

УДК 621.7+621.791.722

И. Л. ПОБОЛЬ, С. В. ЮРЕВИЧ

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ
НИОБИЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ***Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск**(Поступила в редакцию 15.03.2015)*

Введение. В [1] представлены данные о некоторых современных тенденциях в строительстве уникальных ускорителей частиц класса мегасайенс (Е-XFEL, ILC), также о реализации менее масштабных проектов. Это создает спрос на ускоряющие элементы – сверхпроводящие высокочастотные (СВЧ) ниобиевые резонаторы. Для создания таких резонаторов из ниобия высокой чистоты общепринятой технологией является штамповка полуячеек с последующей их сваркой между собой и с трубками дрейфа. Для соединения компонентов СВЧ-ниобиевых резонаторов применяется электронно-лучевая сварка (ЭЛС), позволяющая при соблюдении всех требований чистоты (предварительное травление и промывка свариваемых кромок, контроль остаточного давления в сварочной камере) и правильном выборе энергетических параметров процесса получить требуемую геометрию и сверхпроводящие свойства сварных соединений особоочищенного ниобия. Однако трудности в получении качественных сварных швов при сварке тонколистового ниобия возникают как у начинающих производителей СВЧ-резонаторов, так и у изготовителей, имеющих опыт в данной области.

Для финишной обработки рабочей поверхности резонаторов применяется сложная комбинация методов (травление в смеси кислот, электролитическая и абразивная полировки, промывка водой и спиртом), которые требуют узкоспециализированного оборудования, большого расхода химических реактивов, энергии, времени и человеческих ресурсов и делают технологию создания СВЧ-резонаторов предельно дорогостоящей. Внутренняя поверхность сварного соединения экватора полуячеек, являясь частью рабочей поверхности резонатора, в полной мере подвергается всем операциям поверхностной обработки. Из-за вероятности возникновения дефектов при сварке необходима дополнительная аппаратура для контроля качества и их устранения (фотосъемка внутренней поверхности, рентгенографический контроль, общая или локальная полировка выпуклостей, чешуйчатой поверхности сварного шва, после которой повторяется стандартная процедура обработки поверхности), что ведет к росту стоимости изделия. В данной ситуации ответственной процедурой является правильный выбор энергетических параметров режима сварки, отвечающих за формирование сварного соединения.

Параметры режимов ЭЛС тонколистового ниобия. Получение высокого качества поверхности и точности геометрических размеров сварных соединений при сварке компонентов сверхпроводящих резонаторов из ниобия требует особого внимания к правильному выбору параметров режима ЭЛС. Последние должны обеспечить полное проплавление листового материала с шириной шва несколько миллиметров, гладкую поверхность и провисание не более 0,5 мм с обратной стороны сварного шва, отсутствие прожогов, брызг на прилегающей поверхности, больших колебаний ширины шва, подрезов и т.д.

Анализ литературных источников по определяющим энергетическим параметрам режима ЭЛС (ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$, ток луча $I_{\text{св}}$, скорость сварки $V_{\text{св}}$ и характеристики распределения энергии в пятне нагрева) ниобия технической чистоты толщиной 0,8–1,5 мм [2–4] и особоочищенного

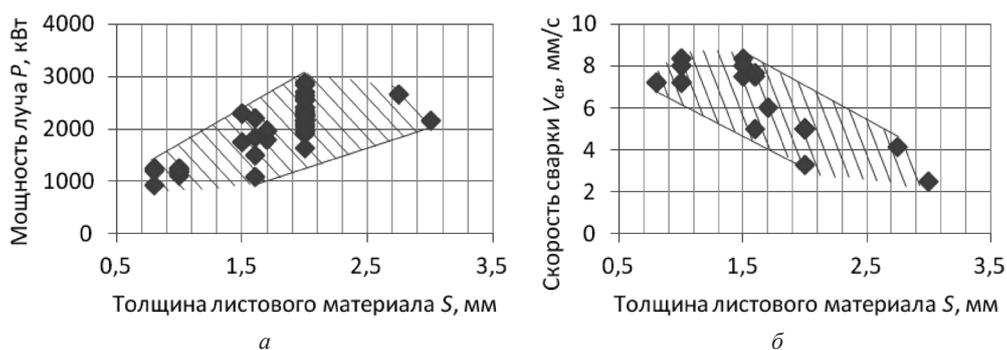


Рис. 1. Мощность луча (а) и скорость сварки (б), используемые для ЭЛС тонколистового ниобия различных толщин (согласно [2–18])

ниобия толщиной 1,5–3 мм, применяемого для изготовления сверхпроводящих резонаторов [5–18], свидетельствует о существовании широких диапазонов значений по всем параметрам режима. Используется ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$ от 17–20 до 150 кВ, что является одной из причин наличия в литературе широкого диапазона значений мощности электронного луча P ($P = U_{\text{уск}} I_{\text{св}}$, Вт), применяемых для сварки листового материала определенной толщины S (рис. 1, а).

Например, для наиболее изученной толщины материала ($S = 2$ мм) разница между минимальной и максимальной мощностями луча, позволяющими получить удовлетворяющий требованиям сварной шов, превышает 1300 Вт. Широкий диапазон величин наблюдается при изучении данных по используемым значениям скоростей сварки в интервале от 2,5 до 8,5 мм/с (рис. 1, б). Правильный выбор схемы развертки электронного луча имеет определяющее влияние на получение качественного сварного шва. Литературные данные свидетельствуют о невозможности получения гладкой поверхности сварного шва при сварке листового ниобия сфокусированным электронным лучом. При изготовлении СВЧ-резонаторов широко применяются схемы сканирования лучом в форме ромба, кольцевая развертка и сварка расфокусированным лучом, позволяющие получить относительно гладкую внутреннюю поверхность сварного шва.

Использование исследователями различных ускоряющих напряжений можно объяснить наличием имеющегося оборудования для ЭЛС без возможности регулировки $U_{\text{уск}}$. Причины выбора того или иного значения остальных параметров режима ЭЛС авторами [2–18] не освещаются. Схема развертки электронного луча должна обеспечить необходимое распределение энергии в пятне нагрева для получения качественной конфигурации сварного шва. Как следует из литературных источников, данное требование обеспечивается использованием серии различных схем, что позволяет при их выборе главным образом руководствоваться возможностями применяемого оборудования.

Несмотря на наличие информации по параметрам режимов ЭЛС листового ниобия, имеются публикации, свидетельствующие о сложностях получения качественного сварного шва как при изготовлении первых полномасштабных и экспериментальных образцов и отработке технологии сварки СВЧ-резонаторов, так и при серийном изготовлении изделий. Типичными проблемами являются брызги и крупные капли металла на обратной поверхности сварного соединения, узкий сварной шов и неполное проплавление, большие колебания ширины шва, чешуйчатая поверхность и высокая шероховатость поверхности шва [19–22]. Обнаруженные дефекты по возможности исправляются с помощью электролитической или абразивной полировки всей внутренней поверхности резонатора или (в случае единичных капель или дефектов на небольшом участке) специального полировочного механизма, позволяющего обработать локальный участок внутренней поверхности резонатора [23]. Контроль качества сварных соединений требует дополнительных ресурсов (визуальное наблюдение внутренней поверхности резонаторов камерами с высокой разрешающей способностью) [24, 25]. Проведение дополнительных операций обработки поверхности и контроля качества сварных швов существенно повышает стоимость изделий.

Материалы, оборудование, методики. Для наших исследований использовался листовый ниобий производства Ningxia OTIC (Китай) с параметром RRR 300 и температурой плавления 2468 °С.

Габариты листов в состоянии поставки $290 \times 290 \times 2,8$ мм. Для изучения процесса ЭЛС вырезались образцы с размерами $25 \times 50 - 100 \times 2,8$ мм, свариваемые кромки с помощью фрезерования доводились до толщины 1,7 мм.

Для процесса химического травления ниобия использовалась смесь кислот HF (38%), HNO_3 (65%), H_3PO_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 Физико-техническом институте НАН Беларуси на базе энергоблока ЭЛА-15 (ускоряющее напряжение 60 кВ, максимальная мощность луча 15 кВт, остаточное давление $3 \cdot 10^{-3}$ Па). Вакуумная камера и сборочно-сварочная оснастка с прижимными элементами выполнены из нержавеющей стали.

Для изучения профилей поверхности сварных швов с лицевой и обратной сторон использовался цифровой профилометр Surtronic 25 (Taylor Hobson).

Определение используемых диапазонов значений параметров режимов ЭЛС листового ниобия. Согласно опубликованным литературным данным, для сварки тонколистового ниобия используются широкие диапазоны значений энергетических параметров режима ЭЛС ($U_{\text{уск}}$, $I_{\text{св}}$, $V_{\text{св}}$), а также ряд схем развертки электронного луча с характерными параметрами для каждой из них. Изучение взаимосвязи между обобщающим показателем термического воздействия при ЭЛС – погонной энергией сварки $q_{\text{п}}$ ($q_{\text{п}} = U_{\text{уск}} \cdot I_{\text{св}} / V_{\text{св}}$, Вт·мин/см) и толщиной основного металла S (рис. 2, а) позволяет сузить области поиска оптимальных параметров режима ЭЛС материала определенной толщины.

Для соединения деталей из материала толщиной 1,7 мм используемые значения погонной энергии сварки, являющейся обобщающим показателем вводимой энергии в процессе ЭЛС, составляют от 40 до 80 Вт·мин/см. На рис. 2, б представлена область значений силы тока луча $I_{\text{св}}$ и скорости сварки $V_{\text{св}}$, обеспечивающих величину $q_{\text{п}}$ в пределах указанного диапазона, используемого для листового ниобия толщиной 1,7 мм, для случая применения электронной пушки с $U_{\text{уск}} = 60$ кВ. Однако и при постоянном ускоряющем напряжении ввести необходимое количество тепла можно с помощью большого числа комбинаций значений $I_{\text{св}}$ и $V_{\text{св}}$.

Важный фактор, влияющий на получение требуемых характеристик сварного шва, – распределение энергии в пятне нагрева. Данный параметр должен обеспечить введение энергии в режиме, с одной стороны, достаточном для плавления относительно большого объема металла (ширина шва в несколько раз превышает толщину свариваемого листового металла) и, с другой стороны, исключающем образование дефектов сварных соединений (прожогов, брызг, подрезов и т. д.). Широко применяемым и наиболее простым методом достижения требуемой плотности энергии в пятне нагрева является сварка расфокусированным электронным лучом. Сходящийся пучок ускоренных электронов в фокусе имеет максимальную плотность энергии. Поднимая фокус над обрабатываемой поверхностью либо опуская его в глубь материала, можно уменьшить концентрацию энергии в пятне нагрева на поверхности обрабатываемой детали. Контролировать и воспроизводить распределение энергии в пятне нагрева при сварке расфокусированным пучком

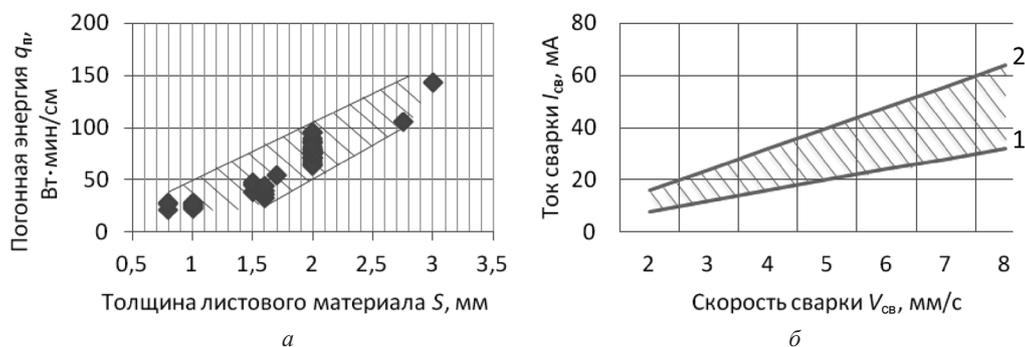


Рис. 2. Используемая погонная энергия, согласно [2–18], для сварки ниобия различных толщин (а) и область значений тока луча и скорости сварки, обеспечивающих погонную энергию $q_{\text{п}}$ от 40 (линия 1) до 80 Вт·мин/см (линия 2) при постоянном ускоряющем напряжении 60 кВ (б)

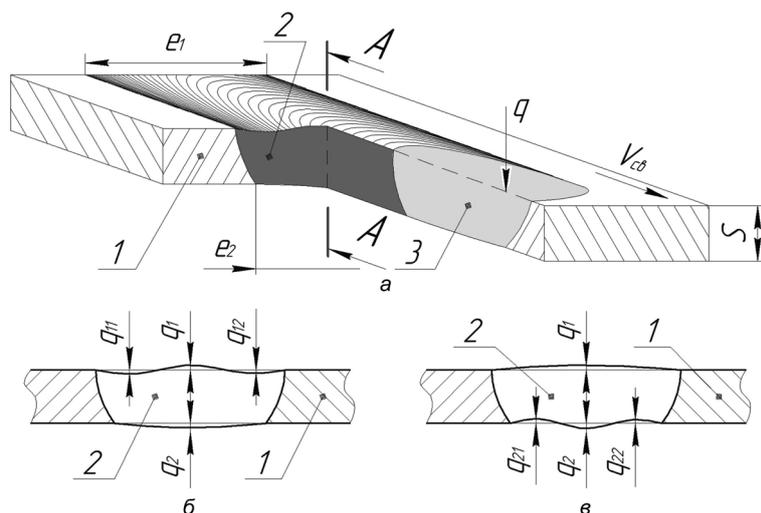


Рис. 3. Схемы сварных соединений листового материала, получаемых с помощью ЭЛС: а – общий вид; б, в – вид А-А (поперечное сечение сварного шва); 1 – основной металл; 2 – металл сварного шва; 3 – жидкая сварочная ванна

электронов наиболее удобно при постоянном расстоянии от электронно-лучевой пушки до обрабатываемой поверхности детали l с помощью тока фокусировки электронного луча $I_{\text{фок}}$.

Геометрия сварных соединений листового ниобия. Основные рассматриваемые при ЭЛС геометрические характеристики сварных швов листового материала – ширина сварного шва с его лицевой e_1 и обратной e_2 сторон, выпуклости шва с лицевой q_1 и обратной q_2 сторон (провисание шва). Однако при детальном рассмотрении сварных соединений особолистого ниобия, получаемых с помощью односторонней однопроходной ЭЛС в горизонтальном положении на весу (схема процесса представлена на рис. 3, а), выявляется более сложная структура геометрии поверхности сварного шва (рис. 3, б, в). Как на лицевой, так и на обратной сторонах шва возможно возникновение вогнутых профилей поверхности, углубляющихся внутрь материала относительно профиля основного металла. Согласно ГОСТ 30242–97 «Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначение и определения», данные углубления описываются как образующиеся при усадке канавки. В случаях присутствия усадочных канавок к характеристикам геометрии поверхности сварного шва помимо значений расстояний от центральной части выпуклости шва до профиля основного металла (q_1, q_2) следует ввести дополнительные размеры (q_{11}, q_{12} и q_{21}, q_{22}), описывающие возникшие углубления. Поверхность сварных швов при ЭЛС листового материала может также иметь полностью вогнутый профиль относительно плоскости основного металла. С лицевой стороны шва вогнутость образуется при большой ширине сварного шва из-за провисания жидкой сварочной ванны под собственным весом и усадки при ее кристаллизации. У корня шва вогнутый профиль поверхности (утяжка) образуется в случае получения узкого шва из-за действия сил поверхностного натяжения и усадки металла шва при сварке.

Получение вогнутости с обратной стороны сварного шва при соединении листового материала крайне нежелательно при предъявлении к поверхности сварного соединения требований полного соответствия профилю основного металла после последующей обработки. В случае образования вогнутостей с обратной стороны шва для получения плоской внутренней рабочей поверхности резонатора приходится снимать слой основного металла, что увеличивает продолжительность и затраты последующей обработки и стоимость изделия. Таким образом, задача процесса ЭЛС – получение сварного шва с поверхностью его обратной стороны, максимально близкой к профилю основного металла, что не потребует дополнительной обработки.

Влияние параметров режима ЭЛС на геометрию сварных швов особолистого ниобия. Изучено влияние характеристик фокусировки электронного луча на геометрию сварных соединений при ЭЛС тонколистового ниобия ($S = 1,7$ мм). При постоянном ускоряющем напряжении $U_{\text{уск}} = 60$ кВ использовались ток луча $I_{\text{св}} = 30$ мА и скорость сварки $V_{\text{св}} = 5$ мм/с (средние значения согласно рис. 2, б). Остаточное давление в сварочной камере $P = 5 \cdot 10^{-3}$ Па. Расстояние между

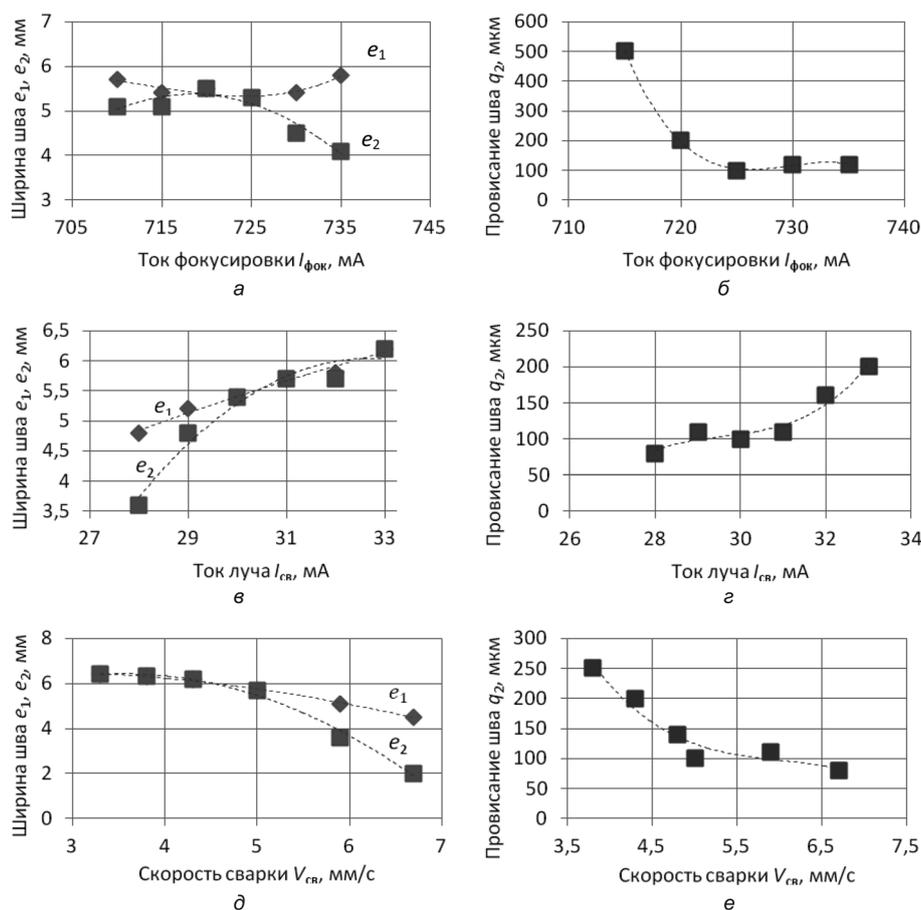


Рис. 4. Зависимость ширины сварного шва с его лицевой и обратной сторон и провисания шва от тока фокусировки луча (а, б), тока луча (в, г) и скорости сварки (д, е)

электронно-лучевой пушкой и поверхностью образцов l составляло 550 мм. Электронный луч фокусировался на поверхности образцов ($I_{\text{фок}} = 700$ мА) и фокус пучка поднимался путем увеличения тока фокусировки до 735 мА с шагом 5 мА.

На рис. 4, а представлена зависимость ширины сварного шва с лицевой e_1 и обратной e_2 сторон от тока фокусировки $I_{\text{фок}}$. Исследуемые значения параметров режима ЭЛС позволяют получить ширину шва с обратной стороны более 4,1 мм, что соответствует предъявляемым к данной характеристике требованиям. Для значений тока фокусировки 720 и 725 мА ширина шва с обеих сторон одинакова. При уменьшении или увеличении $I_{\text{фок}}$ наблюдаются рост ширины шва с лицевой стороны и ее уменьшение с обратной стороны.

Лучшее качество сварных соединений получено лишь при токах фокусировки от 725 до 735 мА, обеспечивающих гладкую поверхность обратной стороны сварного шва и минимальное провисание q_2 не более 120 мкм (рис. 4, б). При сварке с использованием минимально сфокусированного электронного луча (ток фокусировки 705 и 710 мА) в сварном шве наблюдается ряд недопустимых дефектов: сквозные отверстия, брызги металла в околошовной зоне и чрезмерное провисание шва. Величины 715 и 720 мА характеризуются высокими значениями провисания металла q_2 (более 200 мкм) и грубой чешуйчатостью поверхности шва. Увеличение $I_{\text{фок}}$ свыше 735 мА приводит к получению с обратной стороны узкого сварного шва с повышенным колебанием ширины e_2 и возникновением участков с неполным проплавлением.

При получении качественных сварных соединений влияния тока фокусировки на профили лицевой поверхности швов не обнаружено. Во всех случаях наблюдаются вогнутости профиля в глубь изделия, значения q_{11} и q_{12} находятся в пределах 35–50 мкм при расположении выпуклости посередине шва q_1 на уровне линии профиля основного металла. Для дальнейших исследований использовался ток фокусировки 725 мА.

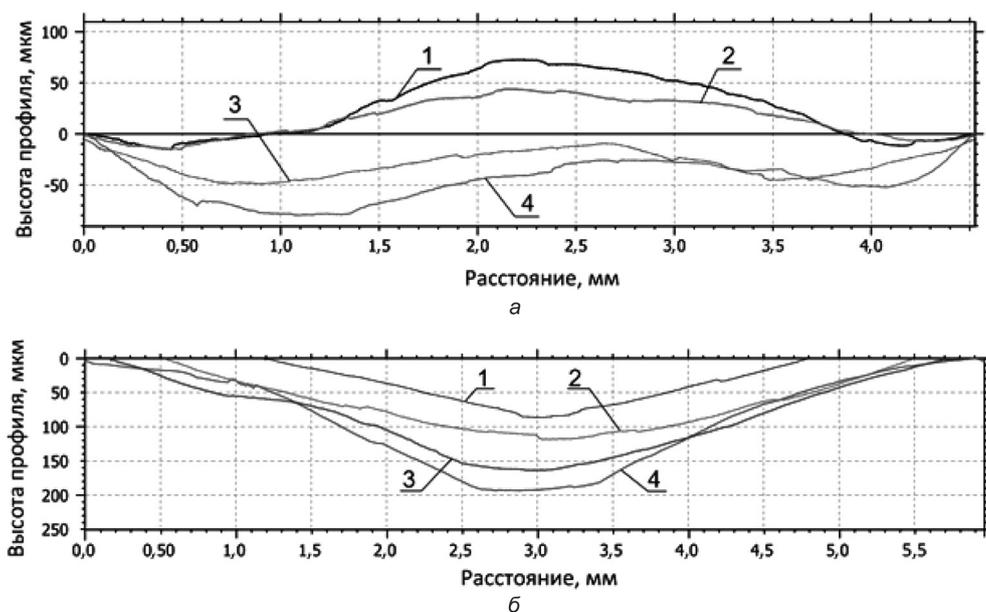


Рис. 5. Профили поверхности лицевой (а) и обратной (б) сторон сварных швов в зависимости от тока сварки (0 на оси ординат соответствует профилю основного металла): 1, 2, 3, 4 – $I_{св} = 28, 29, 32, 33$ мА соответственно

При неизменных прочих параметрах режима ЭЛС ($U_{уск} = 60$ кВ, $I_{фок} = 725$ мА, $V_{св} = 5$ мм/с) уменьшение или увеличение тока луча относительно значения, используемого в предыдущей серии опытов ($I_{св} = 30$ мА), ведет к соответствующим изменениям ширины сварного шва (рис. 4, в) и величины провисания металла (рис. 4, з). Зависимость изучаемых геометрических параметров сварного шва от скорости сварки имеет противоположный характер (рис. 4, д, е) – увеличение $V_{св}$ ведет к уменьшениям ширины и провисания шва.

При изучении профилей поверхности сварного шва установлено, что на характеристики лицевой стороны шва q_1 , q_{11} и q_{12} влияет только величина тока луча. В отличие от этого геометрические характеристики поверхности обратной стороны шва зависят от всех параметров режима ЭЛС. При значениях тока луча 28 и 29 мА лицевая поверхность шва имеет выпуклость, выступающую выше профиля основного металла на высоту 70 и 40 мкм соответственно. Увеличение $I_{св}$ до 32–33 мА приводит к образованию сложного вогнутого профиля поверхности ниже профиля основного металла. Профили лицевой стороны шва в зависимости от тока луча при постоянных других параметрах режима ЭЛС ($U_{уск} = 60$ кВ, $I_{фок} = 725$ мА, $V_{св} = 5$ мм/с) представлены на рис. 5, а. Обратная сторона шва в данном случае имеет типичные профили поверхности для оптимального тока фокусировки (рис. 5, б), описываемые параметром q_2 .

Выбор оптимальных параметров режима ЭЛС листового ниобия. На основании изучения взаимосвязей между параметрами режима ЭЛС и геометрическими характеристиками сварных

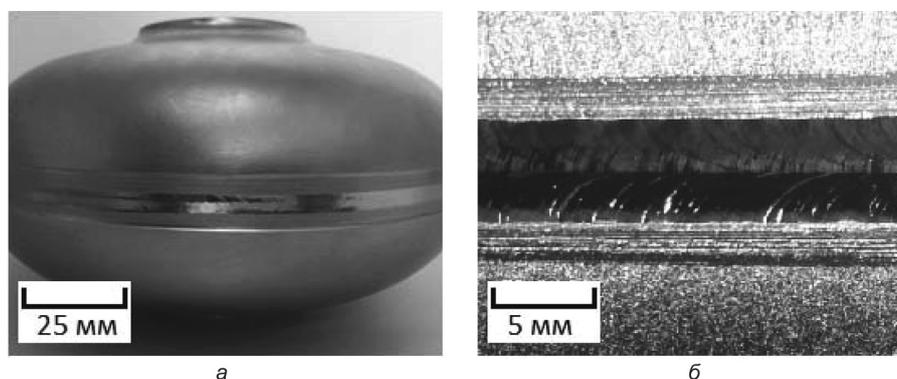


Рис. 6. Внешний вид соединения двух полуячеек, полученных при оптимальном режиме ЭЛС, с лицевой (а) и обратной (б) сторон шва

швов особолистого ниобия, а также требований к последним для толщины материала 1,7 мм оптимальными значениями параметров режима ЭЛС (для ускоряющего напряжения 60 кВ) являются: $I_{\text{фок}} = 725\text{--}730$ мА (при постоянном расстоянии от электронно-лучевой пушки до обрабатываемой детали $l = 550$ мм), $I_{\text{св}} = 30\text{--}31$ мА, $V_{\text{св}} = 5\text{--}5,5$ мм/с. Сварной шов в указанных условиях имеет с обратной стороны ширину не менее 4 мм и провисание в пределах 100–120 мкм (рис. 6).

Заключение. Установлены диапазоны определяющих энергетических параметров режима ЭЛС, обеспечивающие характеристики геометрии сварных швов тонколистового особолистого ниобия, удовлетворяющие требованиям для сварных соединений компонентов ниобиевых СВЧ-резонаторов и позволяющие получить сварные соединения, максимально соответствующие профилю основного металла.

Определенные параметры режима ЭЛС использованы при изготовлении в Физико-техническом институте НАН Беларуси экспериментальной партии ниобиевых одноячеечных СВЧ-резонаторов, успешно прошедших ВЧ-испытания [26].

Литература

1. Диденко А. Н. Сверхпроводящие ускоряющие резонаторы. М., 2008.
2. Гуревич С. М. Сварка химически активных и тугоплавких металлов и сплавов. М., 1982.
3. Щипков М. Д. Сварка сплавов на основе алюминия и тугоплавких высокоактивных металлов. Л., 1983.
4. Николаев Г. А. и др. Сварка в машиностроении: Справочник в 4 т. М., 1978.
5. Padamsee H. RF Superconductivity: Science, Technology and Applications. New York, 2009.
6. Chiaveri B., Lengeler H. // Proc. of SRF Workshop 1984. Geneva, Switzerland, July 23–27, 1984. P. 611–626.
7. Kirchgessner J. L. // Proc. of The Third Workshop on RF Superconductivity. Argonne National Laboratory, USA, September 14–18, 1987. P. 533–544.
8. Geng R. L. et al. // Proc. of 9th Workshop (SRF99). Santa Fe, USA, November 1–5, 1999. P. 238–245.
9. Bauer P. et al. // Proc. of the 11th Workshop on RF Superconductivity. Travemuende/Lubeck, Germany, September 8–12, 2003. P. 588–590.
10. Bauer P. et al. // Proc. of the 12th Int. Workshop on RF Superconductivity. Ithaca, USA, July 10–15, 2005. P. 352–354.
11. Singer X. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2007. Vol. 574, issue 3. P. 518–520.
12. Iwashita Y. et al. // Proc. of 16th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF2013). Paris, France, September 23–27, 2013. P. 561–563.
13. Jiang H. et al. // Proc. of the 2003 Particle Accelerator Conference. Portland, USA, May 12–16, 2003. P. 1359–1361.
14. Kubo T. et al. // IPAC2013: Proc. of the 4th Int. Particle Accelerator Conference. Shanghai, China, May 12–17, 2013. P. 2346–2348.
15. Kubo T. et al. // Proc. of 16th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF2013). Paris, France, September 23–27, 2013. P. 424–429.
16. Sears J., Clasby B. // Proc. of the 12th Int. Workshop on RF Superconductivity. Ithaca, USA, July 10–15, 2005. P. 481–482.
17. Brawley J., Mammosser J., Phillips L. // Proc. of The Eighth Workshop on RF Superconductivity. Abano Terme, Italy, October 6–10, 1997. P. 518–522.
18. Matheisen A. // Proc. of The Eighth Workshop on RF Superconductivity. Abano Terme, Italy, October 6–10, 1997. P. 423–433.
19. Gao J. et al. // Proc. of The first Int. Particle Accelerator Conference, IPAC'10. Kyoto, Japan, May 23–28, 2010. P. 2974–2976.
20. Navitski A. et al. // Proc. of 16th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF2013). Paris, France, September 23–27, 2013. P. 209–212.
21. Watanabe K. et al. // Proc. of The first Int. Particle Accelerator Conference, IPAC'10. Kyoto, Japan, May 23–28, 2010. P. 2962–2964.
22. Saito K. // Proc. of The first Int. Particle Accelerator Conference, IPAC'10. Kyoto, Japan, May 23–28, 2010. P. 3365–3367.
23. Watanabe K. et al. // Proc. of The first Int. Particle Accelerator Conference, IPAC'10. Kyoto, Japan, May 23–28, 2010. P. 2965–2967.
24. Iwashita Y. // Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams. 2008. Vol. 11, Issue 093501.
25. Navitski A. et al. // Proc. of 16th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF2013). Paris, France, September 23–27, 2013. P. 237–240.
26. Поболь И. Л., Юревич С. В. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2015. № 2. С. 44–50.

I. L. POBAL, S. V. YUREVICH

OPTIMIZATION OF A METHOD OF ELECTRON-BEAM WELDING OF NIOBIUM RESONATORS

Summary

The review of published data on the modes of EBW of high-purity niobium for SRF resonators was done. Relations between EBW parameters and geometries of welds of niobium sheets 1.7 mm thick are investigated. The optimal modes setting EBW have been used in the manufacture of samples 1.3 GHz superconducting niobium resonators.