

С. В. Максимова*

АМОРФНЫЕ ПРИПОИ ДЛЯ ПАЙКИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И ТИТАНА И СТРУКТУРА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассмотрены результаты исследований паяных соединений элементов теплообменных устройств из нержавеющей стали (12X18H10T) и титановых сплавов (BT1-0, OT4), полученных с помощью аморфных припоев соответственно на никелевой (Ni—7Cr—4,5Si—3Fe—3,2B) и титановой (Ti—24Cu—12Ni—12Zr) основах. Изучена микроструктура и химическая неоднородность паяных швов и аморфного припоя. Показано, что структура паяных швов неоднородна по длине соединения как по морфологическим признакам, так и по химическому составу и зависит от величины зазора между соединяемыми материалами.

Введение

Проблема нанесения припоев на паяемые поверхности большой протяженности решалась десятилетиями. Особенно остро она стояла при изготовлении многослойных тонкостенных конструкций, например теплообменных аппаратов, где толщина разделительной пластины составляет десятые (или сотые) доли миллиметра. Для пайки таких конструкций часто используют эвтектические припои, которые невозможно получить в виде пластичных заготовок (пластин или лент) обычными методами передела (например, прокаткой) и, как правило, их применяют в порошковом виде. Для получения качественных паяных соединений порошковый припой просеивают, отбирают фракцию с размером частиц 63—100 мкм, замешивают на связке, затем наносят на паяемую поверхность. Использование припоев в порошковой форме затрудняет их равномерное размещение на поверхности больших размеров и удаление связки при нагреве в вакууме, а также возникает в отдельных точках большая концентрация припоя при крупных фракциях и значительно увеличивается количество оксидов при мелких фракциях. Неравномерность слоя припоя на паяемой поверхности приводит к очаговой эрозии тонкостенного паяемого металла и, в конечном счете, к ухудшению качества паяных соединений.

С появлением припоев в аморфном состоянии эти проблемы исчезли и открылись новые возможности в области пайки. Главное преимущество аморфных припоев состоит в том, что их можно получать в виде пластичных, гомогенных по химическому составу тонких лент (толщиной 20—100 мкм) даже из хрупких материалов. Как правило, для таких металлических систем характерно наличие сложных интерметаллидов и эвтектик. Для производства припоев в аморфном состоянии наиболее широко применяется метод быстрого затвердевания расплава на внешней поверхности быстровращающегося диска-холодильника [1—3]. Жидкий металл под давлением инертного газа проходит через сопло и попадает на внешнюю поверхность вращающегося диска, где затвердевает в виде тонкой ленты, которая снимается с диска за счет центробежных сил.

* С. В. Максимова — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, г. Киев.

Благодаря быстрому охлаждению (10^4 — 10^6 град/с) и оптимальным температурному и временному режимам быстрой закалки при получении аморфных припоев зародыши кристаллической твердой фазы не успевают образовываться, а жидкая фаза остается метастабильной или образует так называемое металлическое стекло (неравновесный твердый раствор с избыточной концентрацией растворенных компонентов). Другими словами, аморфный сплав представляет собой замороженную жидкость, в которой полностью отсутствует дальний порядок, свойственный кристаллам [4]. Именно отсутствием зерен, неоднородностей, возникающих по их границам, а также отсутствием кристаллической симметрии и определяются уникальные свойства аморфных припоев. Высокая химическая однородность припоя обеспечивает узкий интервал плавления, равномерность расплавления по объему, хорошее смачивание паяемой поверхности, высокую капиллярную активность припоя и высокую диффузионную активность составляющих его компонентов [5]. Кроме того, из аморфных припоев можно изготавливать закладные элементы требуемых размеров и таким образом строго дозировать количество припоя.

Перечисленные достоинства аморфных припоев улучшают технологический процесс пайки и открывают новые возможности в области пайки, что особенно важно при изготовлении уникальных ответственных конструкций в различных отраслях промышленности. В качестве примера можно привести изготовление компактных пластинчато-ребристых теплообменников из различных материалов (нержавеющих сталей, титановых сплавов, тугоплавких металлов и т. д.).

Отечественными и американскими учеными наиболее хорошо изучены сплавы системы Ni—Cr—Si—B [6—15]. На базе данной системы созданы стандартные припои типа BNi-1, BNi-2, ВПр-11. Интересно отметить, что припои с бором и кремнием (BNi-1, BNi-2, BNi-3, BNi-4) появились в США давно, видимо, еще во время второй мировой войны, в период бурного развития авиации. Тогда не ставился вопрос об аморфизации припоев или получении их в нанокристаллическом состоянии. Они широко применялись в виде порошка.

Паяные швы, полученные с использованием припоев BNi-2, BNi-3 и BNi-4, состоят из трех фаз [13]: γ -твердого раствора на основе никеля, прилегающего к основному металлу, и расположенных в центре паяного шва боридов никеля и эвтектики, состоящей из силицидов и боридов никеля. Хрупкие фазы, расположенные в центре шва, определяют хрупкость соединения в целом, и развитие трещин происходит по этим фазам. Слой γ -Ni, эффективно задерживающий развитие трещин, с увеличением температуры пайки и времени выдержки растёт за счет других фаз в результате диффузии бора в основной металл. При достаточно больших величинах температуры и времени выдержки паяный шов состоит только из γ -Ni. Эти превращения осуществляются тем быстрее, чем меньше толщина паяного шва.

Существенно уменьшить толщину шва позволяет применение припоев в виде аморфных лент [14, 16, 17]. Так, уменьшение толщины припоя Ni—7,7Cr—4,1B—3,5Si—6,5Fe с 0,125 до 0,025 мм позволяет повысить прочность соединения со 100 до 230 МПа. Кроме малой толщины припоя, на прочность соединения влияет то обстоятельство, что фольга припоя

Таблица 1. Химический состав аморфных припоев

Table 1. Chemical composition of amorphous filler metals

Марка припоя	Содержание элементов*, % (мас.)	Температура, °С	
		солидуса	ликвидуса
MBF 10/10A**	Ni—13—15Cr—4—5Si— 4—5Fe—2,75—3,5B	970	1040
MBF 15/15A**	Ni—12—14Cr—4—5Si— 3,5—5Fe—2,5—3,2B	—	—
MBF 30/30A**	Ni—4—5Si—≤0,5Fe— 2,75—3,5B	980	1040
MBF 80/80A**	Ni—14,5—16Cr— 3,17—4,2B	—	—
MBF-20**	Ni—7Cr—4,5Si—3Fe— 3,2B	970	1024
СТЕМЕТ***1301	Ni—7Cr—4,6Si—3Fe— 3,1B	980	1010
СТЕМЕТ*** 1311	Ni—4Si—5Fe—4B— 16Co	980	1015
СТЕМЕТ*** 1201	Ti—24Cu—12Ni—12Zr	830	955

* Здесь и далее содержание элементов приводится в массовых процентах.

** Аморфные припои производства фирмы METGLAS (США).

*** Аморфные припои производства ООО МИФИ-АМЕТО (РФ).

расположена непосредственно в зазоре и припою нет необходимости заполнять зазор под действием капиллярных сил, как это происходит при расположении кристаллического припоя у зазора.

В настоящее время на основе упомянутых составов создан ряд аморфных припоев (табл. 1). Благодаря наличию неметаллических элементов, таких как бор и кремний, они хорошо аморфизируются и получают их в виде аморфной фольги толщиной 0,025—0,05 мм. Содержание бора в них не менее 2,5%.

В данной работе исследованы аморфные припои на основе никеля и титана, а также особенности формирования структуры паяных швов тонколистовых материалов нержавеющей стали и титанового сплава при изготовлении пластинчато-ребристых теплообменников.

Методы исследований и обсуждение полученных результатов

Исследовали аморфные припои системы Ni—7Cr—4,5Si—3Fe—3,2B толщиной 40 мкм и Ti—24Cu—12Ni—12 Zr толщиной 30 мкм. В качестве основного металла использовали нержавеющую сталь 12X18H10T (Fe—

(17—19)Cr—(9,0—11)Ni—(1,0—2,0)Mn— $\leq 0,8$ Si— $\leq 0,8$ Ti— $\leq 0,12$ C, титановые сплавы BT1-0 (Ti), OT4 (псевдо- α -сплав Ti—3Al—1,5Mn). Припой в виде аморфной фольги закладывали между соединяемыми пластинами и паяли в вакуумной печи с радиационным нагревом при разрежении рабочего пространства $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па. Температура пайки многослойных элементов пластинчато-ребристых теплообменников из нержавеющей стали составляла 1050 °С с выдержкой 3 мин, из титановых сплавов — 1000 °С с выдержкой 15 мин. Образцы охлаждали вместе с печью до комнатной температуры.

Для проведения металлографических исследований и изучения химической неоднородности паяных соединений использовали растровый электронный микроскоп CamScan, оснащенный рентгеновским микроанализатором. Рентгеноструктурный анализ проводили с помощью дифрактометра ДРОН-3 в MoK_α -излучении в режиме сканирования по точкам.

При выборе припоев для пайки теплообменных устройств из нержавеющей сталей были учтены не только химический состав паяемого материала, но и его толщина, которая может составлять 0,5—0,15 мм. В этом случае желательное применение припоев с узким интервалом кристаллизации. Температура закалки нержавеющей стали 12X18H10T составляет 1100 °С. Поэтому во избежание значительного роста зерна и ухудшения механических свойств паяемого металла температура пайки не должна превышать указанного значения [18].

При визуальном осмотре паяных соединений из нержавеющей стали марки 12X18H10T, изготовленных с помощью припоя Ni—7Cr—4,5Si—3Fe—3,2В, было отмечено хорошее смачивание паяемого материала.

Металлографические и микрорентгеноспектральные исследования показали, что структуры металла шва и галтельного участка паяного соединения существенно отличаются как по морфологическим признакам (рис. 1), так и по химическому составу. В частности, структура центральной части шва, ширина которого не превышает 30—40 мкм (рис. 1, а, в), представлена твердым раствором на основе никеля (71,46%), содержащим железо (15,06%), хром (8,86%), кремний (3,78%) и незначительные количества титана и марганца (составляющих элементов основного металла). Бор в данном участке шва отсутствует.

Очевидно, во время пайки происходит активное взаимодействие жидкого припоя с твердым основным металлом. Бор не растворим ни в никелевой матрице паяного шва, ни в паяемом материале и его диффузионная активность намного превышает таковую для других элементов, составляющих припой. Он активно диффундирует из жидкого металла шва в паяемый материал, прилегающий к шву. Значительный градиент концентраций на межфазной границе способствует диффузионным процессам и оставшийся в зазоре жидкий припой кристаллизуется как однофазный сплав.

В направлении от межфазной границы вглубь основного металла количество дисперсных выделений уменьшается, но образуется боридная сетка по границам зерен основного металла (рис. 1, в). Проникновение бора в основной металл происходит на расстояние около 40 мкм от границы шов — основной металл.

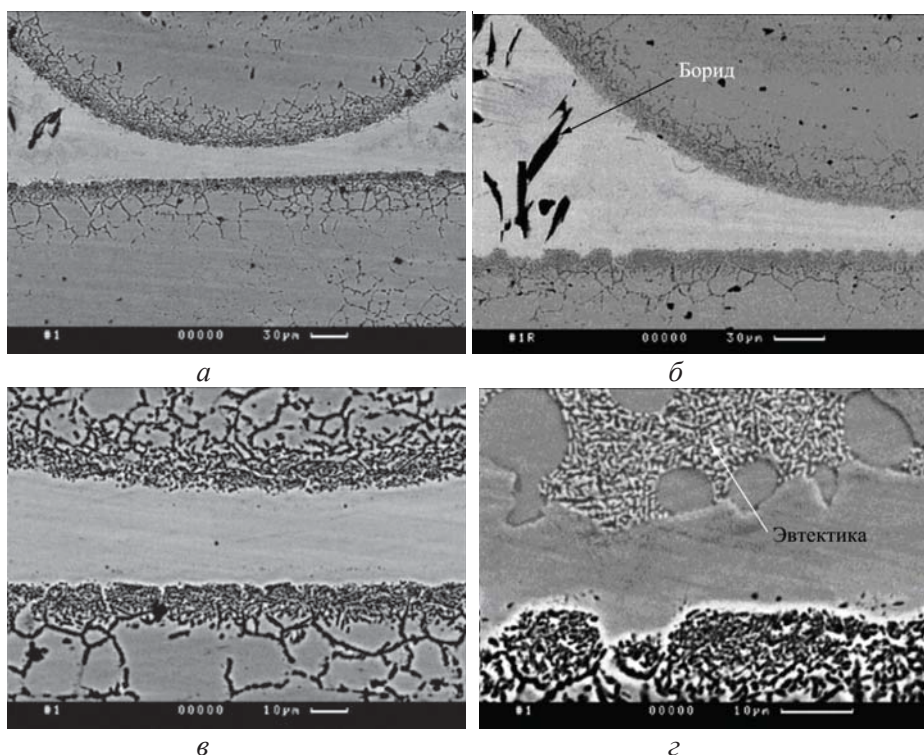


Рис. 1. Микроструктура паяных соединений теплообменного устройства стали 12X18H10T, полученных с помощью аморфного припоя Ni—7Cr—4,5Si—3Fe—3,2B: общий вид (а), широкий шов перед галтельным участком (б), узкий участок шва (в), эвтектика в широком участке шва (г)

Fig. 1. Microstructure of brazed joints on steel 12Kh18N10T heat exchanging device, made by using amorphous filler metal Ni—7Cr—4,5Si—3Fe—3,2B: general view (a), fillet region (b), narrow region of the seam (c), eutectic in fillet region (d)

С увеличением ширины зазора (в том числе при переходе к галтельному участку) возрастает количество (объем) жидкого металла шва, меняется соотношение площади контакта жидкой фазы к поверхности контакта твердого основного металла. В результате при охлаждении соединения в широких зазорах размерами около 150 мкм (в том числе и в галтельном участке) кристаллизуются довольно крупные игловидные включения борида хрома (рис. 1, а, б). Кроме того, в центральной зоне широкого шва (более 40 мкм) наблюдается эвтектическая составляющая, характерная для данного припоя в литом состоянии (рис. 2, г). В эвтектике наблюдается повышенное содержание никеля (до 84%) и кремния (около 5—8%). Очевидно, одной из составляющих эвтектики являются силициды никеля.

Следует отметить, что наличие хрупких фаз в большом количестве отрицательно влияет на усталостную прочность и коррозионную стойкость паяных соединений, способствует эрозии тонких элементов пластинчато-ребристых теплообменников, образованию пористости, свищей, трещин, понижению механических свойств [6].

Исходя из изложенного, авторы работы [8] предлагают для пайки использовать сплавы на базе припоя BNi-5 марок MBF-50 (Ni—19Cr—7,3Si—1,4B) и MBF-51 (Ni—15Cr—7,25Si—1,4B), где содержание бора снижено до 1,4%. Температурный интервал плавления данных припоев находится в пределах 1052—1144 °С (MBF-50) и 1030—1126 °С (MBF-51). Сплав MBF-51 позволил получить аморфную фольгу толщиной 0,05—0,06 мм при ширине до 200 мм, что явилось огромным достижением.

Для повышения качества соединений авторы работы [6] предлагают при использовании борсодержащих припоев, в частности припоя Ni—15Cr—7,25Si—1,4B, проводить ступенчатый режим пайки: нагрев до 1190 °С, выдержка при этой температуре 2,5 ч; охлаждение до 1100 °С, выдержка 3 ч; дальнейшее охлаждение в азоте до 70 °С в течение 30 мин. По мнению авторов, такой ступенчатый процесс пайки [8] позволяет уменьшить вероятность образования борсодержащих фаз (или растворять их). Однако даже после оптимальной термообработки по границам зерен основного металла, прилегающего к шву, обнаруживаются бориды (рис. 2) [6].

С экономической точки зрения этот длительный и энергоемкий процесс неприемлем для производителей пластинчатых конструкций. Поэтому необходимо разрабатывать припои для пайки нержавеющей сталей, которые можно аморфизировать со значительно меньшим количеством бора (<0,5%) или без него. В настоящее время такие исследования проводятся [19].

При изучении склонности сплавов к аморфизации, в том числе и титановых, принимается во внимание определенный комплекс физико-химических параметров, обуславливающих индивидуальные свойства исходных компонентов сплава (размерные соотношения атомных радиусов и положение в периодической системе Д. И. Менделеева), характер их взаимодействия в данной системе, а также термодинамические параметры и температура стеклования. Существует связь между склонностью сплавов к аморфизации, их химическими свойствами и диаграммами состояния. Интересен тот факт, что объемно-аморфизирующие сплавы можно получить в эвтектических системах, в которых при медленном затвердевании расплава велика вероятность образования двух, трех и большего числа интерметаллических фаз со сложной кристаллической структурой типа Франка—Каспера. Например, σ - или μ -фаз, фазы Лавеса, а также тройных интерметаллидов (при наличии нонвариантных

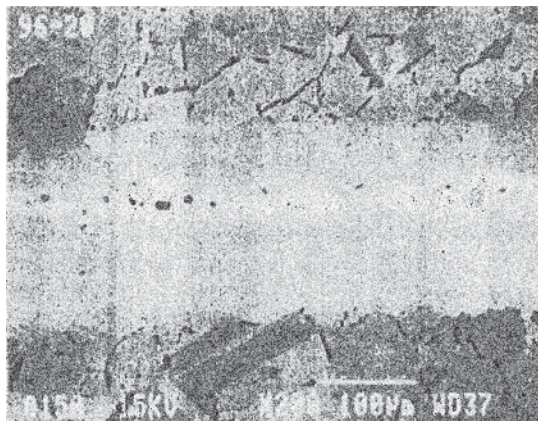


Рис. 2. Микроструктура паяного шва после термической обработки [6]

Fig. 2. Microstructure of the seam after heat treatment [6]

превращений) наряду с образованием указанных двойных интерметаллидов. К металлическим объемно-аморфизирующимся сплавам относятся сплавы систем Ti—Cu—Ni, Ti—Zr—Cu—Ni, Zr—Ti—Ni, Cu—Zr—Ti и др. [1]. Высокая способность этих сплавов к аморфизации обусловлена взаимодействием двойных интерметаллических соединений TiCu, Zr₂Cu, ZrCu_{3,6} и ZrCu с тройной фазой Лавеса TiZrCu₄ [1].

Один из составов системы Ti—Zr—Cu—Ni получают быстрой закалкой в виде пластичной аморфной ленты шириной 20 мм и толщиной 0,05 мм (торговая марка СТЕМЕТ 1201). Особенно эффективно его использование при изготовлении теплообменников из титановых сплавов пайкой. Эта система характеризуется полным отсутствием неметаллов — аморфизаторов (бора, кремния) и аморфное состояние обеспечивается наличием интерметаллидных соединений. Исследование химической неоднородности быстрозакаленной ленты подтверждает гомогенное распределение составляющих элементов по ее ширине (рис. 3, а, б).

Дифракционная кривая ленты Ti—Zr—Cu—Ni (рис. 4), полученная с помощью рентгеноструктурного анализа, имеет диффузные максимумы с раздвоенным вторым максимумом, что характерно для аморфных материалов [3]. Применение аморфного припоя Ti—Zr—Cu—Ni при пайке тонкостенных изделий из титановых сплавов обеспечило хорошее формирование паяных соединений (рис. 5, а, б), получение качественных швов и отсутствие каких-либо дефектов (рис. 6, а, б).

Характерной особенностью паяных соединений титановых сплавов является отсутствие межфазной границы в центральной части паяного образца. Зона соединения представлена общими зернами основного металла (в виде осветленной полосы, рис. 7, а, б). Так, при пайке титана марки ВТ1-0 в данной зоне наблюдаются зерна основного металла (рис. 7, а), которые обогащены составляющими элементами припоя (меди до 5%, циркония до 3,7%, табл. 2, спектр 3, рис. 7, а). Концентрация циркония в зоне соединения плавно повышается к центру осветленной

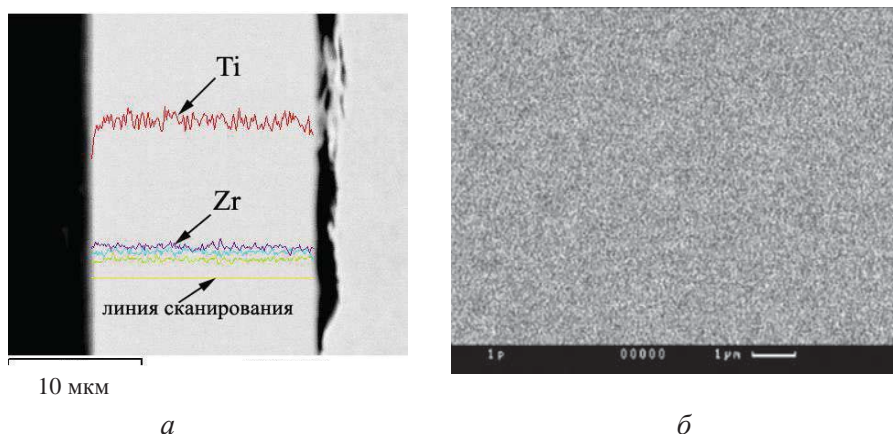


Рис. 3. Распределение составляющих элементов аморфного припоя Ti—Cu—Zr—Ni по ширине ленты (а) и его микроструктура (б)

Fig. 3. Distribution of components of amorphous filler metal Ti—Cu—Zr—Ni in width of the strip (а) and its microstructure (б)

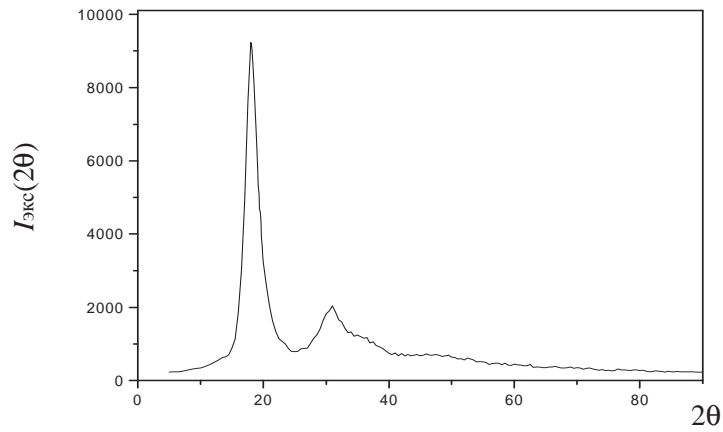


Рис. 4. Дифракционная кривая аморфного припоя Ti—Zr—Cu—Ni

Fig. 4. Diffraction curve of amorphous filler metal Ti—Zr—Cu—Ni

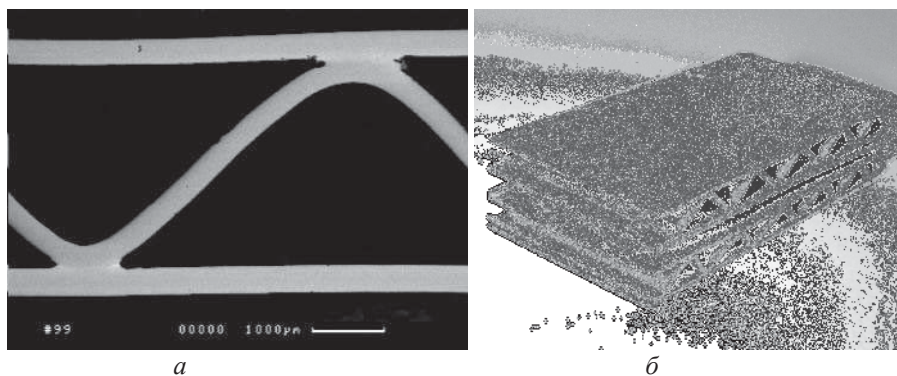


Рис. 5. Одно- (а) и многослойный (б) элементы пластинчато-ребристого теплообменника титанового сплава VT1-0, полученные с помощью аморфного припоя системы Ti—Zr—Cu—Ni

Fig. 5. One-layer (a) and multilayer (b) elements of plate-ribbed type heat exchanger of titanium alloy VT1-0, brazed by using the Ti—Zr—Cu—Ni system amorphous filler metal

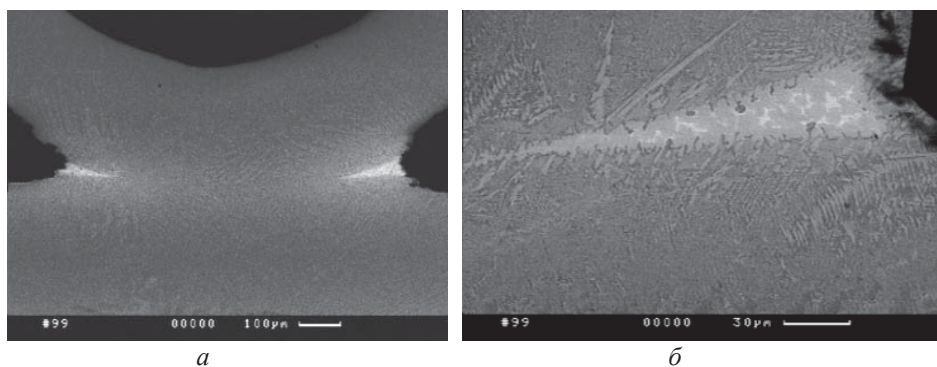


Рис. 6. Микроструктура паяного соединения элемента пластинчато-ребристого теплообменника из сплава VT1-0: общий вид (а), галтельный участок (б)

Fig. 6. Microstructure of brazed joint on an element of VT1-0 plate-ribbed type heat exchanger: general view (a), fillet region (b)

зоны (рис. 7, *з*), что можно объяснить наличием непрерывного ряда твердых растворов во всей области концентраций диаграммы состояния титан—цирконий и активно протекающими диффузионными процессами на границе раздела двух фаз.

На расстоянии около 150—180 мкм от края паяного соединения фиксируется четкая граница между паяным швом и основным металлом (рис. 6). На участке, где ширина шва составляет 8—35 мкм, кристаллизация металла происходит с образованием трех фаз. Большую часть поверхности шва занимает фаза в виде зерен серого цвета (табл. 2, спектр 2, рис. 7, *б*) на основе титана (50,35%), количество циркония составляет 14,75%, содержание меди повышено по сравнению с исходным составом припоя. Между зернами в средней части шва кристаллизуется эвтектика, количество циркония в ней увеличивается до 29,11%, титана — уменьшается до 42,65% (табл. 2, спектр 1, рис. 7, *з*). От основного металла в паяный шов прорастают единичные формирования овальной формы темного цвета. Они содержат минимальное количество никеля и меди (табл. 2, спектр 3, рис. 7, *з*), содержание циркония составляет 18,97%.

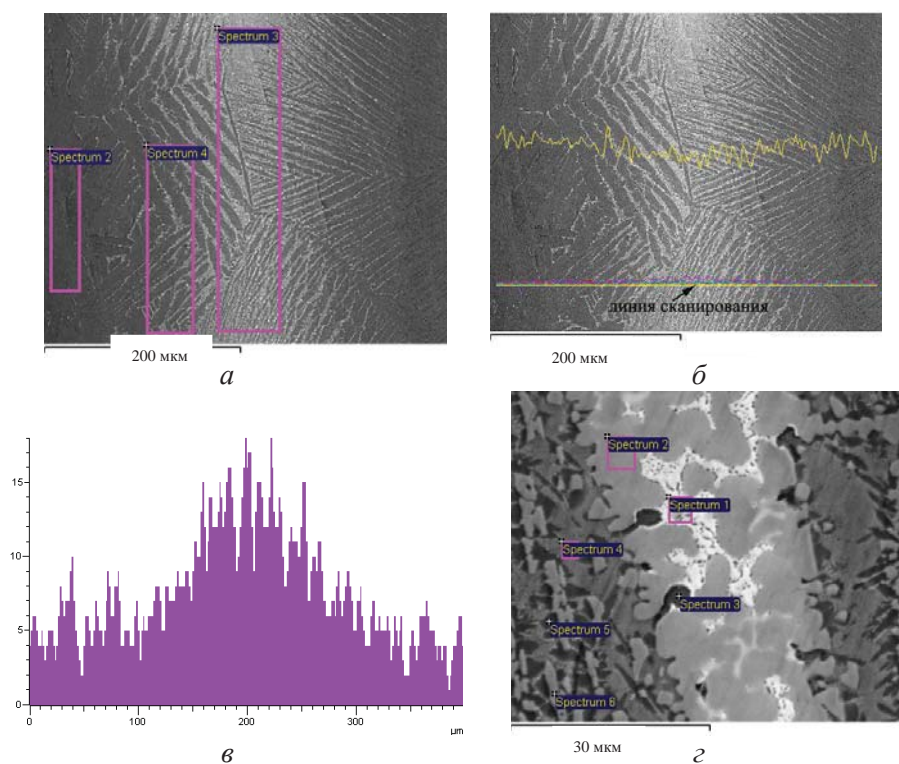


Рис. 7. Микроструктура паяного соединения титанового сплава VT1-0 с обозначением анализируемых участков: центральная часть шва (*а*, *б*) и распределение Zr в нем (*в*), широкий участок шва (*з*)

Fig. 7. Microstructure of brazed joint on titanium alloy VT1-0 with designation of regions being analyzed: central part of the seam (*a*, *b*) and distribution of Zr (*c*) in it, wide region of the seam (*d*)

Количество титана постепенно увеличивается от 42,65% (в эвтектике) до 71,2% (в темных овальных включениях). Такие структурные особенности формирования паяных швов обусловлены взаимными диффузионными процессами и неравновесными условиями кристаллизации металла шва при пайке. Морфология и химический состав фаз, кристаллизующихся в широком участке шва соединений, полученных с помощью аморфного припоя, аналогичны структуре и составу широких паяных швов, полученных с помощью литых припоев. В больших зазорах преобладает объемная кристаллизация металла, аналогичная кристаллизации металла в слитке.

Присутствие таких структурных составляющих характерно для паяных соединений титанового сплава марки ОТ4, полученных на основе рассматриваемого припоя Ti—Cu—Zr—Ni. При исследовании химического состава обнаружена тенденция насыщения металла шва легирующими элементами основного металла, в частности алюминием, количество которого в центральной части шва составляет 2,11%, в широких (периферийных) участках, расположенных ближе к галтелям, его количество уменьшается до 0,53—1,54%.

С увеличением степени легирования титанового сплава повышается прочность паяных соединений. Средние значения прочности на срез паяных соединений сплава ОТ4 составляют 419 МПа.

Т а б л и ц а 2. Химическая неоднородность паяного соединения VT1-0 при пайке аморфным припоем Ti—Cu—Zr—Ni

Table 2. Chemical heterogeneity of brazed joints on alloy VT1-0 made by using amorphous filler metal Ti—Cu—Zr—Ni

Номер спектра	Химический состав, % (мас.)			
	Ti	Ni	Cu	Zr
2 (о. м., рис. 7, а)	99,45	0,56	—	—
3 (шов, рис. 7, а)	89,26	2,04	4,99	3,71
4 (шов, рис. 7, а)	95,09	1,6	2,45	0,86
1 (галтель, рис. 7, з)	42,65	11,28	16,96	29,11
2 (галтель, рис. 7, з)	50,35	7,54	27,36	14,75
3 (галтель, рис. 7, з)	71,2	4,10	5,73	18,97
4 (галтель, рис. 7, з)	76,66	4,93	5,55	12,86
5 (галтель, рис. 7, з)	89,28	1,02	1,8	7,9
6 (галтель, рис. 7, з)	62,54	6,12	23,61	7,73

Выводы

Установлено, что структура паяных швов элементов теплообменных устройств из нержавеющей стали 12X18H10T и титана BT1-0 (OT4), полученных с помощью аморфных припоев соответственно на никелевой (Ni—7Cr—4,5Si—3Fe—3,2B) и титановой (Ti—24Cu—12Ni—12Zr) основах, неоднородна по длине соединения, как по морфологическим характеристикам, так и по химическому составу, и зависит от толщины жидкого металла в шве, то есть от величины зазора.

При пайке нержавеющей стали аморфным припоем толщиной 40 мкм выявлено следующее:

при ширине зазора, не превышающей 30—40 мкм, в шве кристаллизуется структура твердого раствора на основе Ni (Fe, Cr, Si); бор диффундирует в основной металл, прилегающий к шву, и кристаллизуется в виде дисперсных пластинчатых и точечных включений у границы соединения, а также в виде сетки по границам зерен основного металла;

при ширине зазора, превышающей 30—40 мкм, в паяных соединениях наблюдается эвтектическая структура, характерная для припоя Ni—7Cr—4,5Si—3Fe—3,2B в литом состоянии. В широком участке шва (150 мкм), в том числе и галтельном, кристаллизуются довольно крупные игловидные включения боридов длиной до 40 мкм;

образование хрупких боридных фаз в паяных швах и приграничной зоне нержавеющей стали можно исключить, уменьшив количество бора в припое или применяя припой, не содержащие бор.

При пайке титановых сплавов аморфным припоем толщиной 30 мкм определено:

в центральной части соединения граница раздела и шов в “классическом” понимании отсутствуют. Здесь наблюдаются общие сросшиеся зерна соединяемого металла, обогащенные незначительным количеством составляющих элементов припоя;

на расстоянии 200 мкм от края образца появляется четкая граница между соединяемым материалом и металлом припоя. Участки шва шириной 8—35 мкм, расположенные ближе к галтели, имеют эвтектическую структуру, характерную для литого состояния данного припоя.

РЕЗЮМЕ. Розглянуто результати досліджень паяних з'єднань елементів теплообмінних пристроїв з нержавіючої сталі (12X18H10T) і титанових сплавів (BT1-0, OT4), отриманих за допомогою аморфних припоїв відповідно на нікелевій (Ni—7Cr—4,5Si—3Fe—3,2B) і титановій (Ti—24Cu—12Ni—12Zr) основах. Вивчено мікроструктуру і хімічну неоднорідність паяних швів і аморфного припою. Показано, що структура паяних швів неоднорідна по довжині з'єднання як по морфологічних ознаках, так і по хімічному складу і залежить від величини зазору між матеріалами, що з'єднуються.

1. *Ковнеристый Ю. К.* Аморфные стеклообразные металлические материалы. — М.: Наука, 1992. — 190 с.
2. *Калин Б. А., Федотов В. Т., Севрюков О. Н. и др.* Аморфные ленточные припои для высокотемпературной пайки. Опыт разработки технологии производства и применения // Сварочное производство. — 1996. — № 1. — С. 15—19.

3. Немошкаленко В. В., Романов А. В., Ильинский А. Г. и др. Аморфные металлические сплавы. — К.: Наук. думка, 1987. — 248 с.
4. Элиот Р. Управление эвтектическим затвердеванием. — М.: Metallurgia, 1987. — 352 с.
5. Калинин Б. А., Федотов В. Т., Севрюков О. Н. и др. Опыт применения быстрозакаленных припоев для соединения конструкционных материалов // Перспективные материалы. — 2001. — № 6. — С. 82—87.
6. Rabinkin A., Wenski E., Ribaudo A. Brazing stainless steel using a new MBF-series of Ni—Cr—B—Si amorphous brazing foils // Welding J. — 1998. — No. 2. — P. 66s—75s.
7. Wittke K. Löten mit “amorphen“ löten // Schweisstechnik. — 1986. — 36, No. 3. — P. 97, 100—102.
8. Szewieczek D., Tyrlik-Held J. Application of amorphous ductile tapes of nickel based alloys in brazing processes // Zváranie-Svařovani (Welding). — 1999. — 48, No. 1. — P. 3—5.
9. METGLASS MBF 10/10A (metallic—glass brazing alloy) // Alloy Digest. — 1981. — No. 7/9.
10. METGLASS MBF 15/15A (metallic—glass brazing alloy) // Ibid. — 1983. — No. 7.
11. METGLASS MBF 30/30A (metallic—glass brazing alloy) // Ibid. — 1981. — No. 11/12.
12. METGLASS MBF 80/80A (metallic—glass brazing alloy) // Ibid. — 1983. — No. 5/6.
13. Johnson R. The use of TETIG diagrams in high temperature brazing // Welding J. — 1981. — 60, No. 10. — P. 185—193.
14. Amorphous foils a natural for jet tailpipe brazing // Ibid. — 1983. — 62, No. 10. — P. 57—58.
15. Pat. 4314661 USA. Homogeneous ductile brazing foils /N. J. De Cristofaro, Sexton P. (Allied Corp.). — Оpubл. 09.02.82.
16. Cieslak L., Poloczek T., Griner S. Thermal stability of amorphous BNi-2 alloy // Arch. Hutn. — 1986. — 31, No. 3. — P. 439—455.
17. Biegsame folie zum hartlöten hat eine breite von 152 mm // Maschinenmarkt. — 1991. — 97, No. 46. — S. 172.
18. Химушин Ф. Ф. Нержавеющие стали. — М.: Metallurgia, 1967. — 798 с.
19. Хорунов В. Ф., Максимова С. В. Вакуумная пайка тонколистовых металлов // Сб. докл. 7-й Междунар. конф. “Вакуумные нанотехнологии и оборудование”. 2—6 окт. 2006 г., г. Харьков. — В 2-х т. — Т. 1. — Харьков: ННЦ “ХФТИ”, 2006. — С. 62—65.

Поступила 31.09.07

Maksymova S. V.

Amorphous filler metals for brazing of stainless steel and titanium, and structure of brazed joints

The paper considers results of investigations of brazed joints on elements of heat exchanging devices of stainless steel (12Kh18N10T) and titanium alloys (VT1-0, OT4), made by using amorphous filler metals on the nickel (Ni—7Cr—4,5Si—3Fe—3,2B) and titanium base (Ti—24Cu—12Ni—12Zr), respectively. Microstructure and chemical heterogeneity of the seams and amorphous filler metals have been studied. It is shown that structure is inhomogeneous along the seam both in morphology and in chemical composition, and that it depends upon the size of the gap between the materials joined.