

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт электросварки им. Е. О. Патона

На правах рукописи

А В А Г Я Н
Вардан Шаваршович

УДК 621.791:621.384.6

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
И АППАРАТУРЫ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНЫХ
ДЛИННОМЕРНЫХ МЕДНЫХ ВОЛНОВОДОВ**

05.03.06 —

технология и машины сварочного производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Киев 1994

621.791

ЛНБ ім. В. Стефаніка



00330593 (N)

Дисертація являється рукописю.

Робота виконана в Єреванському фізическому інституті, і в Інституті електросварки ім. Е. О. Патона АН України

Научний керівитель

д-р техн. наук

Г. К. ХАРЧЕНКО

Офіційні опоненти

професор,

д-р техн. наук

М. М. НЕРОДЕНКО

доцент,

канд. техн. наук

Г. П. БОЛОТОВ

Ведуче підприємство: ХФТИ (г. Харків).

Захист дисертації состоится « 20 » апреля 1994 г. в 10:00 часов на засіданні спеціалізованого совета K016.08.01 Інститута електросварки ім. Е. О. Патона АН України (252650, г. Київ-5, ГСП, ул. Боженко, 11).

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ІЭС ім. Е. О. Патона АН України.

Отзыв на автореферат (1 экз., заверенный печатью) просьба прислать по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан « 15 » марта 1994 г.



Учений секретарь
спеціалізованого совета
канд. техн. наук

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка новых методов соединения материалов, обеспечивающих высокую чистоту обработки поверхности и прочность конструкций, является одним из перспективных направлений при создании прецизионных установок. Последнее десятилетие характеризуется бурным развитием ускорительной техники, приведшим к созданию уникальных ускорителей электронов и протонов с энергией от нескольких миллионов электронвольт для нужд народного хозяйства (медицина, металловедение и т.д.) до нескольких десятков миллиардов электронвольт для фундаментальных исследований и области ядерной физики.

Одним из основных требований к ускорителям является высокая точность изготовления ускоряющих секций, представляющих собой диафрагмированные волноводы. В связи с этим особенно актуальны работы, направленные на создание новых способов соединения элементов, ускоряющих секций, обеспечивающих сохранение исходных размеров секции, вакуумной герметичности, а также прочность соединения без существенных изменений радиофизических параметров секции в целом.

Наиболее перспективный путь создания диафрагмированных волноводов — это применение способа диффузионной сварки, который позволяет при разработке соответствующей технологии получить соединение с минимально допустимой пластической деформацией.

До настоящего времени не были установлены закономерности влияния параметров сварки на характер изменения пластической деформации в сварных соединениях из меди, не были разработаны технология и аппаратура для сварки медных диафрагмированных волноводов длиной до одного метра.

Цель работы — разработка технологии и аппаратуры для изготовления диффузионной сваркой в вакууме (ДСВ) цельносварных медных волноводов длиной до одного метра.

Основные задачи настоящей диссертационной работы:

1. Исследование влияния параметров режимов сварки и качества подготовки поверхности на пластическую деформацию.

2. Изучение характера распределения теплового поля в волноводе при движении вдоль него источника нагрева с определенной скоростью.

3. Разработка технологии предварительной подготовки элементов волновода, последующей их сварки и неразрушающего контроля качества сварного изделия.

4. Разработка и внедрение в производство специализированного оборудования ДСВ.

Основные положения, представленные к защите:

1. Экспериментальные и расчетные результаты изучения влияния параметров режимов сварки и качества подготовки поверхности на пластическую деформацию сварных соединений из меди, позволяющие выбрать оптимальный режим сварки.

2. Расчетные оценки распределения теплового поля по длине волновода, позволяющие прогнозировать температурно-временные условия формирования сварного соединения для каждого элемента волновода.

3. Технологический процесс диффузионной сварки в вакууме диафрагмированных медных волноводов, обеспечивающий высокое качество сварного изделия; новая специализированная сварочная аппаратура.

Научная новизна работы. Установлены закономерности образования соединения при диффузионной сварке меди в вакууме в зависимости от параметров процесса и качества предварительной механической подготовки поверхности. Показано, что для получения соединения с остаточной деформацией не более 0,03 % предварительная механическая подготовка должна соответствовать $R_3 = 0,025$ мкм.

Установлено, что при перемещении источника нагрева вдоль диафрагмированного медного волновода характер распределения теплового поля определяется условиями прогрева первых элементов волновода.

Определено, что для обеспечения пластической деформации каждого элемента не более 0,03 % необходимо стабилизировать сварочное давление по всей длине вертикально установленного волновода за счет взаимосвязи перемещения нагревателя и системы сжатия, что позволяет компенсировать дополнительное давление, обусловленное массой волновода, расположенного выше свариваемого стыка.

На основании анализа поведения оксидов на поверхности металла при его нагреве в вакууме показано, что в зоне взаимодействия контактирующих поверхностей медных деталей имеет место восстановление оксидов за счет выделения водорода из материала деталей.

Разработан новый тип установки ДСВ, в которой нагреватель расположен вне вакуумной камеры, выполненной из кварца, и перемещается вдоль нее, что обеспечивает условия получения сварного длинномерного медного волновода с равномерно распределенной пластической деформацией по всей его длине.

Практическая ценность. На основании проведенных исследований разработан технологический процесс и специализированная установка для ДСВ диафрагмированных медных волноводов. Результаты работы использованы при создании ускоряющей секции ЛУЭ и волноводных элементов инжектора линейного ускорителя Ереванского синхротрона.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на XIII Всесоюзной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития диффузионной сварки» (Москва, 1990), на семинарах по ускорительной технике в ЕРФИ в 1987-1993 гг., на семинаре в Институте электросварки им. Е. О. Патона (Киев, 1994).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 статьи; получены 2 авторских свидетельства на изобретения.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, изложена на 115 страницах

машинописного текста, содержит 39 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 80 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, приведено краткое содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается состояние проблемы изготовления волноводов и особенности диффузионной сварки.

В § 1.1 рассматриваются основные методы получения длинномерных волноводов. Устанавливается, что наиболее распространена технология производства паяных волноводов. Конструкцию волновода набирают из отдельных, точно изготовленных медных элементов, имеющих вид короткого стакана (чашки) с отверстием в центре дна. После тщательной центровки элементов их припаивают в вакууме, используя в качестве припоя серебро. Сформулированы основные недостатки, присущие пайке в вакууме, а именно: трудность обеспечения постоянства установочного давления между соединяемыми элементами по всей длине, что приводит к неравномерной деформации, выгеканию серебра в рабочую область или к образованию пустот в зонах соединения, в это в обоих случаях вызывает уменьшение подводимой СВЧ мощности (и тем самым уменьшение градиента или темпа ускорения) и большой расход серебра.

Отмечается, что при температуре $T = 1052$ К серебро с медью образует эвтектику: процесс пайки при эвтектике не управляем, так как затекание жидкого припоя в разор начинается сразу же после его расплавления и смачивания соединяемых чашек у входа в зазор, а заканчивается до того, как достигнута заданная температура пайки; кроме того, к недостаткам относится испарения серебра в вакууме.

В § 1.2 рассмотрены особенности соединения меди в твердом состоянии. Анализ литературных данных свидетельствует, что нет

единого мнения об оптимальных режимах диффузионной сварки меди.

Проведенный анализ состояния вопроса диффузионной сварки узлов и деталей из меди позволяет заключить, что возможно конструировать оригинальные узлы и приборы, получать изделия с необходимыми свойствами, а также изготавливать высокоточные конструкции, которые нельзя выполнить, используя другие способы сварки. Можно также утверждать, что сварка в вакууме экономически более выгодна, чем сварка в водороде. Замена пайки деталей из меди на диффузионную сварку в вакууме позволит отказаться от припоев, содержащих серебро, золото и другие дорогостоящие материалы.

Приведенный обзор литературы позволяет утверждать, что для решения задачи сварки динномерных прецизионных изделий нет ни технологии, ни соответствующей аппаратуры.

В § 1.3 рассматриваются процессы, определяющие образование сварного соединения.

Существует ряд гипотез, которые описывают процесс образования соединений металлов. Несмотря на различный подход к объяснению процесса схватывания, все гипотезы имеют общее положение, а именно: для того, чтобы произошло схватывание металлов необходимы условия для образования металлических связей, очистка поверхности от оксидных и адсорбированных пленок.

Особо следует рассмотреть поведение оксидов на поверхности меди при ее нагреве в вакууме. Отметим, что в литературе нет термодинамических оценок поведения оксидов на меди. Некоторые авторы предполагают, что оксидные пленки с поверхности меди удаляются при нагреве в вакууме в результате диссоциации и растворения в основном металле. Однако анализ этих процессов авторы не приводят. Отметим, что толщина оксида меди, образующегося за 30 с после механической обработки в атмосфере сухого воздуха составляет $3 \cdot 10^{-9}$ м. В то же время расстояние межатомного взаимодействия составляет $(4 \dots 5) \cdot 10^{-10}$ м, т.е. оксидный слой будет пре-

пятствовать атомному взаимодействию контактирующих поверхностей.

В §1.4 сформулированы основные задачи исследований.

Приведенный выше анализ состояния вопроса показывает, что образование сварного соединения является результатом взаимодействия комплекса сложных физико-технических процессов в приконтактных объемах и на поверхности металла. Анализ общего состояния вопроса диффузионной сварки меди показал, что нет единого мнения по вопросу выбора оптимальных режимов сварки, обеспечивающих формирование соединений с очень малой остаточной пластической деформацией, отсутствует четкое понимание процесса, обуславливающего очистку поверхности от оксидов при нагреве меди в вакууме.

Представленные в первой главе материалы позволяют заключить, что задача сварки давлением длинномерных волноводов пока не решена.

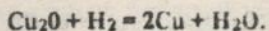
Во второй главе диссертации рассматривается характеристика свариваемого материала, лабораторная аппаратура и методики исследования.

В § 2.1 рассматриваются особенности свариваемого материала — меди. На качество сварных соединений наиболее вредное влияние оказывают находящиеся в меди кислород, висмут и свинец, и поэтому их массовая доля в меди, предназначенной для изготовления сварных конструкций, не должна превышать соответственно 0,10, 0,003 и 0,3 %. Кислород в меди находится в связанном состоянии, в виде закиси меди (Cu_2O), которая образует с медью эвтектику ($\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$) с температурой плавления 1338 К (несколько меньше температуры плавления меди). Температура плавления закиси меди (не в виде эвтектики) 1508 К, т.е. выше температуры плавления меди.

После обработки давлением, эвтектика ($\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$), которая располагается в границах зерен и имеет точечное строение, разрушается, и в деформируемой меди кислород присутствует уже в виде обособленных включений закиси меди.

Однако, благодаря влиянию наклепа, проводимость меди уменьшается. Если медь подвергнуть отжигу, т.е. нагреть до нескольких сот градусов с последующим охлаждением, то получится мягкая отожженная медь, которая достаточно пластична, имеет малую твердость и небольшую прочность, но весьма большое удлинение перед разрывом, более высокую удельную электропроводность.

Известно, что водород восстанавливает оксиды на меди, это ощутимо уже при нагреве свыше 1073 К:



Процесс восстановления оксида водородом идет непрерывно, т.к. после восстановления оксида образуются пары воды, которые при взаимодействии с нагретым металлом разлагаются с выделением водорода.

Зная особенности газовой выделении в вакууме металлов, мы можем оценить механизм очистки поверхности от оксидов. Во многих работах установлено, что с поверхности меди при нагреве в вакууме идет интенсивное выделение водорода. В связи с этим можно выдвинуть гипотезу о том, что в зоне взаимодействия контактирующих поверхностей медных деталей имеет место восстановление оксидов за счет выделения водорода из металла деталей. Согласно предположению В. Т. Слепухи, освобожденные в процессе восстановления оксида атомы металла участвуют в формировании твердофазного соединения.

Вышесказанное позволяет предположить возможность получения диффузионной сваркой в вакууме соединения из меди с минимальной остаточной пластической деформацией.

В § 2.2 рассмотрена лабораторная аппаратура, на которой выполнялись экспериментальные исследования.

Исследования диффузионной сварки на образцах выполнялись на установке У-394 с электронно-лучевым нагревом в ИЭС им. Е. О. Патона и на установке МДВ-301 с индукционным нагревом в Ереванском физическом институте.

В § 2.3 описана методика исследований.

Для проведения исследования диффузионной сваркой изготавливали образцы из меди М1 диаметром 18 мм, длиной 30 мм. Сты-

куемые поверхности образцов обрабатывали алмазными резцами до шероховатости поверхности $R_a = 0,4 \dots 0,025$ мкм. Перед обработкой образцы и чашки подвергали вакуумному отжигу. Параметры шероховатости поверхности измеряли прибором «Профилограф и профилометр 252». Для предотвращения окисления меди образцы хранили в вакуумной камере. Геометрические размеры образцов и изделий измеряли прибором «Микроском измерительный универсальный УИМ-23». Статистическую обработку экспериментальных данных и построение регрессионных моделей выполняли на ЭВМ-1046. Механические свойства сварных соединений оценивали по результатам испытаний соединения на разрыв. Для металлографического анализа использовали оптический микроскоп «Неофот 21» и электронный оптический микроскоп «Стероскоп S4-10». Герметичность сварных образцов и цельносварных волноводов испытывали с помощью гелиевого масс-спектрометрического течеискателя ПТИ-10. Контроль электрофизических параметров цельносварного волновода осуществлялся методом радиометрического измерения.

В третьей главе диссертации рассматривается расчетно-экспериментальная оценка параметров процесса.

В § 3.1 исследуются условия образования сварного соединения с минимальной остаточной пластической деформацией.

С целью выбора оптимальных условий, обеспечивающих получение соединений с минимальной остаточной пластической деформацией, изучали влияние подготовки поверхности и параметров режима на механические свойства сварных соединений. Исследование проводили на образцах из меди М1. Параметры процесса изменяли в следующие пределах:

| | |
|-----------------------------|----------|
| давление P , МПа | 2-8 |
| температура нагрева T , К | 973-1173 |
| время выдержки t , мин | 5-20 |

Стыкуемые поверхности подвергали чистовой, финишной и суперфинишной механической обработке алмазными резцами.

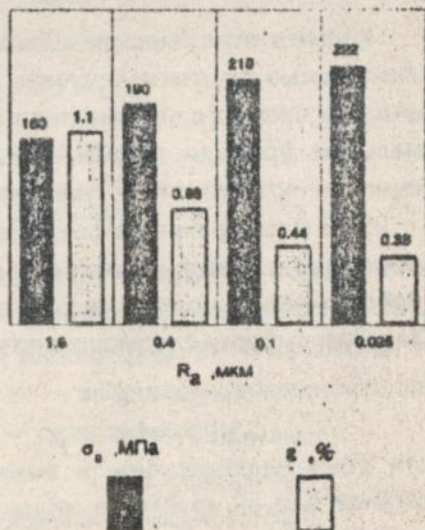
Анализ влияния температуры сварки на σ_a и ε показывает, что более интенсивный рост остаточной пластической деформации (ε) наступает — $T \geq 1073$ К, а прочность соединения при этой температуре уже находится на уровне основного металла.

При высокотемпературной ползучести в зоне контакта возрастает вклад межзеренного проскальзывания, что в некоторой степени способствует образованию физического контакта. Металлографические исследования показывают, что с повышением температуры сварки количество дефектов в зоне соединения уменьшается, причем наибольшее влияние повышения температуры проявляется при чистовой обработке поверхностей $R_a = 0,025$ мкм. При температуре 973 К в зоне соединения сохраняется граница раздела, но ее ширина такого же порядка, как и обычная межзеренная граница.

На рисунке приведена зависимость прочности и остаточной деформации сварного соединения от чистоты обработки поверхности. Из рисунка видно, что с повышением чистоты обработки, прочность соединения возрастает незначительно, а остаточная деформация интенсивно уменьшается.

В § 3.2 рассмотрена расчетная оценка оптимальных режимов сварки.

На основании проведенных исследований была установлена область режима сварки меди, в которой следует искать оптимальные режимы сварки изделия. С повышением температуры сварки прочность соединения возрастает, но увеличивается остаточная деформация. При уменьшении усилия сжатия наступает момент, когда напряжения в зоне стыка уже недостаточны для совместной пластиче-



Зависимость σ_a и ε сварного соединения от чистоты обработки поверхности: $T = 1123$ К; $P = 4$ МПа; $\tau = 20$ мин

ской деформации свариваемых образцов и, следовательно, для образования качественного соединения. Снижение температуры сварки с одновременным увеличением усилия сжатия образцов не дает положительных результатов. Многообразие факторов, определяющих температурно-временные условия, в которых возможно соединение образцов, не позволяет в настоящее время в общем виде решить вопрос оптимальных режимов сварки. Поэтому оптимизация режимов сварки меди осуществляется с применением метода математического планирования эксперимента.

В процессе обработки результатов эксперимента методом наименьших квадратов с последовательным отсеиванием оценок коэффициентов, незначимых на уровне $\alpha = 0,1$, получены регрессионные модели:

$$\sigma_{\text{в}} = 562 - 0,367T - 33,02\tau + 0,029T\tau + 1,23P\tau - 1,88P^2 - 257R_{\text{в}}^2, \\ R + 0,816, \quad d_0 = 17,3, \quad (1)$$

$$\epsilon = 3,05 - 0,0025T - 0,35P - 0,135\tau - 2,27R + 0,00032TP + \\ + 0,00012T\tau + 0,43PR_{\text{в}} + 0,064\tau R_{\text{в}} + 0,014P^2, \quad (2) \\ R = 0,966, \quad d_0 = 0,075.$$

Кроме статистической обработки данных были поставлены дополнительные опыты и получены экспериментальные зависимости прочности сварного соединения от температуры и давления при оптимальном времени сварки. С повышением температуры сварки прочность возрастает, с увеличением давления (при $\tau = 15$ мин, $R_{\text{в}} = 0,025$ мкм) прочность соединения увеличивается. Минимальная деформация изделий может быть получена при повышении чистоты обработки поверхности и небольшом усилии сжатия. Исследования позволили выбрать следующие оптимальные параметры процесса:

| | |
|----------------------------------------------------|-----------|
| температура T , К | 1023-1073 |
| давление P , МПа | 1-2 |
| время сварки τ , мин | 20 |
| чистота обработки поверхности $R_{\text{в}}$, мкм | 0,025 |

В § 3.3 рассмотрена кинетика температурного поля длинномерного изделия.

При разработке технологии сварки волновода необходимо знать характер распределения температуры по длине волновода для того, чтобы параметры процесса и соответствующая аппаратура не позволяли превысить определенную величину остаточной пластической деформации, которая должна быть равномерно распределена по всей длине изделия.

Поскольку нагрев высокочастотным индуктором в местах стыка чашек S_* производится по кольцу, то рассматривается асимметричное температурное поле $T(S, Z)$, переменное вдоль образующей S и по толщине изделия Z ($-\delta/2; \delta/2$). Это температурное поле описывается решением уравнения теплопроводности для тонкостенной оболочки вращения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial S} \cdot \left(\delta r \lambda \frac{\partial T}{\partial S} \right) + r \frac{\partial}{\partial Z} \left(\delta \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + \bar{\alpha} r (T - T_c) = \\ = r \left[c \gamma \delta \frac{\partial T}{\partial t} - W h(S - S_*) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

при заданных начальных и граничных условиях:

$$\text{при } t = 0 \quad T(S, Z) = T_0, \quad (4)$$

$$\text{при } s = S_0 \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial S} = \bar{\alpha} (T - T_c),$$

$$\text{при } S = S_k \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial S} = \bar{\alpha} (T - T_c), \quad (5)$$

$$\text{при } Z = -\frac{\delta}{2} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} = \bar{\alpha} (T - T_c),$$

$$\text{при } Z = \frac{\delta}{2} \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} = \bar{\alpha} (T - T_c).$$

Здесь δ — толщина оболочки; $r(S)$ — средний радиус вращения; λ — теплопроводность; T_0 — температура окружающей среды; $\bar{\alpha}$ — коэффициент поверхностной теплоотдачи; T_c — начальная температура свариваемого изделия; W — эффективная мощность высокочастотного индуктора; $h(S - S_*)$ — дельта-функция.

Анализируя расчетные данные можно заключить, что время нагрева всего волновода можно условно разбить на два интервала, которые отличаются закономерностью хода. Установлено, что темп роста и распределения температуры вдоль диафрагмированного

волновода определяется температурно-временными условиями нагрева первых чашек.

В четвертой главе рассматриваются аппаратура и технология сварки волноводов.

В § 4.1 рассмотрена технология изготовления биметаллического соединения медь МОб — сталь 12Х18Н10Т, полученного за счет разницы в значениях температурного коэффициента линейного расширения соединяемых металлов.

Большое влияние на соединяемые детали оказывает давление сжатия, воздействующее на физико-химические процессы, протекающие в зоне контакта; физический контакт образуется за счет более пластинкой меди. Проведенные исследования показали, что зона соединения меди МОб со сталью 12Х18Н10Т представляет собой область твердых растворов меди в γ -фазе стали и железа в меди.

В § 4.2 рассматривается технология и оборудование диффузионной сварки волноводов.

Исследования показали, что оптимальным режимом диффузионной сварки двух медных чашек является: $T = 1073$ К; $P = 1$ МПа; $\tau = 15$ мин.

Установлено, что при чистоте обработки поверхностей $R_a = 0,025$ мкм, возможно получение прочного соединения с относительной деформацией $\epsilon = 0,03$ %.

Металлографическое исследование показало, что хотя сохраняется граница раздела, прочность сварного соединения при этом близка к прочности основного металла. Разрушение соединения при испытании происходит по диафрагме.

Для получения соединения с минимальной остаточной деформацией необходимо, чтобы давление и температура сварки были распределены равномерно по высоте волновода. В связи с этим была спроектирована и изготовлена нового типа установка для диффузионной сварки длинномерных волноводов длиной до одного метра, в котором обеспечивается постоянство сварочного давления по всей длине волновода, установленного вертикально внутри камеры, выполненной из кварца (масса волновода до 40 кг).

Установка работает следующим образом. После достижения необходимого вакуума в камере диафрагмированный волновод нагревается ВЧ-током и производится соединение двух чашек, расположенных на уровне горизонтальной оси индуктора. При опускании индуктора до уровня следующего стыка напряжение на выходе потенциометра изменяется по закону:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \cdot x/l,$$

где координата ползунка изменяется от $x = l$ до $x = 0$, l — длина токопроводящей части потенциометра, $U_{\text{п}}$ — напряжение на выходе регулируемого источника напряжения. Что приводит к изменению тока электромагнита на значения, при которых компенсируется дополнительное давление, обусловленное массой диафрагмированного волновода, расположенного выше свариваемого стыка.

Постоянство времени сварки каждой пары стыкуемых элементов волновода обеспечивается размерами нагревателя и скоростью его перемещения, а постоянство температуры сварки гарантируется дозированным снижением мощности источника нагрева по мере перемещения нагревателя сверху вниз.

В § 4.3 описывается контроль качества цельносварного волновода. Для определения герметичности сварного волновода использовали гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ПТИ-10.

При проверке сваренного на оптимальных режимах волновода на герметичность течи не обнаруживались.

Контроль электрофизических параметров цельносварного волновода осуществляется методом радиометрического измерения. Одной из основных СВЧ характеристик волновода (резонатора) является частота электромагнитных колебаний f_0 , которая определяется резонансным методом.

Радиометрические измерения показали, что изменение частоты электромагнитных колебаний волнопроводов, сваренных на оптимальных режимах, находится в допустимых пределах по сравнению с эталоном.

Результаты работы использованы при создании макета ускоряющей секции ЛУЭ и волноводных элементов инжектора линейно-

го ускорителя Ереванского синхротрона с получением энергии электронов 75 МэВ.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности образования соединения при диффузионной сварке меди в вакууме в зависимости от параметров процесса и качества предварительной механической подготовки поверхности. Показано, что для получения соединения с остаточной деформацией не более 0,03 % предварительная механическая подготовка должна соответствовать $R_a = 0,025$ мкм, а режим сварки $T = 1073$ К, $P = 1$ МПа, $\tau = 15 \dots 20$ мин.

2. Предложена гипотеза о том, что в зоне взаимодействия контактирующих поверхностей медных деталей происходит восстановление оксидов за счет выделения водорода из металла в процессе его нагрева. Сделано предположение, что такой механизм очистки поверхности меди от оксидов в вакууме позволит получить сварное соединение с минимальной остаточной деформацией.

3. Определен характер распределения теплового поля в волноводе при движении вдоль него источника нагрева с постоянной скоростью. Показано, что темп роста и распределения температуры вдоль диафрагмированного волновода определяется температурно-временными условиями нагрева первых чашек.

4. Разработан технологический процесс предварительной подготовки чашек и сварки всего волновода. Выявлена необходимость сохранения деталей в вакуумной среде в период между их механической обработкой и сваркой. Определены условия получения вакуумно-плотного сварного волновода, отвечающие требованиям его эксплуатации в линейном ускорителе синхротрона. При сварке необходимо выдерживать оптимальные параметры ДСВ на каждом стыке (более 30 чашек) вертикально расположенного волновода (масса до 40 кг при длине до 1 м).

5. Разработана специализированная аппаратура ДСВ, позволяющая выдерживать по всей длине волновода для каждой чашки постоянство сварочного давления за счет взаимосвязи перемеще-

ния нагревателя и системы сжатия; постоянство времени сварки за счет размеров нагревателя, скорости его перемещения и применения технологических элементов на концах волновода; постоянство температуры нагрева путем дозированного снижения мощности источника нагрева по мере перемещения нагревателя сверху вниз. Разработанные технологии и аппаратура применяются при создании волноводных элементов инжектора линейного ускорителя Ереванского синхротрона.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Авагян В. Ш., Антонов В. П. Установка диффузионной сварки в вакууме : Тез. докл. XIII Всесоюз. научно-техн. конф. «Достижения и перспективы развития диффузионной сварки» — М.: МНДТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1990. — С. 74-75.
2. А. с. 1755481 СССР, МК В 23 К 20/26. Устройство для диффузионной сварки / Авагян В. Ш., Бабаян А. З.
3. Авагян В. Ш., Тунян И. В. Крупногабаритная вакуумная установка для диффузионной сварки и пайки изделий из меди. — Ереван, 1992. (Препр. / ЕрФИ; 1373(3)-92).
4. Положительное решение на заявку 5014707/08 (059160). Устройство для сварки давлением / Авагян В. Ш., Тунян И. В., Харченко Г. К. — Принято 03.07.91.
5. Авагян В. Ш. Сварка меди в твердой фазе. — Ереван, 1992. (Препр. / ЕрФИ; 1380(10)-92).
6. Авагян В. Ш., Бабаян А. З., Харченко Г. К. Оборудование и технология диффузионной сварки диафрагмированных волноводов. — Ереван, 1993. — 13 с. (Препр. / ЕрФИ; 1993(4)-93).

Личный вклад автора. В [1, 2, 3, 4] представлены экспериментальные работы по созданию нового типа устройства и установки ДСВ применительного к сварке длинномерных изделий; в [6] установлены закономерности влияния параметров процесса ДСВ, обеспечивающего получение соединений меди с минимальной остаточной деформацией.

ЛИБ им. В. Стефаняк
Ан Угвайк

Подп. в печ. 01.03.94. Формат 60x84/16. Бум. офс. №2.
Офс. печ. Усл.печ.л. 0,93. Усл.кр.-отт. 1,16 Уч.-изд.л.
0,96. Тираж 100 экз. Зак. 68. Бесплатно.

ИЗС им.Е.О.Патона.252650 Киев 5, ГСП, ул. Горького, 69.
ПОП ИЗС им.Е.О.Патона. 252650 Киев 5, ГСП, ул.Горького, 69.

170772

Бесплатно

Ав 29.462
Издана 2