

PACS numbers: 07.30.Hd, 07.30.Kf, 81.05.Je, 81.05.Mh, 81.20.Vj

## **Исследование процессов взаимодействия титаносодержащих припоев с оксидной керамикой и коваром**

А. М. Костин, Ал. В. Лабарткава, В. А. Мартыненко

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,  
пр. Героев Сталинграда, 9,  
54025 Николаев, Украина*

В современной промышленности широко используются металлокерамические изделия, в частности, гермоводы вакуумных установок электронно-лучевой сварки, которые изготавливаются пайкой или диффузионной сваркой. При изготовлении подобных узлов приходится решать ряд проблем, связанных с наличием остаточных собственных напряжений, вызванных различием термических коэффициентов линейного расширения металла и керамики, а также плохой смачиваемостью поверхности керамики припоями. Для снижения остаточных напряжений и повышения качества пайки в конструкциях гермоводов используют согласованные материалы и припои с высокой адгезионной активностью. Однако в литературных источниках недостаточно рассмотрены характеристики смачивания и растекания указанных припоев по ковару и керамике, отсутствуют результаты детальнейших исследований фазового состава и свойств паяных соединений с использованием припоев и сплавов на основе системы Cu–Ti. В этой связи в данной работе исследованы характеристики смачивания припоем СТЕМЕТ-1203 и припоем Cu–Ti, который формировался в процессе контактно-реактивного плавления фольги титана и меди (50% Ti–50% Cu по объёму), ковара 29НК, керамики ВК 94-1 и муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ ), изучены свойства паяных соединений с целью оптимизации технологии пайки металлокерамических высоковольтных гермоводов электронно-лучевых пушек вакуумных установок для сварки и напыления. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что для изготовления металлокерамических гермоводов оптимальным является сочетание ковар 29НК–керамика ВК 94-1. Использование для пайки гермоводов припоя Ti–Cu позволяет получить повышение адгезионной активности по сравнению с припоем СТЕМЕТ-1203 и снизить температуру пайки на 60–90°C. Таким образом, твёрдость плавно увеличивается от ковара к керамике, что, вероятно, способствует снижению уровня собственных напряжений в паяном соединении. Характер распределения химических элементов в паяных соединениях обеспечивает образование прочного пластичного шва без видимых макро- и микродефектов.

Качество пайки металлокерамических гермовводов определяется вакуумной плотностью швов и электросопротивлением между керамическими и металлическими элементами детали. В нашем случае герметичность пайки подтверждается масс-спектрометрическим методом; электросопротивление между керамическими и металлическими элементами гермоввода составляет более 15 ГОм при напряжении 1 кВ.

У сучасній промисловості широко використовуються металокерамічні виробы, зокрема, гермовводи вакуумних установок електронно-променевого зварювання, які виготовляють паянням або дифузійним зварюванням. При виготовленні зазначених вузлів доводиться розв'язувати низку проблем, що пов'язані з наявністю залишкових власних напружень, спричинених відмінністю термічних коефіцієнтів лінійного розширення металу і кераміки, а також поганою змочуваністю поверхні кераміки лютою. Для зниження залишкових напружень і підвищення якості паяння в конструкціях гермовводів використовують узгоджені матеріали і люту з високою адгезійною активністю. Однак у літературних джерелах недостатньо розглянуто характеристики змочування і розтікання зазначених лютей по ковару і кераміці, відсутні результати детальних досліджень фазового складу і властивостей паяних з'єднань з використанням лютей і стопів на основі системи Cu–Ti. У цьому зв'язку в даній роботі досліджено характеристики змочування лютою СТЕМЕТ-1203 і лютою Cu–Ti, яка формувалася в процесі контактано-реактивного топлення фольги титану і міді (50% Ti–50% Cu за об'ємом), ковару 29НК, кераміки ВК 94-1 і муліту ( $3\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}2\text{SiO}_2$ ), вивчено властивості паяних з'єднань з метою оптимізації технології паяння металокерамічних високовольтних гермовводів електронно-променевих гармат вакуумних установок для зварювання і напорошення. На підставі одержаних результатів можна зробити висновок про те, що для виготовлення металокерамічних гермовводів оптимальним є поєднання ковар 29НК–кераміка ВК 94-1. Використання для паяння гермовводів припою Ti–Cu уможливило одержати підвищення адгезійної активності порівняно з припоєм СТЕМЕТ-1203 і знизити температуру паяння на 60–90°C. Таким чином, твердість плавно збільшується від ковару до кераміки, що, ймовірно, сприяє зниженню рівня власних напружень у паяному з'єднанні. Характер розподілу хімічних елементів у паяних з'єднаннях забезпечує утворення міцного пластичного шва без наявних макро- і мікродефектів. Якість паяння металокерамічних гермовводів визначається вакуумною щільністю швів і електроопором між керамічними і металевими елементами деталі. У нашому випадку герметичність паяння підтверджується мас-спектрометричним методом. Електроопір між керамічними і металевими елементами гермовводу складає понад 15 ГОм при напрузі 1 кВ.

The ceramic–metal products such as pressure seals of electron-beam welding vacuum plants are widely used in modern industry. These seals are fabricated by brazing or diffusion welding. Fabricating this type of units, one should take into account a number of issues connected with presence of residual welding stresses caused by difference between linear thermal-expansion coefficients of metal and ceramic as well as poor ceramic surface wetting with brazes. Therefore, matching materials and brazes with high adhesive activity

are used in pressure seal constructions to decrease residual stresses and improve brazing quality. However, the features of braze wetting and flowing on kovar and ceramics are not enough presented in literature, and no results of detailed studies of phase composition and features of soldered joints using brazes and alloys based on Cu–Ti system are presented. In this paper, we examine features of wetting with STEMET-1203 braze and Cu–Ti braze, which is formed during contact-reacting soldering of titanium and copper foil (50% Ti by 50% Cu in volume), kovar 29NK, ceramics VK 94-1 and mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ ), study the features of brazed joint to optimize soldering technologies for pressure seals of metal-ceramics electron-beam gun high-voltage vacuum plants for welding and sputtering. Based on obtained results, we can conclude that the kovar 29NK–ceramics VK 94-1 combination is optimal for metal-ceramics pressure seal production. The usage of pressure seal soldering with braze Ti–Cu enables to improve adhesive activity in comparison with STEMET-1203 braze and to reduce the soldering temperature by 60–90°C. Thereby, hardness is gradually increasing from kovar to ceramics and thus may promote the inherent-stresses' level decrease in brazed joints. The chemical-elements' pattern in brazed joint promotes formation of fast plastic seam without noticeable macro- and microdefects. The quality of metal-ceramics pressure seal brazing is determined with joint vacuum tightness and electrical resistance between ceramics and metal elements of detail. In this case, the braze impermeability is confirmed by mass-spectrometric method. The electrical resistivity between ceramics and metal pressure seal elements is over 15 GΩ at the 1 kV voltage.

**Ключевые слова:** химический состав, фазовый состав, микротвёрдость, смачивание, растекание, оксидная керамика, ковар, титаносодержащие припои, гермоввод, активная пайка.

*(Получено 15 января 2014 г.; окончат. вариант — 3 апреля 2014 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности широко используются металлокерамические конструкции, которые изготавливаются пайкой или диффузионной сваркой [1–3]. Например, гермовводы различного назначения, в том числе высоковольтные для электронно-лучевых пушек вакуумных установок сварки и напыления [4, 5]. При этом, основными проблемами соединения керамики с металлом являются: наличие остаточных собственных напряжений в узле, которые вызваны различием термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) металла и керамики [3–5], а также плохая смачиваемость керамики припоями. В этой связи, для снижения остаточных напряжений, в конструкциях гермовводов используют согласованные материалы. Например, прецизионный сплав 29НК (ковар) и керамику марки ВК 94-1 или муллит ( $3\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ ), ТКЛР которых близки.

Наиболее распространённым способом соединения керамики с металлом является пайка [5, 6]. Широко используется пайка металлизированной керамики [6, 8]. Однако этот процесс является сложным и дорогостоящим. В этой связи в последнее время всё более широкое применение находит пайка активными припоями. Например, в работе [3] изучены процессы контактного взаимодействия Nb-содержащих расплавов с материалами системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  при пайке оксидной керамики с тугоплавкими металлами. В этом случае пайку осуществляют при температуре  $1250^\circ\text{C}$ , что приводит к образованию больших остаточных напряжений в соединении.

Известен способ пайки на основе системы Ti-Cu-Ni [7]. Недостатком указанного способа является необходимость строгого контроля содержания никеля в припое. Нарушение заданной стехиометрии приводит к образованию избыточных интерметаллидных соединений и растрескиванию паяного шва.

Достаточно широко используются для пайки металлокерамических узлов активные припои и пасты марок СТЕМЕТ и BrazeTec [5]. Припои, в этом случае, изготавливаются в виде аморфной ленты, что существенно увеличивает их стоимость. Применение паст имеет конструктивные ограничения.

В этой связи, нами предложена технология адгезионно-активной пайки припоями, которые формируются в процессе контактно-реактивного плавления фольги титана и меди [5, 9, 10]. Однако в литературе отсутствуют результаты детальных исследований фаз и свойств паяных соединений с использованием припоев СТЕМЕТ-1203 и сплавов на основе системы Cu-Ti, характеристики смачивания и растекания указанных припоев по ковару и керамике марки ВК 94-1, муллиту ( $3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$ ), что обуславливает актуальность настоящей работы.

Цель работы — исследование характеристик смачивания припоем СТЕМЕТ-1203 и припоем, который формируется в процессе контактно-реактивного плавления фольги титана и меди, ковара, керамики ВК 94-1, муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$ ), фазового состава и свойств паяных соединений, с целью оптимизации технологии пайки металлокерамических высоковольтных гермовводов электронно-лучевых пушек вакуумных установок для сварки и напыления.

## 2. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Высоковольтные гермовводы электронно-лучевых пушек в установках для сварки и напыления предназначены для обжатия электронного пучка электромагнитным полем [4]. Гермоввод состоит из пяти керамических колец с наружным диаметром 49 мм, внутренним диаметром 25 мм, толщиной 7 мм и четырёх коваровых колец-токоподводов толщиной 0,8 мм каждое. Общий вид гермоввода

представлен на рис. 1.

Для исследований в работе использовался аморфный припой СТЕМЕТ-1203 с температурой пайки 1000–1050°C и припой, который формировался в процессе контактно-реактивного плавления фольги титана и меди. Содержание титана и меди выбирали, исходя из следующих соображений.

Известно, что для образования прочного спая, на границе раздела припой–керамика необходимо обеспечить содержание титана в пределах 20–30% масс., что регулируется количеством и составом прослойки припоя и режимами пайки [11]. Содержание титана в прослойке припоя более 36% масс. приводит к повышению температуры его плавления и снижению пластичности. В этом случае в паяном шве гарантированно образуются хрупкие интерметаллидные соединения, что приводит к его растрескиванию. При содержании титана менее 24% масс. припой не всегда обеспечивает надежное взаимодействие с компонентами керамики, в результате чего снижается прочность паяного соединения [12]. В этой связи анализ диаграммы состояния системы Cu–Ti показывает, что оптимальным является соотношение 50% Ti–50% Cu по объёму или 28% Ti–72% Cu по массе (далее по тексту Ti–Cu) [13]. В работе нами выдерживалось данное соотношение.

В качестве подложек для исследования процессов смачивания использовали полированные ( $R_z \cong 0,01$  мкм) пластинки прецизионного сплава 29НЖ толщиной 0,8 мм, керамику марки ВК 94-1 и муллит ( $3Al_2O_3-2SiO_2$ ). Масса припоев СТЕМЕТ-1203 и Ti–Cu составляла 50 мг. Навески припоев выставлялись на подложку в виде фольги, скрученной в шарик. Припой Ti–Cu формировался в процессе контактно-реактивного плавления фольги титана и меди непосредственно при нагреве образцов. Перед экспериментом подложки из ковара, припой СТЕМЕТ-1203, фольга титана и меди подвергались очистке в ультразвуковой ванне в среде ацетона, затем

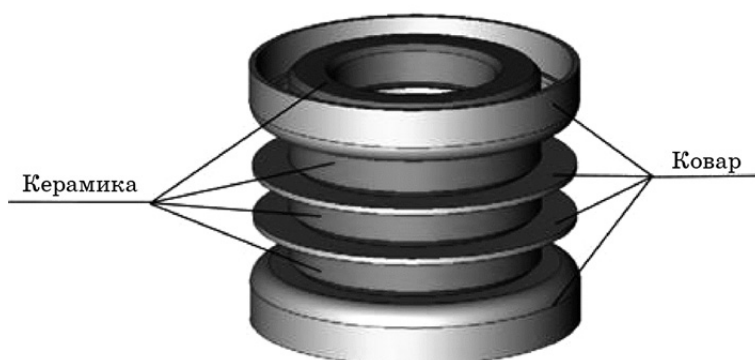


Рис. 1. Общий вид гермоввода.

тщательно обезжиривались. Керамика ВК 94-1 и муллит ( $3\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ ) отжигались в вакууме порядка  $10^{-2}$  Па при  $T = 950^\circ\text{C}$  в течение 30 мин.

Характеристики смачивания исследовали методом покоящейся капли. Образцы нагревали в вакуумной печи СНВ-1-3-1/16Н1 до температур 960, 990 и  $1020^\circ\text{C}$ , выдержка 3 мин., скорость нагрева  $20^\circ\text{C}$  в минуту, вакуум  $4 \cdot 10^{-2}$  Па. После порезки и травления в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте образцы исследовались на оптическом микроскопе Неофот-21.

Растровую электронную микроскопию и локальный рентгено-спектральный микроанализ выполняли на установке РЭММА 102-02 энергодисперсионным и волновым методом. На керамические образцы предварительно наносили слой углерода толщиной 0,01 мм с помощью установки ВУП-5М. Рентгеноструктурный анализ выполняли на дифрактометре ДРОН-УМ1 в монохроматическом  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении методом шагового сканирования. В качестве монохроматора использовали монокристалл графита.

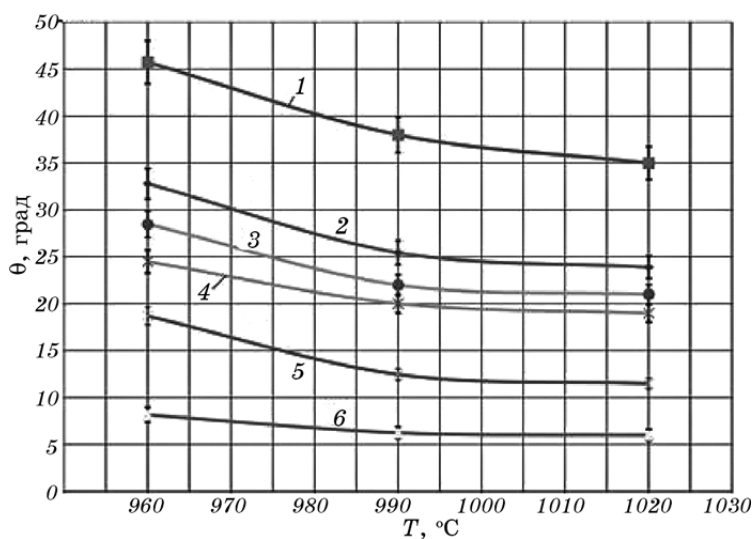
Твёрдость шва и его фазовых составляющих определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3 и на многофункциональном приборе «Микрон-гамма». Погрешность измерений при доверительной вероятности 0,95 с учётом коэффициента Стьюдента не превышала  $\pm 10\%$ .

Краевые углы смачивания припоями исследуемых материалов при температурах 960, 990 и  $1020^\circ\text{C}$  приведены на рис. 2. Анализ полученных результатов показал, что, в целом, припой Ti-Cu, по сравнению с припоем СТЕМЕТ-1203, демонстрирует более высокую адгезионную активность. Так, например, краевые углы смачивания муллита припоем СТЕМЕТ-1203 составляют 43–47 град и 33–37 град при температурах 960 и  $1020^\circ\text{C}$ , соответственно. Припой Ti-Cu обеспечивает в аналогичных условиях краевой угол смачивания 32–35 град и 22–26 град соответственно, что существенно лучше.

Керамика ВК 94-1 смачивается припоями лучше, чем муллит. Замеры краевых углов смачивания показали, что припой СТЕМЕТ-1203 при взаимодействии с керамикой ВК 94-1 обеспечивает краевые углы смачивания 27–30 град и 20–23 град при температурах 960 и  $1020^\circ\text{C}$ , соответственно. Припой Ti-Cu обеспечивает в аналогичных условиях краевой угол смачивания 23–26 град и 18–20 град соответственно.

Значительное превосходство процесса контактно-реактивного плавления наблюдается также при смачивании ковара 29НЖ. Так, припой СТЕМЕТ-1203 смачивает ковар с краевыми углами 18–20 град и 10–12 град при температурах 960 и  $1020^\circ\text{C}$ , соответственно. Припой Ti-Cu обеспечивает существенно лучшие показатели: 7–9 град и 5–7 град соответственно.

Таким образом, комплексный анализ полученных результатов показал, что использование припоя Ti-Cu обеспечивает повышение



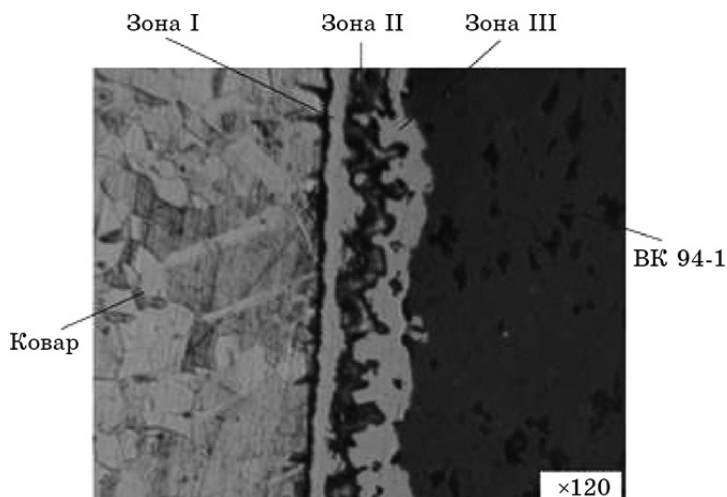
**Рис. 2.** Краевые углы смачивания припоями исследуемых материалов: 1 — СТЕМЕТ-1203 по муллиту ( $3\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ ), 2 — Ti-Cu по муллиту ( $3\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ ), 3 — СТЕМЕТ-1203 по керамике ВК 94-1, 4 — Ti-Cu по керамике ВК 94-1, 5 — СТЕМЕТ-1203 по ковару 29НК, 6 — Ti-Cu по ковару 29НК.

адгезионной активности по сравнению с припоем СТЕМЕТ-1203, и позволяет снизить температуру пайки в среднем на  $40-90^\circ\text{C}$ . Кроме того, для изготовления металлокерамических гермовводов оптимальным является сочетание ковар 29НК–керамика ВК 94-1. Указанное комплексное решение гарантированно обеспечивает снижение остаточных напряжений в паяном узле и улучшает его напряженно-деформированное состояние [14].

С учётом полученных закономерностей была разработана технология пайки металлокерамических гермовводов из ковара 29НК и керамики ВК 94-1 (см. рис. 1). Режимы пайки с давлением в вакууме оптимизировались нами в работе [10]. Кроме того, для обеспечения релаксации и уменьшения остаточных напряжений в паяном узле в процессе нагрева и охлаждения нами в работе [9] был обоснован термический цикл регламентированного по скорости нагрева и ступенчатого охлаждения с выдержкой на каждой ступени. Это существенно повышает качество пайки, в частности, вакуумную плотность и электросопротивление паяного узла. Таким образом, пайку осуществляли с учётом рекомендаций работ [9, 10].

Характерная микроструктура паяного соединения ковар 29НК–керамика ВК 94-1 показана на рис. 3. Контактно-реактивная пайка выполнялась с использованием фольги титана и меди толщиной  $0,1\text{ мм}$  каждая.

Оптическое исследование паяного шва показало образование ха-



**Рис. 3.** Микроструктура паяного соединения ковар 29НК–керамика BK 94-1 припоем Ti–Cu;  $\times 120$ .

рактических трёх зон: прикристаллизовавшийся к ковару однородный слой протяжённостью 19–45 мкм с микротвёрдостью  $H_{\mu_{50}} = 1,9–2,2$  ГПа (зона I), средняя зона — неоднородный по толщине и фазовому составу паяный шов протяжённостью 7–58 мкм с микротвёрдостью  $H_{\mu_{50}} = 2,1–2,8$  ГПа (зона II), и зона активного взаимодействия припоя с керамикой, имеющая неравномерную протяжённость 15–53 мкм с микротвёрдостью  $H_{\mu_{50}} = 3,2–3,6$  ГПа (зона III). Диффузионное проникновение припоя в керамику наблюдается до 30 мкм.

Изучение характера распределения химических элементов в паяном соединении ковар 29НК–керамика BK 94-1 показало (см. рис. 4), что непосредственно в зоне контакта припоя с керамикой наблюдается повышение химической активности титана, что выражается в увеличении его концентрации. Средняя зона содержит повышенную концентрацию меди, что объясняется её инертностью по отношению к ковару и керамике, и обеспечивает необходимую концентрацию титана с точки зрения обеспечения прочности и пластичности паяного соединения. Прикристаллизовавшийся к ковару однородный равномерный слой белого цвета обогащён железом, никелем и кобальтом, что увеличивает его пластичность по отношению к средней зоне. Об этом свидетельствует снижение микротвёрдости приблизительно на 20%. В свою очередь, ковар имеет ещё более низкую микротвёрдость  $H_{\mu_{50}} = 1,6–2,1$  ГПа, которая на границе с припоем демонстрирует тенденцию к уменьшению и составляет  $H_{\mu_{50}} = 1,1–1,8$  ГПа. Распределение микротвёрдости в паяном соединении ковар 29НК–керамика BK 94-1 припоем Ti–Cu показано на



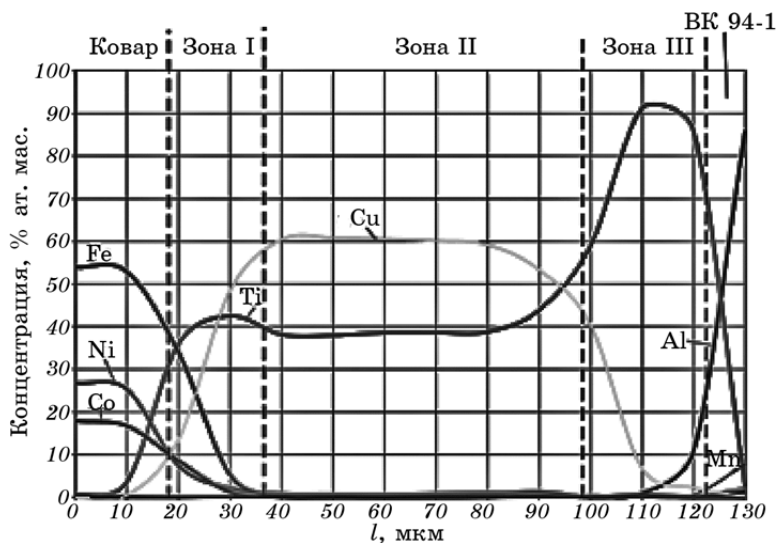


Рис. 4. Распределение элементов в паяном соединении ковар 29НК–керамика ВК 94-1 припоем Ti–Cu.

рис. 5. Таким образом, трехслойная зона паяного соединения представляет собой своеобразную прослойку переменной жесткости, жесткость которой плавно увеличивается от ковара к керамике.

Указанный факт, вероятно, способствует релаксации и уменьшению остаточных напряжений в паяном узле, что предотвращает его растрескивание и благоприятно сказывается на качестве пайки.

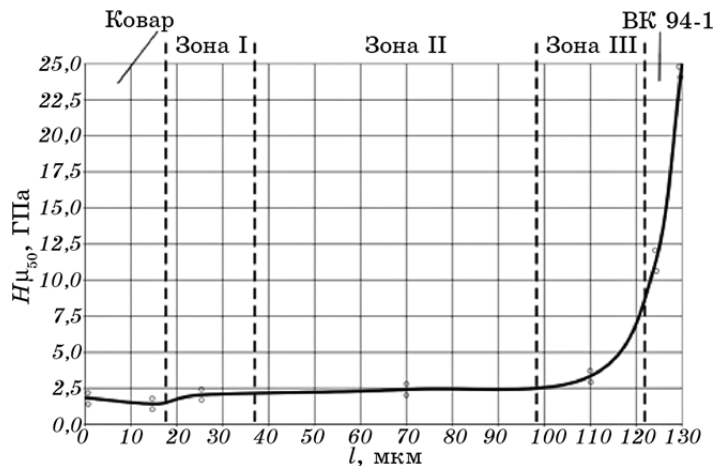


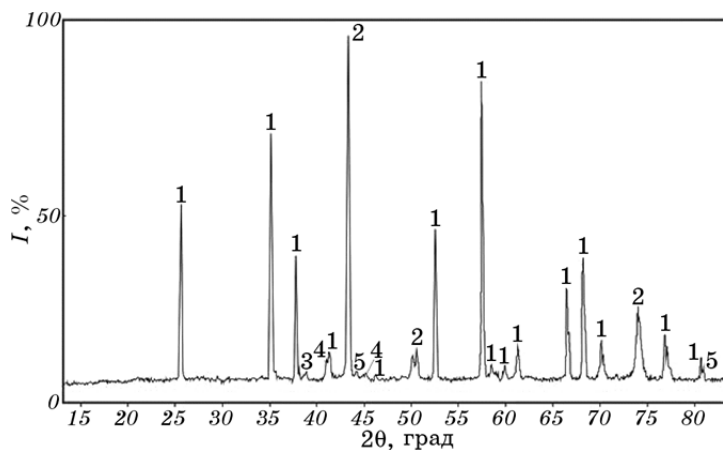
Рис. 5. Распределение микротвёрдости в паяном соединении ковар 29НК–керамика ВК 94-1 припоем Ti–Cu.

Паяное соединение, показанное на рис. 3, исследовалось также методом рентгеноструктурного анализа. Учитывая его малые размеры и протяженность, дифрактограмма была получена с места, где соединение было максимально широким и включало в себя все три характерные зоны (см. рис. 6). Анализ дифрактограммы показал, что кроме линий керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (R) и ковара  $\text{FeNi}$  (ГЦК), соединение также содержит три фазовые составляющие с кубической решеткой, такие как  $\text{Cu}_2\text{Ti}_4\text{O}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Cu}_3\text{O}$  и  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ . Кроме того, вероятно, так же могут присутствовать соединения типа  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (R)  $\text{FeNi}$  (ГЦК) с измененными параметрами.

Таким образом, рентгеноструктурный анализ зон паяного соединения подтвердил высокую химическую активность припоя  $\text{Ti-Cu}$  в процессе пайки. Входящий в припой титан в чистом виде взаимодействует с керамикой и коваром с образованием комплексных оксидов, что способствует повышению адгезионной активности процесса пайки. Хрупких интерметаллидных соединений, за исключением незначительного количества  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ , которое, вероятно, локализуется в приграничной к керамике области, обнаружено не было.

В целом, паяный шов имеет высокую плотность. Макро- и микродофекты, такие как поры, раковины, непропаи, трещины и др. не обнаруживаются. По периметру гермоввода формируются плотные швы с равномерной галтелью. Сопряжение паяного шва с керамикой и коваром плавное. Со стороны керамики наблюдается незначительная зона пропитки керамики припоем. Внешний вид гермоввода после пайки показан на рис. 7.

Основными требованиями к металлокерамическим высоковольт-



**Рис. 6.** Дифрактограмма паяного соединения ковар 29НК–керамика ВК 94-1 припоем  $\text{Ti-Cu}$ : 1 —  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (R), 2 —  $\text{Fe, Ni}$  (ГЦК), 3 —  $\text{Ti}_3\text{Cu}_3\text{O}$ , 4 —  $\text{Cu}_2\text{Ti}_4\text{O}$ , 5 —  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ .



Рис. 7. Внешний вид гермоввода после пайки.

ным гермовводам вакуумных установок являются их вакуумная плотность и электросопротивление. В этой связи, проверка их герметичности выполнялась с использованием масс-спектрометрического метода, с минимальным регистрируемым натеканием гелия  $10^{-13}$  м<sup>3</sup>·Па/с, а электросопротивление, которое составляло более 15 ГОм при напряжении 1 кВ — с помощью мегомметра Ф4102/1-1М. Результаты проверки герметичности и электросопротивления опытной партии гермовводов в количестве 50 штук показали, что выход годных изделий составляет не менее 95%.

### 3. ВЫВОДЫ

1. Для изготовления металлокерамических гермовводов оптимальным является сочетание ковар 29НК–керамика ВК 94-1.
2. Использование для пайки гермовводов припоя Ti–Cu, который формируется в процессе контактно-реактивного плавления фольги титана и меди, обеспечивает повышение адгезионной активности по сравнению с припоем СТЕМЕТ-1203, и позволяет снизить температуру пайки в среднем на 40–90°С.
3. В процессе пайки ковара 29НК с керамикой ВК 94-1 припоем Ti–Cu формируется соединение, которое содержит три фазовые составляющие с кубической решёткой, такие как  $\text{Cu}_2\text{Ti}_4\text{O}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Cu}_3\text{O}$  и  $\text{Al}_4\text{Cu}_9$ . Твёрдость паяного шва плавно увеличивается от ковара к керамике.

4. Пайка металлокерамических гермовводов на оптимальных режимах обеспечивает выход годных изделий на уровне не менее 95%.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, А. И. Четверо, *Машиностроение* (Ред. Б. Е. Патон) (Киев: Машиностроение: 2006), т. III-4.
2. В. А. Бачин, В. Ф. Квасницкий, Д. И. Котельников, В. Г. Новиков, Г. П. Полущкин, *Теория, технология и оборудование диффузионной сварки* (Москва: Машиностроение: 1991).
3. В. С. Журавлёв, Н. Ю. Таранец, А. Ю. Коваль, М. В. Карпец, Ю. В. Найдич, *Збірник наукових праць НУК*, № 3: 38 (2009).
4. В. В. Квасницкий, Ал. В. Лабарткава, *Проблеми техніки*, № 1: 82 (2009).
5. В. В. Квасницкий, А. М. Костин, А. В. Лабарткава, Ал. В. Лабарткава, *Матеріали VI науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (25–27 травня 2011 р., Київ)*, с. 36.
6. А. А. Бушков, Л. В. Козловский, В. С. Хейфец, *Адгезия расплавов и пайка материалов*, № 8: 67 (1981).
7. Ю. В. Найдич, Т. В. Сидоренко, А. В. Дуров, *Адгезия расплавов и пайка материалов*, № 40: 63 (2007).
8. В. Е. Барабанов, Е. И. Егорова, В. И. Лисогорский, В. В. Паничкина, В. В. Скороход, *Адгезия расплавов и пайка материалов*, № 4: 94 (1979).
9. В. Ф. Квасницкий, В. В. Квасницкий, О. М. Костин, Г. В. Ермолаев, Б. В. Бугаенко, О. В. Лабарткава, А. В. Лабарткава, *Спосіб паяння оксидної кераміки з металом*, Патент на корисну модель № 72197 (Опубликовано 10 септя 2012 р.) (Бюл. № 15).
10. В. Ф. Квасницкий, В. В. Квасницкий, О. М. Костин, Б. В. Бугаенко, *Спосіб паяння металокерамічних вузлів*, Патент на корисну модель № 67071 (Опубликовано 25 сичня 2012) (Бюл. № 2).
11. Z. S. Yu, P. Yang, R. F. Li, and K. Qi, *Materials Science and Technology*, 22, Iss. 7: 864 (2006).
12. В. А. Пономарев, *Припой для пайки изделий электронной техники*, Патент Российской Федерации № 2058872 (Опубликовано 27 апреля 1996).
13. *Диаграммы состояния двойных металлических систем* (Ред. Н. П. Лякишев) (Москва: Машиностроение: 1997), т. 2.
14. В. І. Махненко, Г. В. Ермолаєв, В. В. Квасницкий, А. В. Лабарткава, *Напруження та деформації при зварюванні* (Миколаїв: Видавництво НУК: 2011).

#### REFERENCES

1. V. K. Lebedev, S. I. Kuchuk-Yatsenko, and A. I. Chvertko, *Mashinostroenie (Machine Building)* (Ed. B. E. Paton) (Kyiv: Mashinostroenie: 2006), vol. III-4 (in Russian).
2. V. A. Bachin, V. F. Kvasnitskiy, D. I. Kotelnikov, V. G. Novikov, and G. P. Polushkin, *Teoriya, Tekhnologiya i Oborudovanie Diffuzionnoy Svarki (Theory, Technology and Equipment for Diffusion Welding)* (Moscow:

- Mashinostroenie: 1991) (in Russian).
3. V. S. Zhuravlyov, N. Yu. Taranets, A. Yu. Koval, M. V. Karpets, and Yu. V. Naydich, *Zbirnyk Naukovykh Prats' NUK*, No. 3: 38 (2009) (in Russian).
  4. V. V. Kvasnitskiy and Al. V. Labartkava, *Problemy Tekhniki*, No. 1: 82 (in Russian).
  5. V. V. Kvasnitskiy, A. M. Kostin, A. V. Labartkava, and Al. V. Labartkava, *Materialy VI Naukovo-Tekhnichnoyi Konferentsiyi Molodykh Uchenykh ta Spetsialistiv 'Zvaryuvannya ta Sporidneni Tekhnologiyi' (25–27 May 2011, Kyiv)*, p. 36 (in Russian).
  6. A. A. Bushkov, L. V. Kozlovskiy, and V. S. Heyfets, *Adheziya Rasplavov i Payka Materialov*, No. 8, 67 (1981) (in Russian).
  7. Yu. V. Naydich, T. V. Sidorenko, and A. V. Durov, *Adheziya Rasplavov i Payka Materialov*, No. 40: 63 (2007) (in Russian).
  8. V. E. Barabanov, E. I. Egorova, V. I. Lisogorskiy, V. V. Panichkina, and V. V. Skorokhod, *Adheziya Rasplavov i Payka Materialov*, No. 4: 94 (1979) (in Russian).
  9. V. F. Kvasnitskiy, V. V. Kvasnitskiy, O. M. Kostin, G. V. Ermolaev, B. V. Bugaenko, O. V. Labartkava, and A. V. Labartkava, *Sposib Payannya Oksidnoyi Keramiki z Metalom*, Patent na Korysnu Model No. 72197 (Published August 10, 2012) (Bul. No. 15) (in Ukrainian).
  10. V. F. Kvasnitskiy, V. V. Kvasnitskiy, O. M. Kostin, B. V. Bugaenko, and O. V. Labartkava, *Sposib Payannya Metalokeramichnykh Vuzliv*, Patent na Korysnu Model No. 67071 (Published January 25, 2012) (Bul. No. 2) (in Ukrainian).
  11. Z. S. Yu, P. Yang, R. F. Li, and K. Qi, *Materials Science and Technology*, **22**, Iss. 7: 864 (2006).
  12. V. A. Ponomarev, *Pripyoy dlya Payki Izdeliy Elektronnoy Tekhniki*, Patent of Russian Federation No. 2058872 (Published April 27, 1996) (in Russian).
  13. *Diagrammy Sostoyaniya Dvoynykh Metallicheskiykh Sistem (State Diagrams of Binary Metal Systems)* (Ed. N. P. Lyakishev) (Moscow: Mashinostroenie: 1997), vol. 2 (in Russian).
  14. V. I. Makhnenko, G. V. Yermolayev, V. V. Kvasnitskiy, and A. V. Labartkava, *Napruzheniya ta Deformatsyi pri Zvaryuvanni (Stresses and Strains at Welding)* (Mykolayiv: NUK: 2011) (in Ukrainian).