

А.И. АЗИЗОВ, Б.С. БАЛАСАНЯН, В.Ш. АВАГЯН

**ВОПРОСЫ ПОЛУЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ БИМЕТАЛЛОВ В
УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ
(Обзор)**

Соединения биметаллов играют важную роль в ускорительной технике. Известно, что современные ускорители предъявляют строгие требования к физико-механическим свойствам и химическому составу материалов, используемых в вакуумных системах. По этой причине в качестве объекта исследования были выбраны нержавеющая сталь, ее марки и медь с ее сплавами, поскольку они являются основными материалами узлов ускорителей. Существует множество способов соединения неоднородных металлов, но в рамках темы изучались технологии диффузионной сварки и пайки. Проведено исследование преимуществ неоднородных соединений металлов методом вакуумной пайки, а именно: низкие тепловые напряжения, минимально возможная деформация деталей, уменьшение явлений окисления поверхностей и т.д. Что касается вакуумной диффузионной сварки, преимущества этого метода также были изучены. Проведен сравнительный анализ результатов, основанный на исследованиях современной литературы.

Ключевые слова: диффузионная сварка, вакуумная пайка, биметаллы, ускорительная техника.

Введение. Биметалл – металлический композиционный материал, состоящий из двух или трех разнородных металлов и сплавов. Биметаллы создаются для получения материалов с новыми или улучшенными свойствами [1].

В современных ускорителях к материалам, используемым для вакуумных систем, предъявляются жесткие требования. Их физические и механические свойства, обрабатываемость, свариваемость и паяемость являются ключевыми параметрами. Достаточная прочность, пластичность, магнитные свойства как при комнатной, так и при низкой температуре являются важными факторами для вакуумных систем ускорителей, работающих при криогенных температурах. Также коррозионная стойкость является важным аспектом выбора материала. Сегодня аустенитные нержавеющие стали являются эталонным материалом для многих вакуумных устройств благодаря своей коррозионной стойкости, прочности и пластичности, сохраняемым при температуре окружающей среды и температуре эксплуатации, пригодности для проведения процедур очистки по назначению, стабильности свойств в процессе эксплуатации, ударной вязкости, магнитным свойствам, остроте (сохранение режущих кромок при использовании в вакуумных уплотнениях), жесткости и стабильности размеров

[2]. В дополнение к нержавеющей стали, другими семействами материалов, подходящими для вакуумных применений в ускорителях, являются Al и сплавы, Cu и сплавы [3]. Кроме того, к материалам, используемым для работы с вакуумом, кроме обычных требований – прочности, технологичности, легкости и т.д., имеется ряд специфических требований [4]:

- 1) минимальное газовыделение материала в рабочих условиях;
- 2) вакуумная герметичность при малых толщинах;
- 3) коррозионная стойкость;
- 4) отсутствие ползучести вплоть до температур 500...600°C;
- 5) немагнитность.

Существуют различные способы получения биметаллических соединений, однако в данной работе акцент поставлен на диффузионную сварку и диффузионную пайку.

1. Диффузионная сварка - это процесс соединения однородных и разнородных металлов, сплавов и неметаллических материалов, осуществляемый путем диффузии атомов через поверхность стыка. Диффузионная сварка материалов в твердом состоянии - это способ получения монолитного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомном уровне. При соединении разнородных металлов могут возникать осложнения, связанные с ухудшением качества шва, такие как интерметаллиды и т.д. Метод соединения является привлекательным для производства, когда требуются особые металлургические и механические свойства в зоне соединения. Вакуумно-диффузионная сварка - это процесс сварки в твердом состоянии, который позволяет соединять контактирующие поверхности под давлением и при повышенных температурах (0,7...0,9% от абсолютной температуры плавления материалов) с минимальной макроскопической деформацией.

Практически все материалы с совместимыми химическими и металлургическими свойствами могут быть соединены с помощью процесса вакуумно-диффузионной сварки. Этот процесс сварки имеет неотъемлемое преимущество перед обычной сваркой, поскольку он не приводит к образованию неожиданных фаз на границе раздела фаз, которые могут возникать в некоторых современных материалах. Обычных дефектов сварки плавлением, таких как трещины, деформация и расслоение, можно избежать с помощью этой технологии [5-11].

1.1. Соединения титана со сталью при помощи диффузионной сварки. Сварка разнородных металлов затрудняется тем, что при их взаимодействии возможно образование хрупких соединений. Так, например, титан обладает ограниченной взаимной растворимостью с основными элементами нержавеющей стали (железом, хромом, никелем). Также возможно образование интер-

металлидов [12]. Результаты работ [13,14] показали, что при непосредственной сварке технически чистого титана со сталью 12X18H10T предел прочности составляет 250...270 МПа. В зоне контакта этих соединений методом металлографии и электронографии были выявлены интерметаллиды [15]. Авторы работы [16] считают, что невозможно получить пластичные и прочные соединения, такие же, как у основного металла, при наличии интерметаллидов по линии контакта, так как в этом случае нет его прочной связи с основным металлом, а сам интерметаллид тверд и хрупок. Для решения этих проблем в литературе популярным решением является соединение титана со сталью при помощи промежуточных металлов. Например, в работе [17] диффузионная сварка в вакууме Ti с Fe, стали марки 08X17T с Ti и стали марки 12X18H10T с Ti проводилась с промежуточной прослойкой из ванадия. Промежуточная прослойка толщиной 0,2 мм помещалась между цилиндрами диаметром 12 мм и высотой 30 мм. Режимы сварки следующие: $T = 1173...1273\text{ K}$, $P = 2...3\text{ МПа}$ и $t = 5...10\text{ мин}$. Испытания на статический разрыв показали: Fe-V-Ti = 300 МПа, 08X17T-V-Ti = 300 МПа, 12X18H10T-V-Ti = 100 МПа; во всех случаях разрушение происходило по границе железа (стали) с ванадием, где присутствовал карбид ванадия. При температуре 823 K уже возможно образование карбида ванадия. Предполагается, что эту задачу может решить добавочный слой из меди, который будет располагаться между ванадием и сталью [14]. Однако при реализации эффекта контактного упрочнения, наблюдаемого при сварке через мягкие прослойки, прочность сварного соединения может быть значительно выше прочности промежуточных слоев. Такие примеры есть в работах [13,18]; режимы сварки следующие: $T = 1273\text{ K}$, $P = 3...6\text{ МПа}$, $t = 5...15\text{ мин}$. Угол загиба 2 мм плоских образцов, которые были вырезаны из сварных стержней, достигал 50...60°. Также пример сварки Ti-316L с прослойкой ванадия-меди приведен в работе [12] (режимы диффузионной сварки: температура = 1000 °C, давление = 5 МПа, время = 15 мин). Металлографические исследования показали, что в плоскости границ образовались поры. По утверждению авторов, они возникли из-за недостаточной подготовки материалов перед сваркой. При испытании на разрыв разрушение происходит по меди. Вакуумные испытания при гелиевой температуре (4,2 K) показывают, что сварные образцы герметичны. Также результаты исследований, выполненные в ИЭС им. Е.О. Патона, показывают, что применение слоев ванадия и меди оптимальных размеров позволяет получить сварные соединения сплавов титана с нержавеющей сталью, обладающие достаточной прочностью при удовлетворительной вязкости и пластичности как при комнатной, так и при повышенных температурах [19]. Пример сварки нержавеющей стали(304) с

технически чистым титаном, используя никель как промежуточный слой, приведен и в работе [20]. Режимы сварки следующие: $T = 800...950^{\circ}\text{C}$, $P = 3 \text{ МПа}$ и $t = 60 \text{ мин}$. Максимальные значения прочности на растяжение $\approx 302 \text{ МПа}$ и прочность на сдвиг $\approx 219 \text{ МПа}$ были получены при температуре 900°C , также на границе (Ni–Ti) образовались интерметаллические соединения.

1.2. Соединения меди со сталью при помощи диффузионной сварки.

Проблемы соединения меди со сталью возникают из-за различия в температурах плавления, так как это затрудняет создание прочного и качественного соединения, а также из-за разных коэффициентов теплового расширения, так как это может привести к образованию трещин или деформаций и т.д. Интересный пример диффузионной сварки приведен в работе [21]. Интересен он тем, что соединение медного сплава CuCrZr с нержавеющей сталью марки 316L происходило при $P = 103 \text{ МПа}$, $t = 2 \text{ часа}$, $T = 1040^{\circ}\text{C}$, которая всего на 30°C ниже начала плавления медного сплава. Обусловлено это тем, что соединение должно применяться в МЭТР (международный экспериментальный термоядерный реактор). Исходя из этого, оно должно соответствовать минимальным требованиям к прочности соединений 316L/316L в соответствии с проектными нормами ЕС по ядерной безопасности. Результаты исследования микроструктуры и состава показали, что из-за высокой температуры соединения скорость взаимной диффузии составляющих элементов медного сплава и нержавеющей стали высока, а получающаяся в результате микроструктура соединения CuCrZr/316L SS является сложной. Произошла диффузия железа в медный сплав, а также присутствует диффузия меди в сталь. Также присутствуют отдельные области с очень высокой концентрацией Zr. Непосредственно справа от первоначальной границы и прилегая к стали находится область почти чистой меди. Испытания на растяжение показали, что разрушения происходили по меди, а не на границе соединения. Аналогичный опыт был проведен и в работе [22]. Здесь, как и в работе [21], изучали соединения нержавеющей стали (316) с медью (DS Cu) для дальнейшего применения в МЭТР. Поверхности покрытия были отполированы до шероховатости $0,2 \text{ мкм}$ и обезжирены ацетоном непосредственно перед сваркой. Режимы сварки следующие: $T = 799,85...999,85^{\circ}\text{C}$, $P = 4,9...16,7 \text{ МПа}$, $t = 60...120 \text{ мин}$. Температурные значения отличаются от значений в работе [28], а также сильно отличаются и давления, при которых происходила сварка. Вблизи границ раздела швов были обнаружены интерметаллические соединения, которые становились крупнее и толще по мере увеличения температуры и времени сварки. Стоит отметить, что DS Cu перед сваркой обжигался при $799,85...999,85^{\circ}\text{C}$. Все соединения, испытанные методом Шарпи-Изд, были повреждены на стыковых поверхностях. Авторы предполагают, что межметаллические соединения привели к снижению ударной

вязкости соединений. Испытания на растяжение показали, что разрыв происходит по DS Cu. Также авторы отметили, что температура сварки оказала большее влияние на прочность соединений, чем давление и время выдержки. Сварка при более высокой температуре того же медного сплава (DS Cu) и той же нержавеющей стали марки 316 рассмотрена в работе [23]. Как и в предыдущих работах, данное соединение также исследовалось для применения в МЭТР. Режимы соединения следующие: $P=150 \text{ МПа}$, $t = 2 \text{ часа}$, $T = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$. Как видно, температура выше, чем в работе [21], на $10 \text{ }^\circ\text{C}$, а давление - на 40 МПа . Предел прочности соединения при тестовой температуре $200 \text{ }^\circ\text{C}$ и $400 \text{ }^\circ\text{C}$ составлял 180 МПа и 140 МПа соответственно. Разрушение соединения наблюдалось по меди. Непосредственное соединение меди и аустенитной нержавеющей стали рассмотрено в работе [24]. Режимы сваривания следующие: $P = 3 \text{ МПа}$, $t = 30 \text{ мин}$, $T = 875 \text{ }^\circ\text{C}$. По сравнению с работой [23], режимы в данной работе более низкие, однако при условии, что к соединяемым частям прикладывали электрический ток напряжением 5 А . Предел прочности соединения - $169,62 \text{ МПа}$. Разрушение соединения происходило в основном на участке, расположенном очень близко к медной стороне. Как утверждают авторы, в случае приложения небольшого количества электрического тока во время диффузии перемещение атомов увеличивается, в результате чего повышается прочность образцов. При непосредственной сварке меди и стали так же, как и при непосредственном соединении титана со сталью, могут возникнуть интерметаллиды, что пагубно отразится на соединениях. По этой причине в работе [25] были проведены исследования сварки меди (DS Cu) и нержавеющей стали марки 316 при помощи прослоек из Au, Cu и Ni в виде фольги. В данной работе было проведено 10 различных экспериментов с режимами и прослойками (табл.).

Таблица

Условия соединения металлов [29]

Идентификатор соединения	Промежуточный слой металла	Толщина промежуточного слоя ($\mu\text{м}$)	Давление (МПа)	Температура ($^\circ\text{C}$)	Время давления (мин)	Время выдержки (мин)
SAC-1	Au	20	9.8	850	50	50
SAC-2	Au	20	9.8	850	120	120
SAC-3	Au	20	4.8	850	50	50
SAC-4	Au	20	9.8	850	240	240
SAC-5	Au	60 (20x3)	9.8	850	50	50
SCC-1	Cu	20	9.8	950	3,3	50
SCC-2	Cu	20	4.8	950	23,3	50
SNC-1	Ni	20	9.8	950	5	50
SNC-2	Ni	20	4.8	950	16,6	50
SNC-3	Ni	20	4.8	950	18	120

Как видно из таблицы, самое долгое время сваривания было у SAC-4, что привело к большой зоне диффузии по сравнению с другими соединениями. Предел прочности составил 375 МПа, а разрыв произошел по меди примерно в 10 мм от границы раздела, что произошло со всеми соединениями, где промежуточным слоем выступал Au, кроме SAC-5.

У образцов с медной прослойкой предел прочности составлял 270 МПа (SCC-1) и 195 МПа (SCC-2), у образцов с никелевой прослойкой - 275 МПа (SNC-1), 250 МПа (SNC-2) и 230 МПа (SNC-3), у образцов с прослойкой Au - 410 МПа (SAC-1), 405 МПа (SAC-2), 420 МПа (SAC-3), 375 МПа (SAC-4) и 215 МПа (SAC-5). Кроме того, в соединениях с медной прослойкой наблюдались интерметаллиды, а в соединениях с никелевой прослойкой образовались пустоты Киркендалла. Из результатов ясно, что более прочный шов получается при прослойке Au, однако в сравнении с работой [24] видно, что соединения с промежуточными слоями имеют более прочную связь, чем без них, также сваривание происходит при более низких температурах и давлении.

2. Вакуумная пайка. Это процесс соединения двух заготовок из основного металла, когда расплавленный припой проходит через очень тонкий зазор между ними и при охлаждении образует прочное соединение. Пайка создает чрезвычайно прочное соединение, обычно более прочное, чем сами заготовки из основного металла, без расплавления или деформации компонентов. Принцип, согласно которому припой проходит через соединение для создания такого сцепления, основан на капиллярном действии. При пайке тепло передается всему основному материалу. Также небольшое давление при капиллярной пайке фиксирует зазор, а при нефиксированном зазоре - удаляет из него избытки жидкой фазы. Во многих случаях давление при пайке является важнейшим параметром процесса, определяющим механические свойства паяных соединений. Прилагаемое при пайке давление во избежание хрупкого разрушения паяемого металла в контакте с жидкой фазой должно быть сравнительно небольшим [26, 27].

2.1. Соединения при помощи вакуумной пайки

В области ускорителей частиц соединения медь/медный сплав и медь/нержавеющая сталь (SS) в основном выполняются с помощью вакуумной пайки, поскольку этот процесс имеет ряд преимуществ:

- 1) высокая точность;
- 2) минимальное деформирование деталей;
- 3) низкое тепловое напряжение;
- 4) минимальное загрязнение стыков.

Кроме того, высокий вакуум во время пайки удаляет масла и окислы [28-30].

Исследования вакуумной пайки меди (высокой чистоты (OFE Cu)) с нержавеющей сталью (AISI 316 L) проводились в работе [30]. Одним из важнейших этапов в сварке является выбор припоя и размеры канавки, в которой будет помещаться припой. В данной работе припой был выбран на основе Ag (Ag/Cu/Pd) в виде проволоки. Диапазон плавления - 807...810 °С. Диаметр проволоки - 0,5 мм, вид канавки - U-образный с шириной 0,8 мм, расстояние от канавки до края детали - 4 или 8 мм. Также важным параметром в пайке является шероховатость поверхностей, так как высокая шероховатость может ухудшить качество соединения, привести к дефектам (поры, трещины) и снизить прочность пайки. Гладкие поверхности способствуют лучшему проникновению припоя и улучшению теплообмена, что критично для создания надежных соединений. В данной работе шероховатость составляла 0,8 мкм (Ra). Основываясь на работах [31-33], из которых ясно, что липкая хромовая окалина на поверхности нержавеющей стали (которая устойчива даже в условиях пайки) приводит к плохому смачиванию припоя, в качестве решения предлагаем нержавеющей сталь покрыть другим металлом, например никелем, что и было сделано в данной работе. Были проведены две пайки: в первом случае толщина никелевого покрытия составляла 20...30 мкм, а во втором – 3...4 мкм. Пайка происходила при высоком вакууме 10^{-3} Па и состояла из двух этапов нагрева: первый –

4 °С мин⁻¹ до 760 °С и второй - 2 °С мин⁻¹ до 820 °С. Температуру пайки поддерживали в течение 10 минут. Также припой находился сверху для обеспечения капиллярного эффекта и, в свою очередь, создавал дополнительное давление около 100...300 г/см². В первом случае между нержавеющей сталью и никелем образовался диффузионный слой. Химический состав этого слоя в основном состоит из Ni. Также образовались пустоты и трещины, что пагубно влияет на соединения. В соответствии с несколькими исследованиями, общая скорость утечки в узлах, включая паяные соединения, не должна превышать 10^{-10} Па/м³ с⁻¹ [34]. В данном случае утечка составляла 10^{-3} до 10^{-2} Па/м³ с⁻¹, что не соответствует вышеприведенному значению. Во втором случае не обнаружено заметных трещин или пор, между припоем и медью наблюдается диффузионный слой толщиной около 15 мкм. Диффузий между никелем и нержавеющей сталью не обнаружено. Также весь никель из покрытия рассеялся в основных металлах. Скорость утечки составляла 10^{-13} Па/м³ с⁻¹, из чего можно сделать вывод, что второй вариант более качественный, чем первый. В работе [35] соединения меди OFE с нержавеющей сталью 316L припоем из

золота показали, что при избытке припоя как внутри, так и снаружи образуется чистый, хорошо сформированный мениск без пустот. В процессе обработки в меди наблюдается значительный рост зернистости. Также в работе проводилась пайка GlidCop-A115 с нержавеющей сталью 316L. В металлическом слое припоя имеется несколько незначительных пустот. Испытания на микротвердость показали, что прочность металлов не изменилась во время пайки. К сожалению, в данной работе не приведены режимы, при которых были проведены процессы вакуумной пайки, и нет данных о первоначальной подготовке металлов (процесс очистки перед пайкой), однако из материала можно сделать вывод, что припои на основе золота более привлекательны при пайке GlidCop-A115 с нержавеющей сталью 316L и OFE с нержавеющей сталью 316L. Все эти металлы широко используются в ускорительной технике. В работе [36] были проведены исследования по изготовлению и вакуумной пайке высокочастотных волноводов. Материалом из них состояли паяемые детали, а именно - медный сплав GlidCop. Медный сплав GlidCop является эталонным материалом для ускорительной техники благодаря высокой теплопроводности, стойкости к радиационным повреждениям, механической прочности и стабильности при высоких температурах. Они обладают высокой проводимостью тока, устойчивостью к коррозии, а также могут быть точно обработаны для создания сложных компонентов. Эти характеристики обеспечивают долговечность и эффективность работы ускорителей частиц и других высокотехнологичных систем. Для пайки использовали припой на основе серебра марки BVAg-30 [37] диаметром 1,5 мм, температура плавления - 810 °С. Шероховатость паяемых деталей составляла 0,8 Ra. В процессе пайки припой находился сверху. Пайка происходила в условиях высокого вакуума 10^{-5} мм рт. ст. с начальной температурой в 830,8 °С и конечной 831,4 °С с выдержкой в 10 мин, паяемые детали прижимались сверху диском весом 3,5 кг. В результате расплавленный припой слишком много вытекал из наружного зазора. Предполагается, что диаметр припоя, рабочие температуры пайки и время выдержки были больше, чем требовалось. При повторной пайке, но уже с диаметром припоя в 1 мм и пазом под неё в 1,1 мм, а также с выдержкой в 8 мин, был получен качественный шов без излишнего течения припоя. Испытания на вакуумную герметичность показали $10 \cdot 10^{-10}$ мбар · л/с.

Заключение

1. Материалы, используемые в вакуумных системах, должны обладать высокой прочностью, пластичностью, хорошими магнитными свойствами при комнатной и низкой температуре, а также коррозионной стойкостью и минимальными уровнями газовыделения.

2. Диффузионная сварка и вакуумная пайка являются привлекательными методами для изготовления узлов в ускорительной технике, так как оба метода позволяют достичь прочных соединений с минимальной деформацией и без образования дефектов.

3. При соединении таких материалов, как титан и сталь, могут образовываться интерметаллиды, что ухудшает качество соединения. Решение — использование промежуточных слоев (например, ванадия или меди), которые помогают избежать этих проблем.

4. Соединение меди и нержавеющей стали с использованием вакуумной диффузионной сварки сталкивается с трудностями из-за различий в температурах плавления. Решение — использование промежуточных слоев, которые помогают избежать этих проблем.

5. Важными факторами пайки меди с нержавеющей сталью являются выбор припоя, размер канавки для припоя, шероховатость поверхностей, чистота поверхностей.

6. В литературе отсутствует влияние остаточных газов на диффузионную сварку и пайку соединений в вакуумной камере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://mos-laser.ru/news/chto-takoe-bimetally.php>
2. Edition M.H.N. Vol. 3. Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals. - ASM, Ohio, USA, 1980.
3. **Sgobba S.** Vacuum for accelerators: introduction to materials and properties //arXiv preprint arXiv:2006.02212. – 2020.
4. **Розанов Л.Н.** Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. "Электрон. Машиностроение". –М.: Высш. шк, 1990.-400с.
5. **Бачина В.А.** Теория, технология и оборудование диффузионной сварки. – М., 1991. -350с.
6. A study on diffusion bonding of superplastic Ti–6Al–4V ELI grade / **H.S. Lee et, al** //Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – V. 187. – P. 526-529.
7. **Ziegelheim J., Hiraki S., Ohsawa H.** Diffusion bondability of similar/dissimilar light metal sheets //Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – V. 186, №. 1-3. – P. 87-93.
8. **Ghosh M., Chatterjee S., Mishra B.** The effect of intermetallics on the strength properties of diffusion bonds formed between Ti–5.5 Al–2.4 V and 304 stainless steel //Materials Science and Engineering: A. – 2003. – V. 363, №. 1-2. – P. 268-274.
9. **He P., Liu D.** Mechanism of forming interfacial intermetallic compounds at interface for solid state diffusion bonding of dissimilar materials //Materials science and engineering: A. – 2006. – V. 437, №. 2. – P. 430-435.

10. XRD and SEM analysis near the diffusion bonding interface of Mg/Al dissimilar materials / **Y. Li, et al** // *Vacuum*. – 2007. – V. 82, № 1. – P. 15-19.
11. **Sabetghadam H., Hanzaki A.Z., Araee A.** Diffusion bonding of 410 stainless steel to copper using a nickel interlayer // *Materials characterization*. – 2010. – V. 61, №.6. – P. 626-634.
12. **Авагян В.Ш.** Диффузионное соединение титана со сталью // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. -2010, № 2.-С.5
13. **Гуревич С.М., Харченко Г.К.** Диффузионная сварка сплавов титана с нержавеющей сталью // *Авиационная промышленность*. – 1967. – №. 10. – С. 85.
14. **Гуревич С.М.** *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. – Наук. думка, 1979.-240с.
15. **Киреев Л.С., Замков В.Н.** Сварка титана со сталью в твердой фазе (Обзор) // *Автоматическая сварка*. – 2002. –С.40.
16. **Чарухина К.Е., Казаков Н.Ф.** Диффузионная сварка в вакууме разнородных металлов // *Л.: ЛДНТП*. – 1964.- 24с.
17. **Харченко Г.К., Гордонная А.А.** Диффузионная сварка титана со сталью через прослойку ванадия // *Автоматическая сварка*. – 1966. – №. 6. – С. 74.
18. **Харченко Г.К.** Вопросы диффузионной сварки разнородных металлов (Обзор литературы) // *Sbornik trudov po avtomaticheskoj svarke pod flinokom*. – 1969. – Т. 22. – С. 29.
19. **Бакши О.А., Шрон Р.З.** О расчетной оценке прочности сварных соединений с мягкой прослойкой // *Сварочное производство*. – 1971. – Т. 3. – С. 3-5.
20. **Kundu S., Chatterjee S.** Interfacial microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded titanium–stainless steel joints using a nickel interlayer // *Materials Science and Engineering: A*. – 2006. – V. 425. – №. 1-2. – P. 107-113.
21. **Goods S.H., Puskar J.D.** Solid state bonding of CuCrZr to 316L stainless steel for ITER applications // *Fusion engineering and design*. – 2011. – V. 86. – №. 9-11. – P. 1634-1638.
22. **Nishi H., Muto Y., Sato K.** Solid-state diffusion bonding of alumina dispersion-strengthened copper to 316 stainless steel // *Journal of nuclear materials*. – 1994. – V. 212. – P. 1585-1589.
23. Mechanical properties of HIP bonded joints of austenitic stainless steel and Cu-alloy for fusion experimental reactor blanket / **S. Sato, et al** // *Journal of nuclear materials*. – 1996. – Т. 233. – С. 940-944.
24. A novel approach to diffusion bonding of copper to stainless steel / **Y. Kaya, et al** // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2012. – V. 226, №. 3. – P. 478-484.
25. **Nishi H., Araki T., Eto M.** Diffusion bonding of alumina dispersion-strengthened copper to 316 stainless steel with interlayer metals // *Fusion Engineering and Design*. – 1998. – V. 39. – P. 505-511.
26. Vacuum brazing of accelerator components / **R. Singh, et al** // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2012. – V. 390. – №. 1. – С. 012025.

27. **Лашко С.В., Лашко Н.Ф.** Пайка металлов.-М.: Машиностроение. – 1988.-375с.
28. **Mathot S.** The Trasco-Spes RFQ //Proceedings of the LINAC 2004 Conference, Lübeck, Germany, 2004. – P. 16-20.
29. Residual stresses and interface strengths in MoSi₂/stainless steel 316L joints produced by metallic-glass brazing / **R. Vaidya, U., et al** //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2001. – V. 32. – P. 1459-1465.
30. Development of high precision joints in particle accelerator components performed by vacuum brazing / **L. Sanchez, et al** //Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – V. 211, №. 8. – P. 1379-1385.
31. **Meetham G.W., Van de Voorde M.H.** Materials for high temperature engineering applications. – Springer Science & Business Media, 2012.
32. Wetting and brazing of stainless steels by copper–silver eutectic/ **O. Kozlova, et al** //Materials Science and Engineering: A. – 2008. – V. 495, №. 1-2. – P. 96-101.
33. Universal brazing alloy for cryogenic technology / **Y.F. Shein, et al** //Welding international. – 2003. – V. 17, №. 7. – P. 573-575.
34. **Prat S., Moeller W.D., Kostin D.** Industrialization process for XFEL power couplers and volume manufacturing //TTC Meeting at Fermilab. – 2007.
35. **Navrotski G., Brajuskovic B.** Metallurgical evaluation of dissimilar metal joints for accelerator vacuum chamber construction at the advanced photon source upgrade project //of the Mech. Eng. Des. of Synchrotron radiant. Equip and Instrum. Conf. - Barcelona, Spain, 2016. – C. 220-222.
36. **Давтян А.А., Исунц Г.А.** Вакуумная пайка высокочастотного волновода с переменным сечением и минимальным отражением //Вестник НПУА: Механика, Машиноведение, Машиностроение. – 2021. – №. 1. – С. 31.
37. <https://www.brazing.com/products/vacgradeBrazingAlloys.aspx>

Ա.Ի. ԱԶԻԶՈՎ, Բ.Ս. ԲԱԼԱՍԱՆՅԱՆ, Վ.Շ. ԱՎԱԳՅԱՆ

**ԱՐԱԳԱՑՈՒՑԻՉՆԵՐՈՒՄ ԵՐԿՄԵՏԱՂԱԿԱՆ ՄԻԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ
ԱՐՏԱԴՐՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ
(Ակնարկ)**

Երկմետաղական միացությունները կարևոր դեր են խաղում արագացուցչային տեխնիկայում: Արագացուցիչներում տարբեր պատասխանատու հանգույցների միացումները, ինչպիսիք են՝ արագացնող կառույցները, ռադիոհաճախականության ալիքների պատուհանները, ալիքատար հանգույցները և այլն, պատրաստվում են այս մեթոդով: Հայտնի է, որ ժամանակակից արագացուցիչների դեպքում խիստ պահանջներ են ներկայացվում վակուումային համակարգերում օգտագործվող նյութերի ֆիզիկական և մեխանիկական հատկությունների և քիմիական կազմի նկատմամբ: Ուստի որպես ուսումնասիրության օբյեկտ ընտրվել են չժանգոտվող պողպատը, դրա տարատեսակները, և պղինձը՝ իր համաձուլվածքներով, քանի որ դրանք արագացուցիչների հանգույցների հիմնական նյութերն են: Տարասեռ մետաղները միացնելու բազմաթիվ եղանակներ կան, բայց թեմայի

շրջանակներում ուսումնասիրվել են դիֆուզիոն եռակցման և զոդման տեխնոլոգիաները: Վակուումային զոդման մեթոդով իրականացվել է մետաղական տարասեռ միացությունների առավելությունների ուսումնասիրություն, մասնավորապես՝ ցածր ջերմային լարումները, մասերի հնարավոր նվազագույն դեֆորմացիան, մակերևույթների օքսիդացման երևույթների նվազումը և այլն: Ուսումնասիրվել են նաև վակուումային դիֆուզիոն զոդման մեթոդի առավելությունները: Կատարվել է ժամանակակից գրականության ուսումնասիրության արդյունքների համեմատական վերլուծություն:

Առանցքային բառեր. դիֆուզիոն զոդում, վակուումային զոդում, երկմետաղ, արագացուցչային տեխնիկա:

A.I. AZIZOV, B.S. BALASANYAN, V.SH. AVAGYAN

**SOME FEATURES OF THE PRODUCING BIMETAL COMPOUNDS IN
ACCELERATOR TECHNOLOGY**

(Review)

Bimetal compounds play an important role in accelerator technology. The connections of various critical nodes in accelerators, such as accelerating structures, radio frequency wave windows, waveguide nodes, etc., are performed using this method. It is known that modern accelerators impose strict requirements on the physical and mechanical properties and chemical composition of materials used in vacuum systems. For this reason, stainless steel, its grades, and copper with its alloys were chosen as the object of research, since they are the main materials of accelerator assemblies. There are many ways to connect heterogeneous metals, but diffusion welding and soldering technologies were studied within the framework of the topic. The advantages of inhomogeneous metal compounds by vacuum soldering were studied, namely: low thermal stresses, minimal possible deformation of parts, reduction of surface oxidation phenomena, etc. As for vacuum diffusion welding, the advantages of this method have also been studied. A comparative analysis of the results was carried out, based on the research of modern literature.

Keywords: diffusion welding, vacuum soldering, bimetals, accelerator technology.