

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2019-10
На правах рукописи

АЗАРЯН
Николай Сергеевич

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ РЕЗОНАТОРЫ
ИЗ НИОБИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛИНАКОВ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 2019

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова
Объединённого института ядерных исследований, г. Дубна

Научный руководитель:

Григорий Дмитриевич ШИРКОВ, доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, помощник директора Объединённого института ядерных
исследований, г. Дубна

Научный консультант:

Игорь Леонидович ПОБОЛЬ, доктор технических наук, доцент, начальник отдела
электронно-лучевых технологий и физики плазмы, Физико-технический институт
НАН Беларуси, г. Минск

Официальные оппоненты:

Валентин Витальевич ПАРАМОНОВ, доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела ускорительного комплекса, ФГБУН «Институт
ядерных исследований РАН», г. Москва

Михаил Владимирович ЛАЛАЯН, кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электрофизические установки», Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ», г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и
экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального
исследовательского центра "Курчатовский институт"», г. Москва

Защита состоится « ____ » _____ 201__ года в __ часов на заседании
диссертационного совета Д 720.001.02 в Объединённом институте ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединённого института
ядерных исследований и по адресу http://wwwinfo.jinr.ru/dissertation/disser_Azaryan.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 года

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

 В.А. Арефьев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Ускорители частиц на базе сверхпроводящих ускоряющих структур находят широкое применение во многих областях современной науки. Прежде всего – это экспериментальная физика элементарных частиц, где ускорители служат основным инструментом учёных.

Ярким примером выдающегося достижения современной физики является недавнее (2012 г.) обнаружение бозона Хиггса на Большом Адронном Коллайдере LHC на установках ATLAS и CMS. Для дальнейших экспериментов в рамках Стандартной Модели, поиска новых явлений и частиц за её пределами необходимо создание нового инструмента – электрон-позитронного коллайдера с энергией в центре масс от 500 ГэВ.

В сравнении с адронной машиной, такой как LHC, лептонный коллайдер обеспечит более оптимальное сочетание достаточной статистики с приемлемой систематикой и более благоприятным отношением эффект/фон. На сегодняшний день лидирующим проектом в этом направлении является Международный Линейный Коллайдер ILC, в котором ускоряющими структурами служат сверхпроводящие резонаторы на частоту 1.3 ГГц. В 2007 г. ОИЯИ присоединился к проекту ILC и предложил размещение коллайдера в Московской области в окрестностях г. Дубна.

Ряд научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по проблематике ILC ведутся в ОИЯИ с 2007 г. в рамках темы первого приоритета. Один из основных этапов этих тем - проект по разработке собственной технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов из ниобия на частоту 1.3 ГГц, выполненный в Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) в сотрудничестве с рядом ведущих научно-исследовательских центров Республики Беларусь.

Цель и задачи работы

Изготовление сверхпроводящих резонаторов – это комплексный высокотехнологичный процесс, в котором задействованы последние достижения в криогенике, вакуумной технике, технологиях сварки, химии, материаловедении, СВЧ-технике. На сегодняшний день в странах-участницах ОИЯИ отсутствуют серийные

технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов, и в первую очередь в работе ставилась задача освоения зарекомендовавших себя технологий с целью обеспечения проекта ИС дополнительным производителем резонаторов в сотрудничестве с учёными и специалистами ОИЯИ и стран-участниц. Эта постановка определила следующие цели:

1. Определить геометрические параметры резонаторов, отвечающих проектным параметрам ускорителя ИС и разработать техническое задание для их изготовления.

2. Создать экспериментальную базу, отвечающую современным критериям промышленного производства сверхпроводящих резонаторов, разработать технологию штамповки полуячеек, освоить технологию электронно-лучевой сварки высокочистого ниобия.

3. Создать экспериментальную базу для СВЧ-испытаний резонаторов при комнатной температуре и температуре жидкого гелия, измерить СВЧ-параметры первой опытной серии ниобиевых резонаторов, изготовленных по собственной технологии.

Научная новизна

Предложен и реализован принципиально новый метод формирования ниобиевых полуячеек гидроударной штамповкой, ранее не применявшийся для изготовления СВЧ-резонаторов.

Впервые экспериментально определена предельная степень вытяжки при гидроударной штамповке ниобия высокой чистоты. Созданная оригинальная технология удовлетворяет требованиям производства сверхпроводящих ниобиевых резонаторов.

Разработано и запатентовано уникальное устройство связи, обеспечивающее эффективное возбуждение резонатора и оптимальную передачу в резонатор СВЧ мощности.

Практическая значимость работы

Впервые в научных центрах стран-участниц ОИЯИ реализован комплекс технологических процедур изготовления сверхпроводящих резонаторов из высокочистого ниобия для ускорителей заряженных частиц. Испытания опытной серии сверхпроводящих резонаторов показали: их качество удовлетворяет современным требованиям и при внедрении в промышленное производство отечественные резонаторы могут быть конкурентоспособными по сравнению с зарубежными аналогами. Опыт

создания и исследования ниобиевых резонаторов нашёл продолжение в ОИЯИ в проекте протонного инжектора ускорительного комплекса НИКА.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты расчётов геометрических параметров резонатора на частоту 1.3 ГГц в соответствии с проектными параметрами ускорителя ПС для изготовления одноячеечного резонатора.

2. Экспериментальная база для полного производственного цикла изготовления одноячеечных резонаторов, ранее отсутствовавшая в ОИЯИ и научных центрах стран-участниц. Результаты отработки технологического процесса гидроударной штамповки высокочистого листового ниобия, обеспечивающих полную вытяжку заготовки при требуемой проектной точности изготовления.

3. Результаты отработки режимов электронно-лучевой сварки особоистого ниобия, отвечающих критериям промышленного производства сверхпроводящих резонаторов для ПС.

4. Метод прецизионного измерения ультравысоких собственных добротностей сверхпроводящих резонаторов в диапазоне $10^8 - 10^{10}$, основанный на возбуждении колебаний в резонаторе электронным потоком.

5. Устройство связи, обеспечивающее эффективное возбуждение резонатора на уровне согласования не хуже $K_{СВ} = 1.01$.

6. Экспериментальная база для исследований одноячеечных СВЧ-резонаторов при комнатной температуре и температуре жидкого гелия. Результаты СВЧ испытаний первой опытной серии ниобиевых резонаторов, изготовленных с применением технологии гидроударной штамповки.

Степень достоверности и апробация работы

При выполнении работы получен патент [1], основные результаты опубликованы в пяти рецензируемых журналах [2-6]. Всего результаты работы представлены в 16 научных публикациях [2-17] и в 12 докладах, в том числе на международных конференциях:

- 15-я, 16-я, 17-я, 18-я Международная научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ (ОМУС-2011, ОМУС-2012, ОМУС-2013, ОМУС-2014), Дубна, Россия.

- 23 Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц (RuPAC 2012), Санкт-Петербург, Россия.

- X-Ray Free Electron Laser school (XFEL 2012), Анси, Франция.

- 4 International Particle Accelerator Conference (IPAC'13), Шанхай, Китай.

- 8 and 9 International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2013, MSMW '2016), Харьков, Украина.

- 16 Международная научно-техническая конференция "Технологии и оборудование ЭЛС-2014", Санкт-Петербург, Россия.

- TESLA Technology Collaboration at DESY, 2014 г., Гамбург, Германия.

- TESLA Technology Collaboration at KEK, 2014 г., Цукуба, Япония.

Из представленного списка докладов 7 доложены лично автором, его доклад на конференции RuPAC-2012 удостоен Диплома 2-й степени на конкурсе молодых учёных – участников конференции.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием аттестованных измерительных средств и апробированных методик, а также хорошей воспроизводимостью результатов. Разработанные и созданные стенды для проведения СВЧ-испытаний резонаторов, а также применённые методики измерений сперва были отработаны на готовом одноячеечном Nb-резонаторе, полученном в рамках международного сотрудничества по программе ILC из Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США) – этот резонатор был принят в качестве эталонного образца.

Личный вклад

Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим. При его непосредственном участии выполнено научное планирование и координирование всех этапов НИОКР, обеспечившее создание первой опытной серии сверхпроводящих резонаторов из ниобия на частоту 1.3 ГГц.

В соавторстве проведены теоретические расчёты по оптимизации геометрии резонатора, по результатам которых при определяющем участии автора создано Техническое задание на изготовление резонатора.

Как лично автором, так и в соавторстве, экспериментально исследованы свойства ниобия разных производителей. Автор предложил постановку и лично участвовал в экспериментах по травлению ниобия, имевших целью отработку режимов химической очистки материала. При участии автора спроектирована специализированная технологическая оснастка для ключевых этапов производства деталей резонаторов, отработаны режимы электронно-лучевой сварки резонатора. В соавторстве впервые получена диаграмма штампуемости особоистого ниобия для метода гидроударной штамповки.

Разработано и запатентовано в соавторстве устройство связи для СВЧ-испытаний резонаторов. При определяющем участии автора выбраны и реализованы методики СВЧ-измерений, созданы экспериментальные стенды и проведены испытания готовых резонаторов.

Как в соавторстве, так и лично выполнена апробация результатов исследования. Большинство публикаций и докладов по теме диссертации подготовлены и представлены лично автором.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 108 страниц, включает в себя 51 рисунок и 12 таблиц. Для обозначения рисунков и таблиц применена сквозная нумерация. Список литературы содержит 94 цитируемых источника.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели исследования, кратко изложены основные результаты диссертации. Далее в параграфе «Линейные электронные ускорители с нормально- и сверхпроводящими СВЧ-структурами» дан обзор литературы по линейным ускорителям заряженных частиц и применению в них в качестве ускоряющих элементов объёмных СВЧ резонаторов; приведены основные аспекты электродинамики и сверхпроводимости на сверхвысоких

частотах. Здесь же приведён сравнительный анализ «тёплых» и «сверхпроводящих» линейных ускорителей и описаны их преимущества и недостатки. В параграфе «Современные технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов» приведён обзор существующих на сегодняшний день технологий изготовления сверхпроводящих резонаторов.

Первая глава диссертации посвящена технологии изготовления деталей сверхпроводящего одноячеечного резонатора на частоту 1.3 ГГц – здесь представлены результаты завершённой научно-исследовательской разработки производственного цикла изготовления всех деталей одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора на частоту 1.3 ГГц с подробным описанием отработанных режимов на каждом технологическом этапе изготовления.

В результате выполненных расчётов определён требуемый профиль одноячеечного резонатора, аналогичный профилю резонатора ИС. Этот результат лёг в основу Технического Задания к изготовлению полуячеек из ниобиевого листа толщиной 2.8 мм, которая обеспечивает необходимую механическую прочность и достаточную теплопроводность для эффективного охлаждения резонатора жидким гелием. В качестве допуска на точность изготовления экспериментальной серии резонаторов было заложено отклонение ± 100 мкм от требуемого профиля.

Выполнены экспериментальные исследования качества образцов ниобия от различных производителей (Россия, Казахстан, Китай, Япония) и принято решение использовать ниобий от зарекомендованного производителя из Китая – Ningxia Orient Tantalum Industry Co. Ltd., у которого измеренный коэффициент остаточного удельного сопротивления (residual resistivity ratio) составил $RRR = 311$. Проведена глубокая материаловедческая экспертиза образцов материала на этапе поставки: исследовано качество поверхности листового ниобия и проведён анализ микроструктуры. Такой входной контроль подтвердил высокое качество материала от выбранного поставщика и его пригодность к применению для изготовления резонаторов.

На полученном материале полностью освоена технология химического травления особолистого ниобия по методу ВСП (buffered chemical polishing): выбран состав смеси кислот – смесь плавиковой (HF, 38-49%), азотной (HNO₃, 65-69.5%) и фосфорной (H₃PO₄, 85%) кислот в соотношении компонентов 1:1:2; отработаны режимы химической очистки поверхности материала методом ВСП. Температура смеси во время обработки поддерживалась в пределах 10-14 °С путем погружения ванны со смесью кислот и

образцами в емкость со льдом и проточной водой. Экспериментально установлено, что ВСП-метод позволяет выполнить как удаление поверхностных поврежденных слоев, так и очистку поверхности после операций механической обработки деталей резонатора перед электронно-лучевой сваркой. Спроектирована технологическая оснастка для предварительной полировки поверхности ниобия на всех технологических этапах изготовления резонатора. Разработана методика выявления и удаления дефектов материала и химических остатков, возникающих в результате химической обработки, основывающаяся на шлифовании поверхности, химическом травлении и электрополировке.

Для изготовления базовых деталей резонаторов был предложен и реализован принципиально новый метод формообразования полуячеек посредством применения технологии *гидроударной штамповки, ранее не применявшийся для задач изготовления СВЧ-резонаторов*. Суть этой технологии заключается в том, что боек, разогнанный до высокой скорости энергией сжатого воздуха, ударяет по жидкости, находящейся в рабочей камере, создавая в ней импульс давления, что деформирует листовую заготовку по матрице. Данный метод выглядит предпочтительней классических методов инструментальной штамповки «пуансон-матрица», так как обладает такими существенными преимуществами как: низкая стоимость оснастки; отсутствие уплотнений; высокое и равномерное деформирующее усилие жидкости, которое гарантирует точное копирование матрицы. Особенно отметим: ввиду высокой скорости деформации при гидроударной штамповке практически весь объем металла находится в пластическом состоянии, что приводит к достижению результата принципиальной важности – отсутствию пружинения, а значит к существенному повышению точности конечных изделий. Сверхчистый ниобий – высокопластичный металл и поэтому обладает высокой схватываемостью с деформирующим инструментом. Это приводит к снижению качества поверхности изделий, а гидроударная штамповка, благодаря минимальному контакту инструмента с заготовкой, лишена этого недостатка. Таким образом, гидроударная штамповка полуячеек резонаторов представляется весьма перспективным направлением при изготовлении как опытных партий резонаторов, так и при массовом производстве сверхпроводящих ниобиевых резонаторов.

Ниобий – относительно дорогой материал, поэтому для отработки технологии штамповки полноразмерных полуячеек целесообразно использовать модельные материалы. В работе в качестве модельных материалов выбраны медь М1М и

алюминиевый сплав АМцМ. Применимость этих материалов в качестве модельных подтверждена статическими испытаниями образцов на растяжение в соответствии с ГОСТ 11701-84, в которых были определены основные прочностные параметры применённых материалов. Дополнительно проведён анализ микроструктуры этих материалов при деформации образцов. Результаты этих испытаний показали: прочностные свойства ниобия высокой чистоты находятся в интервалах между соответствующими характеристиками меди и алюминия. Таким образом, медь и алюминий пригодны для использования в качестве модельных материалов при исследованиях по штамповке полулунных резонаторов.

Следующим этапом для оценки «штампуемости» были динамические испытания образцов для исследования влияния высокоскоростной деформации на способность этих материалов к глубокой вытяжке методом гидроударной штамповки. Отметим, что до представленных в настоящей диссертации результатов, отсутствовали исследования штампуемости не только сверхчистого ниобия, но и ниобия любой чистоты при гидроударном нагружении. Поэтому оценка штампуемости сверхчистого ниобия при гидроударной штамповке является актуальной и принципиально новой задачей.

Оценка штампуемости листового материала имеет большое производственное значение; известны многие методы оценки штампуемости, но единого универсального метода оценки штампуемости нет и это закономерно, т.к. в листовой штамповке существует множество технологических операций и все они отличаются по виду деформации, напряженно-деформированному состоянию, условиям трения и массе других факторов. Поэтому штампуемость материала исследуется для каждой характерной операции отдельно на основе экспериментов в условиях, близких к реальным. В настоящей работе строилась диаграмма штампуемости материалов, подвергаемых операции глубокой вытяжки листовой заготовки путём гидроударного нагружения.

Полученная диаграмма штампуемости ниобия приведена на Рисунке 1. Эти данные являются новыми для ниобия, и ранее в литературных источниках и лабораторных исследованиях отсутствовали.

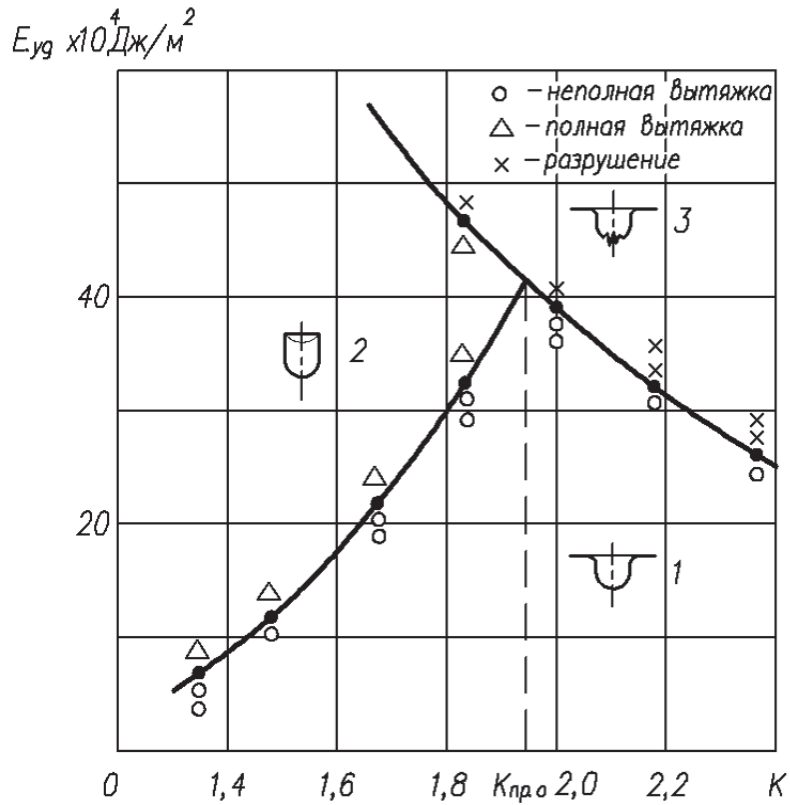


Рисунок 1: Диаграмма штампуемости сверхчистого ниобия

Изображённые на этой диаграмме экспериментальные кривые определяют связь между начальной степенью вытяжки, энергией удара и характером вытяжки. Из рисунка видно: кривые штампуемости являются границами трех характерных областей. Область 1 определяет такие соотношения удельной энергии бойка $E_{уд}$ и начальных степеней вытяжки K , при которых можно получить только неполную вытяжку, то есть деталь всегда будет с фланцем. Область 2 определяет соотношение параметров, при которых происходит полная вытяжка заготовки (всегда без фланца), а область 3 характеризуется тем, что здесь при любых соотношениях энергии бойка и начальной степени вытяжки заготовка разрушается. Общая для всех трех областей точка на кривых штампуемости соответствует предельной степени вытяжки $K_{пр.0}$ – этой точке соответствует максимальный размер заготовки, полную вытяжку которой можно произвести за одно нагружение. Кроме этого видно, что предельной степени вытяжки соответствует единственное значение необходимой удельной энергии, в то время как любой начальной степени вытяжки, меньше предельной, соответствует определенный диапазон удельных энергий бойка. Этот диапазон уменьшается по мере приближения начальной степени вытяжки к критической, а значит чувствительность материала к избытку энергии

возрастает, и отклонение ее от оптимального значения может привести к разрушению или неполной вытяжке заготовки.

Выполненные эксперименты впервые установили значение предельной степени вытяжки сверхчистого ниобия $K_{np.0} = 1.92$ и обнаружили хорошую штампуемость сверхчистого ниобия при гидроударном нагружении. Для меди М1М и алюминиевого сплава АМцМ при гидроударном нагружении в таких же условиях эти показатели соответственно равны 1.91 и 1.94. Таким образом, применение этих материалов в качестве модельных позволило отработать режимы штамповки полноразмерных полуячеек из особоочистого ниобия.

Эти, полученные впервые для ниобия, данные, позволили установить энергетические показатели процесса гидроударной вытяжки полуячеек резонатора из сверхчистого ниобия и разработать технологический процесс изготовления. Для штамповки полноразмерных полуячеек была спроектирована и изготовлена штамповая оснастка для гидроударного прессы – матрица для штамповки полуячеек, зажимное устройство и вспомогательные детали. Штамповка полуячеек резонатора проводилась в Минске в Физико-техническом институте НАН Беларуси на гидроударном прессы СФТ-510. Отработку технологии гидроударной штамповки полноразмерных полуячеек было решено осуществить на материале АМцМ, как наименее пластичном. Это позволило минимизировать количество экспериментов на меди М1М и ниобии высокой чистоты, а значит уменьшить стоимость работ. Результаты отработки технологии на алюминивно-марганцевом сплаве использованы для определения всех технологических показателей для меди и ниобия в соответствии с их прочностными и пластическими свойствами, полученными как при испытаниях на растяжение, так и на штампуемость.

Проведённые исследования позволили впервые в практике изготовления ниобиевых резонаторов методом гидроударной штамповки *получить готовые детали с первой заготовки* как для модельных материалов, так и для сверхчистого ниобия.

Для определения точности изготовления полуячеек резонатора контролировались два размера: внутренний диаметр в области экватора резонатора и внутренний диаметр в области ириса (место стыковки резонатора с трубкой дрейфа). Это – главные размеры полуячеек, по которым они электронным лучом свариваются друг с другом и с трубками дрейфа. Отклонение измеряемых диаметров не превысило 0.1 мм – это указывает, что применённый метод гидроударной штампковки обеспечивает высокую точность изготовления. Подобный результат недостижим для инструментальной штамповки и

фактически такие отклонения характерны для процессов обработки металлов резанием. Для деталей таких размеров в справочниках по холодной штамповке приводятся допускаемые отклонения по диаметру на порядок больше ($\pm 0.4 - 0.9$ мм) по сравнению с достигнутыми отклонениями ($0.05 - 0.1$ мм) при гидроударной штамповке.

Качество поверхности отштампованных гидроударным методом изделий определяется только качеством поверхности исходного материала. Измеренная средняя шероховатость исходного листового сверхчистого ниобия от фирмы Ningxia (от 0.6 до 0.958 мкм) практически не изменилась на отштампованных изделиях.

Подведём итоги применения предложенного метода гидроударной штамповки полуячеек резонаторов:

- Проведены статические и динамические исследования свойств ниобия и модельных материалов. Показано, что медь М1М и алюминиевый сплав АМцМ пригодны для применения в качестве модельных материалов при экспериментальной отработке технологии гидроударной штамповки полуячеек резонатора.

- Впервые экспериментально определена предельная степень вытяжки при гидроударной штамповке ниобия высокой чистоты. Установлено, что ниобий обладает хорошей штампуемостью при гидроударном нагружении и пригоден к штамповке полуячеек резонатора.

- Изготовлена технологическая оснастка для штамповки полуячеек резонатора, на которой отштампованы полуячейки из модельных материалов и из ниобия.

- Впервые методом гидроударной штамповки изготовлены детали резонатора из ниобия. Выполненные исследования показали, что гидроударный метод штамповки полностью удовлетворяет требованиям по точности, качеству и экономичности, предъявляемым к методу изготовления сверхпроводящих ниобиевых резонаторов.

Ключевое преимущество технологии гидроударной штамповки заключается в *отсутствии пружинения*, что обеспечивает достижение высокой точности изготовления при серийном производстве. В отличие от традиционной инструментальной штамповки, при которой происходит упругая деформация заготовки и имеет место остаточное пружинение материала, гидроударная штамповка обеспечивает пластическую деформацию материала. При этом ввиду высокой скорости деформации имеет место рекристаллизация зерна, что негативно сказывается на *RRR* ниобия. Однако этот недостаток нивелируется в дальнейшей технологической цепочке

изготовления резонаторов, в которой имеется несколько стадий высокотемпературного отжига.

Следующая технологическая операция изготовления полуячеек – это токарная обработка торцов отштампованных заготовок. Помимо полуячеек, токарной обработке также подвергаются трубки дрейфа и фланцы резонатора, которые тоже изготавливаются из особоочистого ниобия. Токарная обработка резанием – это завершающий этап изготовления деталей резонаторов. Отработаны режимы такой мехобработки ниобия высокой чистоты и создана вся необходимая технологическая оснастка. Наилучшие результаты в проведённых испытаниях показали резцы с пластинками ВК8 – эти резцы были выбраны для дальнейших работ. Обработка резанием проводилась под постоянной струей смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), что предотвратило нагрев в зоне резания более 80°C . В качестве СОЖ использовали эмульсию DASCOOL-S44 в смеси 1:20 с водой. Использовали изолированную подачу СОЖ. Режимы резания были очень щадящими: небольшая глубина резания - не более 0.2 мм; минимальная ручная подача.

Таким образом, были экспериментально отработаны режимы механической обработки деталей резонатора из ниобия высокой чистоты и создана необходимая технологическая оснастка полного производственного цикла. Отдельные детали резонатора и резонатор в сборе представлены на Рисунке 2.

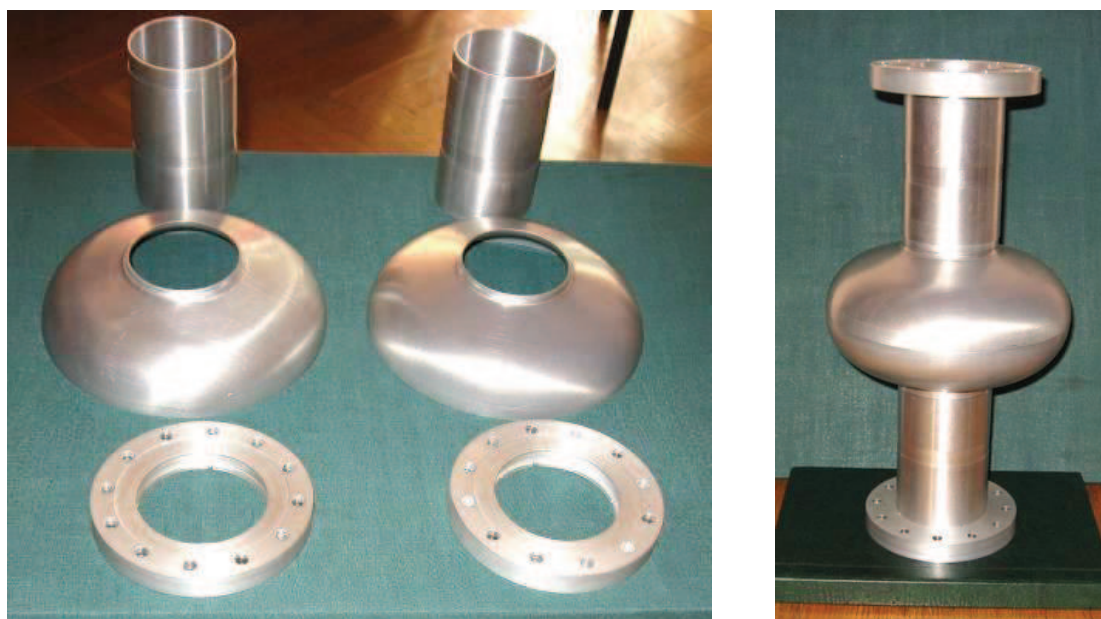


Рисунок 2: Изготовленные детали одноячеечного резонатора из ниобия (слева) и резонатор в сборе (справа)

Проведённые исследования завершают полный производственный цикл изготовления деталей сверхпроводящих ниобиевых одноячеечных резонаторов на частоту 1.3 ГГц. Изготовлены все детали резонатора, состоящего из двух полуячеек, двух трубок дрейфа и двух фланцев. Ниже суммированы основные результаты НИОКР, описанных в первой главе диссертации, которые обеспечили создание собственной оригинальной технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов, основанной на методе гидроударной штамповки.

- Для проектирования сверхпроводящего резонатора на частоту 1.3 ГГц разработан оригинальный алгоритм расчёта и выполнена его программная реализация [2,7,11,17]. Это позволило найти оптимальную форму резонатора, обеспечивающую минимальную напряжённость электрического поля на стенках резонатора и максимальную на его оси в соответствии с проектными параметрами ускорителя ИС.

- Проведено материаловедческое исследование образцов ниобия от различных производителей (Россия, Казахстан, Китай, Япония) и принято решение использовать ниобий от производителя из Китая – Ningxia Orient Tantalum Industry Co. Ltd.

- Полностью освоена технология химического травления ниобия методом ВСР, ранее для ниобия не применявшаяся в ОИЯИ и научных центрах стран-участниц [9,17]. Отработана методика и спроектирована технологическая оснастка для предварительной полировки поверхности ниобия перед выполнением сварки деталей резонатора. Разработана методика выявления и удаления дефектов материала и химических остатков как результата химической обработки, основывающаяся на шлифовании поверхности, химическом травлении и электрополировке.

- Исследовано влияние высокоскоростной деформации на способность ниобия к глубокой вытяжке. Определены предельные степени вытяжки модельных материалов и сверхчистого ниобия: 1.94 для алюминия АМцМ, 1.91 для меди М1М, 1.92 для особоистого ниобия. Проведён анализ структуры образцов после испытаний на растяжение. Впервые получена диаграмма штампуемости высокочистого ниобия для метода гидроударной штамповки [5,17].

Таким образом, отработаны все технологические процедуры изготовления деталей резонаторов. Достигнутые параметры сопоставимы с получаемыми в ведущих зарубежных центрах, специализирующихся на производстве резонаторов. Подобные исследования с особоистым ниобием в ОИЯИ и научных центрах стран-участниц ранее не проводились.

Вторая глава посвящена отработке технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) ниобия – также крайне важной технологической операции, требующей особого внимания при изготовлении резонатора. В отличие от других вариантов сварки, ЭЛС сохраняет чистоту металла в зоне расплавления и термического влияния на уровне исходного материала. Экспериментальные исследования по отработке режимов ЭЛС ниобия проводились на оборудовании для электронно-лучевой обработки на базе энергоблока ЭЛА-15 в Физико-техническом институте НАН Беларуси (г. Минск).

Отработка режимов ЭЛС выполнена на образцах $70 \times 25 \times 2.8$ мм листового ниобия фирм Токуо Denkaі (Япония) и Ningxia (Китай). Кромки свариваемых образцов обрабатывались на фрезерном станке с учетом опыта проведенных исследований по механической обработке ниобия. Для фиксации взаимного расположения образцов была сконструирована и изготовлена экспериментальная оснастка. Для удаления дефектов и загрязнений перед сваркой стравливался поверхностный слой металла толщиной 40 мкм методом ВСП. На изготовленных образцах были отработаны режимы, позволившие получить сварные соединения с полным проплавлением и с шириной сварного шва, равной 1.5 - 2 толщины листа. В проведенных экспериментах получены зависимости геометрических характеристик сварного шва от мощности электронного луча при неизменной скорости сварки 10 мм/с и ускоряющем напряжении 60 кВ. Экспериментально установлено: увеличение тока сварки (мощности луча) увеличивает ширину сварного шва, как у входа луча, так и у корня шва. Аналогично наблюдается провисание сварочной ванны у корня шва при увеличении мощности. Полученные зависимости позволили контролировать геометрические параметры сварных соединений.

Для сварки резонаторов из ниобия выбраны следующие значения параметров режима ЭЛС: ускоряющее напряжение 60 кВ, ток сварки 53 мА, скорость сварки 10 мм/с. Выбранные параметры обеспечили получение сварного шва с шириной 4 - 5 мм у входа луча, 3 - 4 мм у корня шва и провисание сварочной ванны не более 0.3 мм при предельно допустимом значении 0.5 мм.

Также отработан вариант ЭЛС ниобия с использованием предварительного подогрева металла расфокусированным электронным лучом с током, равным 50 % от тока сварки. Экспериментально установлено: в таком режиме сварки геометрические размеры сварного шва увеличиваются. Конкретно достигнута требуемая геометрия сварного шва (4.6 - 5.8 мм у входа луча и 3.6 - 5.0 мм у корня шва) при токе луча 50 мА.

Исследование микроструктуры и микротвердости сварного шва, а также изучение сверхпроводящих характеристик соединения, проведено на трех сериях образцов, которые вырезались методом электроэрозии в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами 40×2×2.8 мм. После электроэрозионной резки с помощью химического травления с поверхности образцов был удален слой материала толщиной 20 мкм. Первая серия образцов (Серия 0) – это контрольные образцы, которые вырезались из материала в состоянии поставки и не подвергавшегося термическому воздействию. Вторая серия (Серия 1) – проплавленные образцы, которые подверглись термическому воздействию электронным лучом по центру сплошного образца для получения зоны проплавления на всю толщину. Третья серия (Серия 2) – это две пластины, сваренные методом ЭЛС и вырезанные перпендикулярно шву так, чтобы зона проплавления была посередине образца.

Анализ микроструктуры свидетельствует о достижении сварного соединения высокого качества: отсутствуют инородные включения; средний размер поликристаллического зерна растёт от 30 - 50 мкм на границе зоны термического воздействия до 1000 мкм в зоне проплавления. Анализ изменения микротвердости вдоль заданной линии не выявил существенных изменений твердости сварного соединения по отношению к не подвергавшемуся термическому воздействию металлу. Значения микротвердости в области, не подвергавшейся термическому воздействию, и в зоне термического воздействия находятся в пределах HV 60 - 70, а для металла сварного шва – HV 60 - 75.

Изучение критических сверхпроводящих характеристик образцов проводилось путём измерения их резистивных характеристик, в том числе в магнитном поле [4]. Для этого на поверхность ниобиевых образцов ультразвуковой пайкой индием наносились токовые контакты – такой способ подведения электродов обеспечил надёжный контакт с образцом даже в условиях термоциклирования в интервале температур 2 - 300 К. Измерения электросопротивления проводились четырехзондовым методом в режиме постоянного тока 0.2 А с коммутацией его направления для исключения влияния асимметрии контактного сопротивления и паразитных термо-ЭДС. Температурные зависимости сопротивления исследовались в режиме непрерывного охлаждения со скоростью 1 К/мин, достаточной, чтобы отклонение температуры от задаваемой в момент измерения не превышало 0.1 К. Критический магнитный переход изучался в диапазоне ± 2 Тл с шагом 0.05 Тл при 4 К с термостатированием в течение получаса

перед началом измерений. В Таблице 1 представлены измеренные основные критические характеристики: температура окончания сверхпроводящего перехода при охлаждении образцов $T_{кр}$ и его ширина $\Delta T_{кр}$, а также величина магнитного поля, при которой металл переходит в нормальное состояние $B_{кр}$, и ширина данного перехода $\Delta B_{кр}$.

Таблица 1: Измеренные критические характеристики сверхпроводящего перехода

Параметр	Серия 0	Серия 1	Серия 2
$T_{кр}$	8.8 К	8.6 К	8.6 К
$\Delta T_{кр}$	0.55-0.6 К	0.65-0.7 К	0.65-0.7 К
$B_{кр}$	0.5 Тл	0.4 Тл	0.4 Тл
$\Delta B_{кр}$	0.15 Тл	0.2-0.25 Тл	0.2-0.25 Тл

В этих измерениях установлено: проплавление электронным лучом (Серия 1) не вносит существенных изменений в изучаемые характеристики по сравнению с контрольными образцами Серии 0 – такие изменения критических сверхпроводящих свойств образцов, проплавленных электронным лучом, естественны, т.к. в области термообработки образуются дефекты металлической структуры за счет концентрации примесных элементов в зоне проплава. Такое незначительное ухудшение параметров сверхпроводимости проплавленных и сваренных образцов по отношению к контрольным не будет являться критичным для эксплуатационных характеристик ниобиевого резонатора при условии создания качественного шва по всему периметру резонатора.

Характеристики образцов реального сварного соединения (Серия 2) идентичны проплавленным образцам (Серия 1) – это свидетельствует, что сверхпроводящие свойства ниобиевых образцов зависят только от условий термического воздействия, которые изменяют микроструктуру (в частности увеличивают размер поликристаллических зерен) и не зависят от параметров ЭЛС.

Таким образом, выполненные измерения критических параметров показывают, что незначительные ухудшения сверхпроводящих свойств листового ниобия при его проплавлении электронным пучком при достигнутом качестве электронно-лучевой сварки носят естественный характер, не являются принципиальными для изготовления резонаторов и не окажут влияние на СВЧ-характеристики ниобиевого резонатора. Достигнутые параметры говорят о высоком качестве получаемых сварных соединений осебнолистного ниобия толщиной 2.8 мм при найденных режимах электронно-лучевой

сварки. Получаемые при этих параметрах сварные соединения отвечают требованиям качества изготовления сверхпроводящих резонаторов.

На основании проведенных исследований разработан технологический процесс электронно-лучевой сварки деталей ниобиевых резонаторов, полученных после гидроударной штамповки и механической обработки. Перед сваркой изготовленные детали промывались в спирте и подвергались химической обработке методом ВСП со снятием поверхностного слоя 20 мкм. Перед сваркой всех компонентов предварительно выполнялись прихваточные швы. Для соединений трубок дрейфа с фланцами и получайками выполнялись по 4 прихваточных шва длиной 2 мм. При выполнении прихваточных швов на экваторе получайки закреплялись в сборочной оснастке, которая обеспечивала точную фиксацию соединяемых компонентов перед наложением прихваток. Затем устанавливалось 8 прихваточных швов длиной 2 мм, после чего сборочная оснастка демонтировалась и выполнялась окончательная сварка всех деталей резонатора. После сварки детали остывали 2 часа в сварочной камере. Затем с внутренней поверхности сваренного резонатора методом химического травления удалялся слой 20 мкм, и резонатор промывался деионизованной водой. Сперва технология сварки была отработана на модельных материалах и изготовлены резонаторы из меди и алюминия, после чего были созданы три опытных образца одноячеечных резонаторов из особоочищенного ниобия.

Таким образом, отработан завершающий этап технологического цикла изготовления резонаторов. Исследованы зависимости характеристик сварного шва от режимов ЭЛС ниобия. Отработаны оптимальные режимы электронно-лучевой сварки ниобия с полным проплавлением и получены сварные соединения требуемой геометрии [10,12]. До начала этих работ исследования ЭЛС ниобия при изготовлении сверхпроводящих резонаторов в ОИЯИ и научных центрах стран-участниц не проводились.

Исследования полученных образцов сварного соединения ниобия показали: достигнутые результаты по ЭЛС позволяют сваривать высокочистый ниобий с высоким качеством сварного шва, удовлетворяющим требованиям к изготовлению сверхпроводящих резонаторов для ускорителя ИС [4]. Достигнутые параметры сопоставимы с получаемыми в ведущих зарубежных центрах, специализирующихся на производстве резонаторов.

Третья глава диссертации посвящена измерениям высокочастотных характеристик опытной партии одноячеечных резонаторов, изготовленных методом гидроударной штамповки с применением технологии электронно-лучевой сварки. Проведено критическое исследование доступных литературных источников по проблеме СВЧ-измерений и криогенных испытаний при гелиевых температурах. Укомплектована необходимая экспериментальная аппаратура и отработана методика СВЧ-измерения характеристик резонаторов. На основе векторного анализатора цепей, стабилизированного высокоточным кварцевым генератором и рубидиевым опорным генератором, создан СВЧ-стенд для испытаний резонаторов на уровне мощности 10 мВт при комнатной температуре и при 4.2 К, обеспечивший измерение добротности до 10^{10} на частоте 1.3 ГГц [8,15,17].

Параллельно, при выполнении исследований, был предложен и обоснован оригинальный новый метод прецизионного измерения ультравысоких собственных добротностей сверхпроводящих резонаторов в диапазоне $10^8 - 10^{10}$ [3]. Идея этого метода основана на возбуждении колебаний в резонаторе электронным потоком. Достоинство представленного метода заключается в его неинвазивности – в отличие от общепринятых методов здесь резонатор не связан с какими-либо внешними СВЧ цепями, а его собственная добротность определяется по потере мощности электронным потоком и по пусковому току. Проведено численное моделирование такого эксперимента, и в результате выполненных расчетов по выявлению условий генерации найдены значения необходимой величины ускоряющего напряжения и тока пучка электронов и сформулированы требования к измерительной аппаратуре. Детальное описание предложенной методики опубликовано в работе [3] и, как представляется, будет востребовано после принятия решения о развертывании и финансировании полномасштабных работ по реализации проекта ИЛС.

Для проведения СВЧ-измерений разработано, запатентовано и изготовлено устройство связи резонатора [1,17], обеспечившее оптимальное возбуждение резонатора: достигнутый уровень согласования обеспечивает КСВ = 1.01, что соответствует передаче в резонатор 99.9 % подаваемой СВЧ мощности. Разработанное устройство отличается от аналогов тем, что оно снабжено устройством регулировки высоты петли связи с возможностью поворота на 360° . Высота петли связи равна или кратна $1/8$ длины волны СВЧ-колебаний, соответствующих резонансной частоте резонатора, а устройство регулировки обеспечивает перемещение тяги на величину не

менее 0.1 от высоты петли связи. В измерениях при комнатной температуре с применением разработанного устройства связи была осуществлена настройка оптимального режима согласования резонатора с измерительной аппаратурой при $KCB = 1.01$, что соответствует передаче в резонатор 99,9 % подаваемой СВЧ мощности. Полученное при этом значение нагруженной добротности $2.8 \cdot 10^4$ соответствует расчетной величине для температуры 293 К и намного больше того значения, которое было получено только при повороте петли связи, т.е. как предусмотрено в ближайшем существующем аналоге. Измеренная собственная частота резонатора составила 1.27 ГГц, что также соответствует расчётному значению основной моды колебаний и говорит об отсутствии паразитных мод СВЧ-поля.

Для испытаний резонаторов при температуре жидкого гелия проведены НИОКР по созданию криогенного измерительного стенда. Определены основные характеристики гелиевого криостата, необходимого для проведения испытаний одноячеечного резонатора заданной геометрии и размера [13-14]. Сформулированы и реализованы технические условия герметизации системы соединения, ввода и вывода СВЧ излучения к измерительному комплексу. Создан криогенный гелиевый стенд и успешно испытан при рабочей температуре 4.2 К. Реализованная криостатирующая система обеспечивает постоянный контроль уровня гелия в криостате с точностью до 2 литров и позволяет регулировать давление паров гелия от 0 до 0.3 бар. Созданная система криостатирования обеспечила минимизацию теплопритоков при СВЧ-испытаниях одноячеечного сверхпроводящего резонатора.

На созданных СВЧ-стендах испытаны резонаторы при комнатной температуре и при температуре жидкого гелия. Результаты испытаний приведены в Таблице 2 в хронологическом порядке. В первом столбце указана дата и условия эксперимента, а также материал испытываемого резонатора. В остальных столбцах показаны измеренные параметры: собственная частота резонатора, коэффициент стоячей волны в эксперименте и нагруженная добротность. Всего испытаниям были подвергнуты 6 резонаторов – «эталонный» образец ниобиевого резонатора из FNAL и пять изготовленных резонаторов – медный, алюминиевый и три ниобиевых. На резонаторах из модельных материалов была отработана методика проведения криогенных испытаний перед завершающими испытаниями ниобиевых резонаторов.

Таблица 2: Результаты испытаний СВЧ-резонаторов

Эксперимент	Частота	КСВ	Добротность
20.08.2012, Ниобий (Фермилаб) Комнатная температура	1.272969689	1.01	28193
01.03.2013, Ниобий (Фермилаб) Гелиевая температура Без стандарта частоты	1.274979678	-	$> 10^8$
05.03.2014, Ниобий (Фермилаб) Гелиевая температура	1.274977156	-	$0.82 \cdot 10^9$
25.09.2014, Медь Комнатная температура	1.2651811	1.0005	71559
16.10.2014, Медь Гелиевая температура	1.2940755	1.0007	94915
23.10.2014, Алюминий Комнатная температура	1.2901982	1.0016	55461
05.11.2014, Алюминий Гелиевая температура	1.2902357	1.0007	123540
19.11.2014, Ниобий (обр. № 1) Комнатная температура	1.290197258	1.003	37549
04.12.2014, Ниобий (обр. № 1) Гелиевая температура	1.290185765	1.0001	$1.5 \cdot 10^9$
10.02.2015, Ниобий (обр. № 2) Комнатная температура	1.2903500	1.0032	36564
06.03.2015, Ниобий (обр. № 2) Гелиевая температура	1.3002077	1.0001	$1.7 \cdot 10^9$
11.05.2015, Ниобий (обр. № 3) Комнатная температура	1.2901429	1.0017	39552
08.06.2015, Ниобий (обр. № 3) Гелиевая температура	1.2901127	1.0001	$2.5 \cdot 10^9$

Во всех ниобиевых резонаторах при криогенных испытаниях достигнута сверхпроводимость. Измеренная добротность резонатора из FNAL оказалась ниже добротности изготовленных резонаторов, изготовленных с применением технологии гидроударной штамповки. Это может быть связано с тем, что при транспортировке и длительном хранении этого резонатора его внутренний поверхностный слой насытился газами из атмосферы на существенную глубину, а также образовался оксидный слой. Наши же ниобиевые резонаторы поступали на СВЧ-стенд сразу после производства. Максимально достигнутое значение добротности последнего изготовленного резонатора составило $2.5 \cdot 10^9$. Данное значение является методическим и аппаратным пределом постановки эксперимента и связано с нестабильностью измеряемой ампер-частотной характеристики в ходе испытания ввиду непрерывных флуктуаций давления в замкнутом объеме с кипящим гелием. Наилучшее достигнутое значение КСВ в криогенных испытаниях созданных ниобиевых резонаторов составило 1.0001. Очевидно, это значение является предельным для этих измерений, учитывая их

методические особенности и аппаратные характеристики созданного испытательного стенда.

Разброс в измеренной резонансной частоте лежит в пределах 0.7 % для всех изготовленных резонаторов во всех проведённых экспериментах. Для трёх ниобиевых резонаторов разброс частоты ещё уже и составляет 0.5 % в криогенных испытаниях и 0.009 % в испытаниях при комнатной температуре. Последнее значение наиболее показательно, т.к. в измерениях при комнатной температуре отсутствует плавание резонансной частоты ввиду нестабильности давления, что имеет место при измерении в жидком гелии. Такое небольшое различие в значениях собственных частот всех трёх изготовленных ниобиевых резонаторов свидетельствует о достижении высокой точности производства в разработанном технологическом процессе.

Таким образом, проведённые СВЧ-испытания изготовленных резонаторов при комнатной температуре и при 4.2 К [6,15-17] показали: в созданной партии одноячеечных резонаторов достигнута стабильная долговременная сверхпроводимость и получена высокая повторяемость частоты резонаторов, изготовленных по разработанной технологии, что свидетельствует о реализации жестких требований и допусков. Качество изготовленных сверхпроводящих резонаторов удовлетворяет современным требованиям промышленного производства, эти резонаторы могут быть конкурентоспособными по сравнению с зарубежными аналогами.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты завершённого комплекса работ, обеспечившие создание оригинальной технологии изготовления сверхпроводящих резонаторов из ниобия на частоту 1.3 ГГц:

1. Создана технология изготовления сверхпроводящих ускоряющих резонаторов из ниобия для электронных линаков. Разработана, изготовлена и исследована опытная серия резонаторов на частоту 1.3 ГГц. В созданных по собственной оригинальной технологии резонаторах достигнута стабильная долговременная сверхпроводимость и получена высокая повторяемость частоты.
2. Определены геометрические параметры резонатора для частоты 1.3 ГГц в соответствии с проектными параметрами ускорителя ILC и разработано Техническое задание для изготовления одноячеечного резонатора [2].
3. Впервые в мировой практике создания сверхпроводящих резонаторов предложен и реализован метод гидроударной штамповки ниобиевых полуячеек [5]. Впервые в

ОИЯИ и научных центрах стран-участниц создана экспериментальная база для полного производственного цикла изготовления одноячеечных резонаторов. Экспериментальным путём впервые получена диаграмма штампуемости высокочистого ниобия для гидроударной штамповки и определены ключевые параметры процесса, обеспечившие полную вытяжку заготовки: предельная степень вытяжки сверхчистого ниобия составляет 1.92 при удельной энергии удара 0.42 МДж/м^2 . Обеспечена точность 100 мкм в контролируемых проектных диаметрах полуячеек ($\varnothing 206.9 \text{ мм}$ и $\varnothing 78.1 \text{ мм}$).

4. Реализованы режимы электронно-лучевой сварки особоочистого ниобия, отвечающие современным критериям промышленного производства сверхпроводящих резонаторов [4]. Анализ микроструктуры сварных швов свидетельствует о достижении соединения высокого качества. Измерены критические температура $T_{KP} = 8.6 \text{ К}$ и магнитное поле $B_{KP} = 0.4 \text{ Тл}$ образцов сварного соединения: отклонение этих характеристик от цельнолиствого ниобия не превышает 10 %, что является естественным следствием высоколокального термического воздействия электронным лучом.
5. Предложен и обоснован принципиально новый метод измерения ультравысоких ($10^8 - 10^{10}$) собственных добротностей резонаторов [3]. Существенное преимущество метода – его «неинвазивность»: резонатор не связан с внешними СВЧ цепями, а его собственная добротность определяется по потере мощности электронным потоком и по пусковому току при монотронной генерации. В результате численного моделирования определены стартовые условия монотронной генерации в резонаторе на 1.3 ГГц, найдены значения необходимой величины тока пучка электронов.
6. Разработано, запатентовано и экспериментально исследовано устройство связи [1], обеспечивающее эффективное возбуждение резонатора. В опытном образце достигнут уровень согласования КСВ = 1.01, что соответствует передаче в резонатор 99.9 % СВЧ мощности.
7. Создана экспериментальная база для исследований одноячеечных СВЧ-резонаторов при комнатной температуре и температуре жидкого гелия. Выполнены СВЧ испытания [6] опытной серии ниобиевых резонаторов, изготовленных впервые с применением технологии гидроударной штамповки. Полученные значения добротности более 10^9 , что подтвердило стабильное достижение в резонаторах

сверхпроводимости. Максимальное измеренное значение добротности составило $2.5 \cdot 10^9$ на частоте 1.29 ГГц при достигнутом $K_{CB} = 1.0001$.

Список публикаций по теме диссертации

- [1] Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Ширков Г.Д., Карпович В.А., Родионова В.Н. и др., «Устройство связи для цилиндрического резонатора СВЧ», Патент ВУ 9583 U 2013.10.03, от 13 марта 2013, Республика Беларусь, 2013.
- [2] Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Кураев А.А., Ширков Г.Д. и др., «Расчет одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов», Письма в ЭЧАЯ, т. 9, № 2, с. 247-268, 2012.
- [3] Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Кураев А.А., Ширков Г.Д. и др., «Измерение ультравысокой собственной добротности путём возбуждения сверхпроводящего резонатора электронным потоком», Письма в ЭЧАЯ, т. 10, № 7, с. 1282-1291, 2013.
- [4] Demyanov S.E., Pobol I.L., Shirkov G.D., Budagov Yu.A., Azaryan N.S. и et al., «Superconducting properties of ultra-pure niobium welded joints», Low Temperature Physics, V. 41, I.7, pp. 522-527, 2015.
- [5] Азарян Н.С., Ширков Г.Д., Журавский А.Ю., Петраковский В.С., Батурицкий М.А., «Изготовление деталей сверхпроводящих резонаторов из ниобия методом гидроударной штамповки», Письма в ЭЧАЯ, т. 13, № 2, с. 345-353, 2016.
- [6] Azaryan N.S., Budagov Yu.A., Karpovich V.A., Pobol I.L., Rodionova V.N., Shirkov G.D. et al., «Measurement of Microwave Parameters of a Superconducting Niobium Cavity», Journal of Engineering Physics and Thermophysics, V. 90, I.1, pp. 242-249, 2017.
- [7] Azaryan N.S. et al., «Superconducting niobium cavity for ILC accelerator», Труды XVI научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ, pp. 79-82, 2012.
- [8] Azaryan N.S. et al., «Creation and testing of the stands for RF measurements of niobium SC cavities at room temperature and at the liquid helium temperature», Труды XVII научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ, pp. 106-110, 2013.
- [9] Азарян Н.С., Юревич С.В. и др., «Исследование процесса химического травления ниобия при изготовлении СВЧ резонаторов», Труды XVII научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ, pp. 116-119, 2013.

- [10] Юревич С.В., Азарян Н.С. и др., «Исследование процесса электронно-лучевой сварки ультрачистого ниобия для изготовления СВЧ резонаторов», Труды XVIII научной конференции молодых учёных и специалистов ОИЯИ, pp. 153-156, 2014.
- [11] Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Кураев А.А., Ширков Г.Д. и др., «Влияние геометрии сопряжения сверхпроводящего ниобиевого резонатора с трубкой дрейфа на его характеристики», Сообщение Объединенного института ядерных исследований P9-2013-49, 2013.
- [12] Поболь И.Л., Юревич С.В., Азарян Н.С. и др., «ЭЛС ниобия для ускоряющих структур», Доклады Санкт-Петербургской Международной научно-технической конференции «Технологии и оборудование ЭЛС - 2014», pp. 135-140, 2014.
- [13] Azaryan N.S. et al., «Dubna-Minsk activity on the development of 1.3 GHz superconducting single-cell RF-cavity», Proceedings of RuPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, pp. 602-604, 2012.
- [14] Azaryan N.S. et al., «Dubna-Minsk SRF technology development status report», Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, pp. 2393-2395, 2013.
- [15] Azaryan N.S., Rodionova V.N. et al., «Superconducting single-cell RF-cavity for ILC accelerator», Proceedings of 8th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW-2013), 2013.
- [16] Azaryan N.S., Rodionova V.N. et al., «Measurement resonance frequency and quality-factor of resonant cavity of Tesla-type in superconducting regime», Proceedings of 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW-2016), 2016.
- [17] Азарян Н.С., Батурицкий М.А. и др., Состояние и перспективы создания резонаторов для нового поколения e^+e^- линейных ускорителей и коллайдеров. Международное рабочее совещание, Минск, 22-25 апреля, 2014 г., Дубна: ОИЯИ P9-2014-98, 2014.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 14.02.2019.
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,50. Уч.-изд. л. 1,63. Тираж 100 экз. Заказ № 59608.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/