

DOI: 10.24412/2077-8481-2025-1-14-22

УДК 621.791

**В. Г. ЗАЛЕССКИЙ**, д-р физ.-мат. наук

**А. И. ПОБОЛЬ**

Физико-технический институт НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУВОЛНОВЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ

### Аннотация

Разработана технология изготовления с применением электронно-лучевой сварки полуволновых резонаторов ускорителей частиц из чистой меди и особо чистого ниобия. Изготовлена партия резонаторов для строящегося комплекса Нуклотрон/NICA.

### Ключевые слова:

электронно-лучевая сварка, резонатор, медь, особо чистый ниобий.

### Для цитирования:

Залесский, В. Г. Использование электронно-лучевой сварки для изготовления полуволновых сверхпроводящих резонаторов ускорителей частиц / В. Г. Залесский, А. И. Поболь // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1 (86). – С. 14–22.

### Введение

Одним из классов изделий, требующих высокой точности изготовления, являются основные узлы ускорителей высокоинтенсивных пучков, которые относятся к мега-сайенс объектам. В ускорителях применяются сверхпроводящие радиочастотные резонаторы из дорогостоящего особо чистого ниобия, обладающие чрезвычайно высокой добротностью. Их конструкции уникальны, а стоимость достигает сотен тысяч евро за одно изделие. Исследуются варианты резонаторов из также дорогостоящей бескислородной меди марки OFC с нанесенным на их внутреннюю поверхность слоем ниобия, Nb<sub>3</sub>Sn либо других материалов, обладающих сверхпроводимостью при низких температурах [1, 2].

Сверхпроводящие ускоряющие структуры обеспечивают существенные преимущества перед традиционными «теплыми» – возможность работать на более низких частотах (1,3 ГГц и ниже), очень низкое электрическое сопротивление и, следовательно, малые резистив-

ные потери в стенках резонаторов. Это требует поддержания резонаторов при работе при температуре жидкого гелия 2...4 К.

Для создания одного ускорителя необходимо от одного-двух до нескольких десятков, сотен (в комплексе XFEL в DESY Гамбург использованы 800 резонаторов типа TESLA) и тысяч (для проектируемого коллайдера ILC потребуется до 18 000 резонаторов TESLA) резонаторов. Это подчеркивает важность высокой точности и недопустимость ошибок при их изготовлении.

Резонаторы изготавливаются из тонколистового (толщиной 3 мм и менее) материала и выполнение соединений отдельных элементов в них может выполняться только путем электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Из-за специфических механических, теплофизических и химических свойств ниобия необходимы значительные трудозатраты при отработке режимов качественного проплавления металла и формирования швов одно- и разнотолщинных элементов, их травлении крайне агрессивными

кислотами.

Каждый тип резонатора – уникальный электрофизический прибор, требующий индивидуального подхода при его конструировании и изготовлении сваркой. В ФТИ НАН Беларуси ранее проведены исследования по выбору оптимальных режимов ЭЛС тонколистовых меди и ниобия, решена задача получения равномерных по геометрическим параметрам сварных соединений с необходимой морфологией лицевой и обратной поверхности сварных швов, изготовлена опытная партия одноячеечных эллиптических 1,3 ГГц резонаторов типа TESLA [3–5]. Такой резонатор имеет относительно простую геометрическую форму.

Востребованы также сверхпроводящие резонаторы существенно более сложной конструкции. Так, в ускорительном комплексе Нуклотрон/NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility), строящемся в ОИЯИ (г. Дубна, Россия) [6] ускорительная система будет формироваться из четырёх полуволновых коаксиальных резонаторов HWR (Half-Wave Resonator). Все резонаторы должны иметь максимально идентичные геометрические размеры, собственную частоту (325 МГц) и добротность (характеризующую уровень потерь энергии в устройстве), близкую к максимально возможной ( $Q = 10^{10}$ ).

Организация мелкосерийного производства партии резонаторов предполагает отлаженный технологический процесс и создание специализированной оснастки для обеспечения повторяемости изделий. Высокая стоимость материалов, сложность изготовления и большое число технологических операций требуют дополнительных инструментов изучения и прогнозирования поведения материалов на каждом этапе производства, в том числе с использованием моделирования на всех этапах создания.

На некоторых элементах резонатора HWR должно выполняться по несколько сварочных операций. Имея в

виду малые габаритные размеры таких элементов и толщину ниобия, высокие теплопроводность и температуру плавления (2740 К), это неминуемо ведет при сварке плавлением к большим температурным деформациям деталей. Учитывая высокую стоимость особо чистого ниобия, особую актуальность приобретает моделирование процесса ЭЛС с целью минимизации затрат на создание таких наукоемких изделий.

Конструкции сверхпроводящих резонаторов (в том числе для комплекса Нуклотрон/NICA) разрабатываются для использования в каждом конкретном комплексе, в мировой литературе отсутствует информация о моделировании и путях предотвращения деформаций в процессе изготовления требуемого резонатора. В [7] выполнен конечно-элементный термомеханический анализ процесса сварки наиболее сложной для проведения ЭЛС детали HWR-резонатора (крышки наружного электрода с трубками) при его изготовлении из меди и ниобия и проведено сравнение различных методик предотвращения коробления при ЭЛС.

### **Материалы, оборудование и методики**

Эксперименты по ЭЛС выполнялись на образцах толщиной 3 мм из меди М1 (99,96 масс. % Cu), особо чистого ниобия фирмы Ningxia OTIC (Китай, общее содержание примесей не более 132 ppm, средний размер зерен ~50 мкм, показатель RRR > 300) и титана BT1-0. Из этих же материалов изготавливались резонаторы.

Использовалось оборудование ЭЛС на базе энергоблоков PZ EB 2,5–15 (Prvá Zváračská, Словакия), а также комплекс КЛ 156 (ИЭС НАН Украины). Характеристики оборудования: ускоряющее напряжение 60 кВ, максимальная мощность в луче 15 кВт (для PZ EB 2,5–15) и 30 кВт (для КЛ 156), уровень вакуума в рабочей камере  $3 \cdot 10^{-3}$  Па.

В процессе ЭЛС использовалась

4-координатная система перемещения образцов и деталей на базе системы ЧПУ Purelogic и ШВП-направляющих с шаговыми двигателями. Для работы с круговыми траекториями применялся наклонно-поворотный стол, подключенный к системе ЧПУ. Блок управления ЧПУ Purelogic коммутирован с электронно-лучевой аппаратурой посредством релейного выхода. Включение и отключение тока луча осуществляется макросом управляющей программы. Регулирование тока луча возможно как в ручном режиме, так и при помощи ПЛК аппаратуры по предварительно заполненной таблице «время – ток сварки – ток фокусировки». Управляющая программа описывается при помощи стандартных G-code команд.

Обязательное условие при изготовлении сверхпроводящих резонаторов – химическое травление (buffered chemical polishing) после проведения каждого этапа механической обработки и непосредственно перед каждой операцией ЭЛС для удаления слоя материала (не менее 40 мкм), на толщине которого возможно внесение загрязнений и образование дефектов. В качестве травителя для ниобия применялась смесь плавиковой HF (38 %), азотной HNO<sub>3</sub> (65 %) и фосфорной H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (85 %) кислот в соотношении компонентов 1 : 1 : 2.

### *Экспериментальная часть*

Исследования по разработке режимов получения соединений в изделиях проводились на первой стадии на листовых материалах из меди, далее – из

ниобия. В статье приводится информация, касающаяся только исследований на ниобии.

Параметры процесса ЭЛС, определяющие характер воздействия луча на материал, – ускоряющее напряжение, ток сварки, скорость сварки и ток фокусировки. От последнего зависят размеры зоны и плотность энергии в месте ее выделения в материале. Для проплавления электронным лучом ниобиевого листа толщиной 3 мм определены следующие энергетические параметры режима воздействия: ускоряющее напряжение – 60 кВ, ток сварки – 51 мА, скорость сварки – 10 мм/с. Данные значения энергетических характеристик режимов электронно-лучевого воздействия позволили получить зону проплавления шириной 3 мм с лицевой стороны проплавляемой пластины и 1 мм с обратной стороны. Внешний вид сварного соединения представлен на рис. 1. Заметно значительное возрастание размера зерна ниобия в расплавленном металле. Для резонаторов это не является отрицательным фактором. Идеальным вариантом для их изготовления считается использование монокристаллов, однако их стоимость чрезмерно велика.

Совместно сотрудниками ФТИ НАН Беларуси и НИЯУ «МИФИ» выполнено моделирование сверхпроводящего полуволнового резонатора HWR для ускорительного комплекса Нуклотрон/NICA. На рис. 2, а показана 3D-модель полуволнового резонатора HWR, он включает корпус из ниобия (рис. 2, б) и кожух из титана (не показан).



Рис. 1. Внешний вид сварного соединения на ниобии толщиной 3 мм ( $\times 10$ )

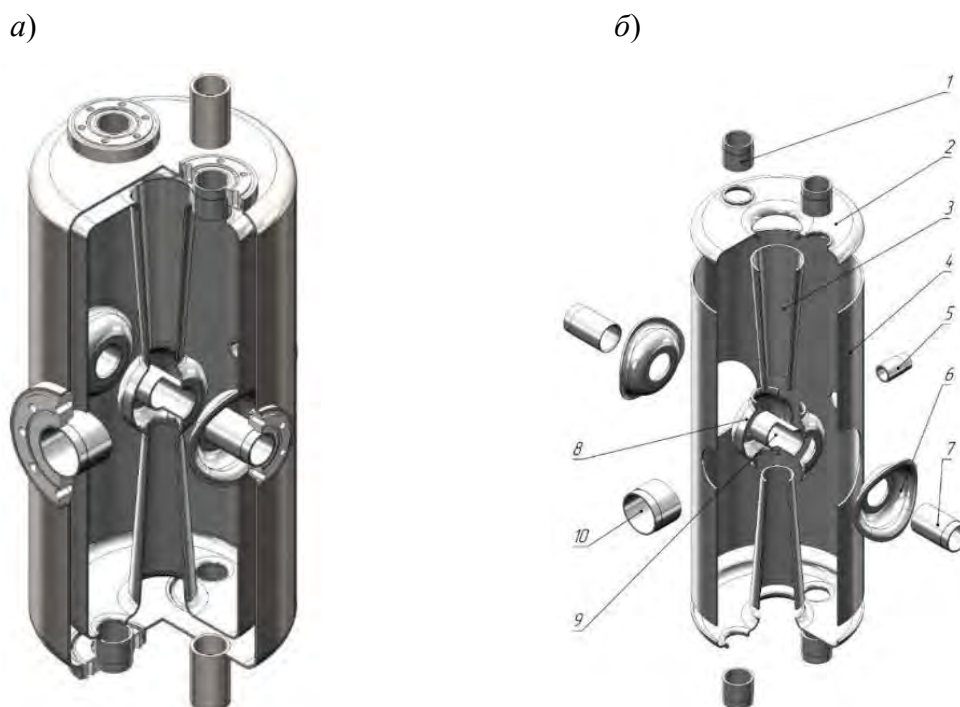


Рис. 2. 3D-модель резонатора HWR (а) и разнесенный вид корпуса из ниобия (б)

Корпус (см. рис. 2, б) состоит из внутреннего и наружного электродов, в том числе 18 отдельных деталей: двух трубок промывки 1, крышки 2, двух конусов 3, наружного электрода 4, патрубка для антенны 5, чашки 6, дрейфовой трубки наружного электрода 7, канала пролета пучка 8, дрейфовой трубки внутреннего электрода 9 и патрубка для ввода электрической мощности 10.

В титановом кожухе 14 деталей: два патрубка для подачи жидкого гелия, четыре патрубка для фланцев промывки, две титановые крышки, два титановых полукорпуса, два патрубка для фланцев трубок дрейфа, патрубки для фланца антенны и для фланца ввода мощности.

После последовательного соединения всех 18 элементов корпуса, присоединения к нему 14 деталей кожуха к собранному корпусу и кожуху присоединялись шесть фланцев – трубок промывки, трубок дрейфа, ввода мощности и патрубков антенны.

Штампованные элементы резонатора изготавливались инструменталь-

ными штампами и разработанными в ФТИ НАН Беларуси методами гидроударной штамповки жидкой и эластичной средой [8].

Требовалось проведение оптимизации техпроцесса сварки для минимизации сварочных деформаций, а один из возможных путей – установление рациональной последовательности наложения швов. В [7] проведена оптимизация направления перемещения и положения начальной точки траектории перемещения источника тепла, обеспечивающие снижение результирующих деформаций для наружного электрода с трубками (узла «крышка с трубками»). Для этой симметричной детали с учетом равноудаленности расположения сварных соединений от центра возможные пути выбора наилучших режимов процесса сварки – варьирование направлением перемещения источника тепла, положением точки начала траектории перемещения сварочного источника тепла и синхронизацией процессов сварки двух швов (рис. 3).

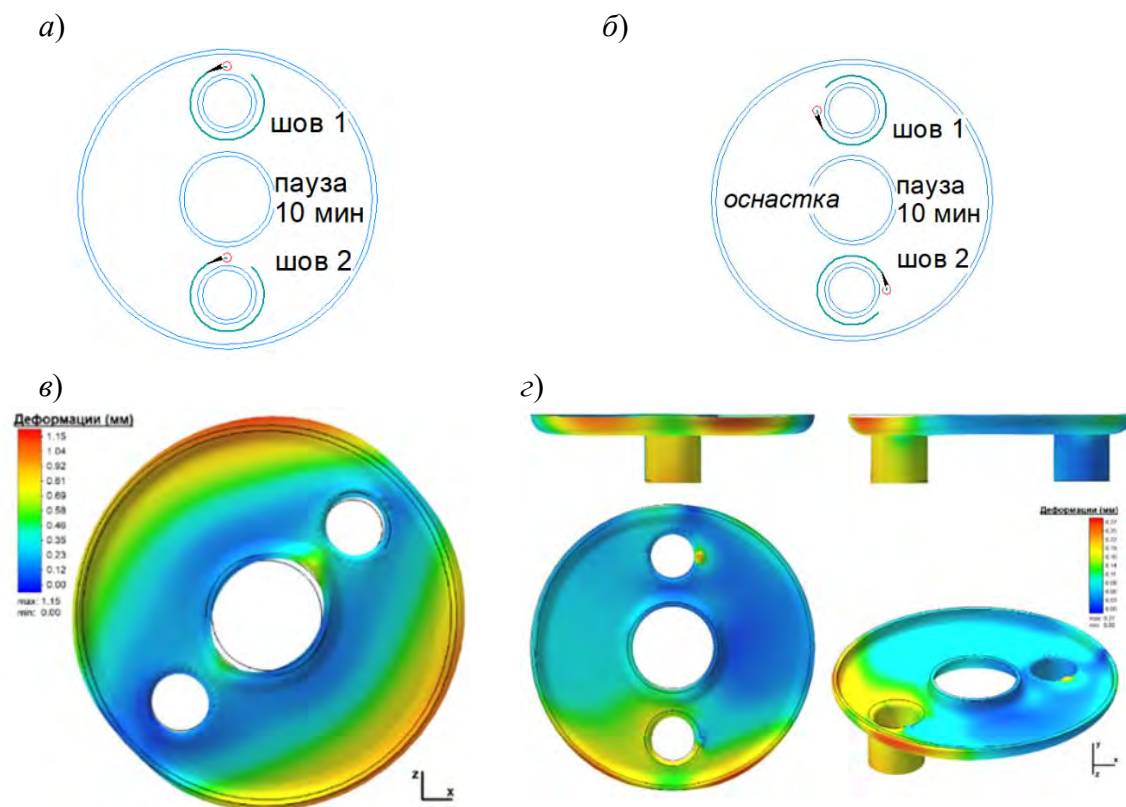


Рис. 3. Варианты проведения операций сварки элементов наружного электрода с трубками (а, б) и результирующие сварочные деформации узла из ниобия (в, г) при выполнении соединений по базовому (а, в) и оптимальному (б, г) вариантам

Направление деформаций позволило определить места расположения опор и прижимов сборочно-сварочной оснастки, а также провести оценку эффективности ее применения. Оснастка обеспечивает снижение результирующих деформаций в узле «крышка с трубками» на 64,21 % для медного изделия и на 76,52 % – для ниобиевого [7].

При технологической проработке изготовления деталей резонатора учитывали не только возможное изменение в частотных характеристиках, но и высокие требования к точности и качеству поверхности получаемых изделий.

#### **Электронно-лучевая сварка узлов ниобиевых резонаторов**

При ЭЛС узлов применялись стыковые и торцевые типы соединений. Для удержания отдельных элементов в про-

цессе ЭЛС изготавливалась специализированная сборочно-сварочная оснастка.

Далее приведены примеры поддержания параметров ЭЛС в процессе сварки деталей. Сварку узла «чашка – трубка дрейфа» выполняли кольцевым швом при неподвижной электронно-лучевой пушке и вращении деталей вокруг центральной оси. Значения токов сварки и фокусировки для разных углов поворота детали в оснастке представлены на рис. 4, внешний вид деталей – на рис. 5.

ЭЛС узла «крышка с трубками» проводили кольцевыми швами по оптимальному варианту (см. рис. 3, б). Электронно-лучевая пушка выполняла движение по кольцевой траектории по стыку деталей, детали фиксировались в сборочно-сварочной оснастке. Схема расположения деталей при сварке показана на рис. 6.

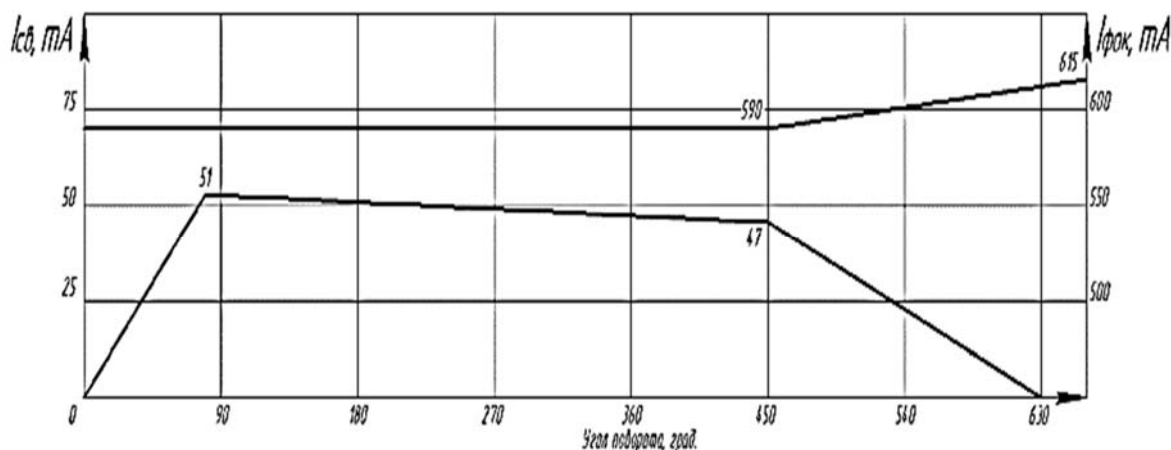


Рис. 4. Изменение тока сварки  $I_{св}$  и тока фокусировки  $I_{фок}$  для угла поворота узла «чашка – трубка дрейфа» при ЭЛС



Рис. 5. Внешний вид деталей узла «чашка – трубка дрейфа» до (слева) и после сварки

Использованы следующие параметры процесса ЭЛС: ускоряющее напряжение 60 кВ, ток сварки 51 мА при основном проходе с постепенным набором и снижением в начале и конце процесса сварки, ток фокусировки 590 мА при основном проходе и увеличении до 615 мА при завершении процесса сварки, скорость сварки 10 мм/с. Контрольные точки при перемещении пушки по стыку деталей узла «крышка с трубками» приведены на рис. 7. Параметры сварки в зависимости от позиции пушки показаны в табл. 1.

Внешний вид деталей, зафиксированных в сборочно-сварочной оснастке, до сварки показан на рис. 8, а, швов после ЭЛС – на рис. 8, б.

Для ЭЛС остальных узлов разрабатывались специализированная сборочно-сварочная оснастка и режимы проведения процесса сварки.

В ходе выполнения работы методом ЭЛС изготовлены один резонатор из меди и три сверхпроводящих ниобиевых резонатора для протонного модульного линейного ускорителя-инжектора NICA в ОИЯИ (Дубна).

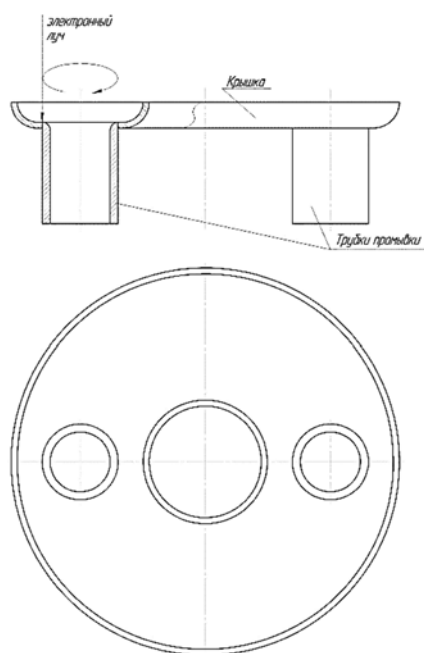


Рис. 6. Схема расположения деталей крышка и трубки промывки

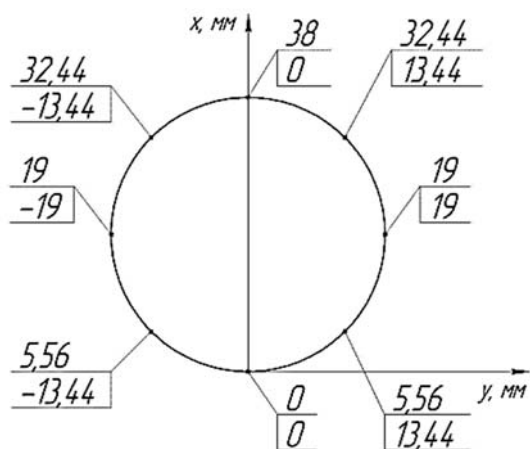
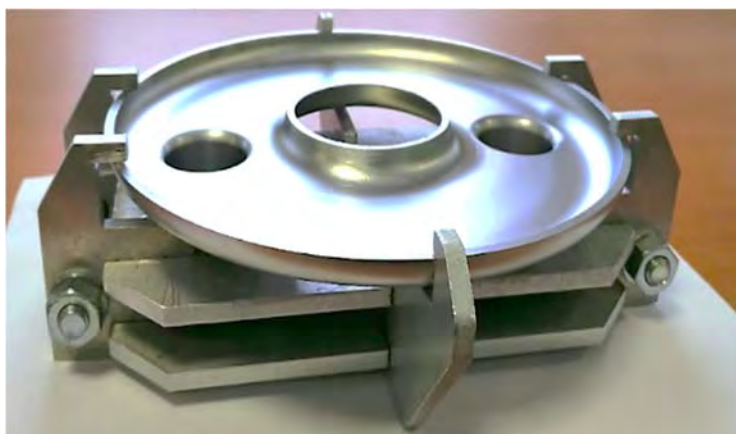


Рис. 7. Контрольные точки при перемещении зоны нагрева по стыку узла «крышка с трубками»

Табл. 1. Параметры ЭЛС в зависимости от позиции электронно-лучевой пушки

| Координаты точек |        | Ток луча, мА | Ток фокусировки, мА |
|------------------|--------|--------------|---------------------|
| х, мм            | у, мм  |              |                     |
| 0                | 0      | 0            | 590                 |
| 5,56             | 13,44  | 25           |                     |
| 19               | 19     | 51           |                     |
| 32,44            | 13,44  | 50,5         |                     |
| 38               | 0      | 50           |                     |
| 32,44            | -13,44 | 49,5         |                     |
| 19               | -19    | 49           |                     |
| 5,56             | -13,44 | 48,5         |                     |
| 0                | 0      | 48           |                     |
| 5,56             | 13,44  | 47,5         |                     |
| 19               | 19     | 47           |                     |
| 32,44            | 13,44  | 35           | 600                 |
| 38               | 0      | 25           | 605                 |
| 32,44            | -13,44 | 12           | 610                 |
| 19               | -19    | 0            | 615                 |

а)



б)



Рис. 8. Внешний вид узла «крышка с трубками» в сборочно-сварочной оснастке перед ЭЛС (а) и после сварки (б)

В НИИ ядерных проблем БГУ проведены «теплые» (при комнатной температуре) и «холодные» в сверхпроводящем состоянии в криостате (при температуре жидкого гелия 4,2 К) испытания ниобиевых резонаторов HWR. Подтверждены высокие значения собственной добротности этих устройств, основной характеристикой, показывающей качество изготовления и подготовки резонатора [9].

### Выводы

С использованием результатов конечно-элементного термомеханического анализа процесса ЭЛС и экспериментальных исследований выполнены соединения отдельных элементов изделия и изготовлены резонаторы из меди и особо чистого ниобия для оснащения ими строящегося ускорительного комплекса NICA в ОИЯИ (Дубна). Впервые на постсоветском пространстве созданы, изготовлены и прошли испытания сверхпроводящие ниобиевые полуволновые резонаторы HWR на частоту 325 МГц, соответствующие мировому уровню.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Niobium sputtered QWRs / A. M. Porcellato [et al.] // Proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconductivity, Cornell University. – Ithaca, New York, USA, 2003. – P. 118–122.
2. A high throughput facility for the RF characterisation of planar superconducting thin films / D. Seal, O. Malyshev, P. Goudket [et al.] // Superconductor Science and Technology. – 2024. – Vol. 37.
3. **Юревич, С. В.** Технология электронно-лучевой сварки сверхпроводящих СВЧ-резонаторов из тонколистового особо чистого ниобия: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / С. В. Юревич. – Минск, 2018. – 24 с.
4. Оптимизация метода сварки резонаторов для ускорителей заряженных частиц / В. Г. Залесский, И. Л. Поболь, С. В. Юревич, А. И. Поболь // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии: материалы IV Междунар. конф. – М.: МЭИ, 2021. – С. 135–143.
5. Сверхпроводящие ускорительные ниобиевые резонаторы TESLA-типа для электронов и позитронов / Ю. А. Будагов, М. А. Батурицкий, С. Е. Демьянов [и др.] // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2024. – Т. 55, вып. 1. – С. 5–102.
6. New Superconducting Linac Injector Project for Nuclotron-NICA / A. V. Butenko [et al.] // Current Results, Proc. of RuPAC'16, THPSC041. – 2016. – P. 626–628.

7. **Поболь, А. И.** Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния деталей из Cu и Nb после электронно-лучевой сварки. Ч. 1: Свойства материалов / А. И. Поболь // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр.: в 3 кн. – Минск: ФТИ НАН Беларуси. – 2020. – Кн. 2. – С. 213–225.

8. **Петраковский, В. С.** Оценка штампуемости сверхчистого ниобия при гидроударном нагружении / В. С. Петраковский, А. Ю. Журавский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. сб. науч. тр.: в 3 кн. – Минск: ФТИ НАН Беларуси. – 2013. – Кн. 3. – С. 147–156.

9. Electromagnetic properties of superconductive low- $\beta$  325 MHz half-wave resonators at low microwave field amplitudes / A. Sukhotski, D. Bychanok, G. Volunets [et al.] // Superconductor Science and Technology. – 2024. – Vol. 37, № 12.

*Статья сдана в редакцию 24 января 2025 года*

Контакты:

Zaleski@phti.by (Залесский Виталий Геннадьевич);

alex.pobol@gmail.com (Поболь Алексей Игоревич).

**V. G. ZALESKI, A. I. POBOL**

## **USE OF ELECTRON BEAM WELDING FOR MANUFACTURING SUPERCONDUCTING HALF-WAVE CAVITIES FOR PARTICLE ACCELERATORS**

### **Abstract**

A technology has been developed for using electron beam welding to manufacture half-wave cavities for particle accelerators made of pure copper and high purity niobium. A batch of cavities has been manufactured for the Nuclotron/NICA complex under construction.

### **Keywords:**

electron beam welding, cavities, copper, high purity niobium.

### **For citation:**

Zaleski, V. G. Use of electron beam welding for manufacturing superconducting half-wave cavities for particle accelerators / V. G. Zaleski, A. I. Pobol // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2025. – № 1 (86). – P. 14–22.