

УДК 621.791.3:621.793.3

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-67-73

Структура и прочностные свойства паяного соединения меди и нержавеющей стали с функциональным медным покрытием

© 2016 г. **Б.Н. Гузанов, Г.В. Минеев**

Российский государственный профессионально-педагогический университет (РГППУ), г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 16.12.15 г., доработана 11.02.16 г., подписана в печать 24.02.16 г.

Рассмотрено влияние термодиффузионного меднения хромоникелевой нержавеющей стали на структуру и прочностные свойства ее паяного соединения с медью. Особенности технологии позволяют получить функциональное покрытие с развитым микрорельефом, повышенная шероховатость которого за счет капиллярного эффекта способствует увеличению параметра растекания припоя по контактными поверхностям соединяемой пары. Все это способствует формированию в спае практически бездефектной структуры припоя с минимальным по площади непропаем в центре, что дает возможность получить более высокие показатели прочности и сопротивления отрыву по сравнению с аналогичными характеристиками паяных образцов в комбинации медь–медь.

Ключевые слова: термодиффузия, медное покрытие, растекание, припой, микрорельеф, поверхность, сталь, прочностные характеристики, микроструктура.

Гузанов Б.Н. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой металлургии, сварочного производства и методики профессионального обучения РГППУ (620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11). E-mail: guzanov_bn@mail.ru .

Минеев Г.В. – старший преподаватель кафедры общетехнических дисциплин УрИ ГПС МЧС России, аспирант РГППУ (620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 22). E-mail: mineev_gleb@mail.ru.

Для цитирования: Гузанов Б.Н., Минеев Г.В. Структура и прочностные свойства паяного соединения меди и нержавеющей стали с функциональным медным покрытием // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 3. С. 67–73. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-67-73.

Guzanov B.N., Mineev G.V.

Structure and strength properties of copper and stainless steel soldered joint with functional copper coating

The paper reviews the influence of therm diffusion copper plating of nickel-chromium stainless steel on the structure and strength properties of its soldered joint with copper. Technology features allow to obtain a functional coating with a developed microrelief which due to its higher roughness contributes to the increase in the solder flowing parameter over contact surfaces of the soldered couple due to the capillary effect. All this contributes to formation of a virtually defect-free solder structure in the soldered seam with a minimal dry joint area at its center, and makes it possible to obtain higher strength indices and tear resistance as compared to similar characteristics of a soldered specimen in the copper / copper combination.

Keywords: therm diffusion, copper coating, spreading, solder, microrelief, surface, steel, strength properties, microstructure.

Guzanov B.N. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Head of the Department of metallurgy, welding production and methodology of professional training of RGPPU (620012, Russia, Yekaterinburg, Mashinostroitelei str., 11). E-mail: guzanov_bn@mail.ru .

Mineev G.V. – Senior Teacher of the Department of general technical disciplines of URI GPS of Emercom of Russia, Graduate Student of RGPPU (620026, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 22). E-mail: mineev_gleb@mail.ru.

Citation: Guzanov B.N., Mineev G.V. Struktura i prochnostnye svoistva payanogo soedineniya medi i nerzhavayushchei stali s funktsional'nym mednym pokrytiem. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2016. No. 3. С. 67–73. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-67-73.

Введение

Современные методы пайки значительно расширили технические возможности выполнения неразъемных соединений, что позволило соединять детали не только из однородных, но и из разнородных металлов. В случае применения рациональных сочетаний паяемых материалов, припоев и технологических режимов пайки надежность и

долговечность паяных соединений часто оказываются выше, чем у сварных. Следует отметить, что в этом случае и прочность паяного шва весьма часто превышает прочность самого припоя, так как связь в паяном шве основана на растворении металла деталей в расплавленном припое и взаимной диффузии элементов припоя и металла соединяемых

деталей [1, 2]. При этом прочность связи припоя с металлом основы во многом определяется характером физико-химических процессов, протекающих при паянии, и главным образом от механических свойств твердых растворов и химических соединений, образующихся на границе раздела между припоем и металлом основы в результате их взаимодействия [3, 4].

В паяных конструкциях, когда металлы однородны, характер растекания и взаимодействия припоя с поверхностями спаиваемых деталей практически одинаков, и прочность паяных соединений для них в большей степени зависит от метода и режима паяния. Принципиально другие показатели паяного слоя обнаруживаются при соединении разнородных металлов, в частности при сборке медно-стальных конструкций. В этом случае существенные различия в физико-химических и механических характеристиках сопрягаемых металлов обуславливают возникновение определенных технологических трудностей при формировании паяного шва требуемой прочности и высокой работоспособности. Как показано в работах [5, 6], весьма важным здесь является нанесение на одну из спаиваемых поверхностей специального функционального покрытия, по составу и свойствам аналогичного материалу противоположной поверхности.

В данной статье представлены результаты исследования влияния разработанного термодиффузионного медного покрытия на особенности растекания припоя по поверхности образцов, а также прочностные характеристики паяного соединения в паре «медь — хромоникелевая сталь с медным подслоем».

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для проведения исследований были использованы хромоникелевая нержавеющая сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72) и медь МЗ (ГОСТ 859-2001) в виде листа толщиной 4 мм. В соответствии с программой для каждого эксперимента были подготовлены специальные образцы требуемых геометрии и размеров, а в качестве припоя использовали оловянно-свинцовую паяльную пасту Indium NC-SMQ90.

Определение параметров растекания припоя проводили на квадратных образцах размером 50×50 мм в соответствии с ГОСТ 23904-79. Паяльную пасту наносили пятном диаметром 8 мм и

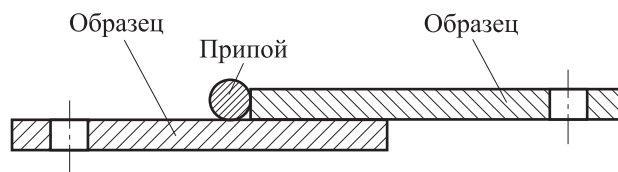


Рис. 1. Схема расположения припоя

толщиной 0,6 мм, после чего образцы с припоем помещали в муфельную печь (ПМШП-1-0,7) и нагревали до установленной изготовителем температуры 220 °С с выдержкой 10 мин. Охлаждение осуществляли в воздушной атмосфере при комнатной температуре.

Прочностные характеристики паяных соединений определяли в соответствии с ГОСТ 28830-90 при статических испытаниях на растяжение при нормальной температуре на 10-тонной разрывной машине ИР 5113-100. Образцы размерами 65×25 мм паяли внахлест на длину нахлеста 15 мм с зазором 0,07—0,1 мм. Паяльную пасту наносили в виде валика диаметром 5 мм по всей ширине спаиваемых образцов в соответствии со схемой, показанной на рис. 1. Процесс пайки соответствовал температурно-временному режиму вышеописанного эксперимента по растеканию.

Термодиффузионное меднение стальных образцов проводили в расплаве хлорида меди и ряда щелочно-земельных металлов по технологии, изложенной в работе [7]. Микроструктуру поверхностных слоев после меднения исследовали с помощью оптического микроскопа Neophot-21 на травленых в 6 %-ном растворе азотной кислоты металлографических шлифах.

Сравнительную оценку рельефа поверхности образцов осуществляли с использованием оптического профилографа Veeco WYKO NT 1100. Для исследования состава и структуры паяного шва использовали растровый электронный микроскоп JSM 6490 LV с системой энергодисперсионного микроанализа Oxford Inca Energy 350.

Результаты исследования и их обсуждение

Для получения надежного и ровного паяного шва необходимо, чтобы припой хорошо растекался по поверхности соединяемых металлов. Как известно, растекаемость является весьма сложной характеристикой, зависящей от очень большого количества факторов, среди которых весьма значима физико-химическая природа используемых

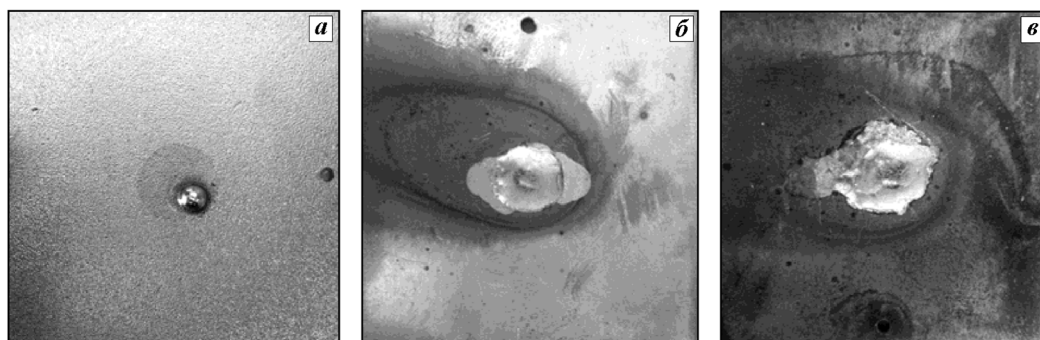


Рис. 2. Растекание припоя по поверхности образцов

a — чистая сталь, *b* — чистая медь, *v* — нержавеющая сталь с медным покрытием

материалов и припоя [8, 9]. В частности, для низкотемпературной пайки во многих отраслях современной техники наиболее широко применяют припой системы олово—свинец, обладающие достаточной прочностью, коррозионной стойкостью и высокими технологическими свойствами. Они достаточно пластичны, хорошо сопротивляются знакопеременным нагрузкам и обладают хорошей смачивающей способностью по отношению ко многим металлам и сплавам.

Однако, как показали исследования, растекания используемого припоя по поверхности стальных образцов без покрытия в процессе эксперимента добиться практически не удалось (рис. 2, *a*). В то же время при исследовании образцов из меди было установлено, что показатель растекания составил примерно 120 % (рис. 2, *b*).

Для улучшения смачиваемости и растекания припоя на основе паяльной пасты Indium NC-SMQ90 по стальной поверхности на ней было сформировано медное покрытие толщиной ~11÷12 мкм с достаточно развитой поверхностью без видимых внутренних дефектов и отслоений (рис. 3). В результате показатель растекаемости по функциональному покрытию даже превысил подобное значение для чистой меди и составил практичес-

ки 130—135 % (см. рис. 2, *v*). Решающее значение в этом случае приобретает микрогеометрия поверхности, так как шероховатость может улучшить смачиваемость и увеличить растекание припоя.

Так, в работах [10, 11] показано, что способность металла к пайке определяется не только составом нанесенного на него функционального покрытия, но и в значительной степени зависит от микрогеометрии его поверхности, когда начинают действовать капиллярные силы, способствующие растеканию припоя. Изучение микрорельефа поверхностей образцов меди после прокатки и термомодифузионного медного покрытия на стали показало, что развитость поверхности покрытия, полученного по разработанной технологии насыщения, более чем в 2 раза превосходит поверхность листовой меди (рис. 4 и 5). Причем, если на листо-

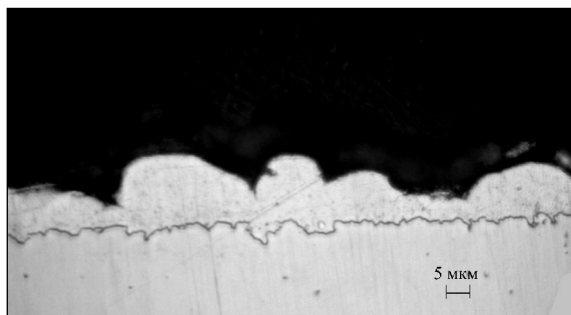


Рис. 3. Микроструктура медного покрытия на стали 12X18H10T

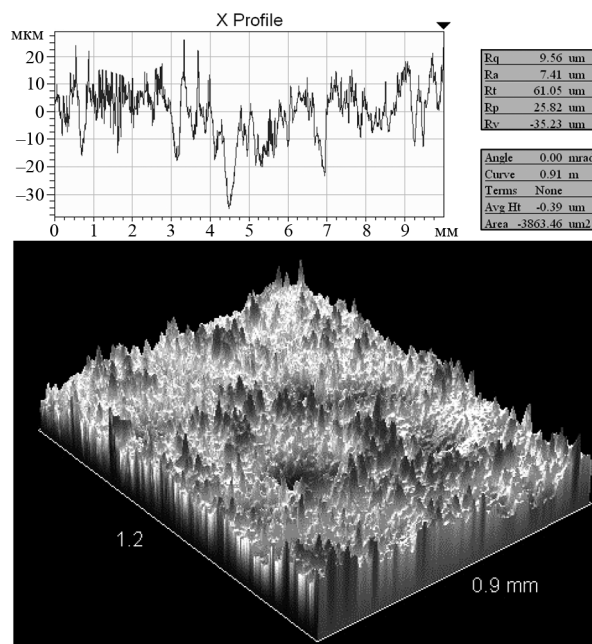


Рис. 4. Микрорельеф поверхности медного покрытия на стали 12X18H10T

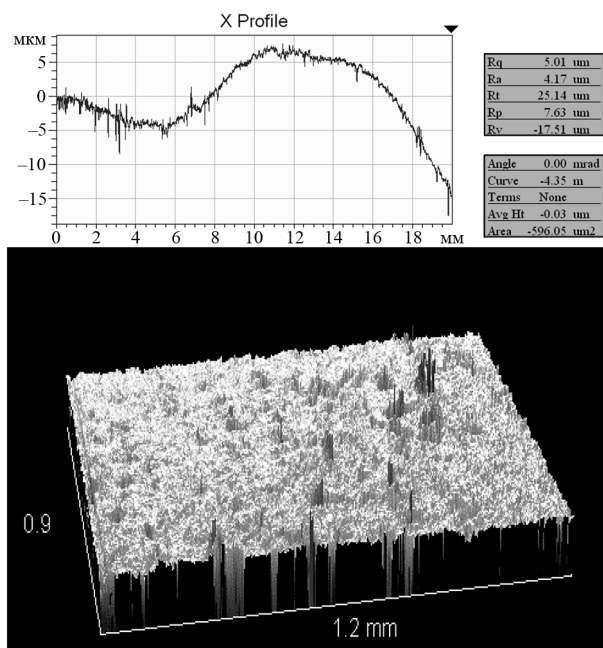
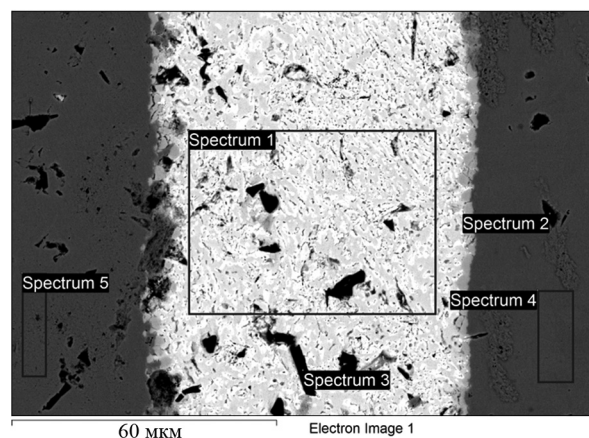


Рис. 5. Микрорельеф поверхности листовой меди

вой меди шероховатость несущественна и рельеф плавно меняет свою геометрию, то покрытие выравнило сам рельеф, но значительно увеличило общую шероховатость за счет возникновения множества микрокапилляров. Все это оказало большое влияние на структуру и прочностные свойства паяного соединения.

Проведенные исследования показали (рис. 6 и 7), что структура паяного шва на основе использованной паяльной пасты в точном соответствии с диаграммой состояния системы олово—свинец [12, 13] представляет собой двухкомпонентную эвтектическую механическую смесь с некоторым количеством избыточной фазы β -Pb в виде светлых участков неправильной формы по границам зерен эвтектики. Следует отметить, что подобная структура аналогична для обеих спаиваемых пар образцов из чистой меди и меди со сталью с медным покрытием.

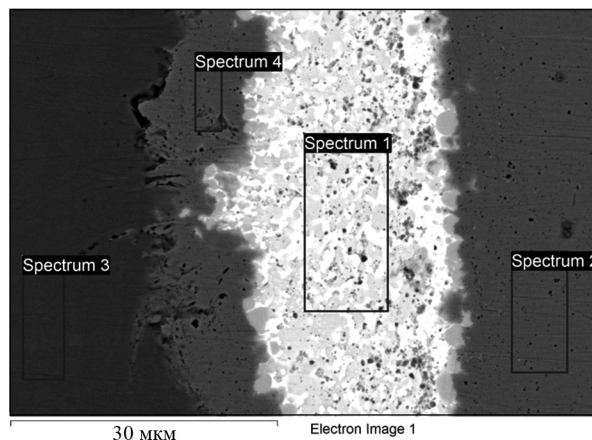
В то же время металлографически обнаружено, что при наличии однородных по составу поверхностей (в нашем случае меди и медного покрытия) условия растекания влияют главным образом на дефектность самого паяного шва. Так, при спаивании двух медных образцов (см. рис. 6) как в структуре самого паяного шва, так и на нескольких участках вблизи границы раздела были выявлены поры, раковины и микротрещины. В результате на некоторых участках паяного шва при соединении двух медных образцов там, где размеры дефектов



Processing option : All elements analysed (Normalised) All results in weight%

Spectrum	In stats.	O	Si	Cr	Fe	Cu	Sn	Pb	Total
Spectrum 1	Yes		1.87			0.90	74.90	22.34	100.00
Spectrum 2	Yes	3.70		0.74	1.15	94.41			100.00
Spectrum 3	Yes		75.72			0.93	15.99	7.36	100.00
Spectrum 4	Yes					100.00			100.00
Spectrum 5	Yes					100.00			100.00
Max.		3.70	75.72	0.74	1.15	100.00	74.90	22.34	
Min.		3.70	1.87	0.74	1.15	0.90	15.99	7.36	Min.

Рис. 6. Микроструктура и результаты спектрального анализа паяного соединения образцов из чистой меди



Processing option : All elements analysed (Normalised) All results in weight%

Spectrum	In stats.	Si	Cr	Fe	Ni	Cu	Sn	Pb	Total
Spectrum 1	Yes		2.01			1.01	72.79	24.19	100.00
Spectrum 2	Yes					100.00			100.00
Spectrum 3	Yes	0.44	17.64	72.93	8.99				100.00
Spectrum 4	Yes		0.54	1.51	2.36	95.59			100.00
Max.		0.44	17.64	72.93	8.99	100.00	72.79	24.19	
Min.		0.44	0.54	1.51	2.36	1.01	72.79	24.19	

Рис. 7. Микроструктура и результаты спектрального анализа паяного соединения медных и стальных образцов с медным покрытием

наиболее значительны (см. рис. 6, спектр 3), при спектральном анализе идентифицируется высокая концентрация кремния (до 75,72 %), что, по-видимому, обусловлено затиранием абразива в несплошности в процессе приготовления шлифа для металлографического анализа.

При спаивании медных и стальных образцов с медным покрытием подобных дефектов обнаружено не было, причем развитая поверхность покрытия позволила расплаву припоя проникнуть в глубь диффузионного слоя, в результате чего граница приобрела размытый характер (см. рис. 7). Как было показано в работе [14], подобное строение переходной зоны повышает адгезию припоя к поверхности и оказывает положительное влияние на эксплуатационные свойства паяного соединения.

Необходимо отметить, что наличие дефектов в паяном шве ослабляет соединение, и даже небольшое количество пустот и пор нарушает непрерывность слоя припоя, что может оказать неблагоприятное влияние на его прочностные свойства. Однако наибольшее негативное влияние на прочность соединения оказывают непропаи, наличие и размер которых зависят от растекания припоя.

На рис. 8 представлены результаты исследования характеристик прочности паяных соединений при статическом растяжении плоских образцов

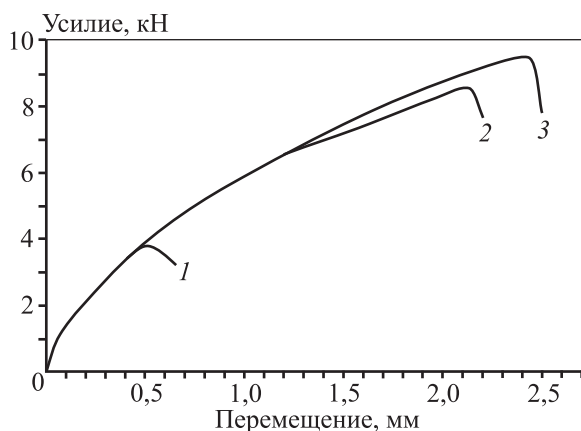


Рис. 8. Диаграммы растяжения паяных соединений

1 — медь — нержавеющая сталь; 2 — медь — медь;
3 — медь — нержавеющая сталь с медным покрытием



при нормальных условиях. Так, у образцов из меди и стали с медным покрытием разрушение происходило при усилии 9,4 кН и перемещении захватов 2,45 мм, у образцов из меди — при 8,6 кН и 2,1 мм, а у образцов из меди и стали без покрытия — при 3,7 кН и 0,6 мм соответственно. Видно, что наилучшие результаты получены для образцов медь — сталь с медным покрытием.

При сравнительном анализе характеристик прочности в нахлесточных соединениях необходимо учитывать, что в результате относительного сдвига соединяемых элементов и искривления под действием изгибающего момента (рис. 9) создаются касательные напряжения отрыва (наибольшие их значения приходятся на края галтели) и нормальные напряжения сдвига, неравномерно распределенные по длине и толщине нахлестки [3]. В результате при удовлетворительной пластичности и хорошей адгезии прочность паяного шва будет определяться сопротивлением отрыву под действием касательных напряжений. И здесь огромное значение приобретает наличие непропаев на границе раздела металл—припой, так как внутренние дефекты при статических нагрузках не оказывают значительного влияния на прочность [15].

Исследование поверхности нахлестов после разрушения показало, что в образцах медь — нержавеющая сталь растекания припоя практически не было, а соединение имело место только в области галтели. В результате разрушение произошло при минимальном перемещении захватов и незначительной нагрузке. Другими словами, заполнение припоем технологической щели между поверхностями спаиваемых образцов отсутствует, и паяный шов не образуется даже на локальных участках вблизи кромок образцов (рис. 10, а).

Сравнение поверхностей разрушения в образцах медь — медь и медь — нержавеющая сталь с медным покрытием (см. рис. 10, б, в) позволяет заключить, что в этих комбинациях припой полностью заполнил зазор, однако при соединении двух медных образцов в средней части нахлеста образовался непропад довольно крупного разме-



Рис. 9. Особенности разрушения паяного шва в нахлесточном соединении медь — сталь с медным покрытием

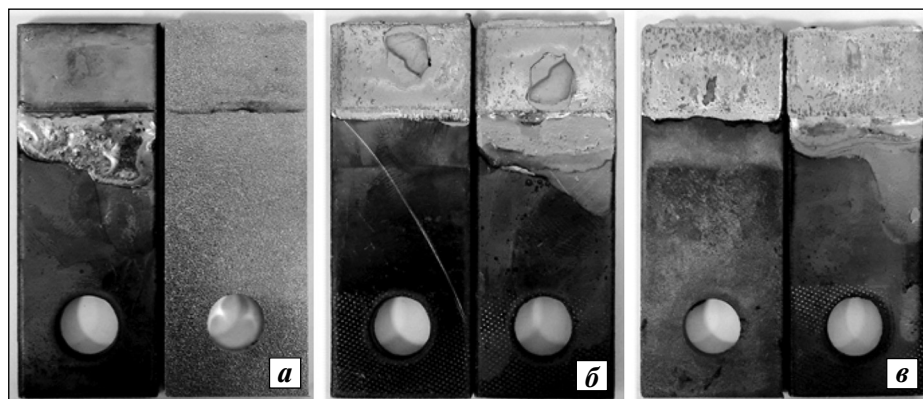


Рис. 10. Образцы после разрушения паяных соединений

а — медь — нержавеющая сталь; *б* — медь — медь;

в — медь — нержавеющая сталь с медным покрытием

ра, в то время как в другой паре медное покрытие повысило растекаемость припоя и непропай оказался незначительным по величине. В результате прочностные характеристики паяного шва разнородных металлов с промежуточным функциональным покрытием оказались даже выше, чем у однородных металлов.

Выводы

1. Исследование показателя растекания припоя в зависимости от состояния микрорельефа поверхности показало, что термодиффузионное меднение по разработанной технологии формирует в процессе нанесения развитую поверхность с высокой степенью шероховатости, улучшает смачиваемость и увеличивает величину растекания припоя по сравнению с листовой медью за счет образования множества микрокапилляров.

2. Микроструктура паяного шва при использовании паяльной пасты Indium NC-SMQ90 не зависит от спаиваемых пар металлов и представляет собой двухкомпонентную эвтектическую смесь с некоторым количеством избыточной фазы β -Pb, однако дефектность спая медь по меди в виде микропор выше, чем в паре медь — медное покрытие.

3. Оценка прочности паяных соединений в условиях статического растяжения показала, что внутренние дефекты не оказывают значительного влияния на прочность и сопротивление отрыву, которые определяются главным образом размером непропаев, образующихся при растекании припоя между спаиваемыми поверхностями. Наилучшие результаты получены для образцов в комбинации медь — сталь с функциональным покрытием.

Литература

1. He P., Feng J.C., Zhou H. Microstructure and strength of brazed joints of Ti_3Al —base alloy with TiZrNiCu filler metal // Mater. Sci. Eng. A. 2005. Vol. 392. No. 1-2. P. 81—86.
2. Nishiura M., Nakayama A., Sakatani S., Kohara Y., Uenishi K., Kobayashi K. Mechanical strength and microstructure of BGA joints using lead—free solders // Mater. Trans. (Special issue on lead—free electronics packaging). 2002. Vol. 43. No. 8. P. 1802—1807.
3. Парфенов А.Н. Введение в теорию прочности паяных соединений // Технологии в электронной промышленности. 2008. No. 2. С. 46—52.
4. Ganjeh E., Sarkhosh H., Khorsand H., Sabet H., Dehkor-di E.H., Ghfarri M. Evaluate of braze joint strength and microstructure characterize of titanium—CP with Ag—based filler alloy // Mater. Design. 2012. No. 39. P. 33—41.
5. Петрунин И.Е. Справочник по пайке. М.: Машиностроение, 2003.
6. Лашко С.В., Врублевский Е.И. Технология пайки изделий в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993.
7. Гузанов Б.Н., Минеев Г.В. Термодиффузионное меднение хромоникелевых сталей в расплавах солей // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2013. No. 1. С. 67—72.
8. Зенин В.В., Сегал Ю.Е., Колбенков А.А. Оценка смачиваемости и растекания припоя по паяемой поверхности // Петербургский журн. электроники. 2000. No. 2. С. 32—36.
9. Saiz E., Tomsia A.P., Hwang C.-W., Suganuma K. Spreading of Sn—Ag solders on Fe—Ni alloys // Acta Mater. 2003. Vol. 51. No. 11. P. 3185—3197.
10. Рогожин В.В., Спасская М.М., Ананьева Е.Ю., Яровая Е.И., Абрамов А.М. Использование боросодержащих ве-

- ществ для получения функциональных покрытий никель—бор различного назначения // Вестн. Нижегородского ун-та. 2012. No. 4(1). С. 140—147.
11. Yeo H.K., Han K.H. Wetting and spreading of molten SnPb solder on a Cu—10% Nb micro—composite // *J. Alloys Compounds*. 2009. Vol. 477. No. 1-2. P. 278—282.
 12. Шанк Ф.А. Структуры двойных сплавов. М.: Металлургия, 1973.
 13. Большаков В.И., Сухомлин Д.В., Лаухин Д.В. Атлас структур металлов и сплавов. Днепропетровск: ПГАСА, 2010.
 14. Koster M., Lis A., Lee W.J., Kenel C., Leinenbach C. Influence of elastic—plastic base material properties on the fatigue and cyclic deformation behavior of brazed steel joints. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112315002479> (дата обращения 13.11.2015).
 15. Лашко С.В., Лашко Н.Ф. Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1988.
 5. Petrunin I.E. Spravochnik po paike [Guide to soldering]. Moscow: Mashinostroenie, 2003.
 6. Lashko S.V., Vrublevskii E.I. Tekhnologiya paiki izdelii v mashinostroenii [The technology of soldering products in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1993.
 7. Guzanov B.N., Mineev G.V. Termodiffuzionnoe mednenie khromonikelevykh stalei v rasplavakh solei [Thermal diffusion copper plating of chrome-nickel steels in molten salts]. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2013. No. 1. P. 67—72.
 8. Zenin V.V., Segal Yu.E., Kolbenkov A.A. Otsenka smachivaemosti i rastekaniya pripoya po payaemoi poverkhnosti [Evaluation of wettability and spreading of the solder on the soldered surfaces]. *Peterburgskii zhurnal elektroniki*. 2000. No. 2. P. 32—36.
 9. Saiz E., Tomsia A.P., Hwang C.-W., Suganuma K. Spreading of Sn—Ag solders on Fe—Ni alloys. *Acta Mater*. 2003. Vol. 51. No. 11. P. 3185—3197.
 10. Rogozhin V.V., Spasskaya M.M., Anan'eva E.Yu. Yarovaya E.I., Abramov A.M. Ispol'zovanie borosoderzhashchikh veshchestv dlya polucheniya funktsional'nykh pokrytii nikel'—bor razlichnogo naznacheniya [The use of boron-containing substances to produce functional coatings Nickel-boron for various purposes]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta*. 2012. No. 4(1). P. 140—147.
 11. Yeo H.K., Han K.H. Wetting and spreading of molten SnPb solder on a Cu—10% Nb micro—composite. *J. Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 477. No. 1-2. P. 278—282.
 12. Shank F.A. Struktury dvoynykh splavov [Constitution of binary alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1973.
 13. Bol'shakov V.I., Sukhomlin D.V., Laukhin D.V. Atlas struktur metallov i splavov [Atlas of structures of metals and alloys]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2010.
 14. Koster M., Lis A., Lee W.J., Kenel C., Leinenbach C. Influence of elastic—plastic base material properties on the fatigue and cyclic deformation behavior of brazed steel joints. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112315002479> (accessed 13.11.2015).
 15. Lashko S.V., Lashko N.F. Paika metallov [Brazing of metals]. Moscow: Mashinostroenie, 1988.

References

1. He P., Feng J.C., Zhou H. Microstructure and strength of brazed joints of Ti₃Al—base alloy with TiZrNiCu filler metal. *Mater. Sci. Eng. A*. 2005. Vol. 392. No. 1-2. P. 81—86.
2. Nishiura M., Nakayama A., Sakatani S., Kohara Y., Uenishi K., Kobayashi K. Mechanical strength and microstructure of BGA joints using lead—free solders. *Mater. Trans. (Special issue on lead—free electronics packaging)*. *Mater. Trans.* 2002. Vol. 43. No. 8. P. 1802—1807.
3. Parfenov A.N. Vvedenie v teoriyu prochnosti payanykh soedinenii [Introduction to the theory of strength of brazed joints]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*. 2008. No. 2. P. 46—52.
4. Ganjeh E., Sarkhosh H., Khorsand H., Sabet H., Dehkordi E.H., Ghfarri M. Evaluate of braze joint strength and microstructure characterize of titanium—CP with Ag—based filler alloy. *Mater. design*. 2012. No. 39. P. 33—41.