

В.Ш. АВАГЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ДИФФУЗИОННОЙ ПАЙКИ И СВАРКИ МЕДНЫХ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР

Приводится технология диффузионных соединений медных ускоряющих структур. Экспериментальным путем определены условия образования диффузионного соединения медных конструкций с минимальной остаточной пластической деформацией.

Ключевые слова: диффузия, сварка, вакуум, пайка, ускоряющая структура.

Введение. Получение прецизионных пучков заряженных частиц высоких энергий в современных линейных ускорителях налагает жесткие требования на качество изготовления и сборки медных ускоряющих структур. Эти требования сводятся к минимизации неоднородностей внутри полости ускоряющих структур, избежанию примесей при пайке медных конструкций и различных деформаций при соединении конструктивных частей. Изучение этих эффектов и разработка новых подходов к вопросам соединения медных конструкций являются важной частью современных исследований по ускорительной технике для обеспечения малых потерь высокочастотной мощности, избежания возбуждения паразитных мод в структуре, неоднородного нагрева и пробоя электромагнитного поля.

При соединении отдельных элементов ускоряющей структуры должны быть удовлетворены следующие требования: обеспечение прочности соединения; обеспечение вакуумной герметичности; обеспечение проектных геометрических размеров ускоряющей структуры; минимизация остаточных деформаций после соединения элементов структуры; избежание различных примесей, окисления и образования новых соединений; разработка установки, которая обеспечивает соединение (стыковку) отдельных частей ускоряющих секций.

Важной частью технического осуществления соединений медных конструкций является разработка установки, которая обеспечивает выполнение вышеуказанных требований.

В данной работе рассматривается технология соединения ускоряющих структур методом индукционной пайки и диффузионной сварки в вакууме. Исследованы вопросы зависимости остаточной деформации стыкуемых элементов ускоряющей секции от давления, температуры и времени выдержки. Разработана установка для пайки и диффузионного соединения ускоряющих секций, позволяющая обеспечить минимальную пластическую деформацию изделия.

1. Технология пайки ускоряющих структур. Ускоряющая структура состоит из отдельных элементов, изготовленных из медных чашек, которые собираются в пакет и соединяются между собой с помощью пайки серебряным припоем (ПСр-72) в вакууме (см., например, [1]). Во время процесса пайки

конструктивных частей геометрическая форма конструкции в месте стыковки может деформироваться из-за плотности растекающегося припоя [2].

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, 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 ($T_{пл.}$) 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 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.

Соединение медных ускоряющих структур проводилось в вакууме $P=1,3 \cdot 10^{-3}$ Па при температуре 1073 К и давлении сжатия 1 МПа. На рис. 1 схематически представлена установка для соединения ускоряющей структуры длиной до 1,2 м [3].

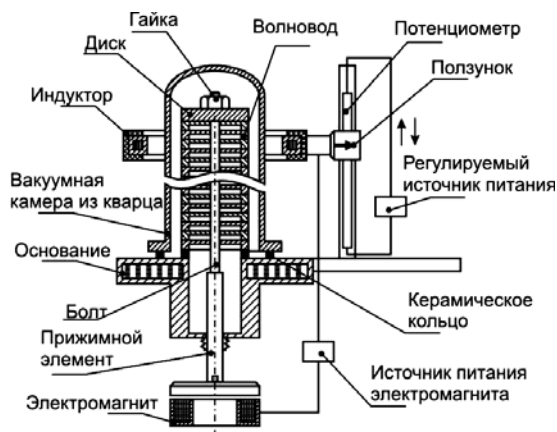


Рис.1. Схема установки для соединения ускоряющих секций

Разработанная установка позволяет обеспечить оптимальный режим соединения в стыке каждой двух чашек по всей длине ускоряющей структуры. Постоянство давления обеспечивается системой управления магнитом,

снижающим нагрузку по мере перемещения нагревателя сверху вниз; постоянство времени процесса соединения - за счет размеров нагревателя и скорости его перемещения, а постоянство температуры нагрева - путем дозированного снижения мощности источника нагрева по мере перемещения нагревателя сверху вниз. Нагрев ускоряющей секции осуществляется медным индуктором диаметром 180 мм (число витков 8), который подключен к высокочастотному генератору ВЧГ 6-60/0,44 (рабочая частота 0,44 МГц). Контроль температуры осуществляется пирометром Raytek МХ4. На рис.2 показана микроструктура зоны соединения меди с медью через жидкую фазу серебра.

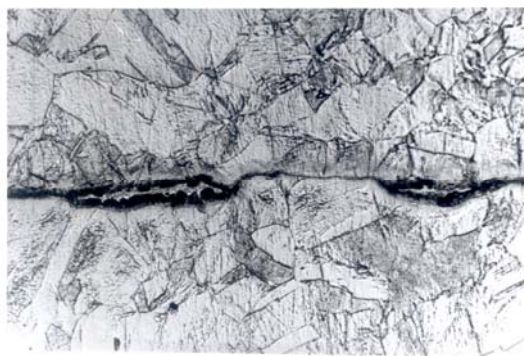


Рис.2. Микроструктура зоны соединения медь - серебро – медь ((200)

2. Исследование условий образования диффузионного соединения меди с минимальной остаточной пластической деформацией. Диффузионное соединение меди в вакууме или в среде инертного газа не вызывает особых затруднений, однако следует отметить, что нет единого мнения об оптимальных режимах диффузионной сварки меди [4,5].

С целью выбора оптимальных условий, обеспечивающих получение соединений с минимальной остаточной пластической деформацией, изучено влияние подготовки поверхности и параметров режима на механические свойства диффузионных соединений. Исследование проводилось на образцах из меди М1. Параметры процесса изменялись в следующих пределах: удельное давление P , МПа - 2...8; температура нагрева - T , К - 973...1173; время выдержки τ , мин - 5...20.

Стыкуемые поверхности образцов обрабатывались алмазными резцами до шероховатости $Ra = 1,5...0,025$ мкм. Анализ влияния температуры соединения на параметр σ (прочность соединения на разрыв) показывает, что более интенсивный рост остаточной пластической деформации (наступает при $T \geq 1073$ К, а прочность соединения при этой температуре уже находится на уровне основного металла (рис. 3).

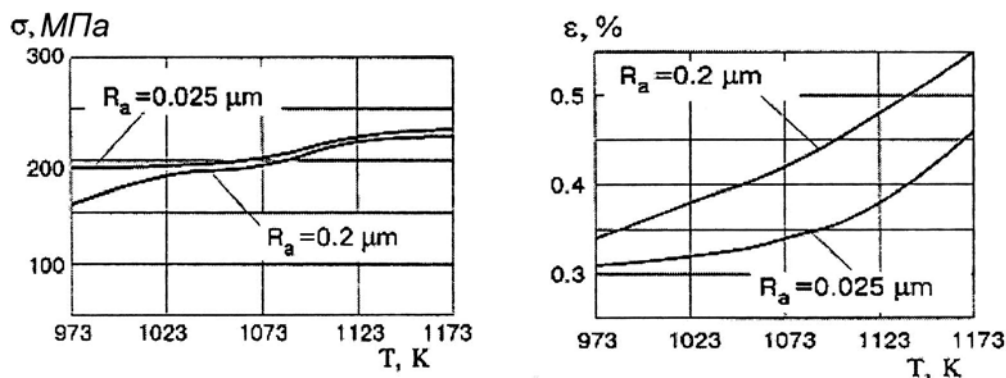


Рис.3. Зависимость параметров сварки σ и ε от температуры
($P = 4 \text{ МПа}$, $\tau = 20 \text{ мин}$)

При высокотемпературной ползучести в зоне контакта возрастает вклад межзернового проскальзывания, что в некоторой степени способствует образованию физического контакта. Металлографические исследования показывают, что с повышением температуры соединения количество дефектов в зоне соединения уменьшается, причем наибольшее влияние повышения температуры проявляется при чистоте обработки поверхностей R_a ($0,025 \text{ мкм}$, когда наблюдается общее образование зерен (рис.4).

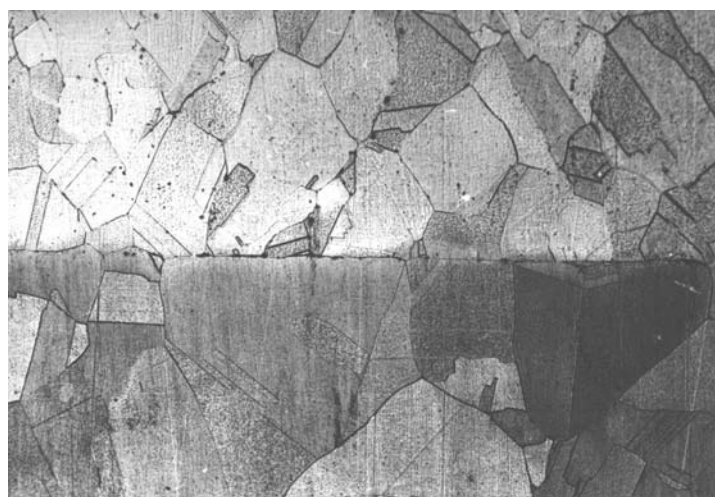


Рис.4. Микроструктура зоны соединения меди ((200))

Графики зависимости σ - и ε - соединений от величины удельного давления приведены на рис. 5. Как видно из графиков, рост давления повышает прочность соединения, однако резко увеличивается остаточная деформация. Наиболее интенсивный рост наблюдается начиная с $P = 4 \text{ МПа}$.

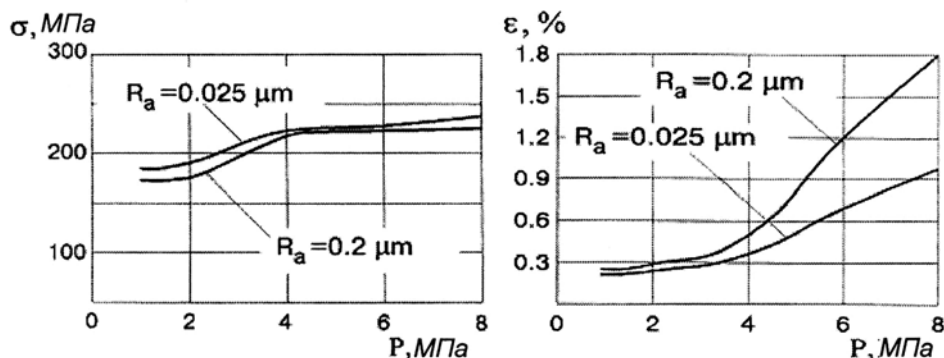


Рис.5. Зависимость параметров сварки σ и ϵ от сварочного давления
($T = 1123 \text{ K}$, $\tau = 20 \text{ мин}$)

Зависимости σ - и ϵ - соединений от времени показывают, что для соединения реального изделия можно рекомендовать время от 15 до 20 мин (рис. 6).

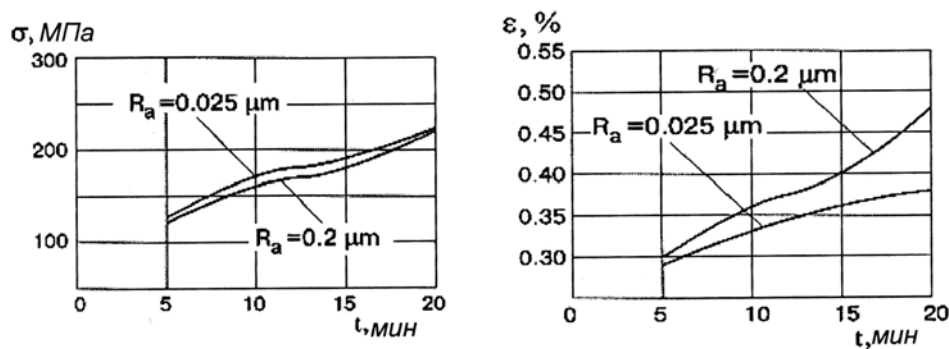


Рис. 6. Зависимость параметров сварки σ и ϵ от времени
($T = 1123 \text{ K}$, $P = 4 \text{ МПа}$)

В соответствии с представлениями о механизме и кинетике процесса диффузионного соединения можно выделить следующие пути снижения остаточной пластической деформации соединения:

- повышение класса чистоты обработки поверхности;
- освобождение поверхности от оксидов.

Исследование диффузионного соединения на двух медных чашках показало, что параметрами оптимального режима являются: $T = 1073^\circ \text{ C}$; $P = 1 \text{ МПа}$; $\tau = 15 \text{ мин}$ при чистоте обработки поверхностей $R_a = 0,025 \text{ мкм}$. При этом относительная деформация ($0,01 \%$. На рис.7 показано металлографическое исследование зоны соединения. Как видно из рисунка, сохраняется граница раздела, но ее ширина такого же порядка, что и обычная межзеренная граница. При этом прочность соединения составляет $\sigma \geq 180 \text{ МПа}$.

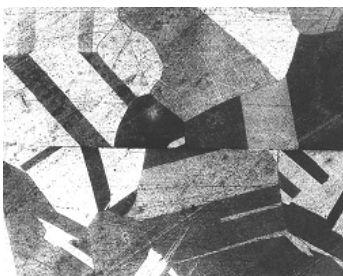


Рис.7. Микроструктура зоны соединения медь+медь (x200)

3. Установка для диффузионной сварки и пайки длинномерных изделий. Для решения вопроса герметичности соединения отдельных частей ускоряющих секций разработана установка (рис.8), которая позволяет с помощью вакуумной камеры в виде сильфона герметизировать область стыка соединяемых частей секций и в процессе соединения осуществлять контроль герметичности.

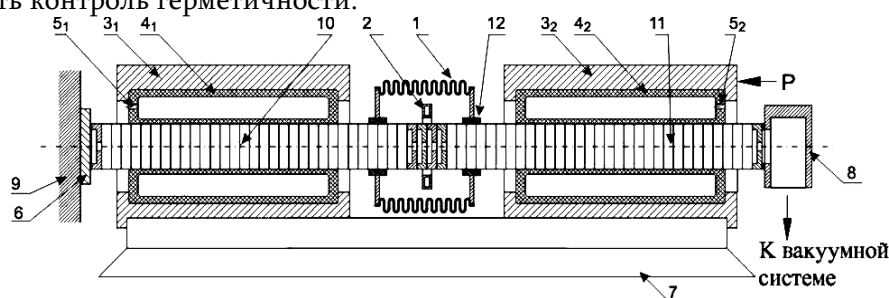


Рис.8. Схема установки для диффузионной сварки длинномерных изделий:

- 1- вакуумная камера, 2 - индуктор для нагрева, 3 - кольцевой барабан, 4 - резиновое колесо, 5 - отверстие для подачи воздуха, 6 - заглушка, 7-основание, 8 - фланец, 9 - опора, 10,11 – стыкуемые ускоряющие секции, 12 - прокладка

Установка работает следующим образом. Соединяемые ускоряющие секции 10 и 11 устанавливаются внутри барабана 3 через резиновое колесо 4. Через отверстие 5 в полость резиновой камеры подается воздух и создается давление, которое захватывает соединяемые ускоряющие секции, независимо от их внешних профилей, и обеспечивает равномерный захват соединяемых секций, исключая таким образом их деформацию. Секция 10 опирается на опору 9, а секция 11 соединена через фланец 8 с вакуумной системой. Кольцевые барабаны 3₁ и 3₂ имеют возможность перемещения в трех направлениях (на чертеже не показано).

После создания вакуума в камере 1 соединяемые секции нагреваются индуктором 2 до необходимой температуры, а давление соединения обеспечивается через барабан 3₂ (на чертеже не показано). Взаимное перемещение секций 10 и 11 обеспечивается с помощью вакуумной камеры в виде сильфона.

Разработанная установка обеспечивает контроль герметичности в процессе соединения, пропуская гелий в камеру 1, а массоспектрометр подсоединен к вакуумной системе через фланец 8 для контроля герметичности.

Заклучение

1. Разработана специализированная установка для осуществления диффузионных соединений в вакууме, позволяющая выдерживать по всей длине волновода постоянство сварочного давления для каждого соединяемого стыка чашек за счет взаимосвязи перемещения нагревателя и системы сжатия.

2. Определены оптимальные условия получения соединения с минимальной остаточной деформацией в зависимости от параметров процесса.

3. Разработана вакуумная установка для соединения ускоряющих секций с одновременным контролем вакуумной герметичности в стыке соединяемых секций.

Работа выполнена в Ереванском физическом институте им. А.И. Алиханяна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carron G. *et al.* Design of a 3GNZ accelerator structure for the CLIC test facility (CTF 3) drive beam // XX International Linac Conference (Linac 2000).- Monterey, California, 21-25 Aug., 2000. - Vol. 1. - P. 416-418.
2. Takahashi J. *et al.* Plunger frequency of the side couple accelerating structure for the IFUSP microtron // 1997 Particle Accelerator Conference (PAC'97), Vancouver, B.C., Canada, 12-16 May, 1997. - P. 2998-3000.
3. А.с. СССР, 1755481, МК Б23К 20/26. Устройство для диффузионной сварки / В.Ш. Авагян, А.З. Бабаян. - Оpubл. 1992.
4. Конюшков Г.В. Особенности получения вакуумноплотного соединения материалов при диффузионной сварке // Автомат. сварка. - 1985. - N 8. - С. 25-28.
5. Сергеев С.А., Филипенко А.Г. Диффузионная сварка металлов в электронной технике // В кн.: Новые методы сварки в машиностроении и приборостроении. - 1988. - С.33-36.
6. Авагян В.Ш. Установка для диффузионной сварки длинномерных изделий: Патент, АМ, N 1534A2. Заяв. 20.04.2004; Оpubл. 11.05.2004. - N5 (46).

Центр перспект. исслед. с использованием синхр. излучения (CANDLE), Ереван, Армения. Материал поступил в редакцию 20.05.2006.

Վ.Շ. ԱՎԱԳՅԱՆ

ՊԵՐՏԵ ԱՐԱԳԱՑՆՈՂ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՂԻՖՈՒՂԻՈՆ ԶՈՂՄԱՆ ԵՎ ԵՌԱԿՑՄԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՎ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Ներկայացված է պղնձե արագացնող կառուցվածքների ղիֆուղիոն միացումների տեխնոլոգիան: Փորձնական ճանապարհով հաստատվել են պղնձի ղիֆուղիոն միացումների պայմանները, որոնց դեպքում մնացորդային դեֆորմացիան նվազագույնն է:

Առանցքային բառեր. ղիֆուղիա, վակուում, եռակցում, զոդում, արագացնող կառուցվածք:

V.SH. AVAGYAN

STUDY AND DEVELOPMENT OF DIFFUSION BRAZING AND WELDING OF THE COPPER ACCELERATING STRUCTURES TECHNOLOGY

Technologies of copper accelerating structure diffusion joints are presented. The formation conditions of copper diffusion joint with minimal residual plastic strain are determined experimentally.

Keywords: diffusion, welding, vacuum, brazing, accelerating structure.