

В.Ш. АВАГЯН А.З. БАБАЯН, И.В. ТУНЯН

## ВАКУУМНАЯ ИНДУКЦИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПАЙКИ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР

Приводится конструкция вакуумной установки, предназначенной для соединения длинномерных изделий из меди применительно к ускорительной технике. Представлены результаты металлографических исследований соединения медь-серебро-медь.

**Ключевые слова:** пайка, вакуум, ускоряющая структура, высокочастотный нагрев, адсорбционный насос.

**Введение.** Последнее десятилетие характеризуется бурным развитием ускорительной техники нового поколения, приведшим к созданию уникальных ускорителей электронов и протонов с энергией от нескольких миллионов электронвольт для нужд народного хозяйства (медицина, материаловедение и т. д.) до нескольких десятков миллиардов электронвольт для фундаментальных исследований в области ядерной физики. Достаточно отметить некоторые из крупных ускорителей, строящихся или проектируемых в ведущих центрах мира: NLC, ILC, SLC, TESLA, LHC, CANDLE (США, Германия, Япония, Россия, Армения). К основным узлам ускорителей относятся ускоряющие секции, представляющие собой медные диафрагмированные волноводы, которые должны быть изготовлены с большой точностью (допуски порядка  $10^{-2}$  мм и менее (1)). В противном случае, распределение фазовой скорости волны вдоль оси волновода будет отличаться от расчетной, что приведет к изменению энергии электронов на выходе ускорителя и монохроматичности пучка. В ускорителях на средние и большие энергии диафрагмированные волноводы изготавливают в виде отдельных секций, при этом число секций в больших ускорителях может достигать нескольких сотен, а их длина - от метров до нескольких километров.

**1. Оборудование для пайки в вакууме ускоряющей подсекции.** Базовыми элементами для соединения (стыковки) отдельных частей ускоряющей секции являются метровые подсекции (с точки зрения технологичности, подсекции паяются отдельно и впоследствии соединяются между собой серебряным припоем) из медных диафрагм (рассмотрены в работах (2-4)). Была разработана и изготовлена крупногабаритная установка для пайки ускоряющих подсекций в вакууме. На рис. 1 показан внешний вид установки.

В вакуумную систему установки входят: турбомолекулярный насос ТМН-500, вакуумный затвор, азотная ловушка, форвакуумный насос ВМ 1МГ,

вакуумные вентили и трубопроводы, которые изготовлены из стали 12Х18Н10Т.

Вакуумная камера состоит из двух равных полуцилиндров, изготовленных из стали 12Х18Н10Т, внутренние размеры камеры: диаметр – 750 мм, высота – 4800 мм.

Турбомолекулярные насосы и вакуумные системы на их основе позволяют получать практически свободный от углеводородов вакуум и имеют широкий диапазон рабочих давлений. Известно, однако, что при нагреве металла происходит газовыделение различных загрязнений, которые, проходя через турбомолекулярный насос, загрязняют его и ухудшают его работоспособность (5). Для надежной работы турбомолекулярного насоса между вакуумной камерой и этим насосом введена медная сетка, скрученная в виде червяка, которая соединена с трубопроводом, охлаждаемым азотом. Благодаря этому в процессе работы установки продукты загрязнения осаждаются на нем, не загрязняя при этом турбомолекулярный насос.

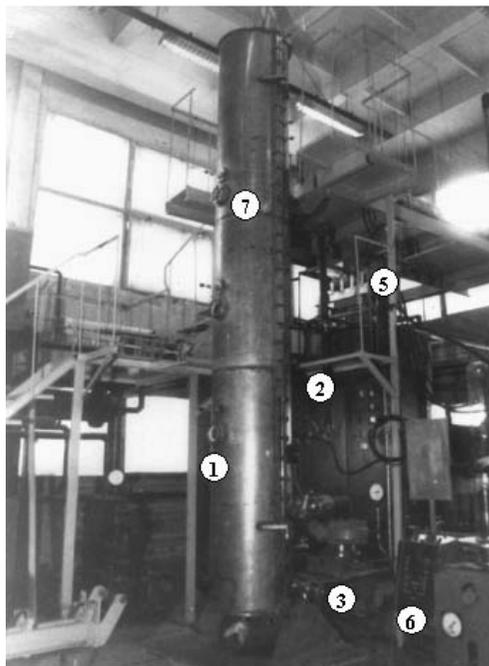


Рис.1. Внешний вид крупногабаритной вакуумной установки для диффузионной сварки и пайки изделий: 1-рабочая камера; 2- ввод ТВЧ; 3- турбомолекулярный насос; 4- вакуумный затвор; 5- конденсаторный блок; 6-пульт управления; 7- смотровое окно

Нагрев изделия осуществляется тремя высокочастотными (ВЧ) индукторами, согласованными с высокочастотным генератором ВЧ Г6-60/0,44.

Рабочая камера установки позволяет производить соединения изделий диаметром 200 мм и высотой 4500 мм.

На установке можно производить распайку изделий электронной техники с целью восстановления и ремонта негерметичных соединений. Для визуального контроля в технологическом процессе в вакуумной камере установлены три смотровых окна из кварцевого стекла. Максимальная температура нагрева изделий - до 1773 К.

Вакуумная система (рис.2), применяемая на установке, позволяет получать безмасленное разрежение воздуха в рабочем объеме  $1,3 \cdot 10^{-3}$  Па.

Важным фактором диффузионной пайки ускоряющей секции является сохранение вакуума на

протяжении всего цикла технологического процесса. Учитывая, что технология изготовления ускоряющей секции - весьма сложный и дорогостоящий процесс, в вакуумную систему введен криoadсорбционный насос. Он необходим для сохранения вакуума в случае прерывания электроснабжения во время пайки изделий в нагретом состоянии.

В настоящее время разрабатывается много новых конструкций адсорбционных криогенных рефрижераторов, способных к длительному криостатированию объектов при низких температурах. Это связано с тем, что адсорбционная откачка паров хладагента по сравнению с откачкой внешними насосами имеет ряд несомненных преимуществ, важнейшие из которых: простая система очистки рабочего газа, который практически не покидает камеры; короткий тракт откачки, так как адсорбционный насос находится близко к вакуумной камере; маленькие теплопритоки. Однако адсорбционная откачка действует до тех пор, пока не насытится адсорбент, либо полностью испарится хладагент, и, следовательно, есть необходимость периодической регенерации адсорбента.

Основной конструктивной особенностью адсорбционного насоса является адсорбент, который размещается на медных пластинах с 20-миллиметровым зазором между ними. Все пластины подсоединены к медной трубке с внутренним диаметром примерно 50...70 мм и имеющей снаружи ленточную резьбу для увеличения поверхности теплового контакта [6]. К недостаткам таких адсорбционных насосов относятся сложность конструкций, а также плохой тепловой контакт.

С учетом особенностей конструкций адсорбционных насосов и требований, предъявляемых к механической прочности изделий при работе в широком диапазоне температур (от 573 К до -4,2 К) и при различных условиях нагружения (статические и циклические по уровню напряжений и температур), была поставлена цель разработать технологию, обеспечивающую получение прочных соединений адсорбционного насоса, изготовленных из меди и имеющих объем для заполнения адсорбента и прямого контакта с трубопроводом с целью подачи хладагента.

Процесс диффузионной сварки меди не вызывает особых затруднений. Равнопрочность соединений меди к основному материалу достигается при диффузионной сварке по режиму  $T_{св} = 1123 \text{ К}$ ,  $P_{св} = 7...8 \text{ МПа}$ ,  $t = 20 \text{ мин}$ , вакуум ( $10^{-2} \text{ Па}$ ) [7].

Однако не всегда удается создавать необходимое сварочное давление для получения равнопрочных соединений. При диффузионной сварке сложных конструкций из меди существенные трудности возникают в связи с необходимостью создания давления в контакте свариваемых изделий.

На рис. 3 показан адсорбционный насос, сваренный диффузионной сваркой в вакууме. Он состоит из медной трубы, намотанной в виде спирали, между витками спирали устанавливается медная сетка, которая заранее складывается и деформируется в виде спирали на специальном приспособлении.

В процессе сборки между витками сетки ввинчивается спираль из тугоплавкого материала для предотвращения соединений между сетками. После центровки с помощью приспособления, изготовленного из стали 12Х18Н10Т, его стягивают и устанавливают в вакуумную камеру. Детали соединяются за счет различия температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) стягиваемой детали и стягивающего приспособления. Однако возникающие при нагреве напряжения сжатия недостаточны для осуществления процесса сварки. Поэтому на медную спираль наносят серебро гальваническим способом толщиной 20...25 мкм. Один конец трубы сваривают (закрывают), в другой конец в процессе сварки подают инертный газ, благодаря чему медная труба, намотанная в виде спирали, расширяется, что приводит к качественному соединению. Нагрев сборного изделия осуществляется ВЧ индуктором. Регулировка подачи инертного газа позволяет создавать оптимальное давление на свариваемых деталях от 1 до 3 атм. Благодаря низкому пределу текучести промежуточная прокладка легче деформируется, способствуя тем самым увеличению площади поверхности контакта свариваемых материалов. Использование промежуточного слоя серебра позволяет значительно сократить время сварки и продолжительность подготовки поверхности под сварку.

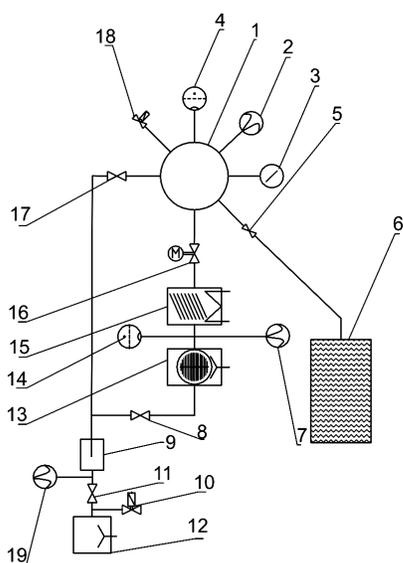


Рис.2. Схема вакуумной системы установки: 1-вакуумная камера; 2,3,4,7,14,19- измерительная аппаратура; 5,8,10,11,17,18- вакуумные клапаны; 6- адсорбционный насос; 9- ловушка азотная; 12- форвакуумный насос; 13 - турбомолекулярный насос; 15 - жалюзи охлаждаемые; 16- вакуумный затвор

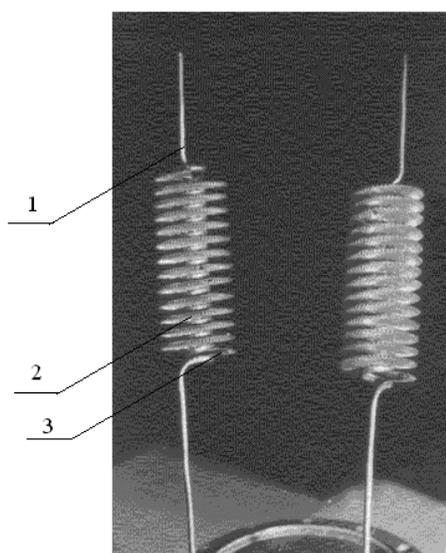


Рис.3. Адсорбционный насос, изготовленный диффузионной сваркой в вакууме: 1 - медная труба, 2 - медная сетка, 3 - объем для заполнения адсорбента

Оптимальным режимом соединений адсорбционного насоса является  $T_{св} = 1023 \text{ K}$ ,  $t = 5 \text{ мин}$ , вакуум  $\sim 10^{-3} \text{ Па}$ .

При разработке изделий ускорительной техники, работающей в широком диапазоне температур, необходимо учесть, что механические свойства материалов будут меняться. На рис.4 показаны временные сопротивления соединения медь-серебро-медь при повышенных и низких температурах.

Таким образом, адсорбционный насос, сваренный диффузионной сваркой, имеет хороший тепловой контакт с трубопроводом хладагента и высокую удельную быстроту действия. Такая конструкция адсорбционного насоса обеспечивает равномерное охлаждение адсорбента.

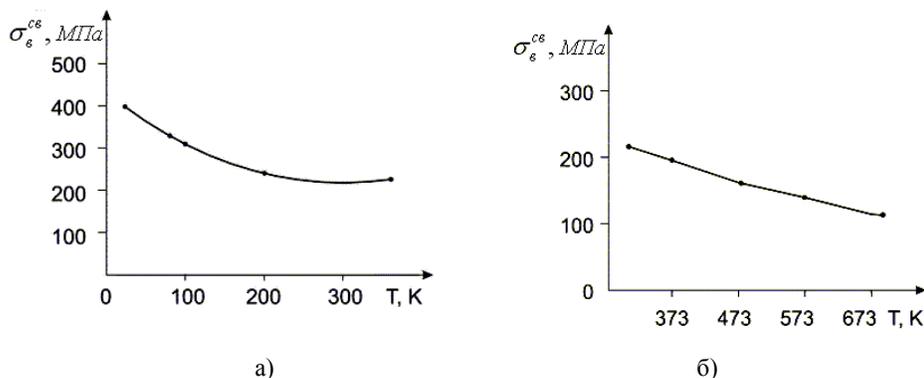


Рис. 4. Зависимость предела прочности сварного соединения при: а – низких температурах; б – повышенных температурах

**2.Технология пайки ускоряющей структуры.** Ускоряющая структура состоит из отдельных подсекций, изготовленных из медных диафрагм, которые соединяются между собой с помощью пайки серебряным припоем (ПСр-72) в вакууме [8]. В процессе пайки конструктивных частей геометрическая форма конструкции в месте стыковки может деформироваться из-за плотности растекающегося припоя [8].

Для обеспечения требуемых электрических параметров ускоряющих секций и хорошего смачивания припоя предлагается предварительно наносить серебро в местах стыка чашек методом гальванического покрытия. Применение промежуточного элемента в виде гальванически нанесенного серебра, более мягкого, чем медь, приводит к локализации пластической деформации сжатия в месте стыка изделий. Физический контакт образуется при этом преимущественно за счет активной деформации и ползучести серебра, заполняющего микронеровности соединяемых поверхностей (рис.5), что существенно снижает минимально необходимый уровень давления сжатия и остаточной деформации изделий. При соединении меди через тонкий слой серебра при температуре, несколько превышающей температуру плавления ( $1052 \text{ K}$ ) эвтектики Ag-Cu (но остающейся ниже температуры плавления

серебра), развивается процесс контактно-реактивного плавления. Большую роль играет здесь давление сжатия на соединяемые детали, воздействующие на физико-химические процессы, протекающие в месте контакта. Из диаграммы состояния системы серебро-медь (рис.6) известно, что серебро обладает ограниченной растворимостью в меди (не более 8%), поэтому толщина гальванического покрытия должна быть минимальной. Как показали экспериментальные исследования, оптимальная толщина покрытия должна быть порядка 8...12 мкм. Дальнейшее увеличение толщины покрытия приводит к снижению прочности соединения и увеличению остаточной деформации а иногда и к образованию пустот в зоне соединения при длительном нагреве (рис.7 а, б).

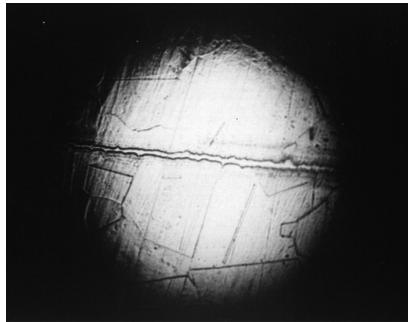


Рис.5. Микроструктура зоны соединения медь-серебро-медь (( 100)

Необходимо отметить, что при изготовлении паяных изделий особенно важным является качество сборки под пайку, при которой должны быть гарантированы зазоры для заполнения их жидким припоем. При широко применяемой так называемой капиллярной пайке используется способность жидкостей самопроизвольно подниматься в тонкие капилляры (трубочки) или плоские щели за счет сил поверхностного натяжения при наличии смачивания жидкостью (припоя) твердой поверхности. Если зазоры оставлены большие, то припой не будет в них затекать, и может возникнуть некачественная пайка. Наоборот, если зазоры очень малы, то скорость проникновения в них жидкого металла будет очень мала, что также может способствовать возникновению некачественных паек. Таким образом, существуют оптимальные размеры зазоров, обеспечивающие хорошее качество паяных соединений. В производственных условиях особую трудность представляет сборка деталей изделия под пайку по оптимальным зазорам, от которой зависит качество паяного изделия (прочность, вакуумная герметичность, электропроводимость).

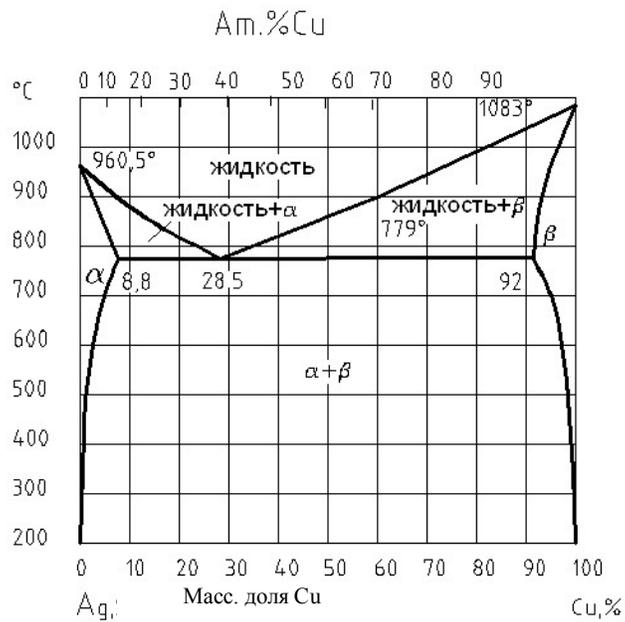
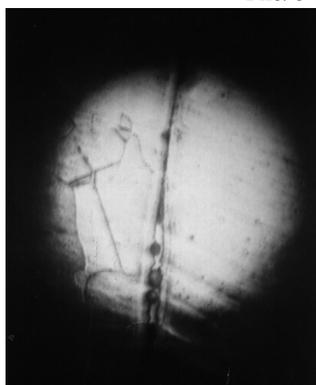
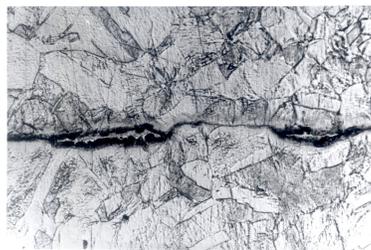


Рис. 6 Диаграмма состояния системы серебро-медь [9]



а)



б)

Рис. 7. Микроструктура зоны соединения: а- медь-серебро- медь ((( 100); б- медь бескислородная (МБ) - серебро- медь МБ (( 200)

Анализируя вышесказанное, можно утверждать, что при соединении (стыковке) ускоряющих секций припой должен укладываться между диафрагмами заранее в виде фольги или напыленного слоя малой толщины. При этом даже при отсутствии смачивания припой тем не менее под действием отрицательного капиллярного давления будет вытесняться из зазора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров Ю.А., Иванов С.А. Ускорительная техника и рентгеновские приборы. - М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.
  2. А.с. СССР № 1755481, МК В23К 20/26. Устройство для диффузионной сварки / В.Ш. Авагян, А.З. Бабаян. - 15.04.1992.
  3. Avagyan V. Development of technology for brazing and diffusion welding of copper accelerating structures // Phys. Rev. Special Topics- Accelerator and Beams. – 2006.- V.9- P. 083501- 083507.
  4. Авагян В.Ш. Исследование и разработка технологии диффузионной пайки и сварки медных ускоряющих структур // Известия НАН РА и ГИУА.-Сер.ТН.-2007. – Т. LX, №1. - С.9-15.
  5. Кеменев В.Н. Состояние и перспективы развития систем откочки // 12-я Всесоюзная научно-техническая конференция “Достижения и перспективы развития диффузионной сварки”. – М.: МДНТП, 1987. – С.145-148.
  6. Адсорбционный криогенный рефрижератор непрерывного действия без движущихся узлов / А.А. Ароян и др. Препринт ЕФИ- 749(76)-85. - Ереван, 1985.
  7. Афанасьев И.В., Косичкин Н.В., Худышев А.Ф. Диффузионная сварка в вакууме и контролируемой атмосфере // Сварочное производство. – 1963. - 1 4. - С.28-29.
  8. Design of a 3GNZ accelerator structure for the CLIC test facility. (CTF 3) drive beam / G. Carron et al // XX International Linac Conference. - 2000.
  9. Хряпин В.Е. Справочник паяльщика. 5-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1981.-348 с.
- ЕрФИ им А.И. Алиханяна. Материал поступил в редакцию 11.10.2009.

Վ.Շ. ԱՎԱԳՅԱՆ, Ա.Զ. ԲԱԲԱՅԱՆ, Ի.Վ. ԹՈՒՆՅԱՆ

### ԱՐԱԳԱՑՆՈՂ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ԶՈՂՄԱՆ ՎԱԿՈՒՈՒՄԱՅԻՆ ԻՆՂՈՒԿՑԻՈՆ ԿԱՅԱՆՔ

Նկարագրված է վակուումային ինդուկցիոն զոդման կայանք, որն օգտագործվում է արագացուցչային տեխնիկայում՝ պղնձե արագացնող կառուցվածքների զոդման համար: Բերված են մետաղագիտական հետազոտությունների արդյունքները պղինձ- արծաթ- պղինձ զոդման տիրույթում:

*Առանցքային բառեր.* զոդում, վակուում, արագացնող կառուցվածք, տաքացում, ադսորբցիոն պոմպ:

V.Sh. AVAGYAN, A.Z. BABAYAN, I.V. TUNYAN

### INDUCTIVE VACUUM MACHINE FOR THE BRAZING OF THE ACCELERATING STRUCTURES

A construction of the setup foreseen for the junction of long copper pieces used in accelerating technique as well as the results of metallographic researches of Cu+Ag+Cu compound are described.

**Keywords:** brazing, vacuum, accelarating structure, heating, adsorbtion pump.