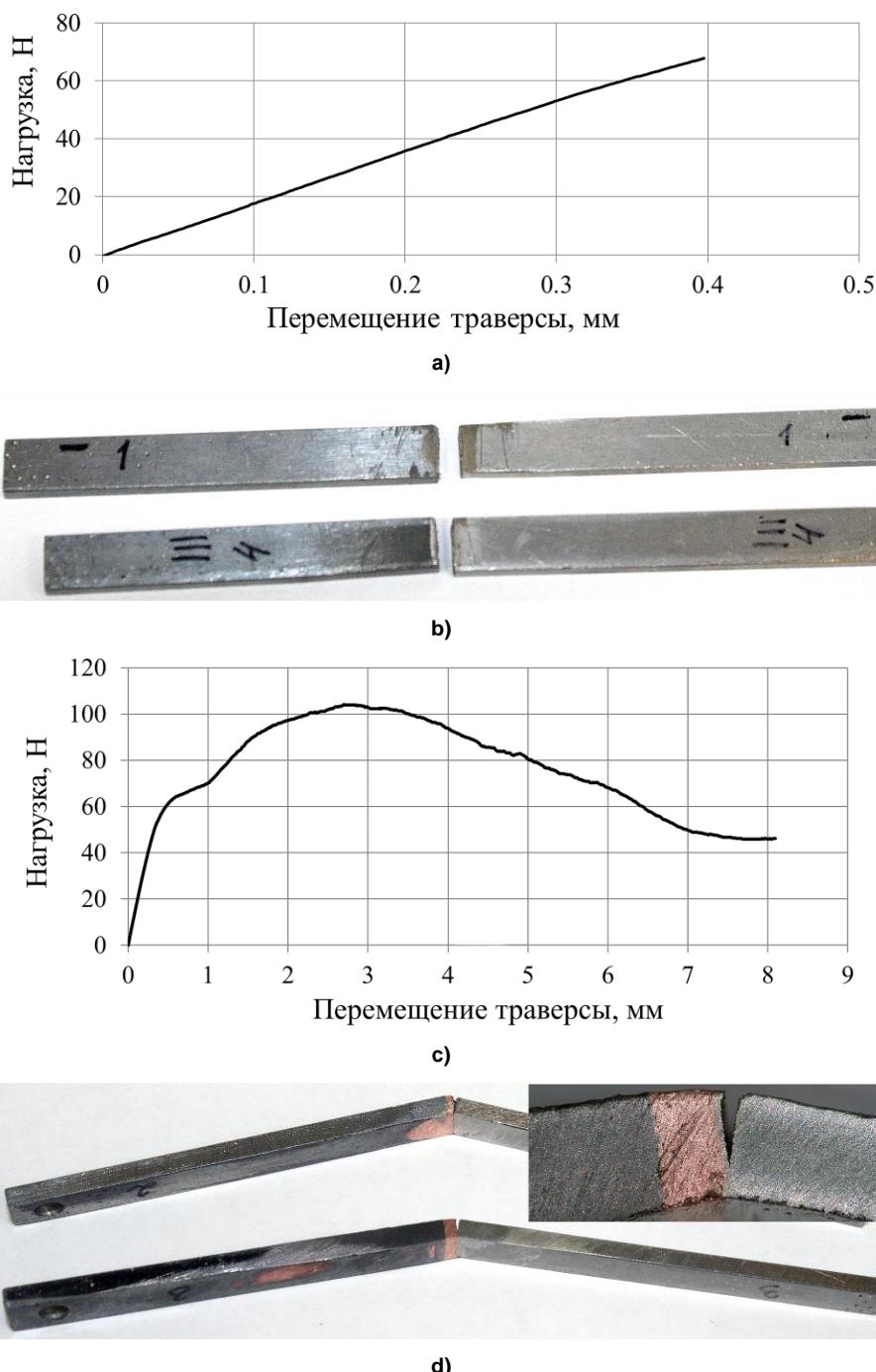


Рис. 4. Механическое испытание паяных образцов на изгиб (диаграмма и внешний вид образцов после испытаний): а, б – образец без медного покрытия; в, г – образец с медным покрытием

Fig. 4. Mechanical bending test of soldered samples (diagram and post-test appearance):
a, b – sample without copper coating; c, d – sample with copper coating

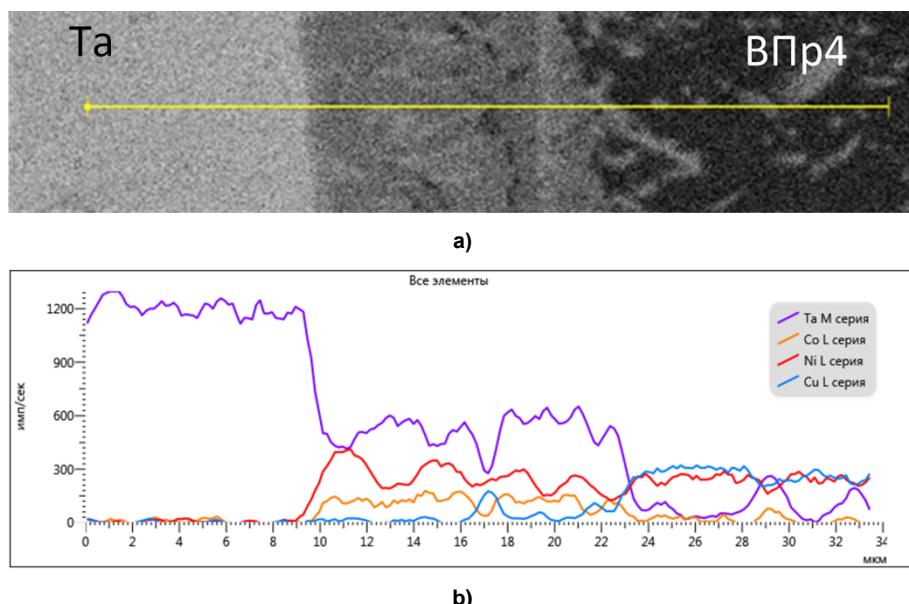


Рис. 5. Паяное соединение тантал – сталь 12Х18Н10Т без медного покрытия: а – снимок в отраженных электронах; б – линейное распределение характеристических рентгеновских излучений химических элементов

Fig. 5. Tantalum – steel soldered joint without copper coating: a – BSE image; b – linear distribution of x-ray emissions of elements



По результатам отработки технологии пайки изготовлено необходимое количество узлов, внешний вид которых показан на рис. 6.

Проверка на герметичность показала, что натекание гелия через паяный шов находится на уровне $1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Рис. 6. Сборочная единица с паяным соединением
Fig. 6. Assembly unit with a solder joint

Заключение

Таким образом, разработанная технология пайки разнородных материалов (тантал – сталь 12Х18Н10Т) припоеем ВПр4 позволяет получать герметичные, прочные и пластичные паяные соединения. Эффект достигается за счет использования барьерных покрытий (медь), не образующих с соединяемыми материалами и припоями интерметаллидных соединений.

В паяемой конструкции при величине паяльного зазора, равного 0,3 мм на сторону, интерметаллидные соединения не образуются при толщине медного слоя 0,6 мм.

Паяные соединения, полученные на образцах по разработанной технологии, характеризуются высокой прочностью на изгиб – на уровне 400 МПа. Разрушение соединения происходит по границе припоя – сталь 12Х18Н10Т при напряжениях, соответствующих прочности припоя ВПр4.

Герметичность паяных соединений сборочных единиц не хуже $1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Благодарности. Авторы благодарят Д.В. Толмачева за проведения испытаний на герметичность, Н.Н. Романенко и Е.В. Седова – за полезные замечания.

Список литературы

1. Brazing Tungsten/Tantalum/RAFM Steel Joint for DEMO by Fully Reduced Activation Brazing Alloy 48Ti–48Zr–4Be / D. Bachurina, A. Suchkov, J. Gurova et. al. // Metals, 2021, no. 11, vol. 1417. DOI: 10.3390/met11091417.
2. Омарова Д.К. Применение тантала и производство мировой танталовой продукции (обзор) // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2012. № 1 (83). С. 143–148.
3. Индукционная пайка твердосплавных резцов горного инструмента. Выбор состава и формы припоя / И.Н. Пашков, В.Е. Мисников, В.А. Морозов, С.А. Таволжанский // Сварочное производство. 2020. № 8. С. 20–27.
4. Исследование паяных вакуумно-плотных соединений бериллия с конструкционными металлами / М.В. Емельянов, А.Н. Фоканов, В.Ф. Подурожная, А.В. Тебякин // Сварочное производство. 2021. № 5. С. 48–55.
5. Влияние состава припоя и флюса на термическую стабильность паяных PDC резцов / И.Н. Пашков, В.Е. Мисников, В.А. Морозов и др. // Сварочное производство. 2021. № 1. С. 44–50. DOI: 10.34641/SP.2021.1034.1.003.
6. Карабанов В.В., Борохов И.О. Реактивные процессы при пайке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 4. С. 30–39.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997. Т. 2. 1024 с.
8. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2001. Т. 3. Кн. I. 872 с.
9. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочки, Л.Г. Стрижевская. М.: Машиностроение, 1984. 239 с.
10. Исследование химического состава и микроструктуры сварного соединения AISI 321/Cu/Ta/Ti / Н.Б. Пугачева, А.М. Оришич, А.Н. Черепанов и др. // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 11. С. 1213–1219. DOI: 10.31857/S001532302011008X.
11. Будкин Ю.В. Особенности физико-химических процессов взаимодействия тугоплавких металлов при электронно-лучевой сварке // Сварочное производство. 2009. № 10. С. 17–20.
12. Paul H., Chulist R., Mania I. Structural Properties of Interfacial Layers in Tantalum to Stainless Steel Clad with Copper Interlayer Produced by Explosive Welding. // Metals. 2020. No. 10(7). P. 969. DOI: 10.3390/met10070969.
13. Controlling intermetallic compounds formation during laser welding of NiTi to 316L stainless steel / A. Shamsolhodaei, J.P. Oliveira, N. Schell, E. Maawad et al. // Intermetallics. 2020. Vol. 116, 106656. DOI: 10.1016/j.intermet.2019.106656.
14. Study of intermetallic compound (IMC) formed in welding of steel with magnesium: A review / A. Jain, P. Sonia, S. Kumari, P. Pushp // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 26, no. 2. P. 1159–1166. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.232.
15. Subramanian P.R., Laughlin D.E. The Cu–Ta (Copper-Tantalum) System // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. 1989. Vol. 10. P. 652–655. DOI: 10.1007/BF02877637
16. Stabilization and strengthening of nanocrystalline copper by alloying with tantalum / T. Frolov, K.A. Darling, L.J. Kecske, Y. Mishin // Acta Materialia. 2012. Vol. 60, no. 5. P. 2158–2168. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.01.011.
17. Baren M.R. The Ag–Ta (Silver-Tantalum) System // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. 1988. Vol. 9, no. 3. P. 244–245. DOI: 10.1007/BF02881273.
18. Murray J.L. The Cr–Ti (chromium-titanium) System // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. 1981. Vol. 2, no. 2. P. 174–181. DOI: 10.1007/BF02881474.
19. Справочник по пайке / под редакцией И.Е. Петрунина. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
20. Малютина Ю.Н., Степанова Н.В., Черков А.Г. Сварка разнородных материалов с использованием промежуточных вставок, содержащих медь и tantal // Обработка металлов и материаловедение. 2015. № 4 (69). С. 61–71.
21. Патент № 2359792 Российская Федерация, МПК B23K1/19. Способ пайки тугоплавких металлов с коррозионностойкими, жаростойкими сталью и никелевыми сплавами:

№ 2007123925/02: заявл. 27.12.2008: опубликовано 27.06.2009 / В.М. Ишков, О.О. Федоркин, А.С. Бодунов; заявитель ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 4 с.

22. Патент № 2156183 Российской Федерации, МПК B23K1/00. Способ пайки труб: № 2007123925/02: / заявл. 28.05.1998: опубликовано 20.09.2000 / В.Н. Семенов, В.В. Семенов; ОАО «Научно-производственное объединение энергетического машиностроения им. В.П. Глушко». 4 с.

23. Effect of the thickness of Cu interlayer on dissimilar laser welding of 304 stainless steel to tantalum / Xiangyi Meng, Fan Song, Danyang Lin, Haoyue Li et al. // Optics & Laser Technology. 2023. Vol. 157. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108727.

24. Liu C., Srinivasan J., Kelly R. G. Editors' Choice – Electrolyte Film Thickness Effects on the Cathodic Current Availability in a Galvanic Couple // J. Electrochem. Soc. 2017. Vol. 164, no. 13. P. 845–855. DOI: 10.1149/2.1641713jes.

25. Interfacial reactions and microstructure related properties of explosively welded tantalum and steel sheets with copper interlayer / H. Paul, R. Chulist, L. Lytynksa-Dobrzynska et al. // Materials & Design. 2021. Vol. 208. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109873.

26. Analyzing metallurgical interaction during arc surfacing of barrier layers on titanium to prevent the formation of intermetallics in titanium-steel compounds / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grynyuk et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 5 (12 (113)). P. 69–82. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.240154.

27. Huda Z., Zaharinie T., Amir Y. SEM-EDS Analysis and Microhardness Variations in Steel-Copper Braze Joint // Journal of Technological Science & Engineering (JTSE). 2020. Vol. 1, no. 1. P. 23–29.

28. Characterization of the interphase in an aluminium/epoxy joint by using controlled pressure scanning electron microscopy coupled with an energy dispersive X-ray spectrometer / C. Sperandio, C. Arnoult, A. Laachachi et al. // Micron. 2010. Vol. 42, no. 2. P. 105–111. DOI: 10.1016/j.micron.2009.10.006.

29. Microstructural characterisation of rotary friction welded AA6082 and Ti-6Al-4V dissimilar joints / M. Meisnar, S. Baker, J.M. Bennett et al. // Materials & Design. 2017. Vol. 132. P. 188–197. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.07.004.

30. Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Welded Joint of Tantalum and Stainless Steel / S. Feng, Y. Zhou, Z. Zhu et al. // Metals. 2022. Vol. 12. 1638. DOI: 10.3390/met12101638.

References

1. Bachurina D., Suchkov A., Gurova J. et al. Brazing Tungsten/Tantalum/RAFM Steel Joint for DEMO by Fully Reduced Activation Brazing Alloy 48Ti-48Zr-4Be. *Metals*, 2021, no. 11, vol. 1417. DOI: 10.3390/met11091417.
2. Omarova D.K. Tantalum Utilization and Production of Global Tantalum Products (Review). *Bulletin of the SB RAMS*, 2012, no. 1 (83), pp. 143–148 (In Russ.)
3. Pashkov I.N., Misnikov V.E., Morozov V.A., Tavolzhanskiy S.A. Introduction Brazing of Carbide Cutters for a Mining Tool. The Choice of Composition and Solder Form. *Welding International*, 2019, vol. 33, no. 10-12, pp. 411–417. DOI: 10.1080/09507116.2021.1894032. (In Russ.)
4. Emelyanov M.V., Fokanov A.N., Podurazhnaya V.F., Tebyakin A.V. Investigation of Soldered Vacuum-tight Joints of Beryllium with Structural Metals. *Welding International*, 2021, vol. 35, no. 10-12, pp. 447–453. DOI: 10.1080/09507116.2021.1979826. (In Russ.)
5. Pashkov I.N., Misnikov V.E., Morozov V.A.1, Gadzhiev M., Bazlova T.A. Influence of Solder and Flux Composition on Thermal Stability of Brazed PDC Cutters. *Welding International*, 2021. DOI: 10.1080/09507116.2021.1963535. (In Russ.)
6. Karabanov V.V., Borokhov. Soldering Reaction Processes. *Assembly in mechanical engineering, instrument making.*, 2012, no. 4, pp. 30–39. (In Russ.)
7. Lyakishev N.P. (Ed.) *Diagrammy sostoyaniya dvoinykh metallicheskikh system* [State Diagrams of Double Metallic Systems]. Moscow, 1997, vol. 2. 1024 p.
8. Lyakishev N.P. (Ed.) *Diagrammy sostoyaniya dvoinykh metallicheskikh system* [State Diagrams of Double Metallic Systems] Moscow, 2001, vol. 3. 872 p.

9. Ruabov V.P., Rabkin D.M., Kyrochko R.S. Strizhevskaya L.G. *Svarka raznorodnykh metallov i splavov* [Welding of dissimilar metals and alloys]. Moscow, 1984. 239 p.
10. Pugacheva N.B., Senaeva E.I., Trushina E.B., Orishich A.M., Cherepanov A.N. Study of the Chemical Composition and Microstructure of AISI 321/Cu/Ta/Ti Welded Join. *Physics of Metals and Metallography*, 2020, vol. 121, no. 11, pp. 1112–1118. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0031918X20110083.
11. Bydkin Yu.V. Peculiarity of Physicochemical Processes of Interaction of Refractory Metals During Electrom-Beam Welding. *Welding International*, 2009, no. 10, pp. 17–20. (In Russ.)
12. Paul H., Chulist R., Mania I. Structural Properties of Interfacial Layers in Tantalum to Stainless Steel Clad with Copper Interlayer Produced by Explosive Welding. *Metals*, 2020, no. 10(7), pp. 969. DOI: 10.3390/met10070969.
13. Shamsolhodaei A., Oliveira J.P., Schell N., Maawad E., Panton B., Zhou Y.N. Controlling intermetallic compounds formation during laser welding of NiTi to 316L stainless steel. *Intermetallics*, 2020, vol. 116, 106656. DOI: 10.1016/j.intermet.2019.106656.
14. Jain A., Sonia P., Kumari S., Pushp P. Study of intermetallic compound (IMC) formed in welding of steel with magnesium: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 1159–1166. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.232.
15. Subramanian, P.R., Laughlin, D.E. The Cu–Ta (Copper-Tantalum) System. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1989, vol. 10, pp. 652–655. DOI: 10.1007/BF02877637.
16. Frolov T., Darling K.A., Kecskes L.J., Mishin Y. Stabilization and strengthening of nanocrystalline copper by alloying with tantalum. *Acta Materialia*, 2012, vol. 60, no. 5, pp. 2158–2168. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.01.011.
17. Baren, M.R. The Ag–Ta (Silver-Tantalum) System. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1988, vol. 9, no. 3, pp. 244–245. DOI: 10.1007/BF02881273.
18. Murray, J.L. The Cr–Ti (chromium-titanium) System. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1981, vol. 2, no. 2, pp. 174–181. DOI: 10.1007/BF02881474.
19. Petrunin I.E. (Ed.) *Spravochnik po paike* [Soldering guide]. Moscow, 2003. 480 p.
20. Malyutina Yu.N., Stepanova N.V., Cherkov A.G. Welding of Dissimilar Materials Using Intermediate Inserts Containing Copper and Tantalum. *Metal Processing and Materials Science.*, 2015, no. 4 (69), pp. 61–71. (In Russ.)
21. Ishkov V.M., Fedorkin O.O., Bodynov A.S. *Sposob paiki tygoplavkikh metallov s korrozionnostoikimi, zharostoikimi stalyami i nikellevymi splavami* [Method of Soldering Refractory Metals with Corrosion-Resistant, Heat-Resistant Steels and Nickel Alloys]. Patent RF, no. 2359792. 2009.
22. Semenov V.N., Semenov V.V. *Sposob paiki tryb* [Brazing Method of Pipes]. Patent RF, no. 2156183. 2000.
23. Xiangyi Meng, Fan Song, Danyang Lin, Haoyue Li, Chao Fu, Hongbo Xia, Xi Chen, Laijun Wu, Bo Chen, Caiwang Tan, Xiaoguo Song. Effect of the thickness of Cu interlayer on dissimilar laser welding of 304 stainless steel to tantalum. *Optics & Laser Technology*, vol. 157, 2023. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108727.
24. Liu C., Srinivasan J., Kelly R. G. Editors' Choice – Electrolyte Film Thickness Effects on the Cathodic Current Availability in a Galvanic Couple. *J. Electrochem. Soc.*, 2017, vol. 164, no. 13, pp. 845–855. DOI: 10.1149/2.1641713jes.
25. Paul H., Chulist R., Lytynksa-Dobrzynska L. et. al. Interfacial Reactions and Microstructure Related Properties of Explosively Welded Tantalum and Steel Sheets with Copper Interlayer. *Materials & Design*, 2021, vol. 208. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109873.
26. Korzhik V., Khaskin V., Grynyuk A., Ganushchak O., Shcheretskiy V., Peleshenko S., Konoreva O., Demianov O., Fialko N., Kvasnytskyi V. Analyzing metallurgical interaction during arc surfacing of barrier layers on titanium to prevent the formation of intermetallics in titanium-steel compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 202, vol. 15 (12 (113)), pp. 69–82. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.240154.
27. Huda Z., Zaharinie T., Amir Y. SEM-EDS Analysis and Microhardness Variations in Steel-Copper Braze Joint. *Journal of Technological Science & Engineering (JTSE)*, 2020, vol. 1, no. 1, pp. 23–29.

28. Sperandio C., Arnoult C., Laachachi A., Martino J.D., Ruch D. Characterization of the interphase in an aluminium/epoxy joint by using controlled pressure scanning electron microscopy coupled with an energy dispersive X-ray spectrometer. *Micron*, 2010, vol. 42, no 2, pp. 105–111. DOI: 10.1016/j.micron.2009.10.006.
29. Meisnar M., Baker S., Bennett J.M., Bernad A., Mostafa A., Resch S., Fernandes N., Norman A. Microstructural characterisation of rotary friction welded AA6082 and Ti-6Al-4V dissimilar joints. *Materials & Design*, 2017, vol. 132, pp. 188–197. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.07.004.
30. Feng S., Zhou Y., Zhu Z., Chen Y., Zhu Y. Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Welded Joint of Tantalum and Stainless Steel. *Metals*, 2022, vol. 12, 1638. DOI: 10.3390/met12101638.

Информация об авторах

Дровосеков Сергей Петрович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Российской федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия.

Ордин Николай Андреевич, инженер-исследователь, Российской федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия.

Титова Ольга Васильевна, научный сотрудник, Российской федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия.

Смирнов Юрий Геннадьевич, заместитель начальника подразделения, Российской федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия; yu.smirnov@vniitf.ru

Малых Михаил Викторович, научный сотрудник, Российской федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия.

Information about the authors

Sergey P. Drovosekov, Doctor of Technical Science, leading researcher, Russian Federal Nuclear Center – All Russian Researching Institute of Technical Physics named after Academ. E.I. Zababakhin, Sinezhinsk, Russia.

Nikolay A. Ordin, research engineer, Russian Federal Nuclear Center – All Russian Researching Institute of Technical Physics named after Academ. E.I. Zababakhin, Sinezhinsk, Russia.

Olga V. Titova, researcher, Russian Federal Nuclear Center – All Russian Researching Institute of Technical Physics named after Academ. E.I. Zababakhin, Sinezhinsk, Russia.

Yury G. Smirnov, deputy head of division, Russian Federal Nuclear Center – All Russian Researching Institute of Technical Physics named after Academ. E.I. Zababakhin, Sinezhinsk, Russia; yu.smirnov@vniitf.ru

Mikchail V. Malyh, researcher, Russian Federal Nuclear Center – All Russian Researching Institute of Technical Physics named after Academ. E.I. Zababakhin, Sinezhinsk, Russia.

Статья поступила в редакцию 21.02.2025; принята к публикации 13.03.2025.

The article was submitted 21.02.2025; accepted for publication 13.03.2025