

Ա.Ի. ԱԼԻԽԱՆՅԱՆԻ ԱՆՎԱՆ ԵՐԵՎԱՆԻ ՖԻԶԻԿԱՅԻ ԻՆՍՏԻՏՈՒՏ

Ազնայան Վարդան Շավարշի

ՃԵՂՐԻՑ ՄԻԱՅՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԴՐՈՑԵՍՆԵՐԻ
ՄԾԱԿՈՒՄ ԱՐԱԳԱՅՈՒԹՅԱՅԻՆ ՏԵԽՆԻԿԱՅՈՒՄ

Ա.04.20 - Լիցքավորված մասնիկների փոքրի ֆիզիկա և
արագացուցչային տեխնիկա մասնագիտությամբ տեխնիկական
գիտությունների դոկտորի գիտական
աստիճանի հայցման ատենախոսության

Ս Ե Ղ Մ Ա Գ Ի Ր

ԵՐԵՎԱՆ-2010

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.И. Алиханяна

Авагян Вардан Шаваршович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПОЛУЧЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ В
УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности

А.04.20 - Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

ЕРЕВАН-2010

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Получение прецизионных параметров пучка в современных ускорителях заряженных частиц - коллайдерах для физики высоких энергий, ускорителях для лазеров на свободных электронах, источниках для синхротронного излучения - является одной из важнейших и актуальных проблем для развития фундаментальных и прикладных экспериментальных исследований на таких установках [1-3]. Достижение проектных параметров пучка (энергия частиц, ток и фазовый объем пучка, стабильность и т.д) в таких ускорителях требует разработки и исследования новых технических решений для различных узлов ускорителя (ускоряющие секции, вакуумная камера, системы ввода и вывода частиц, системы генерации излучения, системы стабильного контроля температуры) [4-7,17] и технологических процессов их изготовления, обеспечивающих необходимые механические, термодинамические и электротехнические характеристики. Новые физические и технические решения для различных систем ускорителя сопровождаются, как усложнением конструктивных особенностей узлов ускорителя (изменяющаяся геометрия диафрагм ускоряющих секций, использование композиционных и разнородных материалов, включение дополнительных функциональных элементов), так и ужесточением требований на параметры систем (однородность соединений, чистота поверхности, прочность и жесткость конструкций и т.д.).

Решение этих проблем нетривиально и требует новых подходов к технологии изготовления ускоряющих структур, получения качественных соединений однородных и разнородных материалов с минимальными остаточными деформациями, исследования полученных соединений при различных режимах работы. Как следствие, разработка новых методов соединения материалов, обеспечивающих высокую точность и достаточную прочность конструкций, является одним из актуальных проблем при создании прецизионных установок в ускорительной технике.

Последнее десятилетие характеризуется бурным развитием ускорительной техники нового поколения, приведшим к созданию уникальных ускорителей электронов и протонов с энергией от нескольких миллиардов электронвольт (ГэВ) для нужд народного хозяйства (медицина, металлургия и т. д.) [1,14,18,4,5]. и до нескольких триллионов электронвольт для фундаментальных исследований в области ядерной физики [6, 7]. Достаточно отметить некоторые из крупных современных ускорителей, запущенных, строящихся или проектирующихся во многих центрах мира: LHC, SOLEIL, DIAMOND, FAIR, EXFEL, ILC, MAX-IV, CANDLE (Швейцария, Франция, Англия, Германия, США, Швеция, Армения). К основным узлам ускорителей относятся: ускоряющие секции,

Ատենախոսության թեման հաստատված է Ա. Ի. Ալիխանյանի անվ.
Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում:

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝
ֆիզ-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Է. Ս. Լազիև
տեխն.գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Վ. Դ. Կուզնեցով

տեխն.գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր
Ա. Կ. Սուլամանիդզե

Առաջատար կազմակերպություն՝ Սարատովի պետական տեխնիկական
համալսարան, ք. Սարատով

Պաշտպանությունը կայանալու է 2010թ. մարտի 12-ին՝ ժամը 14-00-ին Ա. Ի.
Ալիխանյանի անվ. Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում գործող ԲՈՀ-ի 024
մասնագիտական խորհրդում (հասցեն՝ Երևան-36, Ալիխանյան Եղբայրներ փող. 2,
հեռ. 341500):
Ատենախոսությունը կարելի է ծանոթանալ ինստիտուտի գրադարանում:
Սեղմագիրը առաքված է 2010թ. փետրվարի 11 -ին:

024 մասնագիտական խորհրդի
գիտական քարտուղար, ֆիզ-մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր *Յ. Դաթնա* Դ. Գազազյան

Тема диссертации утверждена в Ереванском физическом институте им. А. И. Алиханяна

Официальные оппоненты՝
доктор физ-мат. наук, профессор
Э. М. Лазиев
доктор техн. наук, профессор
В. Д. Кузнецов
доктор техн. наук, профессор
А. К. Суламанидзе

Издущая организация: Саратовский государственный технический
университет, г. Саратов

Защита состоится 12 марта 2010г. В 14-00 на заседании специализированного совета ВАК 024
при Ереванском физическом институте им. А.И. Алиханяна (адрес : ул. Бр. Алиханян, 2,
Тел. 341500).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.
Автореферат разослан 11-го февраля 2010г.

Ученый секретарь специализированного
Совета 024, доктор физ-мат. наук, профессор

Յ. Դաթնա

Э. Д. Газазян

представляющие собой медные диафрагмированные волноводы; вакуумные камеры для транспортирования элементарных частиц, системы ввода и вывода частиц.

Современная ускорительная техника выдвинула новые повышенные требования к технологическим процессам изготовления отдельных узлов и конструкций ускорителя. Ранее разработанные методы пайки и сварки плавлением не могут полностью удовлетворять этим требованиям. Возникла необходимость в изыскании способов сварки, обеспечивающих высокое качество соединяемых изделий однородных и разнородных материалов. Сварка разнородных металлов позволяет сэкономить дорогостоящие и дефицитные материалы, создавать наиболее рациональные конструкции узлов и изделий, уменьшая их массу и размеры, а в ряде случаев создавать совершенно новые конструкции, позволяющие эффективно изменять электродинамические характеристики узлов ускорителя.

Среди новых способов сварки металлов в ускорительной технике особое место занимает диффузионная сварка в вакууме, которая позволяет решать многие задачи соединения однородных и разнородных металлов, осуществление которых с помощью пайки или сварки плавлением затруднено или невыполнимо [13]. Особенностью этого процесса является возможность соединения металлов без расплавления в вакууме, в условиях, исключающих загрязнение стыкуемых поверхностей вредными примесями и газами. При разработке соответствующих технологий диффузионная сварка в вакууме позволяет получать соединения с минимально допустимой пластической деформацией.

Несмотря на то, что исследованиями в данном направлении занимается большой круг ученых, проблема настолько многообразна и сложна, что в настоящее время еще недостаточно изучены физико-химические процессы, происходящие в зоне соединяемых материалов, нет единого взгляда на закономерности влияния параметров сварки на характер изменения пластической деформации в сварных соединениях из меди, недостаточно разработаны технологии и аппаратура для сварки длинномерных ускоряющих секций. Это ограничивает решение ряда важных технических задач в ускорительной технике и других отраслях.

Цель работы: Разработка технологий и аппаратуры для изготовления цельносварных длинномерных ускоряющих секций из меди методом диффузионной сварки в вакууме, новых способов технологической сварки давлением разнородных металлов с ограниченной взаимной растворимостью в изделиях ускорительной техники, обладающих высокими эксплуатационными свойствами.

При решении поставленных задач исходные данные и предпосылки базировались на результатах теоретических и экспериментальных

исследований в областях сварки давлением таких ведущих ученых как: С.Б. Айбиндер, А. А. Бочвар, К. К. Хренов, Ю. Л. Красулин, М. Х. Шоршоров, Э.С. Каракозов, Н. Ф. Казаков, Г. В. Конюшков, Р. А. Мусин, Г. К. Харченко, В. П. Алехин, В. А. Бачин и другие.

Научная новизна. Установлены закономерности образования соединения при диффузионной сварке меди в вакууме в зависимости от параметров процесса и качества предварительной механической обработки поверхности. Показано, что для получения соединений с остаточной деформацией не более 0,07% предварительная механическая обработка поверхности должна быть на уровне $Ra = 0,025$ мкм [15, 16].

Установлено, что при перемещении источника нагрева вдоль ускоряющей секции, характер распределения теплового поля определяется условиями нагрева первых элементов секции.

Впервые показано, что для обеспечения пластической деформации каждой диафрагмы ускоряющей секции не более 0,07 %, необходимо стабилизировать сварочное давление по всей длине вертикально установленных ускоряющих секций за счет корреляции системы сжатия с перемещением нагревателя. Новый подход позволяет компенсировать дополнительное давление, обусловленное массой ускоряющих секций, расположенных выше свариваемого стыка [3, 16].

Разработано новое сварочное оборудование и сборочно-сварочная оснастка для реализации технологического процесса сварки ускоряющих секций в вакууме. Разработана система контроля качества в процессе сварки [9, 24].

Установлен механизм образования соединения нагретой детали с ненагретой металлической прослойкой при мгновенном процессе взаимодействия. Показано, что применение такого метода позволяет сохранить первоначальные свойства металлической прослойки [8, 26].

Исследована кинетика процесса образования соединения низкотемпературной диффузионной сваркой химически активных и тугоплавких металлов, определены условия получения сварного соединения [27].

Разработана новая технология диффузионной сварки и устройство для сварки тонкостенных изделий из однородных и разнородных материалов [9, 22].

Установлены закономерности образования соединения при диффузионной сварке трубчатых переходов разнородных материалов, работающих в широком диапазоне температур и при различных условиях нагружения [23].

На защиту выносятся:

1. Разработанные методы и экспериментальные результаты исследований сварных соединений из меди, влияния параметров режима сварки и качества подготовки поверхности на пластическую деформацию соединений, позволяющие определить оптимальный режим сварки [15].
2. Полученные распределения теплового поля по длине ускоряющих секций, позволяющие прогнозировать температурно-временные условия формирования сварного соединения для каждой диафрагмы ускоряющих секции [3,23].
3. Технологические процессы диффузионного соединения в вакууме диафрагмированных медных ускоряющих секций, обеспечивающих высокое качество изделия и разработанная новая специализированная сварочная аппаратура [2,3,8,16].
4. Результаты исследований процесса взаимодействия разнородных материалов при различных методах соединения, которые позволяют определить оптимальные условия сварки [23,26,27].
5. Разработана новая технология и метод диффузионной сварки с помощью металлической прослойки, позволяющие сохранять в процессе сварки физико-химические свойства прослойки [9, 22].
6. Новый метод диффузионного соединения материалов, позволяющий обеспечить качество сварки переходных трубчатых элементов и расширение номенклатуры соединяемых материалов [10,11,25].

Практическая ценность. На основании проведенных исследований разработаны технологические процессы, специализированные установки и устройства для диффузионного соединения изделий ускорительной техники. Результаты работы использованы для ускорителей Ереванского физического института АРУС, ЛУЭ-20, ЛУЭ-5, в разработке детектора АТЛАС (CERN), для ускорителя TESLA (DESY), в конструкции магнитов для НИИЯФ МГУ, а также в разработке вакуумной системы накопительного комплекса CANDLE. Справка об использовании результатов и акты внедрения приведены в приложении к диссертации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих международных конференциях :

Европейские конференции по ускорителям (EPAC 2000, EPAC 2002, EPAC 2004),

Национальная конференция США по ускорителям (PAC 2005),

Конференция по аппаратуре синхротронных источников (SRI 2006) ,

Перспективы развития сварочного производства (ДГМА 2009 г. Краматорск), а также на семинарах в ЕрФИ, Институте электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев, ХФТИ г. Харьков, ГГТУ, г. Тбилиси.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 27 научных публикациях (в том числе 3 патента и 1 изобретение); 10 работ опубликованы без соавторов; 26 работ опубликовано после защиты кандидатской диссертации.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 211 стр., включая 9 таблиц, 78 рисунка и список литературы из 167 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, научная новизна и ее практическая ценность, сформулирована цель исследования, показана структура и содержание диссертации.

В первой главе диссертации обобщены зарубежные достижения в области теории и технологии соединений однородных и разнородных материалов в ускорительной технике и рассмотрены особенности диффузионной сварки и проблемы изготовления ускоряющих секций из меди.

Высокая точность, с которой должна быть изготовлена ускоряющая секция - сложная технологическая задача. Она решается рядом методов. Например, при использовании метода гальванического наращивания, первоначально с высокой точностью изготавливают сборную алюминиевую матрицу с профилем, соответствующим конфигурации внутренней полости ускоряющих секций. Затем в электрической ванне на матрицу осаждают толстый слой меди, после чего алюминий вытравливают химическим путем и заготовка ускоряющих секций освобождается [8]. Недостатками таких ускоряющих секций являются сложность технологии, малая плотность, неравномерность поверхности, невозможность получения длинномерных ускоряющих секций.

В некоторых случаях для изготовления ускоряющих секций применяют калиброванные медные трубы. Монтаж диафрагм в них осуществляют методом тепловой посадки: диафрагмы охлаждают жидким азотом и затем размещают в трубе. Недостатками таких ускоряющих секций является низкая прочность соединения и плохой электрический контакт.

Для изготовления высокоточных деталей замедляющих структур применяется диффузионная сварка в оправках. При этом усилие сжатия

свариваемых деталей возникает при нагревании системы "оправка-изделие" за счет разницы коэффициентов линейного расширения материалов свариваемых деталей и оправки. Недостатками такой технологии являются: невозможность получения регулируемого и четко фиксируемого уровня удельного давления, практически одноразовое использование специальных оправок и невозможность изготовления прецизионных деталей больших размеров.

Наиболее распространена технология производства паяных ускоряющих секций. Конструкцию ускоряющих секций набирают из отдельных точно изготовленных медных диафрагм, имеющих вид короткого стакана с отверстием в центре дна. После тщательной центровки диафрагм их припаивают током высокой частоты в вакууме. В качестве припоя используется серебро. Необходимо отметить, что при изготовлении паяных изделий особенно важно качество сборки под пайку, при которой должны быть гарантированы зазоры для заполнения их жидким припоем. Недостатками данного метода являются: трудность обеспечения постоянства установочного давления между паяными диафрагмами по всей длине, что приводит к неравномерной деформации; вытеканию серебра в рабочую область или образованию пустот в зоне соединения.

Известные способы изготовления медных ускоряющих секций имеют существенные недостатки, которые обусловлены невозможностью регулирования удельного давления и применением припоев, состоящих из дорого-стоящих материалов.

Анализ общего состояния вопроса диффузионной сварки меди показал, что нет единого мнения по вопросу выбора оптимальных режимов сварки, обеспечивающих формирование соединения с очень малой величиной остаточной пластической деформацией [19].

Что касается проблемных вопросов сварки давлением разнородных металлов, обладающих ограниченной взаимной растворимостью, применительно к ускорительной технике, то они до настоящего времени изучены недостаточно. Образование в зоне контакта в определенных температурно-временных условиях интерметаллидов, карбидов, низкотемпературных эвтектик, неоднородность физико-химических и металлических свойств соединяемых металлов создают большие трудности на пути разработки технологий сварки давлением титана с нержавеющей сталью, стали с нержавеющей сталью, нержавеющей стали с медью, меди с алюминием и эксплуатации таких соединений.

Известные способы сварки давлением и разработанные технологии не всегда могут решать проблемы изготовления биметаллических узлов, работающих в особых условиях изменяющейся температуры, рабочей среды и, особенно, работающих в широком диапазоне температур от 4,2 К до 300 К.

В соответствии с поставленной целью в работе ставились и решались следующие задачи:

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

2. Экспериментальная и расчетная оценка условий формирования соединения методом диффузионной сварки в вакууме цельносварных длинномерных ускоряющих секций с минимальным уровнем остаточной пластической деформации.

3. Разработка специализированной аппаратуры для сварки изделий ускорительной техники длиной до 1 м.

4. Разработка специализированной аппаратуры для сварки ускоряющей секции неограниченной длины с последующим неразрушающим контролем качества сварного изделия в процессе сварки.

5. Исследование и разработка технологических процессов сварки давлением разнородных материалов, исследование условий выбора материала и толщин прослоек, обеспечивающих образование работоспособных сварных соединений в узлах и системах ускорительной техники.

6. Исследование микротвердости в зоне сварки разнородных материалов, получение соединения в твердой и в жидкой фазе и выбор оптимального метода сварки, который обеспечивает пластичность соединения и эксплуатационные требования конструкции.

7. Разработка низкотемпературного (температура рекристаллизации) диффузионного соединения ниобия с титаном в интервале температур $0,4 \div 0,5$ Тпл. свариваемых металлов.

8. Разработка новых методов соединения тонких металлических прослоек, определение критериев оценки уровня внутренних напряжений в сварных конструкциях из разнородных материалов с учетом физико-механических, технологических и эксплуатационных характеристик.

Во второй главе приводится обзор исследуемых материалов и их подготовки, а также методов исследования, применяемых в работе [19]. На качество сварных соединений наиболее вредное влияние оказывают содержащийся в меди кислород. 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 меньшей температуры плавления меди). Температура плавления закиси меди (не в виде эвтектики) 1508 К, т. е. выше температуры плавления меди.

Следует отметить, что после обработки давлением эвтектика ($\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$), которая располагается на границах зерен и имеет точечное строение, разрушается, и в деформируемой меди кислород присутствует уже в виде обособленных включений закиси меди. Однако благодаря влиянию наклепа медь имеет высокий предел прочности при растяжении и

малое относительное удлинение перед разрывом, а также обладает твердостью и упругостью при изгибе, но ее проводимость уменьшается.

После проведения вакуумного отжига получается мягкая медь, которая сравнительно пластична, имеет малую твердость и небольшую прочность, но весьма большое удлинение перед разрывом и более высокую удельную проводимость.

Зная особенности газовыделения металлов в вакууме мы можем оценить механизм очистки поверхности от оксидов. В работе Найдича Ю.В. установлено [9], что с поверхности меди при термическом обезгаживании 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 материала деталей. Согласно предположению Слепухи В. Т., освобожденные в процессе восстановления оксида атомы металла участвуют в формировании твердофазного соединения.

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

Экспериментальные исследования проведены в ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины на установке У-394, и в Ереванском физическом институте им. А. И. Аликханяна на установке МДВ 301.

Для проведения исследований диффузионной сварки были изготовлены образцы диаметром 18 мм., длиной 30 мм. Стыкуемые поверхности образцов обрабатывались алмазными резцами до шероховатости $R_a = 0,025 \mu\text{м}$., параметры шероховатости поверхности измерялись прибором "Профилограф-профилометр 252".

Для предотвращения окисления после механической обработки образцы хранились в вакуумной камере. Геометрические размеры образцов и изделий измерялись прибором "Микроскоп измерительный универсальный УИМ-23".

Механические свойства сварных соединений оценивались по результатам испытаний на разрывной машине РТ-250М и измерениям микротвердости в зоне соединения с помощью прибора ПМТ-3 для оценки твердости отдельных фаз или структурных составляющих сплавов.

Для металлографического анализа использовался оптический микроскоп МИМ-8М и электронный оптический микроскоп "Стероскан S4-10". Герметичность сварных образцов изделий испытывалась с помощью гелиевого масспектрометрического течеискателя ПТИ-10. Контроль электрофизических параметров цельносварной ускоряющей секции осуществлялся методом радиометрических измерений. Проведены испытания на вакуумную плотность сварных соединений титана с

нержавеющей сталью в диапазоне температур от 300К до 4,2К. Температура 4,2К достигалась путем погружения сварного шва в жидкий гелий.

Третья глава посвящена исследованию и выбору оптимальных условий, обеспечивающих получение соединений с минимальной остаточной пластической деформацией. Изучено влияние подготовки поверхности и параметров режима на механические свойства диффузионных соединений [15,16]. Исследования проводились 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	t, мин	5-20

Стыкуемые поверхности образцов обрабатывались алмазными резцами до шероховатости $R_a = 0,2-0,025 \mu\text{м}$. Анализ влияния температуры соединения на параметр σ_b (прочность соединения на разрыв) показывает, что более интенсивный рост остаточной пластической деформации ϵ наступает при $T=1073\text{К}$, а прочность соединения при этой температуре уже находится на уровне основного металла (рис. 1).

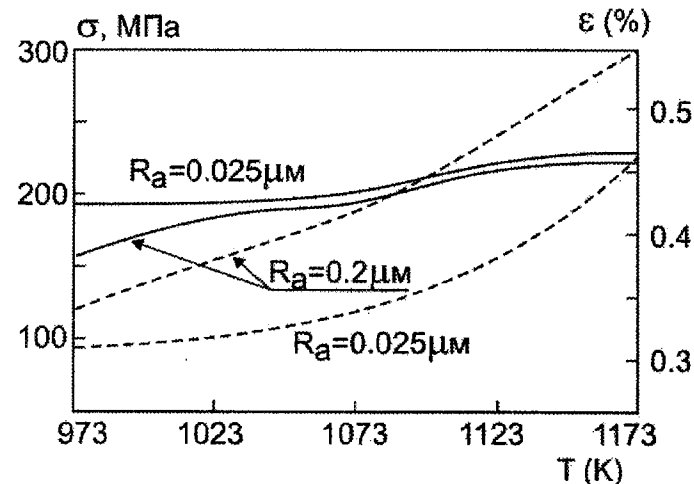


Рис. 1. Зависимость σ и ϵ от температуры сварки: ($P = 4 \text{ МПа}$, $\tau = 20 \text{ мин}$)

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 $Ra = 0.025$ мкм, когда наблюдается общее образование зерен (рис.2).



Рис.2. Микроструктура зоны соединения меди (x 200)

Графики зависимости σ и ε - соединений от величины удельного давления показывают, что рост давления повышает прочность соединения, однако резко увеличивается остаточная деформация. Наиболее интенсивный рост наблюдается начиная с $P = 4$ МПа (рис. 3).

Экспериментальные исследования показывают, что для соединения реального изделия можно рекомендовать время от 15 до 20 мин [16]

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.

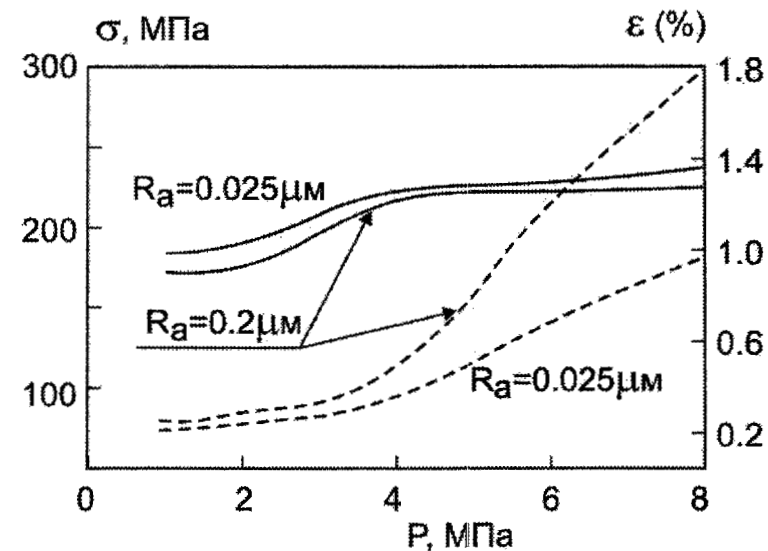


Рис.3. Зависимость параметров сварки σ и ε от сварочного давления ($T = 1123$ К, $\tau = 20$ мин)

Исследование диффузионного соединения на двух медных диафрагмах показало, что параметрами оптимального режима являются: $T = 1073^\circ\text{C}$, $P = 1$ МПа, $\tau = 15$ мин, при чистоте обработки поверхностей $Ra = 0,025$ мкм. При этом относительная деформация $\varepsilon = 0,03$ %, прочность соединения составляет $\sigma \geq 180$ МПа.

При разработке технологии сварки ускоряющих секций необходимо знать характер распределения температуры по длине изделий для того, чтобы параметры процесса и соответствующая аппаратура позволяли не превышать определенную величину остаточной пластической деформации, которая должна быть равномерно распределена по всей длине изделия. Поскольку нагрев высокочастотным индуктором в местах стыка диафрагм 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:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(\delta r \lambda \frac{\partial T}{\partial s} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left(\delta \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{\alpha} r (T - T_c) = r \left[c \gamma \delta \frac{\partial T}{\partial t} - w h (S - S_0) \right] \quad (1)$$

при заданных начальных и граничных условиях:

$$\text{при } t = 0, \quad T(s, z) = T_0 \quad (2)$$

$$\text{при } S = S_0 \quad \lambda = \alpha(T - T_c)$$

$$\text{при } S = S_k \quad \lambda = \alpha(T - T_c) \quad (3)$$

$$\text{при } z = -\delta/2 \quad \lambda = \alpha(T - T_c)$$

$$\text{при } z = \delta/2 \quad \lambda = \alpha(T - T_c)$$

Здесь δ - толщина оболочки; $r(S)$ - средний радиус вращения; λ - теплопроводность; T_c - температура окружающей среды; α - коэффициент поверхностной теплоотдачи; T_0 - начальная температура свариваемого изделия; w - эффективная мощность высокочастотного индуктора; $h(s - s^*)$ - дельта-функция.

Для решения уравнения (1) с начальными условиями (2) и граничными условиями (3) использовался метод конечных разностей на сетке, аппроксимирующей рассматриваемую область. Разностная система решалась по методу Письмена-Рекфорда.

Анализируя расчетные данные, можно заключить, что время нагрева всех ускоряющих секций можно условно разбить на два интервала, которые отличаются закономерностью хода.

Установлено, что темп роста и распределения температуры вдоль ускоряющих секций определяется температурно-временными условиями нагрева первых диафрагм [5].

Четвертая глава посвящена разработке аппаратуры и технологий для соединения ускоряющих секций [2, 3, 8, 24]

Исследование процесса диффузионной сварки на диафрагмах показало, что для получения достаточной прочности соединения с минимальной остаточной деформацией (с заданными технологическими требованиями для ускоряющих секций) необходимо, чтобы давление и температура сварки были одинаковы на каждом стыке по высоте ускоряющих секций. В связи с этим была спроектирована и изготовлена установка для диффузионной сварки длинномерных ускоряющих секций до одного метра, в которой обеспечивается постоянство сварочного давления по всей длине ускоряющей секции с перемещающимся источником нагрева. Ограничивание длины до 1м обусловлено технологической возможностью с точки зрения энергоемкости нагретой ускоряющей секции а также сборки медных диафрагм.

На рис. 4 схематически представлена установка, в которая обеспечивается равномерное давление по всей длине ускоряющей секции.

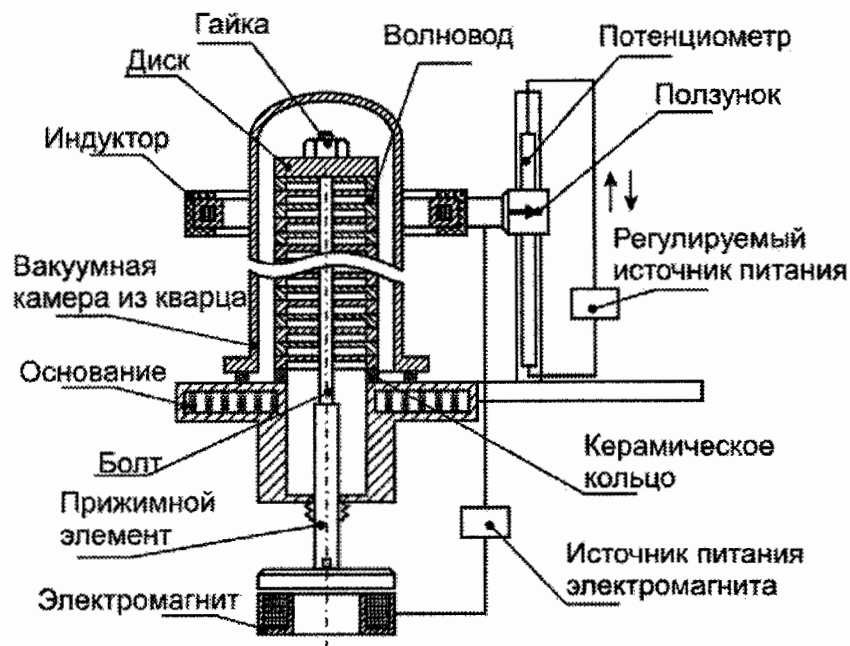


Рис.4. Схема установки для соединения ускоряющих секций

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

$$U_{\text{вых}} = U_n \cdot X / L \quad (4)$$

где координата ползунка X изменяется от $X=1$ до $X=0$, L - длина токопроводящей части потенциометра; U_n - напряжение на выходе регулируемого источника напряжения. Перемещение ползунка приводит к изменению тока электромагнита на величину, при которой компенсируется дополнительное давление, обусловленное весом ускоряющей секции, расположенной выше свариваемого стыка. Разработанная аппаратура позволяет обеспечивать оптимальные режимы соединения на стыке каждой из двух диафрагм по всей длине секции.

Постоянство давления обеспечивается системой управления магнитом, снижающим нагрузку по мере перемещения нагревателя сверху вниз.

Для обеспечения постоянного времени соединения на концах ускоряющей секции устанавливаются медные технологические вставки определенного размера. Длина рабочей части индуктора составляет 90мм, что обуславливает, при постоянной скорости его перемещения, постоянство времени прогрева каждой диафрагмы при оптимальной температуре.

Для обеспечения нагрева каждой диафрагмы до оптимальной температуры по всей длине ускоряющей секции применялся следующий прием. После нагрева первой диафрагмы до температуры сварки мощность индуктора постепенно уменьшалась при его движении к концу ускоряющей секции. Закономерность изменения мощности нагревателя определяется экспериментальным путем. Применение выше рассмотренных технологических приемов и аппаратуры обеспечивает получение вакуумноплотных соединений ускоряющей секции по всей ее длине при уровне остаточной деформации не более 0,07 %.

Для соединения (стыковки) отдельных частей ускоряющей секции была разработана и изготовлена крупногабаритная вакуумная установка для диффузионной сварки и пайки изделий. На рис. 5 показан внешний вид установки.

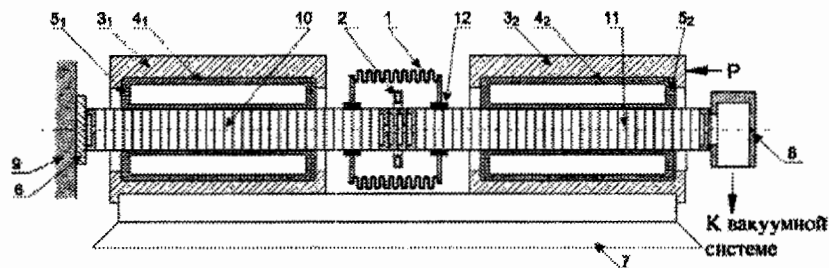


Рис.5. Схема установки для диффузионной сварки длинномерных изделий:

- 1-вакуумная камера; 2- ВЧ индуктор; 3-барабан; 4- резиновые колеса;
- 5- отверстия для подачи воздуха; 6- заглушка; 7- основание; 8- фланец;
- 9- опора; 10, 11 - стыкуемые ускоряющие секции ; 12- прокладки

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 опираясь на барабан 3₂ (на чертеже механизм не показан). Взаимное перемещение секций 10 и 11 обеспечивается с помощью вакуумной камеры в виде сильфона. Передвижением опоры 9 можно увеличить длину соединяемых изделий.

Разработанная установка обеспечивает контроль герметичности в процессе соединения с помощью пропуска гелия в камеру 1 и масспектрометра, подсоединенного к вакуумной системе через фланец 8.

Пятая глава посвящена исследованию и разработке способа сварки давлением разнородных материалов применительно к ускорительной технике [5,11,12,13,20, 23,27].

При создании изделий ускорительной техники весьма актуальной остается задача получения биметаллических элементов, надежных соединений конструкций и устройств из разнородных материалов, работающих в широком диапазоне температур (от 300 до 4,2 К) и при различных условиях нагружения. Такие соединения как медь+нерж.сталь, медь+сталь, медь+алюминий, нерж.сталь+титан, титан +ниобий являются актуальными для создания конструкций и изделий ускорительной техники. Трудность сварки разнородных металлов и сплавов обусловлена тем, что они различаются физическими, механическими и физико-химическими свойствами, которые определяют как взаимодействие металлов между собой, так и их взаимодействие с вновь образующимися фазами[10,11]

5.1. Диффузионная сварка разнородных материалов (без прослойки).

Известно, что при сварке разнородных материалов, содержащих хром, хром окисляется даже в условиях глубокого вакуума, но минимальной изотермической выдержки еще недостаточно для образования оксидов хрома [12].

Для получения вакуумноплотного соединения биметаллической заготовки диафрагм из меди и стали 12Х18Н10Т разработаны способы соединения разнородных материалов, принцип которых состоит в следующем. На вакуумной камере диффузионно-сварочной установки на нижнем штоке опоры устанавливается фланец из меди, а на верхнем штоке закрепляется фланец из нержавеющей стали, который находится на

некотором расстоянии от медного фланца. ВЧ индуктором нагревается медный фланец до температуры 1123 К, после чего ненагретая нержавеющая сталь с помощью верхнего штока штампуется на медный фланец и создается давление до 20 МПа в течении 30 с. ВЧ индуктором продолжается нагрев сборной биметаллической заготовки до температуры диффузионной сварки и при оптимальном режиме сварки получается качественное соединение. Благодаря тому, что мягкая нагретая медь вызывает микропластическую деформацию, создается максимальный контакт между поверхностями соприкосновения, который необходим для образования физического контакта, который затем развивается в течении процесса взаимной диффузии. При этом, благодаря тесному контакту, исключается окисление нержавеющей стали с остаточными газами вакуумной камеры.

Полученные нами экспериментальные данные показали, что при температуре сварки $T=1173$ К, давлении $P=1$ МПа и времени сварки $t=20$ мин, достигается равнопрочное, герметичное и вакуумно-плотное соединение. Прочность сварных соединений меди с нержавеющей сталью, полученных при этих режимах, при испытании на растяжение составила 220-240 МПа, что близко к пределу прочности меди.

Биметаллы медь-алюминий находят широкое применение в ускорительной технике и в различных отраслях промышленности для уменьшения переходного сопротивления и совмещения электрического контакта.

Известно несколько способов совмещения медно-алюминиевой контактной пары. Например, биметаллические прокладки изготовленные холодной сваркой или биметаллическая прокладка для мощной ошиновки, изготавливаемая по технологии сварки взрывом, что требует создания специализированного производственного участка по введению взрывных работ. Иногда в контакте медь-алюминий используется смазка на основе медного порошка. Однако при этом есть недостатки: ухудшение свойств при длительной эксплуатации с циклическими нагрузками.

Для решения проблемы контакта медь-алюминий на алюминиевом контакте поверхности наносят медь, недостатками при этом являются сложность технологии и низкая прочность соединения.

При диффузионном соединении при повышенных температурах ($T=793$ К) в биметалле медь-алюминий происходит образование интерметаллидных соединений, с увеличением времени процесса в переходной зоне возрастает слой интерметаллидных фаз, который приводит к снижению прочности и возрастанию хрупкости. Поэтому очень важно, чтобы в процессе изготовления биметалла длительность теплового воздействия на него была бы минимальной. Предлагаемый способ соединения медно-алюминиевой пары заключается в нагреве меди до

температуры 973 К, после чего в медь вдавливается холодный алюминий в течении 30 с, затем температура понижается до 573 К и выдерживается в течении 20 мин. Металлографический анализ микроструктуры переходной зоны указывает на отсутствие интерметаллидов. С помощью разработанной технологии изготовлена медно-алюминиевая электрическая шина для источника питания магнитов института DESY (Германия).

Предложенная методика диффузионной сварки разнородных материалов Ст.3 с нержавеющей сталью 12X18H10T коренным образом изменила принципы разработки и изготовления магнита разрезного микротрона для НИИЯФ МГУ, где фиксация и ориентация блока полюсов обеспечиваются с помощью направляющих элементов в виде штифтов сваренных диффузионной сваркой из ст.3 и 12X18H10T. Штифты расположены в горизонтальной плоскости во взаимно перпендикулярных гранях основного полюсного наконечника так, что их оси лежат в медианной плоскости разравнивающего зазора, а их диаметр превышает величину этого зазора. Кроме того, с целью исключения влияния штифтов на однородность поля, они выполнены трехслойными, причем верхние и нижние сегментные части штифта, расположенные в соответствующих пазах основного полюсного наконечника и магнитопровода выполнены из ферромагнитного материала, а средняя часть - из немагнитного материала. Такая фиксация блока полюсов одновременно является и его креплением, т. к. взаимно перпендикулярное расположение их исключает любые смещения блока относительно ярма. Кроме того, штифты в данном случае работают на сжатие - в отличие от известного варианта, что позволяет при одинаковых диаметрах штифтов выдерживать более высокие нагрузки. Таким образом, мы имеем жесткую систему полюсов ярмо-блок, которая способна выдерживать нагрузки, возникающие в электромагните. Отметим, что для обеспечения однородности магнитного поля стягивающие винты полюсного блока также выполнены из магнитной и немагнитной стали. Для снятия напряжения до окончательной механической обработки проводился вакуумный отжиг. После термической обработки выяснилось: углерод из ст.3 переходит в сторону стали 12X18H10T. Образование и развитие переходных зон между разнородными сталями устранен с помощью барьера, препятствующего диффузионному перераспределению углерода: путем введения между ними промежуточной прослойки из меди. На основе этих исследований разработана биметаллическая вакуумная камера для источника синхротронного излучения CANDLE [5,11,12,20].

5.2. Диффузионная сварка разнородных материалов с промежуточным слоем [21, 23]

Приводим результаты исследований микротвердости в зоне соединения переходных элементов титан- нерж. сталь, соединяемых различными методами в вакууме $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па. При исследовании использованы следующие методы соединения:

1. диффузионная сварка в вакууме с прослойкой ванадий-медь;
2. фрикционная сварка;
3. пайка в вакуумной печи припоем: L-Ag 72.

На рис. 6 показаны графики измерения твердости в зоне соединения. Из результатов исследований следует, что наибольшая пластичность в зоне соединения титана со сталью достигается посредством применения прокладки ванадий-медь. Механические испытания на растяжение показывают, что разрушение происходит по меди и составляет 200-220 МПа. Осуществлена опытно-промышленная проверка на вакуумную плотность работоспособности соединения при температуре 4,2К. Работа выполнена в рамках проекта TESLA (Институт DESY, Германия).

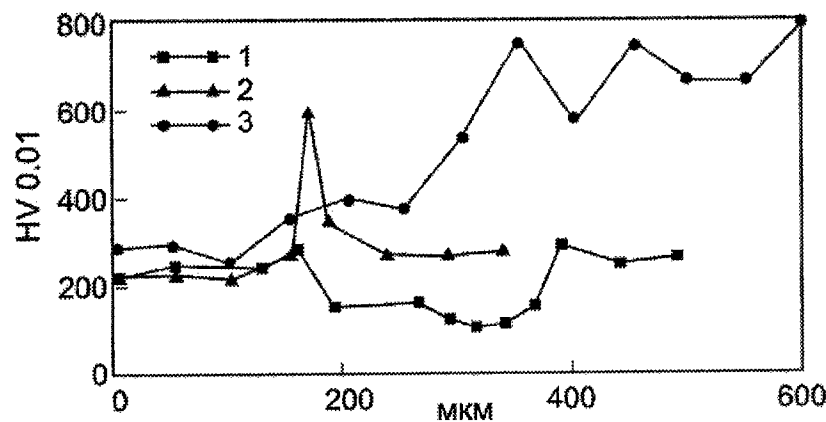


Рис.6. Графики измерения микротвердости в зоне соединений :

1. Диффузионная сварка Ti /V /Cu / 12X18X10T, (T=1000° С, P=5 МПа, $\tau = 15$ мин);
2. Фрикционная сварка Ti / 316 L , длительное фрикционное время (5,5 с);
3. Вакуумная пайка, Ti / L-Cu Sn12 / 316 L, T = 1040°С.

В шестой главе приводятся разработанные способы соединения изделий в ускорительной технике [9,10,21,25-27].

Получение трубной заготовки из фольги сплава пермаллоя 79 НМ для магнитных экранов.

На рис. 7. показан разработанный новый способ соединений. На молибденовую трубу 1 наматывается металлическая фольга 2 до необходимой толщины, затем на фольгу наматывается молибденовая проволока 3 и закрепляется концами с помощью стяжных элементов 4,5, чтобы намотанная молибденовая проволока не разматалась. Подготовленная заготовка устанавливается на вакуумную печь и нагревается до температуры диффузионной сварки. Благодаря разности коэффициентов термического расширения свариваемой заготовки и намотанной проволоки при изотермической выдержке обеспечивается качественное соединение.

Указанным способом из магнитного материала пермаллоевой ленты марки 79 НМ толщиной 50 мкм изготовлены трубные заготовки для магнитных экранов проекта ATLAS (CERN, Geneve, Switzerland) с наружным диаметром 42мм, длиной 50мм, толщиной стенки 1мм путем нагрева в вакуумной печи до T=1150°С с выдержкой 180мин, и совмещением процессов диффузионной сварки и термического отжига. После охлаждения легко снимаются наружная и внутренняя обоймы, торцы полученной заготовки обрабатываются на нужный размер. Предлагаемое устройство расширяет номенклатуру технологических возможностей соединяемых материалов, особенно для круглых деталей или изделий, в недоступных местах, где невозможно создавать давление на соединяемые материалы традиционными известными методами.

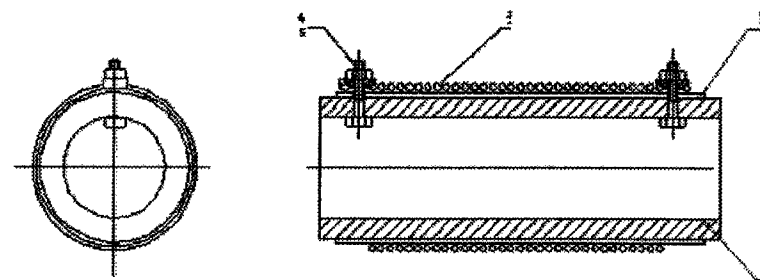


Рис. 7. Эскиз заготовки: 1- молибденовая труба; 2- металлическая фольга; 3 - молибденовая проволока, 4,5 - стяжные элементы

Диффузионное соединение фланца с фольгой. Практически во всех экспериментах или технологиях с применением радиационного излучения используется так называемое “выходное окно”. Выходные окна должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- обеспечение необходимой прочности соединения в условии радиационного излучения и выдержки перепада давления;
- обеспечение вакуумной герметичности;
- избежание окисления и образования хрупких металлических соединений.

Важной частью технологии соединения металлов фланца с фольгой является разработка устройства и новых способов соединения, которые обеспечивают выполнение вышеуказанных требований.

Разработан способ соединения фланца с фольгой (рис.8), при котором фланец нагревается до температуры, необходимой для осуществления диффузионной сварки, отключается нагрев, устанавливается фольга и приложением давления осуществляется диффузионная сварка.

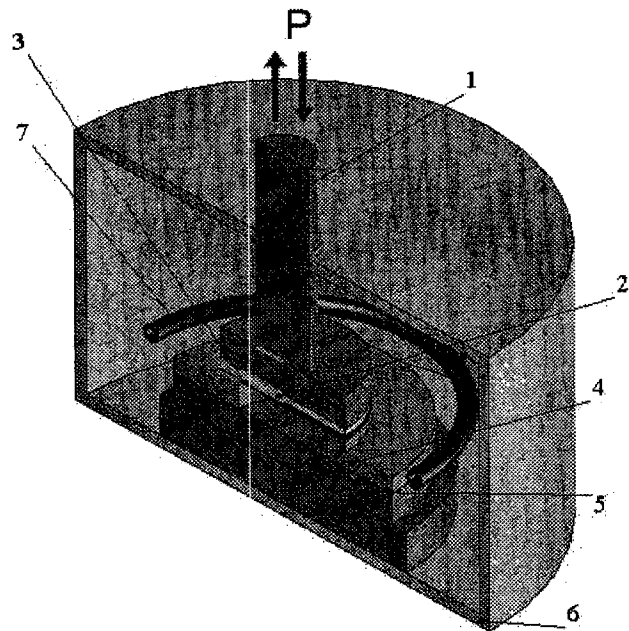


Рис. 8. Схема осуществления диффузионной сварки фланца с фольгой

Способ осуществляется следующим образом. На опорной плите 5, устанавливается сварочная деталь 4, а на приводе давления на штоке 1 закрепляется (на чертеже не показана) компенсационная прокладка 2 и свариваемая фольга 3, которые до сварки находятся на некотором расстоянии от свариваемой детали, с целью исключения нагрева с помощью индуктора. После создания необходимого вакуума индуктором 7 нагревается деталь 4 до температуры сварки и после этого отключается индуктор и одновременно опускается шток 1, создавая давление на свариваемые детали и фольгу до их остывания. В процессе взаимодействия детали и фольги под приложенной нагрузкой происходит локальная пластическая деформация в зоне контакта и образование сварного соединения.

Использование этого метода позволяет соединять разнородные металлы, фланец с фольгой: например медь – нерж. сталь, медь- никель, а также с помощью диффузионной сварки с промежуточным слоем, который в процессе сварки находится в стыке в твердом или в жидком состоянии. Определена сварочная деформация и напряжение в торцевом соединении фланца с фольгой. Данная задача была решена с применением конечно-элементного программного комплекса ANSYS 9.0. Для этого был произведен температурный и конструкционный анализ поведения материалов фланца и фольги кольцевого стыка при переходе от температуры окончания сварки 1000° С к мгновенному охлаждению до комнатной температуры. На рис. 9 показано окружное напряжение.

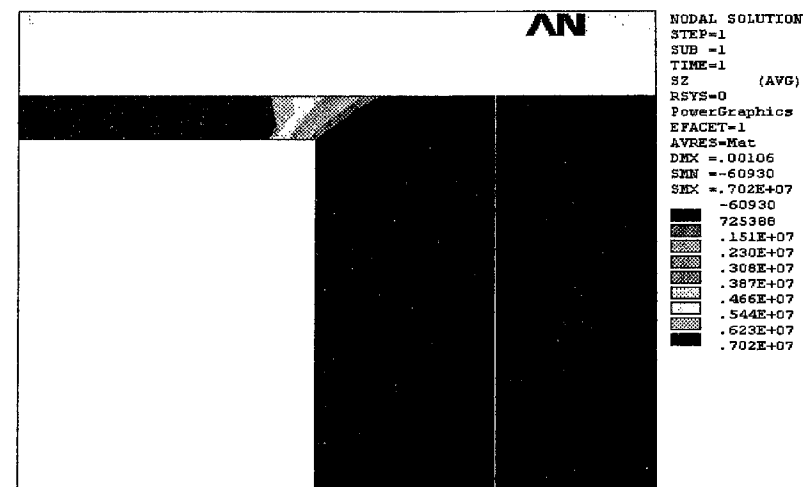


Рис.9. Окружное напряжение зоны соединения фланца с фольгой

Исходя из результатов расчетов видно, что максимальными являются окружные напряжения (порядка 7 МПа) и сосредоточены они вне зоны соединения - в фольге. В целом величина напряжений не превышает предела упругости для нерж. стали, поэтому не может привести к разрушению изделия.

Низкотемпературная диффузионная сварка ниобия с титаном. Изучалась возможность получения диффузионной сварки в вакууме ниобий-титан $T_{св.} = (0,4 \div 0,5) T_{пл.}$ и $P < 2$ МПа. В результате снижается термомодеформационные воздействия на свариваемые металлы:

- исключается микропластическая деформация деталей;
- отпадает дополнительная термическая обработка.
- сохраняются исходные электрофизические и физико-механические свойства металлов;

Исследования проводились с использованием ультрадисперсной меди средних размеров зерен 0,5 мкм, при температуре сварки 1093К, давление сварки 1 МПа.

Металлографическое исследование (рис. 10) сварного образца дает возможность определить характер и ширину опасной переходной зоны, но и это позволяет сделать лишь ограниченный вывод о свариваемости: главное здесь эксплуатационная характеристика конструкции при ее эксплуатации. Максимальная прочность соединения титана с ниобием, полученного при выше указанном режиме сварки $\sigma_B = 140-160$ МПа.

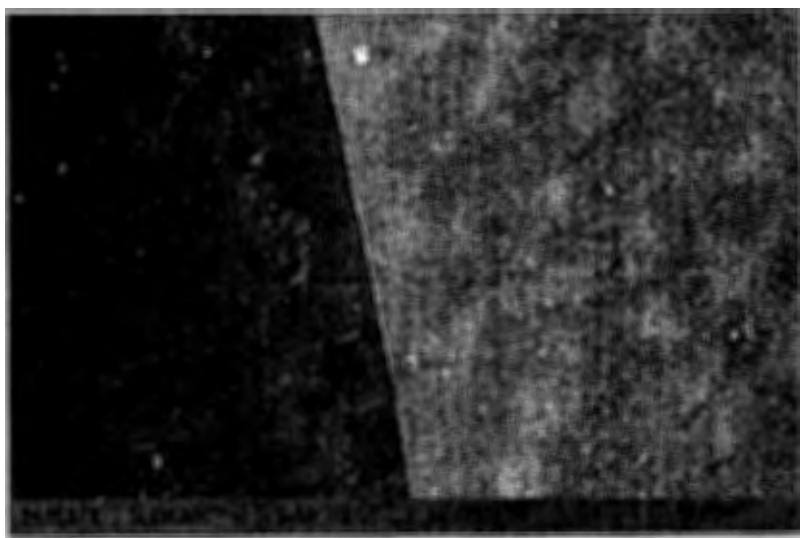


Рис. 10

Вышеприведенные технологии и оборудования позволили разработать и внедрить термовакуумную камеру моделирования низких температур в условиях космоса, посредством облучения электронным пучком с энергией до 8 МэВ и ультрафиолетовым лучом в диапазоне солнечного излучения [26].

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 0,07% предварительная механическая подготовка должна соответствовать $Ra = 0,025$ мкм, при следующих параметрах режима сварки: $T = 1073$ К, $P = 1$ МПа, $t = 15-20$ мин [16,19].
2. Выдвинута 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 ускоряющей секции при движении вдоль него индуктора нагрева с постоянной скоростью. Показано, что темп роста и распределения температуры вдоль диафрагмированного волновода определяется температурно-временными условиями нагрева первых диафрагм [16,24].
4. Разработана специализированная аппаратура для диффузионной сварки в вакууме, позволяющая выдерживать по всей длине ускоряющей секции на каждом стыке диафрагм постоянно сварочного давления за счет взаимосвязи передвижения нагревателя и системы сжатия; обеспечивающая постоянно времени сварки за счет размеров нагревателя, скорости его передвижения и применения технологических элементов на концах ускоряющей секции; постоянно температуры нагрева путем дозированного снижения мощности источника нагрева по мере перемещения нагревателя сверху вниз. Разработанные технологии и аппаратура применялись при создании волноводных элементов инжектора линейного ускорителя Ереванского синхротрона [2,3,11,24].
5. Разработана специализированная установка для стыковки части ускоряющей секции неограниченной длины, которая позволяет

осуществлять контроль вакуумной герметичности в процессе сварки [8,16].

6. Разработан способ соединения разнородных металлов - нержавеющей стали с медью, обеспечивающий качественное соединение с исключением окисления хрома в зоне соединения, остаточных газов в вакуумной камере за счет схватывания пластической деформации нагретой меди до нагрева нержавеющей стали [9,27].
7. Исследована микротвердость в зоне соединения титана с нержавеющей сталью с применением переходного слоя ванадий - медь, определен критерий получения качественного соединения, осуществлена опытно-промышленная проверка работоспособности соединения при температуре 4,2 К. Работа выполнена для проекта TESLA [11,23].
8. Разработан способ и технологический процесс получения трубной заготовки с помощью диффузионной сварки из фольги магнитного сплава пермалоя для адронного калориметра применительно к проекту "ATLAS" (CERN, LHC). Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами моделирования с помощью разработанного алгоритма и пакета программ на базе конечно-элементного пакета ANSYS [10,25].
9. Разработан новый способ соединения фланца с металлической фольгой, исключая образование интерметаллидов в зоне контакта, что достигается за счет уменьшения времени нагрева фольги. Разработанные технологии применяются для изготовления "выходного окна" ускорителей [9,22].
10. Разработана биметаллическая вакуумная камера накопительного комплекса CANDLE [5,6,12,13].
11. Разработана и внедрена термовакуумная камера для экспериментального моделирования космического пространства [26].

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. **Tsakanov V., Amatuni G, Avagyan V.** et al. Status of 3 GEV intermediate energy light source project CANDLE in Republic of Armenia. Proc. of European Particle Accel. Conf. (EPAC), 2002, Paris, France, pp. 763-765.
2. **Авагян В.Ш., Бабаян А.З., Тунян И.В.** Вакуумная индукционная установка для пайки ускоряющих структур, ISTC International Workshop Advanced X-Ray Imaging, 16-18 June 2009, Yerevan, Tsakhkadzor, Armenia, pp. 34-41.
3. **Авагян В.Ш., Бабаян А.З.** Устройство для диффузионной сварки. А.с. СССР №1755481, МК В23К 20/26, 15.04.1992.
4. **Tsakanov V., Amatuni G, Avagyan V.** et al. Design Study of CANDLE Synchrotron Light Source. Proc. of 25th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop. SSILS, 2001, Shanghai, China. - P. 37-41.
5. **Avagyan V., Gagyan H., Nagdalyan S., Petrosyan A.,** Vacuum Chamber Design Considerations for CANDLE Light Source, Proceedings of EPAC 2002, Paris, France. - P.2532-2534.
6. **Abashian A., Aghasyan M., Amatuni G., Arakelyan V., Avagyan V.** et al., 3GeV CANDLE Synchrotron Light Source, Design Report, ASLS-CANDLE, R-001-02, Yerevan, 2002. - 267 p.
7. **Tsakanov V., Avagyan V., Ayvazyan V.** et al. Center for the Advancement of Natural Discoveries using Light Emission- A New Synchrotron Light Source Project in Armenia. Rev. Sci. Instrum. 73, 2002, pp. 1411-1413.
8. **Авагян В.Ш.** Установка для диффузионной сварки длинномерных изделий: Патент, АМ, № 1534 А2. Заяв. 20.04.2004: Опубл. 11.05.2004,- №5 (45).
9. **Авагян В.Ш.** Способ диффузионной сварки фланец с фольгой. Патент N 1533 А2, 24.03.2004, "Изобретения и открытия" официальный бюллетень, N 5(46), Ереван, 2004. - С.4.
10. **Авагян В. Ш.** Устройство для диффузионной сварки. Патент 1535 А2, 16.03.2004, "Изобретения и открытия", официальный бюллетень, N 5,(46), с.4-5, Ереван, 2004.
11. **Avagyan V.Sh., Babayan A.Z., Dobrovolski N. M., Tunyan I.V.** Diffusion Welding of Heterogeneous Materials in Accelerating Technique, Proceedings of 9-th European Particle Accelerator Conference, Lucerne, Switzerland, 5-9 July, 2004. pp.1586-1587
12. **Tunyan S., Aghasyan M., Avagyan V.** "Absorber Design for the CANDLE Storage Ring", 3rd International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and

- Instrumentation, MEDSI 2004, Grenoble, France, MEDSI-PROC-04-20, 7 p.
13. **Tunyan S., Aghasyan M., Avagyan V., Ivanian M.** Heat Load Analysis of CANDLE Storage Ring Due to 3 Tesla Wiggler, 3rd International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation, MEDSI 2004, Grenoble, France, MEDSI-PROC-04-21, 8 p.
 14. **Tsakanov V., Amatuni G., Avagyan V.** et al. "An Overview of CANDLE synchrotron light facility", Proc. of the 4th National Conf^e Semiconductor Microelectronics", Tsakhkadzor, 2003, pp. 204-208.
 15. **Avagyan V. Sh.** Diffusion Brazing and Welding of the Accelerating Structure, Particle accelerator Conference, Knoxville, USA, 2005, pp. 2938-2940.
 16. **Avagyan V.** Development of technology for brazing and diffusion welding of copper accelerating structures, Phys. Rev. Special Topics-Accelerator and Beams, 2006, v.9, pp. 083501- 083507.
 17. **Avagyan V., Amatuni G., Tunyan S.** Main Approaches to Cooling System For the CANDLE Light Source, in Advanced Radiation Sources and Applications (ed. H. Wiedemann), Springer, Netherlands, 2006, pp. 415-419.
 18. **Tsakanov V., Aghasyan M., Amatuni G., Avagyan V.** et al. Status of 3 GEV intermediate energy light source project CANDLE in Republic of Armenia, Proc. of European Particle Accel. Conf. (EPAC), 2004, Lucerne, Switzerland, 2004, pp. 2254-2256.
 19. **Авагян В.Ш.** Особенности диффузионной сварки меди // Вестник МАНЭБ. - Санкт-Петербург. – 2006. - Том 11, №6. - С.118-123.
 20. **Tunyan S., Avagyan V., Aghasyan M., Ivanyan M.** The insertion device adapted vacuum chamber design study, in Advanced Radiation and Applications (ed. H. Wiedemann), Spinger, Netherlands, 2006 – P. 431-436.
 21. **Авагян В.Ш., Микаэлян Р.А., Петросян А.Ж.** Диффузионное соединение фланца с фольгой // Вестник МАНЭБ. - Санкт-Петербург. –2006. - Том 11, № 8. - С.94-96.
 22. **Avagyan V., Mikaelyan R., Petrosyan A.** Vacuum Diffusion Bonding of Flange -foils for X-ray Windows, AIP Conf. Proc. 2007, V. 879, pp. 1046-1048.
 23. **Авагян В.Ш.** Исследование микротвердости в зоне соединения титана со сталью. Санкт-Петербург, 2007, Вестник МАНЭБ, Том 12, № 4, вып.2. - С.68-73.
 24. **Авагян В.Ш.** Исследование и разработка технологии диффузионной пайки и сварки медных ускоряющих структур // Известия НАН РА и ГИУА.-Сер.ТН.-2007. - Т-60, №1. - С.9-15.

25. **Avagyan V.** "The Wire Technology for Magnetic Shield Fabrication", ISTC International Workshop Advansed X-Ray Imaging, 16-18 June 2009, Yerevan, Tsakhkadzor, Armenia. - pp. 30- 33.
26. **Авагян В.Ш., Ерицян Г.Н.** Термовакuumная камера для моделирования космического пространства // Вестник инженерной академии Армении (ВИАА). – 2009. - Т.6, № 4. - С.594-596.
27. **Авагян В.Ш.** Вопросы применения разработанных способов соединения разнородных металлов для изделий в ускорительной технике // Вестник инженерной академии Армении (ВИАА). 2009, Т.6, № 4. - С.587-593.

Список цитированной литературы

1. **R. D. Heuer**, The International Linear Collider, Nucl.Phys. 154, 2006, p. 131-136.
2. **G. Dattoli, A. Renieri**, Review of Existing Soft and Hard X-Ray FEL Projects, Proc. of 27th International Free Electron Laser Conf., Stanford, USA, 2005, p. 442-446.
3. **J.Corbett, T.Rabedeau**, Intermediate Energy Storage Rings, Synchrotron Radiation News 12, 1999, p. 25-33.
4. **P. Elleaume**, Future storage ring synchrotron sources, AIP Conf. Proc. 705, 2004, p. 149-152.
5. **H. Weise**, The TESLA XFEL Project, Proceedings of European Particle Accel. Conf., Lucerne, Switzerland, 2004, p. 11-15.
6. **R. Saban**, Status of the installation and commissioning of LHC, Nuovo Cim.123B, 2008, p. 273-278.
7. **S. Guiducci**, Developments of the International Linear Collider, Nuovo Cim.123B, 2008, p. 1000-1002.
8. **Быстров Ю.А., Иванов С.А.** Ускорительная техника и рентгеновские приборы. - М.: Высшая школа,1983. – 288 с.
9. **Найдич Ю.В.** Контакты свойства расплавов, Киев, Наукова думка, 1986, с.130-133.
10. **Конюшков Г.В., Копылов Ю.Н.** Диффузионная сварка в электронике. - М.: Энергия,1974. – 168 с.
11. **Харченко Г.К., Игнатенко А.И.** Прочность соединений с тонкой мягкой прослойкой // Автоматическая сварка. – 1968. - № 5. - С.31-33.
12. **Сысоев А. П., Сергеев А.В., Казаков Н.Ф.** Диффузионная сварка меднохромового псевдосплава с медью // Порошковая металлургия. – 1984. - №10. - С.45-47.
13. **Г.В. Конюшков, Р. А. Мусин**, Специальные методы сварки давлением, IPR MEDIA, 2009. - 632 с.

Личный вклад автора. В представленных работах, большинство из которых выполнено в соавторстве с другими исследователями, автором определены основные идеи и направления проводимых экспериментальных исследований [11, 21, 22], разработка вакуумной системы и камеры накопительного комплекса [1, 4, 5, 6, 7, 13, 14, 18, 20], новых технических и технологических решений [2, 3, 12, 17, 26]. Значительная часть результатов получена и опубликована автором без соавторов [8, 9, 10, 15, 16, 19, 23, 24, 25, 27].

Ավագյան Վարդան Շավարշի

ԾՃԳՐԻՑ ՄԻԱՅՄԱԼ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԿԱԿԱՆ ՊՐՈՅԵՍՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄ ԱՐՎԱՅՈՒԹՅԱՅԻՆ ՏԵԽՆԻԿԱՅՈՒՄ ԹԵՄԱՅՈՎ ԱՏԵՆԱԽՈՒԹՅԱԼ

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

Ատենախոսության մեջ ներկայացված են հետազոտված խնդիրների կարևորությունը արագացուցչային տեխնիկայում, պղնձյա արագացնող կառուցվածքների ստացման նոր եղանակների և սարքավորումների ստեղծման անհատեչտությունը, ինչպես նաև տարասեռ մետաղների միացման (եռակցման) նոր մեթոդների ուսումնասիրությունը և տեխնոլոգիաների մշակումը, որոնք կապահովեն մակերևույթի բարձր մաքրություն, կառուցվածքների հուսալի ամրություն, վակուումային հերմետիկություն:

Հաշվարկային և փորձնական եղանակներով ուսումնասիրված են պղնձի վակուումային դիֆուզիոն միացման հիմնական պարամետրերը, որոնք ապահովում են մնացորդային դեֆորմացիայի փոքր մեծություն:

Ներկայացված է մինչև մեկ մետր երկարությամբ պղնձյա արագացնող կառուցվածքների վակուումային դիֆուզիոն եռակցման նոր սարքավորում, որն ապահովում է պղնձյա արագացնող կառուցվածքի դիֆուզիոն եռակցումը փոքր մնացորդային դեֆորմացիայով հավասարաչափ բաշխված կառուցվածքի ամբողջ երկարությամբ: Սարքավորումն ապահովում է արագացնող կառուցվածքի ամբողջ երկարությամբ միևնույն դիֆուզիոն եռակցման պարամետրերը՝ ջերմաստիճանը, ճնշումը, ժամանակը:

Մշակված է պղնձյա արագացնող հատվածամասերի միմյանց միացնող վակուումային դիֆուզիոն եռակցման նոր սարքավորում, որը հնարավորություն է տալիս ցանկացած երկարության պղնձյա արագացնող հատվածամասերը եռակցել, ինչպես նաև դիֆուզիոն միացման պրոցեսի ընթացքում իրականացնել վակուումային հերմետիկության ստուգում:

Փորձնական հետազոտությունների միջոցով մշակվել է պղնձի և չժանգոտվող պողպատի դիֆուզիոն միացման նոր եղանակ՝ բացառելով վակուումային խցիկի մնացորդային զազերից չժանգոտվող պողպատում քրոմի օքսիդացումը: Ուսումնասիրված է չժանգոտվող պողպատի և պողպատ 3-ի դիֆուզիոն միացումը, որն օգտագործվում է արագացուցչային տեխնիկայում էլեկտրամագնիսների պատրաստման ժամանակ: Առաջարկվել է չժանգոտվող պողպատի և պողպատ 3 դիֆուզիոն միացումը կատարել պղնձի բարակ թաղանթի միջոցով, որն արգելակում է ածխածնի վերադասավորումը:

Ուսումնասիրվել են դիֆուզիոն միացման տեխնոլոգիական պրոցեսները չժանգոտվող պողպատի և տիտանի համար՝ միացման զոնայում օգտագործելով միջանկյալ մետաղական թաղանթներ: Ուսումնասիրության արդյունքում ընտրվել են չժանգոտվող պողպատի, պղնձի, վանադիումի, տիտանի հաջորդականորեն դասավորված շերտեր, որոնց դիֆուզիոն միացման ժամանակ միացման գոտում բացակայում են միջմետաղական փխրուն համաձուլվածքները: Միացման գոտում չափվել են միկրոկարծրության արժեքները: Ստացված անցումային խողովակների վակուումային հերմետիկությունը փորձարկվել է մինչև 4,2K ցածր ջերմաստիճանում, ինչն ապահովում է եռակցման կարի հուսալիությունը:

Մշակվել է CANDLE սինքրոտրոնային կուտակիչ համակարգի վակուումային խցիկը:

Մշակվել է գլանային խողովակներ ստանալու նոր եղանակ. մշակված մեթոդի օգնությամբ 50մկմ հաստությամբ 79HM մակնիշի պերմալոյե ժապավենից պատրաստվել են խողովակաձև մագնիսական էկրաններ:

Մշակվել է նրբաթիթեղի և մետաղյա դետալի դիֆուզիոն եռակցման նոր եղանակ, որն օգտագործվում է էլեկտրոնային փնջերի արտացոլման համար:

Մշակվել և ներդրվել է ջերմավակուումային խցիկ երկրագնդից 47 հազ. կմ հեռավորության վրա տիեզերական տարածության մոդելավորման համար: Ատենախոսության արդյունքները ներդրված են Ա. Ի. Ալիխանյանի անվան Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտում և НИИЯФ МГУ, TESLA (DESY, Համբուրգ), ATLAS (CERN, LHC) միջազգային կենտրոններում:

Vardan Avagyan

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR
OBTAINING PRECISE JOININGS IN ACCELERATOR TECHNOLOGY**

ABSTRACT

The importance of the investigated problems for the accelerator technology, the necessity of new methods and equipment for the development of copper accelerating structures, as well as the study of new methods of diverse metal joining (welding) and the development of technology providing high surface smoothness, reliable strength of structures, vacuum tightness are presented in the dissertation.

The basic parameters of copper vacuum diffusion welding providing small residual deformation are studied by calculation and experimental methods.

The new equipment for vacuum diffusion welding of copper accelerating structures of up to one meter long is presented providing diffusion welding of copper accelerator structures by small residual deformation evenly distributed along the whole structure. The equipment provides the same diffusion welding parameters (temperature, pressure, time) along the whole accelerating structure. New vacuum diffusion welding equipment is developed connecting copper accelerating sections with each other enabling to weld copper accelerating sections of any length, as well as to check the vacuum tightness during the diffusion joining process.

New method of diffusion joining of the copper and non-corrosive steel excluding the chrome oxidization from vacuum chamber residual gases in non-corrosive steel is experimentally developed. Diffusion joining of non-corrosive steel and steel-3 used in accelerator technology for electromagnets development is studied. It is proposed to make diffusion joining of non-corrosive steel and steel-3 by a thin shell preventing carbon to be reconstructed.

Technological processes of diffusion joining of non-corrosive steel and titanium are studied using intermediate metallic shells in joining zones. As a result, successive layers of non-corrosive steel, copper, vanadium and titanium are chosen, during which diffusion welding the intermetallic brittle alloys are absent in their joining zones. Micro-hardness values are measured in the joining zones. The vacuum tightness of the obtained transitional pipes was tested in low temperature of up to 4.2K, which provides the reliability of the welded seam.

The vacuum chamber of CANDLE synchrotron storage system is developed.

New method of obtaining cylindrical pipes is developed; by that method the pipe-like magnetic screens are made of 79HM permalloy band of 50 mm thickness.

New method of diffusion welding of the foil with metal parts is developed, which is used for the electron beams reflection. A thermal chamber is developed and implemented for simulating the space of 47000 km distance from the Earth.

The results of the dissertation are implemented at Yerevan Institute of Physics after A. I. Alikhanyan and international centers (Scientific Research Institute of Nuclear Physics, MSU), TESLA (DESY, Hamburg), ATLAS (CERN, LHC).

