

УДК 621.983.044, 621.791.722

С. В. ЮРЕВИЧ, И. Л. ПОБОЛЬ, В. С. ПЕТРАКОВСКИЙ, А. Ю. ЖУРАВСКИЙ

### СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ НИОБИЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ

(Представлено академиком А. И. Гордиенко)

Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

*sergei.yurevich@gmail.com; i.pobol@gmail.com; petrakovskiy46@mail.ru; fizteh11@mail.ru*

Исследованы методы гидроударной штамповки и электронно-лучевой сварки деталей сверхпроводящих СВЧ резонаторов из особо чистого ниобия. Разработана технология изготовления одноячеечных 1,3 ГГц ниобиевых резонаторов, включающая гидроударную штамповку полуячеек резонатора из листового материала, химическую обработку поверхности деталей резонаторов перед сваркой, соединение электронно-лучевой сваркой полуячеек между собой, с трубками дрейфа и фланцами. Изготовлены сверхпроводящие ниобиевые СВЧ резонаторы, которые при высокочастотных испытаниях показали сохранение материалом резонатора сверхпроводящих свойств исходного металла и соответствие геометрии резонатора заданным размерам. Это свидетельствует о возможности применения разработанной технологии для серийного изготовления ускоряющих элементов для современной ускорительной техники.

*Ключевые слова:* гидроударная штамповка, ЭЛС, ниобий, сверхпроводимость, СВЧ, резонатор.

S. V. YUREVICH, I. L. POBAL, V. S. PETRAKOVSKY, A. Yu. ZHURAVSKY

### SUPERCONDUCTING NIOBIUM CAVITIES FOR MODERN PARTICLE ACCELERATORS

Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

*sergei.yurevich@gmail.com; i.pobol@gmail.com; petrakovskiy46@mail.ru; fizteh11@mail.ru*

The methods of liquid impact forging and electron beam welding of the parts of superconducting niobium cavities were investigated. The manufacturing technology of single-cell 1.3 GHz niobium cavities was developed. The test results of the fabricated cavities indicate the preservation of superconducting properties of cavity material and the compliance of the cavity geometry with assigned sizes. The cavities comply with the requirements of modern particle accelerators.

*Keywords:* liquid impact forging, EBW, niobium, superconductivity, SRF, cavity.

**Введение.** Ускоряющие структуры современных ускорителей частиц – сверхпроводящие сверхвысокочастотные (СВЧ) ниобиевые резонаторы, являются сложнейшими изделиями, для изготовления которых требуется совокупность знаний во многих областях науки и техники. Стоимость единичного ускоряющего элемента (ячейки резонатора), представляющего собой несколько соединенных сваркой деталей из особо чистого ниобия, соразмерна со стоимостью легкового автомобиля, число деталей в котором превышает десять тысяч единиц. Это обусловлено крайне высокими требованиями к геометрии формы, допускам размеров, качеству материала и рабочей поверхности готового изделия. Как следствие, повышается сложность и наукоемкость процессов обработки деталей из осочистого ниобия – операций формообразования, получения неразъемных соединений, а также финишной обработки поверхности, успешное выполнение которой главным образом закладывается на предыдущих этапах.

В плане соотношения цены и качества изделия наиболее успешной концепцией, используемой для изготовления ячеек СВЧ резонаторов в ряде функционирующих и создаваемых ускорителей частиц [1; 2], является штамповка двух полуячеек с их последующей сваркой между собой. В данном направлении, востребованном в настоящее время в мире, нашли применение технологии гидроударной штамповки и электронно-лучевой сварки (ЭЛС), развиваемые в Физико-техническом институте НАН Беларуси.

Исследования по тематике сверхпроводящих СВЧ ниобиевых резонаторов выполнялись в рамках совместных работ с Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, Россия) и рядом ведущих научных организаций Республики Беларусь – БГУИР, НИИ ядерных проблем БГУ, НЦ физики частиц и высоких энергий БГУ, НПЦ по материаловедению НАН Беларуси [3; 4].

Цель работ, выполняемых в Физико-техническом институте НАН Беларуси, – изготовление опытных образцов одноячеечного сверхпроводящего 1,3 ГГц ниобиевого резонатора.

**Материалы и методы исследования.** Для исследований применялся листовой особо чистый ниобий производства фирмы Ningxia OTIC (Китай) с параметром RRR порядка 300 (RRR характеризует степень чистоты материала и определяется как отношение сопротивления материала при комнатной температуре к сопротивлению при температуре жидкого гелия). Габариты листов в состоянии поставки  $290 \times 290 \times 2,8$  мм. Использовались также фланцы (из ниобия с RRR 40) и трубки дрейфа (из ниобия с RRR 300) производства фирмы Heraeus HMT (Германия).

Гидроударная штамповка проводилась на гидроударном прессе СФТ-510 (максимальная энергия удара – 25 кДж) производства ФТИ НАН Беларуси.

Перед сваркой компонентов резонаторов поверхностный слой материала толщиной порядка 40 мкм удалялся посредством травления в смеси кислот. Для процесса химического травления ниобия использовалась смесь кислот HF (38 %),  $\text{HNO}_3$  (65 %),  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (85 %) в соотношении компонентов 1 : 1 : 2. Температура смеси в процессе обработки поддерживалась в пределах 10–12 °С.

ЭЛС проводилась на оборудовании, созданном в ФТИ НАН Беларуси на базе энергоблока ЭЛА-15 (ускоряющее напряжение 60 кВ, максимальная мощность луча 15 кВт, остаточное давление  $3 \cdot 10^{-3}$  Па).

Высокочастотные исследования рабочих характеристик изготовленных резонаторов при комнатной температуре и температуре 4,5 К проводились в НИИ ядерных проблем БГУ и НПЦ по материаловедению НАН Беларуси.

*Гидроударная штамповка.* Для формообразования полуячеек резонаторов применялась гидроударная штамповка, в которой роль пуансона выполняет жидкость, а матрица придает листовому материалу необходимую форму. Гидроударная штамповка имеет ряд существенных отличий от традиционной инструментальной (в частности, скорости деформации составляют соответственно десятки метров в секунду и сантиметры в секунду), а также преимуществ по сравнению с ней (схемы обоих процессов представлены на рис. 1).

Высокое и равномерное деформирующее усилие жидкости и большие скорости деформаций при гидроударном методе обеспечивают более высокую по сравнению с инструментальной штамповкой точность изделия, благодаря тому, что в ходе обработки практически весь объем металла находится в пластическом состоянии. Это сводит к минимуму пружинение изделия, которое обуславливается остаточными упругими деформациями.

Отсутствие необходимости использовать твердотельный пуансон приводит к минимальному контакту инструмента-матрицы с заготовкой, несущего опасность загрязнения особо чистого

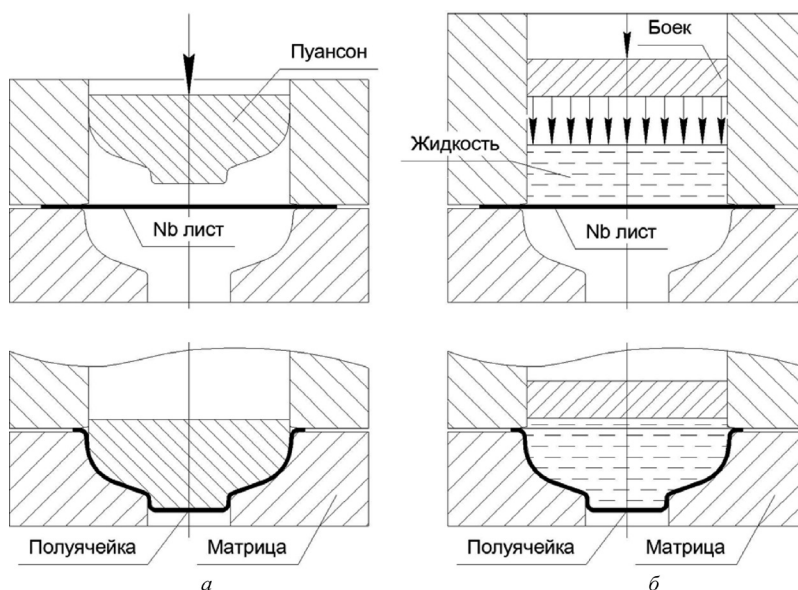


Рис. 1. Схематическое изображение процессов инструментальной (а) и гидроударной (б) штамповок полуячеек ниобиевых резонаторов

ниобия материалом штамповой оснастки и появления механических дефектов на рабочей поверхности заготовки.

В несколько раз снижается стоимость штампа, которая с повышением требований к точности размеров изготавливаемого изделия также возрастает.

В ходе исследований изучены механические и технологические свойства особо чистого ниобия, разработан технологический процесс гидроударной штамповки полуячеек 1,3 ГГц резонаторов, позволивший получить высокоточные полуячейки, максимальное отклонение размеров которых от требований чертежа не превышает 0,1 мм [5; 6]. Точность и повторяемость размеров деталей резонаторов важна при строительстве ускорителей частиц, для которых потребность в таких изделиях составляет сотни–тысячи экземпляров, так как форма всех ячеек должна быть одинаковой.

В противоположность применяемому нами методу формообразования полуячеек, при использовании инструментальной штамповки точность размеров готовых изделий ниже из-за того, что в этом случае пружинение изделия на порядок превышает пружинение при гидроударной штамповке. Поэтому зарубежные изготовители резонаторов используют несколько операций механической правки, направленных на подгонку формы и размеров полуячеек, отдельных ячеек и в целом многоячеечных резонаторов.

Достижение высоких рабочих характеристик резонаторов тесно связано с качеством их рабочей поверхности. В случае применения твердотельного пуансона на поверхностях полуячеек неизбежно будут присутствовать вмятины, риски и царапины от контакта мягкого особо чистого ниобия (твердость ниобия высокой чистоты по Бринеллю 45–55 кг/мм<sup>2</sup>) с материалом инструмента (твердость инструментальной стали по Бринеллю не ниже 160 кг/мм<sup>2</sup>). При использовании пуансона из более мягких материалов возрастает опасность внедрения в материал посторонних элементов, которые негативно сказываются на сверхпроводящих свойствах особо чистого ниобия. При гидроударной штамповке материал полуячеек, будущей рабочей поверхности резонатора, контактирует только с жидкостью, поэтому качество рабочей поверхности соответствует исходному материалу.

Кроме того, высокие точность размеров и качество поверхностей, обеспечиваемые методом гидроударной штамповки, являются необходимыми условиями получения качественных соединений при электронно-лучевой сварке. При сварке тонколистового металла даже небольшие отклонения толщины свариваемых кромок, которые могут возникнуть при механической обработке деталей с отклонениями формы, приводят к недопустимым дефектам сварных швов – неполному проплавлению или брызгам на околошовной поверхности и сквозным прожогам материала.

*Электронно-лучевая сварка (ЭЛС).* Из существующих методов получения неразъемных соединений при сварке деталей из особо чистого ниобия только ЭЛС позволяет сохранить исходную степень чистоты, механические и сверхпроводящие свойства материала сварного соединения на уровне свойств основного металла. Для достижения высокой чистоты материала сварных соединений разработана методика очистки поверхности перед сваркой [7], исследованы сверхпроводящие свойства сварных соединений особо чистого ниобия, полученные с помощью ЭЛС, на предмет их соответствия основному металлу [8; 9].

После сварки деталей резонатора его внутренняя поверхность подвергается сложной комбинации операций полировки (химической, электролитической, абразивной), требующих значительных затрат времени и средств. В этой ситуации задачей процесса ЭЛС, помимо сохранения высокой химической чистоты металла сварного соединения, является также получение поверхности обратной стороны сварного шва, максимально соответствующей основному металлу.

Отработаны режимы ЭЛС соединений полуячеек между собой по экватору и по ирису с трубками дрейфа, трубок дрейфа с фланцами, с использованием которых изготовлены опытные образцы одноячеечного СВЧ ниобиевого резонатора (рис. 2, а). Наиболее ответственным соединением является сварка двух полуячеек по экватору, обратная поверхность сварного шва которого при финишной обработке доводится до полного соответствия профилю основного металла. Отработанные режимы ЭЛС позволяют получить сварной шов, выпуклость с обратной стороны которого не превышает 100–120 мкм при ширине шва более 5 мм. Высота неровностей по границам зерен металла сварного шва находится в пределах 2–11 мкм. Неровности поверхности шва, обусловленные процессом прерывистой кристаллизации сварочной ванны (чешуйчатость шва), не превышают 1 мкм. Обратная поверхность сварного шва экватора изготовленных резонаторов представлена на рис. 2, б.

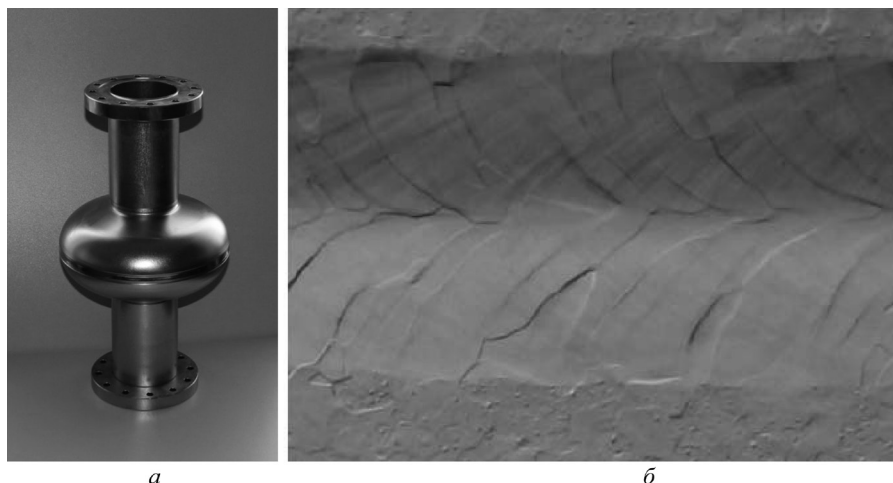


Рис. 2. Сверхпроводящий 1,3 ГГц ниобиевый резонатор (а, диаметр экватора ячейки 212 мм) и снимок поверхности обратной стороны сварного шва экватора (б,  $\times 10$ )

Высокочастотные испытания изготовленных резонаторов при комнатной температуре и температуре 4,5 К показали достижение резонансной частоты 1,3 ГГц и добротности свыше  $1,5 \cdot 10^9$ , что свидетельствует о соответствии геометрических размеров ячейки резонатора чертежу, достижении сверхпроводимости и сохранении высокой чистоты материалом резонатора [10].

**Закключение.** Разработана технология изготовления сверхпроводящих ниобиевых СВЧ резонаторов, включающая гидроударную штамповку полуячеек резонатора из листового материала, химическую обработку поверхности деталей резонаторов перед сваркой, соединение электронно-лучевой сваркой полуячеек между собой, с трубками дрейфа и фланцами.

Результаты высокочастотных испытаний показали сохранение материалом резонатора чистоты, и, как следствие, сверхпроводящих свойств исходного металла и соответствие геометрии резонатора заданным размерам, что свидетельствует о возможности применения разработанной технологии при изготовлении ускоряющих элементов для широкого спектра современной ускорительной техники.

### Список использованной литературы

1. *Padamsee, H.* RF Superconductivity: Science, Technology and Applications / H. Padamsee. – New York: John Wiley & Sons, 2009.
2. *Диденко, А. Н.* Сверхпроводящие ускоряющие резонаторы / А. Н. Диденко. – М., 2008.
3. Dubna–Minsk activity on the development of 1.3 GHz superconducting single-cell RF-cavity / N. Azaryan [et al.] // Proc. of RUPAC2012. September 24–28, 2012. – Saint-Petersburg, Russia, 2012. – P. 602–604.
4. Dubna–Minsk SRF technology development status report / N. Azaryan [et al.] // Proc. of IPAC13. May 12–17, 2013. – Shanghai, China, 2013. – P. 2393–2395.
5. *Петраковский, В. С.* Оценка штампуемости сверхчистого ниобия при гидроударном нагружении / В. С. Петраковский, А. Ю. Журавский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Кн. 2: Обработка металлов давлением. – Минск, 2013. – С. 147–156.
6. *Петраковский, В. С.* Обеспечение точной геометрии и качества поверхности сверхпроводящих ниобиевых резонаторов / В. С. Петраковский, А. Ю. Журавский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Кн. 2: Обработка металлов давлением. – Минск, 2014. – С. 156–162.
7. Подготовка поверхности и электронно-лучевая сварка ниобия для СВЧ-резонаторов / С. В. Юревич [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – Минск, 2013. – С. 557–565.
8. *Pobol, I. L.* Electron beam welding of superconducting cavities made of ultra-pure niobium / I. L. Pobol, S. V. Yurevich // Electrotechnica & Electronica. – 2014. – Vol. 49, N 4–5. – P. 103–107.
9. Сверхпроводящие характеристики сварных соединений особо чистого ниобия / С. Е. Демьянов [и др.] // Физика низких температур. – 2015. – Т. 41, № 7. – С. 671–678.
10. *Поболь, И. Л.* Изготовление СВЧ-резонаторов из ниобия и модельных материалов с использованием электронно-лучевой сварки / И. Л. Поболь, С. В. Юревич // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые материалы. Сварка. – Минск, 2015. – Ч. 2. – С. 250–256.

Поступило в редакцию 27.07.2015