

«ՔԵՆԴԼ» ՄԻՆԲՐՈՏՐՈՆԱՅԻՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Դանիելյան Վահե Ալեքսանդրի

**ԲԱՐՁՐ ԷՖԵԿՏԻՎՈՒԹՅԱՄԲ ԱՐԱԳԱՑՆՈՂ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ
ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ա.04.20 «Լիցքավորված մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի զիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

Մ Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ 2017

“КЕНДЛ” ИНСТИТУТ СИНХРОТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Даниелян Ваге Александрович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУР**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 01.04.20 “Физика
пучков заряженных частиц и ускорительная техника”

ЕРЕВАН 2017

Ատենախոսության թեման հաստատված է «Քենդլ» Մինքրոտրոնային
Հետազոտությունների Ինստիտուտում:

Գիտական ղեկավար՝

տեխնիկական գիտությունների դոկտոր Վ. Շ. Ավագյան

Պաշտոնական ընդիմախոսներ՝

Ֆիզմաթ գիտությունների դոկտոր, Է. Դ. Գազազյան

տեխնիկական գիտությունների թեկնածու, Ն. Վ. Մարտիրոսյան

Առաջատար կազմակերպություն՝

Ա. Ի. Ալիխանյանի անվան Ազգային Գիտական

Լաբորատորիա (Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտ)

Պաշպանությունը կայանալու է 2017թ. մայիսի 25-ին, ժամը 14-00-ին, «Քենդլ»
Մինքրոտրոնային հետազոտությունների Ինստուտուտի «Լիցքավորված
մասնիկների փնջերի ֆիզիկա և արագացուցչային տեխնիկա» ԲՈՀ-ի 021
մասնագիտական խորհրդում (Երևան -0040, Աճառյան փ. 31):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ «Քենդլ» ՍՀԻ>>- ի գրադարանում:
Սեղմագիրը առաքված է 2017թ. ապրիլի 21-ին:

Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար՝

Ֆիզմաթ գիտությունների թեկնածու  Գ. Ա. Ամատունի

Тема диссертации утверждена ученым советом “КЕНДЛ” ИСИ”

Научный руководитель:

доктор технических наук В. Ш. Авагян

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Э. Д. Газазян

кандидат технических наук Н. В. Мартиросян

Ведущая организация:

Национальная научная лаборатория им.


А. И. Алиханяна(ЕрФИ)

Защита состоится «25» мая 2017г. в 14:00 часов на заседании специализированного
совета ВАК 021 при “КЕНДЛ” Институт Синхротронных Исследований (Ереван-
0040, ул. Ачаряна 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке “КЕНДЛ” ИСИ”

Автореферат разослан 21-го апреля 2017г.

Ученый секретарь спец. совета

кандидат физико-математических наук  Գ. Ա. Ամատունի

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Настоящее время характеризуется развитием ускорительной техники нового поколения, приведшим к созданию уникальных ускорителей электронов на малых энергиях для фундаментальных и прикладных исследований сверхбыстрых процессов, работающих с фотокатодом при помощи лазерного возбуждения. Достаточно отметить некоторые из них: линейный ускоритель REGAE, построенный в институте DESY (Германия) как источник электронов с энергией 2-5 МэВ для исследования электронной дифракции на различных материалах; VELA (Versatile Electron Linear Accelerator), ранее известная как EBTF (Electron Beam Test Facility) - лаборатория STFC в Дарсбери (Великобритания), с энергией 6 МэВ аналогично с возбуждением фотокатода лазером Ti:Saph(титан-сапфировый лазер), имеющая две экспериментальные станции для научных и промышленных применений.

Линейный ускоритель AREAL (Advanced Research Electron Accelerator Laboratory) с ВЧ пушкой и лазерным возбуждением обеспечивает электронные импульсы с энергией 2-5 МэВ и зарядом сгустка 10-100 пКл. Ускоритель предназначен для экспериментов в области биологии и материаловедения. Его энергия в будущем будет доведена до 50 МэВ.

Потребность в субпикосекундных, низкоэнергетических импульсах, с чрезвычайно малым эмиттансом, возникающая в современных исследовательских проблемах, приводит к необходимости поисков новых технологических решений для различных систем и узлов ускорителя, в частности, для медных ускоряющих структур.

Наряду с существующими дисковыми и диэлектрическими структурами в последнее время разработаны новые типы ускоряющих структур. Одним из перспективных направлений является разработанная в CANDLER двухслойная металлическая цилиндрическая структура – медный цилиндрический волновод с тонким внутренним германиевым покрытием. Генерируемая в подобной структуре, медленно распространяющаяся собственная мода, обеспечивает одномодовый режим ускорения.

В этой связи развитие технологии тонкослойного равномерного германиевого напыления на внутреннюю поверхность медного цилиндра, а также на плоскую медную пластину, приобретает важное значение.

Цель работы. Разработка технологии и оборудования для изготовления медной ускоряющей структуры, а также одномодовой биметаллической структуры(Cu-Ge).

Основные задачи настоящей диссертационной работы:

1. Разработка технологического процесса обработки деталей ускоряющей структуры, с обеспечением в процессе обработки медных

деталей эффективного охлаждения и удаления стружек из зоны обработки.

2. Проведение исследования тепловой деформации расчетным и экспериментальным путем для фиксации двух медных чашек, с применением штифта близким коэффициентам термического расширения, выбор материала и соответствующей конструкции.
3. Разработка технологического процесса пайки медных деталей в вакууме, исследование оптимального зазора между деталями для затекания припоя, а также расстояния затекания припоя от края внутреннего объема.
4. Разработка и изготовление новой технологической установки для пайки ускоряющей структуры в вакууме.
5. Разработка технологии тонкопленочного покрытия низко проводящим материалом на медной подложке для использования в двухслойном металлическом волноводе. Разработка и изготовления экспериментального устройства(резонатор) для исследования наличия резонансных частот сравнительно к расчетным.

Научная новизна.

1. Показано, что для обеспечения качественной механической обработки поверхностей необходимо применять дополнительные методы для охлаждения и удаления стружки из зоны обработки.
2. Установлен основной критерий для фиксации каждой последующих деталей ускоряющей структуры.
3. Разработана новая технологическая установка для пайки ускоряющей структуры в вакууме, обеспечивающей качество получаемых изделий с учетом перемещения теплового поля, соответственно теплопроводности меди и необходимого уровня давления (сжатия) по высоте изделий.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка технологического процесса обработки деталей ускоряющей структуры с применением новых методов. В процессе обработки медных деталей обеспечивается эффективное охлаждение и удаление стружек из зоны обработки.
2. Результаты исследований тепловой деформации при фиксации высокоточных деталей ускорительной техники, их позиционирования друг относительно друга при пайке в вакууме.
3. Разработка и внедрение новой технологической установки для пайки ускоряющей структуры в вакууме, обеспечивающее контролируемое перемещение теплового поля соответственно теплопроводности меди и необходимого уровня давления сжатия по высоте изделий.
4. Экспериментальные исследования резонансного свойства биметаллического медно-германиевого резонатора.

Практическая ценность. В работе решены новые технологические процессы и создано оборудование для различных систем и узлов ускорителя. Результаты работы использованы в линейной ускорителе «AREAL».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах “КЕНДЛ” ИСИ, а также на следующих международных конференциях:

- International conference “Advanced materials and technologies”, 21-23 October, 2015 Tbilisi, Georgia;
- 4 International conference “CURRENT PROBLEMS OF CHEMICAL PHYSICS” 5-9 October 2015, Yerevan.

Публикации по теме диссертации. Результаты диссертационной работы отражены в 9 научных публикациях (в том числе 1 патента).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 94 наименований. Диссертация представлена на 132 страницах, содержит 75 рисунков и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы и представлено ее краткое описание, научная новизна и ее практическая ценность, сформирована цель исследования, показана структура и содержание диссертации.

В первой главе представлен электронный линейный ускоритель AREAL 5 МэВ с фотокатодом, который был предложен и спроектирован в Синхротронном исследовательском институте CANDLE. Он направлен на обеспечение базы для углубленного экспериментального исследования в области ускорительной техники и динамики сверхбыстрых процессов. Представлена конструкция линейного ускорителя AREAL и его основные системы. После успешного завершения первого этапа возникла потребность увеличения энергии и доведения его от 5МэВ до 50 МэВ.

Проведенный анализ литературных данных в области изготовления современных медных ускоряющих структур показывает, что в последнее время значительно увеличилась их потребность в технике, к настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал о закономерностях образования соединения медных ускоряющих структур. Они должны обладать важнейшими свойствами: высокой проводимостью, высокой точностью механической обработки поверхностей, высокой прочностью, пластичностью, вакуумной герметичностью, сохранением исходных размеров (внутренний объем не должен быть изменен) деталей.

В соответствии с изложенными выводами из литературного обзора сформулирована основная задача исследования.

Во второй главе приведен перечень материалов, а также сплавов, используемых в работе, их свойств, описаны технологические параметры оборудования, методика подготовки образцов, их моделирование для обработки на специальных программированных станках с использованием DELCAM Power Mill программ. Очистка готовых деталей обрабатывалась на ультразвуковых оборудованьях. Пайка образцов выполнялась в вакуумной печи СГВ и на лабораторной диффузионной сварочной установке. Кроме этого интерес к слоистым биметаллическим изделиям в ускорительной физике и технике возник в связи с теоретическим обоснованием явления резонанса в цилиндрическом двухслойном металлическом волноводе с высокопроводящей толстой внешней стенкой и тонким низкопроводящим внутренним покрытием: резистивное излучение, возникающее при пролете вдоль его оси заряженной частицы, формируется единственной медленно-распространяющейся модой TM₀₁ (ее фазовая скорость близка к скорости света в вакууме) и обладает единственным узкополосным резонансом в высокочастотной области спектра. Необходимо отметить, что как

альтернативу нужно рассмотреть вопрос покрытия меди материалом с низкой проводимостью.

Германиевые пленки были получены методом термического испарения в высоком вакууме $P = 1.3 \cdot 10^{-6}$ Па при температуре конденсаций 150, 200, 250°C. Образцы были получены в камере высоко-вакуумного напыления, созданной на базе модернизированной установки УВН-71-ПЗ.

Третья глава диссертации посвящена расчетно-экспериментальным исследованиям технологических процессов.

Для пайки с припоем ПСр -72 изготовили образцы из меди М1 диаметром 25 мм.

Исследование проводили в двух вариантах:

- между поверхностями установили фольгу 50 мкм;
- на углах сборочных паяемых медных деталей изготовили канавку и зазор для затекания припоя.

В первом варианте, использование серебряной фольги в данном случае необходимо было прикладывать небольшое давление для локализации пластической деформации, в этом случае лишней припой выходит в рабочий объем детали, который нежелателен.

Во втором варианте чем больше угол наклона, тем больше пустота вокруг канавки (рис.1).

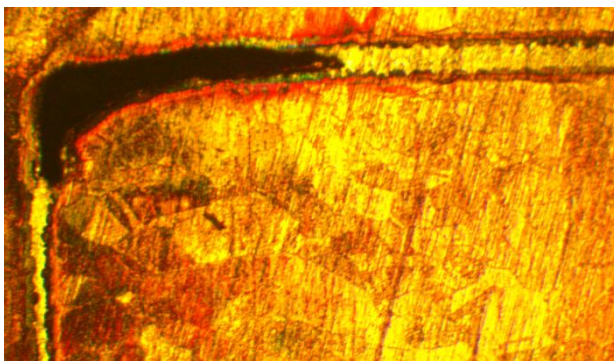


Рис.1. Микроструктура зоны пайки (медь+ПСр 72+ медь) x 50

Исследования показали, что в нашем случае оптимальный зазор для затекания припоя составляет 0,07 мм. Пайки с деталей и место расположения канавок для припоя разрабатывались соответственно по принципу изготовления канавки для припоя внутри, где вложенный припой быстро затекает в суживающийся зазор, так как давление заполнения увеличивается

при уменьшенной ширине зазора. Детали следует собрать зазором, суживающимся в направлении течения припоя.

В ускорительной технике используются различные типы ускоряющих структур. Одним из важнейших задач при сборке и пайке ускоряющих структур является точность позиционирования элементов друг относительно друга. При этом данная задача решена для случая одиночного концентричного центрального отверстия. Для всех же остальных она требует индивидуального подхода для каждого типа.

Для решения задачи позиционирования структур друг относительно друга при пайке, а также препятствия их взаимного перемещения предлагается использование штифтования структурных элементов. Штифты для предотвращения нарушения геометрии предполагается располагать на плоскости для пайки. При нагреве в вакуумной печи позиционирование может быть выполнено снаружи, при индукционном нагреве - должно быть установлено изнутри (рис.2). Штифты используются из нержавеющей стали 316L диаметром 3 мм. Для позиционирования каждой пары ускоряющих структур применяется 2 штифта. При пайке все основные компоненты нагреваются и изменяют свои размеры. За счет различных коэффициентов термического расширения между элементами возникают поля напряжений сжатия, которые при достаточно больших значениях могут приводить к необратимым искажениям формы.

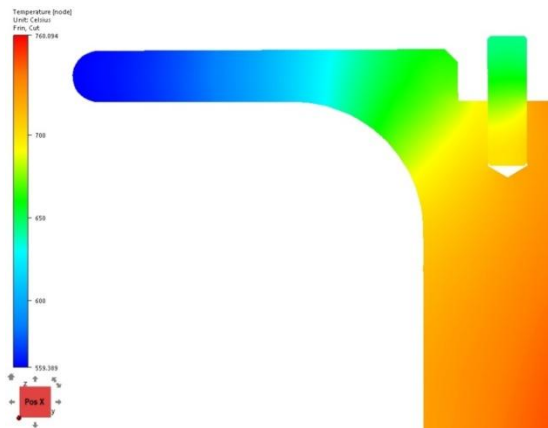


Рис. 2. Распределение температуры по поперечному сечению

Для определения полей напряжения, которые возникают в месте контакта штифта с ускоряющей структурой, было проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов. В связи со значительно

малыми размерами штифта по сравнению с ускоряющей структурой, взаимным влиянием штифтов друг на друга можно пренебречь.

На рис.2 представлено распределение температурного поля по поперечному сечению ускоряющей структуры со штифтом.

Анализ проводился для определенного периода прогрева ускоряющей структуры, который составлял 2700 с. При этом конечная температура принималась на уровне 700 °С. Такая температура была принята исходя из свойств материала, для которого проводилась оценка (медь). При температуре более 700 °С медь становится достаточно мягким материалом, что приводит к снижению напряжений на поверхности отверстия за счет интенсивной рекристаллизации.

Четвертая глава посвящена разработке аппаратуры и технологическим рекомендациям для изготовления ускоряющей структуры.

Для проведения анализа по распределению и контролю температуры при пайке длинномерных ускоряющих секций с использованием индукционного нагрева было проведено компьютерное моделирование. Расчеты проводились для максимального количества структур, которые можно одновременно разместить в кварцевой камере установки для пайки. Максимальное время нагрева начальной стадии было принято 2700 с. В результате были получены данные о распределении температурного поля по высоте колонны. Графики изменения температуры по местам пайки представлены на рис.3. Математическое моделирование позволило разделить данные на стадии, в зависимости от времени выдержки.

Анализ данных показывает, что для малой выдержки времени (100 и 200 с) на верхних структурах прогрев последующих структур незначительный и распространяется до 9-14 чашки. При увеличении времени выдержки проникновение теплового потока за счет теплопроводности возрастает. Но существует определенный момент времени, при котором интенсивность проникновения температуры по высоте колонны существенно снижается и с ростом времени практически не меняется. Из рисунка видно, что таким моментом времени является интервал между 900 и 1000 с выдержки. При тепловой выдержке более 1000 с процесс прогрева колонны можно считать статическим, при этом в учет не берется постепенный прогрев нижних структур до температуры 60-100 °С.

Одной из важнейших задач процесса пайки является установление скорости перемещения индуктора по колонне для получения равномерного прогрева по всей высоте. Для решения данной задачи используем полученные данные о распределении температуры по высоте колонны.

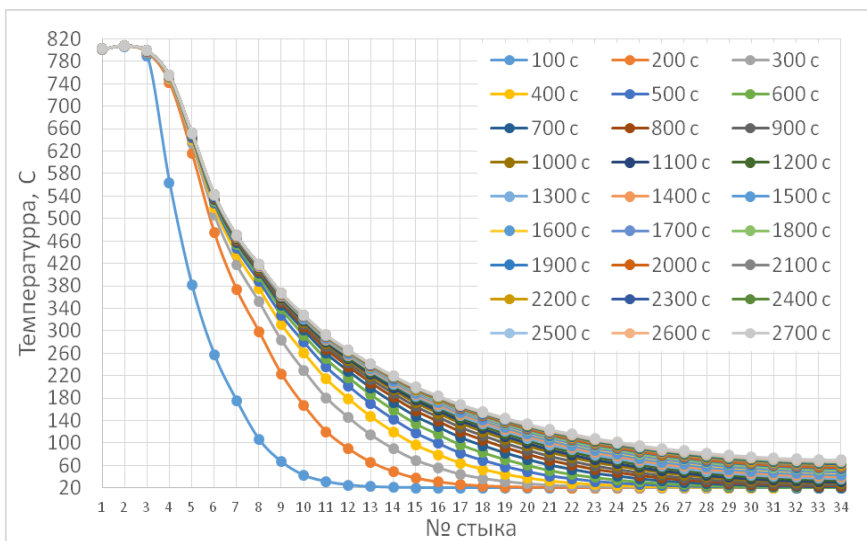


Рис. 3. Изменение температуры по высоте колонны

В качестве определяющего параметра примем количество теплоты, передаваемое индуктором определенному объему металла. Для различной выдержки времени получим скорость передачи тепла Q/t в каждом конкретном случае. Также к расчетам необходимо добавить скорость распространения тепла $\Delta Q/t$ за счет теплопроводности. Перечисленные выше факторы позволяют получить уравнение для расчета скорости перемещения индуктора в зависимости от степени выдержки.

$$V_{инд} = \frac{L}{\frac{Q'}{n \cdot c_{cu} \cdot \Delta T \cdot m_{cu}/t}} + \frac{Q^{max} - Q_{n+1}}{3},$$

где L – длина индуктора; n – количество одновременно нагреваемых структур; c_{cu} – теплоемкость меди; m_{cu} – масса одновременно нагреваемых структур; t – время выдержки; Q' – количество тепла необходимое для нагрева каждой последующей чашки, Q^{max} – максимальное количество тепла необходимое для нагрева одной чашки от минимальной температуры до заданной; Q_{n+1} – количество тепла, получаемое за счет теплопроводности.

Результаты расчетов скорости перемещения индуктора представлены на рис.4.

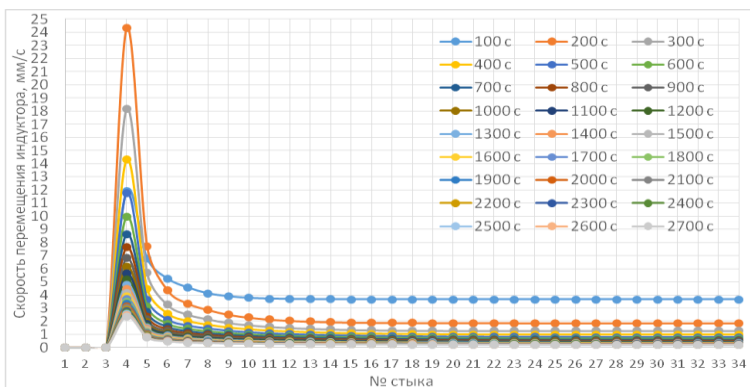


Рис. 4. Изменение скорости перемещения индуктора

В процессе пайки ускоряющих структур решающую роль, для получения качественных изделий, играет предварительное сжатие элементов. Величина прижима определяет полное закрытие замка, что предотвращает попадание припоя во внутреннее пространство ускоряющей структуры. Выбор силы для сжатия является актуальной задачей в вопросах получения ускоряющих структур. Как видно из рис.5 процесс деформации на контакте между двумя структурами можно разделить на две составляющие: упругое и пластическое смещение.

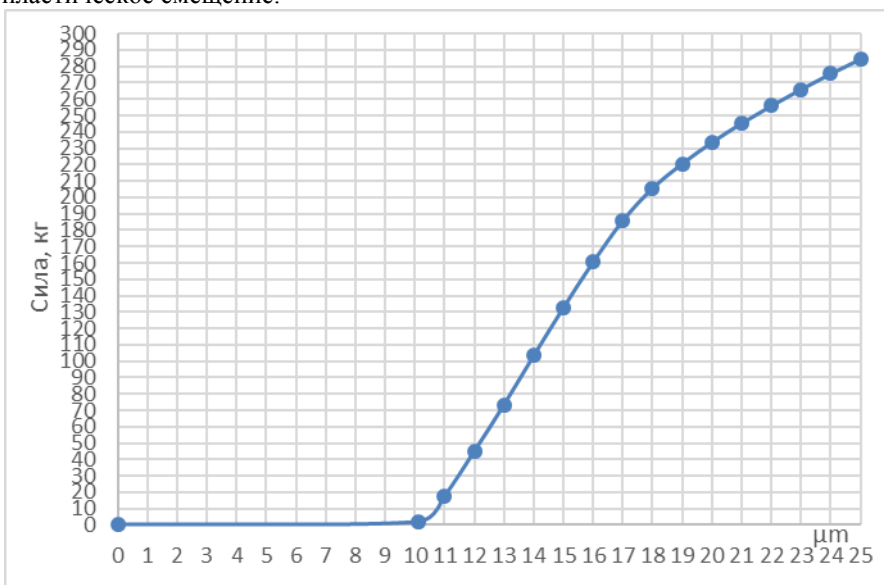


Рис.5. Величина силы в зависимости от перемещения прижима

На кривой, для каждого участка, имеются соответствующие признаки. До значения в 185 кг сила изменяется пропорционально перемещению (прямолинейный участок диаграммы), что соответствует упругой деформации на контакте. После преодоления значения в 185 кг начинается пластическая деформация, о чем свидетельствует непропорциональность изменения силы и перемещения (криволинейный участок диаграммы).

Следовательно процесс пайки целесообразно вести с силой прижима, которая не будет превышать 185 кг. Это позволит сохранить внутренние геометрические размеры ускоряющих структур после пайки за счет упругого последствия.

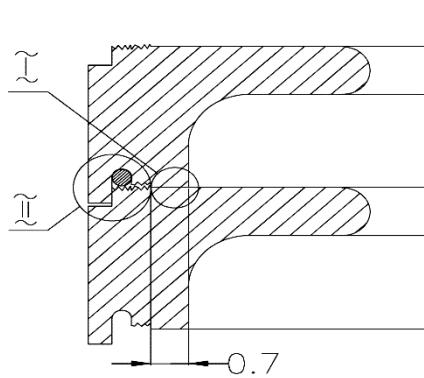


Рис.6. Разработанный чертеж стыка паяных медных чашек

На рис.6 показан разработанный стык медных чашек, который условно разделен на две части: I-я часть служит барьером для протекания жидкого припоя в рабочую область ускоряющей структуры; II-я часть обеспечивает образование пайки серебром без деформации медных деталей, поскольку отсутствует внешнее давление.

На рис.7 показана металлографическая структура для зоны соединения в участке I. Из структуры видно полное закрытие замка и место остановки расплавленного припоя.

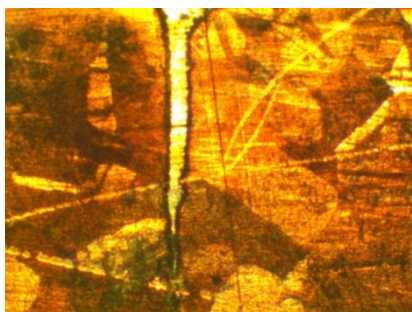


Рис.7. Микроструктура зоны пайки (медь+ПСр 72+ медь)х200

Пайка медных ускоряющих структур проводилась в вакууме $P = 1,3 \cdot 10^{-5}$ Па припоем ПСр-72, при давлении сжатия $0,45 \text{ кг/мм}^2$ на всю площадь паяных чашек для обеспечения необходимого контакта паяных ускоряющих структур. Свои первоначальные размеры изменяются в порядке 16 мкм .

Разработанная установка позволяет обеспечить оптимальный режим пайки в стыке каждой двух чашек по всей длине ускоряющей структуры (рис.8).

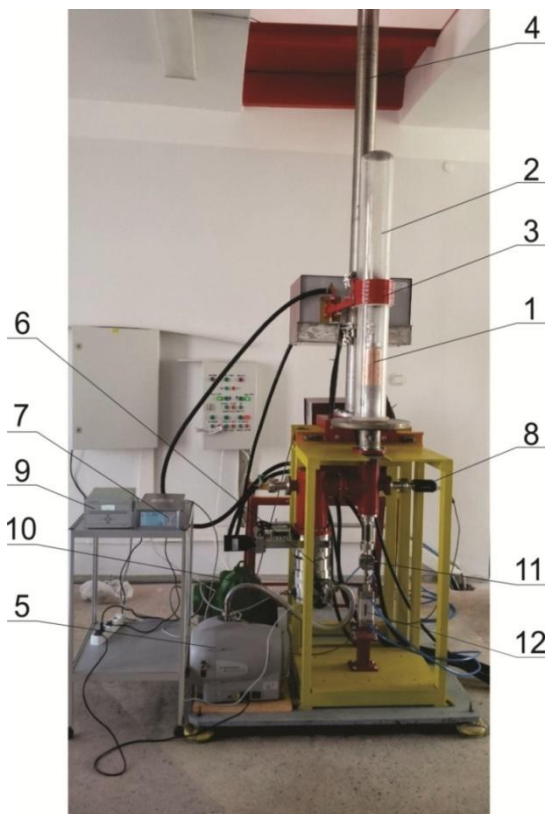


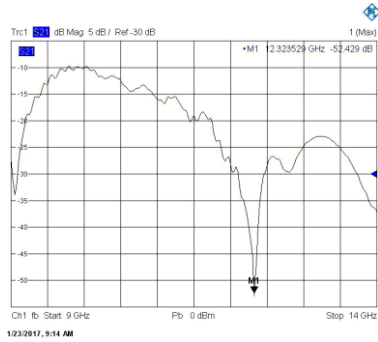
Рис.8. Установка для вакуумной пайки ускоряющих медных структур: 1 - ускоряющая структура, 2 - кварцевая камера, 3 - индуктор, 4 - направляющая, 5 - форвакуумный насос, 6 - турбомолекулярный насос, 7- контроллер вакуумметра, 8 - вакуумметр, 9 - контроллер турбомолекулярного насоса, 10 - редуктор для перемещения индуктора, 11 - динамометр, 12 - пневматический цилиндр

Постоянство давления обеспечивается системой управления пневмоцилиндра, снижающим нагрузку по мере перемещения нагревателя сверху вниз; а также учитывается перемещение теплового поля соответственно теплопроводности меди. Качества паяных ускоряющих структур проверили

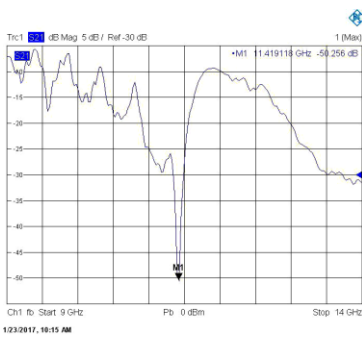
измеряя вакуумную герметичность, в том числе радиодинамические измерения.

Для измерения частоты одномодового резонатора с помощью векторного сетевого анализатора был поставлен эксперимент по измерению коэффициента передачи S_{21} , S параметра резонатора. В качестве биметаллического резонатора был изготовлен медный прямоугольный волновод с внутренним покрытием верхней и нижней стенок слоем германия $d=1\text{мм}$. Разработанное устройство (резонатор) имеет возможность изменения расстояния между вертикальными стенками, покрытыми германием, для изменения частоты основной моды ($a = 2, 3, 4\text{ см}$, где a -расстояние между вертикальными стенками), длина и ширина резонатора 30см и 6см соответственно. Проводимость слоя германия $\sigma = 2\ \Omega^{-1}\text{м}^{-1}$ и диэлектрическая константа $\epsilon' = 16\epsilon_0$. Выбор толщины слоя германия и размеров между вертикальными стенками обусловлен шириной полосы измеряемых частот сетевого векторного анализатора, которая составляет 14ГГц . Для вышеупомянутых размеров глубина скин-слоя на резонансной частоте больше глубины слоя германия более чем в 3 раза ($\delta/d > 3$). Прогнозируемые резонансные частоты для расстояний $a = 4, 3, 2\text{ см}$, соответственно составляют $9.9, 11.3, 12.65\text{ ГГц}$.

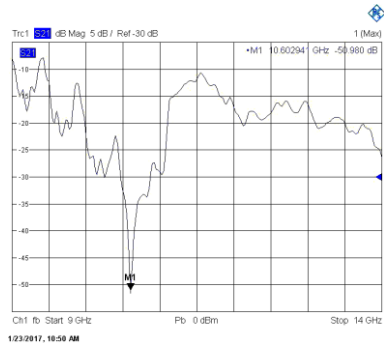
В результате эксперимента с помощью сетевого векторного анализатора был измерен коэффициент передачи изготовленного биметаллического резонатора для расстояний между стенками $2, 3, 4\text{ см}$. Свойственные резонансы наблюдались при частотах $f = 10.6, 11.42, 12.32\text{ ГГц}$ для $a = 4, 3, 2\text{ см}$ соответственно. Как видно из сравнения теоретически рассчитанных и измеренных частот относительная разница составляет меньше 1%. Результаты измерений приведены на рисунке 9. На рисунке приведены потери по логарифмической шкале в зависимости от частоты $I_{\text{loss}} = -20 \log |S_{21}|$ (dB) помеченной как M1.



$a = 2$ см



$a = 3$ см



$a = 4$ см

Рис.9. Коэффициент передачи S_{21} для медного резонатора со внутренним германиевым покрытием $d = 1$ мм, для расстояний между стенками $a = 2, 3, 4$ см.

ВЫВОДЫ

1. Разработан технологический процесс обработки деталей ускоряющей структуры. Обеспечено эффективное охлаждение и удаление стружек из зоны в процессе обработки медных деталей.
2. Расчетным и экспериментальным путем определены тепловые деформации для фиксации каждого последующих деталей ускоряющей структуры, с применением штифта близким коэффициентам термического расширения меди. В качестве материала штифта выбрана нержавеющая сталь 316 L и разработана соответствующая конструкция.
3. Разработан технологический процесс пайки медных ускоряющих структур в вакууме. Экспериментальным путем определен оптимальный зазор между деталями для затекания припоя. Обеспечивается образование соединения деталей с незначительным уровнем остаточной деформации, а так же обеспечивается полное закрытие замка, которая служит барьером для вытекания припоя в рабочее пространства ускоряющих структур.
4. Разработана и изготовлена новая технологическая установка для пайки ускоряющей структуры в вакууме, обеспечивающей перемещение теплового поля соответственно теплопроводности меди, необходимый уровень давления (сжатия) по высоте изделий, контроль качества ВЧ и сверхвысоковакуумных испытаний ускоряющей структуры.
5. Впервые экспериментально исследованы резонансные свойства биметаллического медно-германиевого резонатора. Установлено удовлетворительное совпадение с теоретическими расчетами.

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. V. M. Tsakanov, G. A. Amatuni, V. A. Danielyan et al., AREAL Test Facility for Advanced Accelerator and Radiation Source Concept, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 829, 284-290, 2016.
2. V. A. Danielyan., Developmnet of the vacuum brazing process of copper accelerating structures, Proc. of Engineering Academy of Armenia, V.13, N2, 304-307, 2016.
3. В. Ш. Авагян, В. А. Даниелян., Некоторые вопросы и технологические особенности изготовления ускоряющей структуры, Вестник инженерной академии Армении, Т.14, №1, 99-104, 2017.
4. A.A. Gevorgyan, V. Sh. Avagyan, V.A. Danielyan et al., Design & fabrication of the experimental diffusion welding machine, Proc. of International conference, Advanced materials and technologies, 21-30 October, 311-313, Tbilisi, Georgia, 2015.
5. В. Ш. Авагян, В. А. Даниелян, В. С. Дехтярев и др., Диффузионная сварка сегодня, Вестник инженерной академии Армении, Т.13, №2, 291-295, 2016.
6. Վ.Շ.Ավագյան, Վ.Ա.Դանիելյան, Վ.Ս.Դեխտյարով և այլք, Վակուումային զոդման սարք, Գյուտի արտոնագիր, 3025A, 1-5, 2016:
7. M. I. Ivanyan, V. A. Danielyan, B. A. Grigoryan et al., High frequency single mode traveling wave structures for particle acceleration, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 829, 187-189, 2016.
8. M. I. Ivanyan, V. Sh. Avagyan, V. A. Danielyan et al., On the resonant behavior of laminated accelerating structures, Jornal of instrumentation, 12, P03019, 2017.
9. В.А. Даниелян, В.С. Дехтярев, Т. Г. Мкртчян, Формирования тонких пленок германий на медных подложках, Вестник инженерной академии Армении, Т.14, №1, 121-123, 2017.

Դանիելյան Վահե Ալեքսանդրի
ԲԱՐՁՐ ԷՖԵԿՏԻՎՈՒԹՅԱՄԲ ԱՐԱԳԱՑՆՈՂ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ
ՍՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՅԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

ԱՍՓՈՓՈՒՄ

Վերջին տարիներին նախագծվում և կառուցվում են փոքր էներգիայով էլեկտրոնային արագացուցիչներ, որոնք լայնորեն կիրառվում են գերարագ պրոցեսների հետազոտության համար: Նրանք հիմնականում աշխատում են ֆոտոկաթոդի միջոցով՝ լազերային զրգման եղանակով, օրինակ «AREAL» գծային արագացուցիչը, որի էներգիան մոտ ապագայում պետք է բարձրացվի մինչև 50 ՄԷՎ: Այստեղից արագացնող կառուցվածքների ստացման նոր տեխնոլոգիական պրոցեսների մշակման անհրաժեշտություն է առաջանում:

Այս աշխատանքում կազմվել է արագացնող կառուցվածքների դետալների ճշգրիտ մշակման տեխնոլոգիա, որի մեջ ներառված է դետալների պատրաստման համար անհրաժեշտ օպտիմալ հովացման և տաշեղի հեռացման տեխնոլոգիական նոր հանգույց:

Ուսումնասիրվել է վակուումային միջավայրում մետաղների զոդումը հեղուկ փուլում: Ուսումնասիրությունները իրականացվել են վակուումային զոդման եղանակով (արծաթի բարակ զոդանյութով), ինչպես նաև մշակվել են հատուկ ակոսներ՝ զոդանյութի հոսունությունը ուղղորդելու նպատակով:

Հաշվարկային և փորձարարական եղանակներով ուսումնասիրվել են արագացնող կառուցվածքների առանձին էլեմենտների դիրքավորման խնդիրները, պղնձե դետալների ջերմային դեֆորմացիաները, որոնք դիրքավորվել են 316 L մակնիշի բույթով, որի ջերմային ընդարձակման գործակիցը մոտ է պղնձին:

Ուսումնասիրվել են ջերմաստիճանային դաշտի բաշխման և երկար արագացնող կառուցվածքների ինդուկցիոն տաքացուցիչի միջոցով զոդման վերլուծությունները:

Մշակվել է վակուումում պղնձե դետալների զոդման նոր տեխնոլոգիական գործընթաց:

Նախագծվել և պատրաստվել է արագացնող կառուցվածքների վակուումային զոդման տեխնոլոգիական նոր սարքավորում, իրականացվել են գերբարձր վակուումում պղնձե արագացնող կառուցվածքի որակի ստուգում, ինչպես նաև ռադիոդինամիկական չափումներ:

Փորձարարական եղանակով ուսումնասիրվել է միամոդային երկշերտ (Cu-Ge) արագացնող կառուցվածքի ռեզոնանսային հաճախականությունը և այն համեմատվել է հաշվարկային արդյունքների հետ:

Vahe Aleksandr Danielyan
**THE DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR HIGH-
EFFICIENCY ACCELERATING STRUCTURES**

SUMMARY

In recent years, low energy electron accelerators are being designed and constructed, which are widely used in the studies of ultrafast processes. They mainly work by means of a photocathode (by laser stimulation method). Such an example is AREAL linear accelerator, for which energy upgrade up to 50 MeV is planned. This stimulates the need for the development of new technological processes in accelerating structure production.

In this paper a precise machining technology for accelerating structure parts has been developed. It implies a new technological device of optimal cooling and chip removal, necessary for the production of cavities.

Vacuum metal brazing in liquid phase has been studied. The studies have been conducted by vacuum brazing (by thin silver brazing solder), as well as, special grooves have been designed to direct the brazing alloy flow.

By calculation and experimental methods positioning issues of separate elements in accelerating structures, thermal deformations of copper parts, which were positioned by a 316 L pin, the thermal expansion coefficient of which is similar to the one of copper, are investigated.

The analyses of temperature field distribution and brazing of longitudinal accelerating structures through induction heater have been studied.

A new technological process for the vacuum brazing of copper parts has been developed.

A new equipment for vacuum brazing of accelerating structures has been designed and developed, copper accelerating structure in ultra-high vacuum, as well as RF measurement tests have been carried out.

The resonant frequency of single-mode laminated (Cu-Ge) accelerating structure is experimentally studied and compared to the calculation results.

