

А. А. Бурин, В. Г. Залесский, И. Л. Поболь

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

УСТРАНЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В НИОБИЕВОМ СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ РЕЗОНАТОРЕ

Аннотация. Исследованы возможные причины появления дефектов при сварке ниобиевого сверхпроводящего коаксиального полуволнового резонатора (HWR), которые заключаются в отклонении формы свариваемой поверхности от заданной, в отклонении угла падения луча от перпендикуляра к свариваемой поверхности, в колебании толщины свариваемых кромок, а также наличие некоторой нестабильности (пульсации) ускоряющего напряжения, токов луча и фокусировки электронно-лучевой пушки. Определены возможности предотвращения появления дефектов при сварке, заключающиеся в регулировании рабочих параметров электронно-лучевой пушки в зависимости от возможных погрешностей при изготовлении и подготовке свариваемых кромок. Изучены методы устранения дефектов при сварке ниобиевого сверхпроводящего коаксиального HWR. Разработан способ ремонта дефектов сварных соединений типа прожогов на исследуемом типе резонатора с использованием электронно-лучевого наплавления. Приведены результаты измерения резонансной частоты HWR до возникновения и после восстановления прожога, которые показали, что заплавление отверстия не привело к изменению электрофизических характеристик. Вакуумные и криогенные испытания при температуре жидкого азота подтвердили герметичность сварных соединений. Полученные результаты могут быть использованы при разработке базовых технологий восстановления и ремонта дорогостоящих и сложных в изготовлении элементов ускорительной техники – сверхпроводящих высококачественных резонаторов из листового особо чистого ниобия.

Ключевые слова: дефекты сварных соединений, ниобиевый резонатор, электронно-лучевое наплавление

Для цитирования: Бурин, А. А. Устранение дефектов сварного соединения в ниобиевом сверхпроводящем резонаторе / А. А. Бурин, В. Г. Залесский, И. Л. Поболь // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 18–23. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-18-23>

Alexander A. Burin, Vitali G. Zaleski, Igor L. Pobol

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

ELIMINATION OF DEFECTS IN A WELDED JOINT IN A NIOBIUM SUPERCONDUCTING RESONATOR

Abstract. The possible reasons for the appearance of defects during welding of a niobium superconducting coaxial half-wave resonator (HWR) are investigated, which consist in the deviation of the shape of the welded surface from the given one, in the deviation of the angle of incidence of the beam from the perpendicular to the welded surface, in fluctuations in the thickness of the welded edges, and also the presence of some instability (pulsation) accelerating voltage, beam currents and focusing of the electron beam gun. The possibilities of preventing the appearance of defects during welding are determined, which consist in regulating the operating parameters of the electron beam gun depending on possible errors in the manufacture and preparation of the welded edges. Methods for elimination of defects in welding of niobium superconducting coaxial HWR are studied. A method has been developed for repairing defects in welded joints such as burn-throughs on the type of resonator under study using electron-beam deposition. The results of measuring the resonant frequency of the HWR before the onset and after the recovery of burn-through are presented, which showed that the melting of the hole did not lead to a change in the electrical characteristics. Vacuum and cryogenic tests at liquid nitrogen temperature confirmed the tightness of the welded joints. The results obtained can be used in the development of basic technologies for the restoration and repair of expensive and difficult-to-manufacture elements of accelerator technology – superconducting high-frequency resonators made of high-purity niobium sheet.

Keywords: defects in welded joints, niobium coaxial resonator, beam cladding

For citation: Burin A. A., Zaleski V. G., Pobol I. L. Elimination of defects in a welded joint in a niobium superconducting resonator. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 18–23 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-18-23>

Введение. Сверхпроводящие высокочастотные (СВЧ) резонаторы являются основными ускоряющими элементами современных ускорителей заряженных частиц, предназначенных для исследования физики частиц и высоких энергий. Для изготовления резонаторов используется ниобий высокой чистоты с содержанием примесей не более 100 ppm для металлов и не более 20 ppm для летучих элементов (O, H, N).

Производство СВЧ-резонаторов включает в себя несколько прецизионных технологических операций, при этом необходимо получить неразъемные соединения как отдельных элементов, так и готовой многоуровневой конструкции в целом. Сложности изготовления резонаторов заключаются в том, что к сварному соединению предъявляются высокие требования по чистоте материала, качеству внутренней и наружной рабочих поверхностей, герметичности, при этом высокая температура плавления ниобия (2469 °C) создает дополнительные технологические проблемы. Наибольшее соответствие всем указанным требованиям обеспечивает применение электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Кроме непосредственно ЭЛС соединяемые заготовки подвергаются неоднократным процедурам травления в смеси кислот и промывки деионизованной водой. В последнее десятилетие в Физико-техническом институте НАН Беларуси создана требуемая инфраструктура и накоплен определенный опыт производства сверхпроводящих резонаторов [1–3].

При сварке могут появляться следующие дефекты: неполное проплавление, чешуйчатость и высокая шероховатость поверхности шва, крупные капли и брызги металла на обратной поверхности сварного соединения [4, 5]. Для их устранения применяются методы электролитической или абразивной полировки внутренней поверхности резонатора или специальные механизмы. Значительной проблемой при сварке является появление такого дефекта, как прожог материала сварного шва. Вследствие высокой сложности изготовления и стоимости готового изделия (СВЧ-резонатора) актуальна разработка методики ремонта и восстановления дефектов, которые могут появиться в ходе сварки.

Цель настоящей работы – отработка методов устранения прожога в сварном шве после ЭЛС на примере ниобиевого сверхпроводящего коаксиального полуволнового резонатора.

Возможные причины появления дефектов при сварке и методы их устранения. При выборе режимов сварки необходимо учитывать, что для системы электропитания оборудования и функционирования электронно-лучевой пушки характерна некоторая нестабильность (пульсации) ускоряющего напряжения, токов луча и фокусировки. При формообразовании цилиндрических элементов возможно появление незначительной их эллипсности. Из-за этого при вращении заготовки вокруг оси может изменяться расстояние от пушки до поверхности свариваемых кромок. Кроме того, если при ЭЛС угол падения луча на свариваемый стык в ходе процесса отклоняется от 90°, то вследствие изменения соотношения отраженных от поверхности и поглощенных материалом электронов величина энерговклада изменяется. По причине неоднородной деформации в процессе формообразования толщина свариваемых кромок также колеблется, что обуславливает различия в условиях теплоотводов в разных участках резонатора и неполное соответствие условиям сварки экспериментального образца (ниобиевой трубы), применяемого при отработке оптимальных технологических режимов ЭЛС. Перечисленные причины могут приводить к отклонению глубины шва от требуемого значения и к определенной вероятности появления дефектов сварных соединений. В случае наиболее часто встречаемых устранимых дефектов (например, неполного проплавления) возникает необходимость повторного прохода электронным пучком, что в совокупности с указанными причинами усугубляет риск возникновения серьезных трудно устранимых дефектов – прожогов.

Возможность ремонта прожогов шва при помощи заглушек, вставляемых в отверстие прожога с последующей их переплавкой, показана в [4–9]. В [10] отмечается, что при изготовлении резонаторов для E-XFEL было отремонтировано 6 резонаторов с прожогами шва специально разработанной технологией.

Оборудование и методика изготовления и ремонта резонаторов. Для изготовления коаксиальных полуволновых резонаторов (рис. 1) применялся листовой ниобий толщиной 3 мм производства Ningxia OTIC (Китай). В процессе формообразования с использованием прессового оборудования при получении отдельных элементов резонатора фиксировалось варьирование толщины деформированных участков от 2,8 до 3,2 мм.

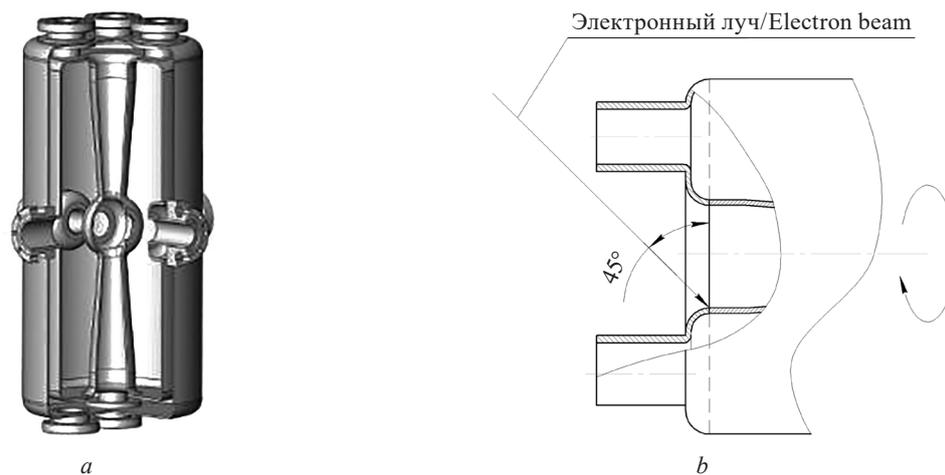


Рис. 1. Коаксиальный полуволновой резонатор в разрезе (а) и схема электронно-лучевой сварки внутреннего электрода с крышкой (b)
 Fig. 1. Coaxial half-wave resonator in section (a) and diagram of the electron beam welding of the internal electrode with a cover (b)

ЭЛС резонаторов выполнялась на электронно-лучевой установке с ускоряющим напряжением 60 кВ и мощностью луча до 30 кВт. Для фиксации и позиционирования резонатора и образцов использовалась специальная оснастка из алюминия и нержавеющей стали. Отсутствие/наличие дефектов на наружной стороне сварного шва определяли путем визуального осмотра. Для осмотра обратной стороны шва использовался эндоскоп с фотофиксацией COANTEC P40 Series M3-6015.

ЭЛС резонатора проводилась комбинированным режимом с током фокусировки луча 627 мА при линейной развертке вдоль направления перемещения ванны 2 мм со смещением от стыка в сторону электронно-лучевой пушки 1,5 мм в несколько проходов по периметру цилиндрической поверхности. Первый проход: ток луча с силой тока 80 мА (в диапазоне угла поворота относительно оси луча 0–20° выполнялся набор тока, в диапазонах 20–380° – сварка, 380–425° – сброс тока до 0 мА); второй проход: ток луча с силой тока 165 мА (0–20° – набор тока, 20–380° – сварка (с падением тока от 165 мА (при 20°) до 163 мА (при 380°)), 380–425° – сброс тока до 0 мА).

При визуальном осмотре (с помощью эндоскопа) обратных сторон сварного соединения были обнаружены дефекты в виде непроваров. Для их устранения выполнялся повторный проход сварного шва. ЭЛС проводилась по следующему режиму: ток луча 168 мА, ток фокусировки 627 мА, линейная развертка вдоль направления перемещения ванны – 2 мм, смещение от стыка в сторону электронно-лучевой пушки – 1,5 мм. Технология сварки в таких условиях требует применения дополнительных технологических мер. Электронный луч попадал на поверхность под углом 45° (практически максимально возможный угол для данной конструкции), резонатор вращался вокруг центральной оси. Для уменьшения концентрации энергии использовался расфокусированный электронный луч (пятно нагрева имело наблюдаемый диаметр 5–6 мм). Установлено, что при падении луча под углом на свариваемых кромках пятно нагрева вытягивается в эллипс. Так, при угле 45° большая сторона эллипса составляет 1,4 от диаметра пятна нагрева при падении луча перпендикулярно поверхности. Для устранения эллипсности пятна нагрева использовалась линейная развертка электронного луча вдоль направления перемещения сварочной ванны с амплитудой 2 мм. Эксперименты по сварке под углом 45° без развертки не позволили определить оптимальные параметры сварки. Сварка под данным углом за один проход также не дала положительных результатов – они были получены при выполнении предварительного прохода с мощностью 50 % от номинального тока луча. При этом на одном из участков образовался прожог шва.

Для заварки прожога была изготовлена заглушка из ниобия толщиной 3 мм (рис. 2, а). Заготовка заглушки выполнена из листового материала (рис. 2, б) с радиусом изгиба 31 мм, что соответствует наружному диаметру внутреннего электрода – 62 мм.

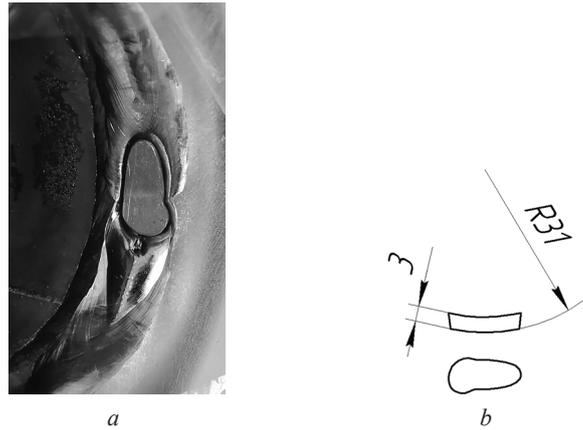


Рис. 2. Вид прожога в резонаторе с установленной заглушкой из ниобия (a) и схема заглушки (b)
 Fig. 2. Type of burn-through in the resonator with a niobium plug installed (a) and a diagram of the plug (b)

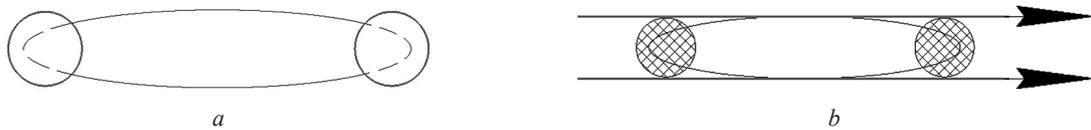


Рис. 3. Схемы первого (a) и второго (b) этапов заварки прожога
 Fig. 3. Schemes of the first (a) and second (b) stages of welding burn

Методика заварки прожога отрабатывалась на модели в виде трубы близкого к резонатору диаметра из ниобия толщиной 3 мм. Из-за достаточно больших размеров прожога (6 × 10 мм) заварка осуществлялась в несколько этапов:

- 1) для точного позиционирования заглушки потребовались точечные прихватки по краям при токе фокусировки 627 мА и токе сварки 60 мА (рис. 3, a);
- 2) для пространственного ограничения растекания сварочной ванны и сплавления материала заглушки с основой проводились два параллельных прохода с неполным проплавлением со смещением к краям заглушки при токе фокусировки 627 мА и токе сварки 120 мА (рис. 3, b);
- 3) финальный проход по центру заглушки с полным проплавлением, ток фокусировки – 627 мА, ток сварки – 173 мА.

После финального прохода наблюдалось значительное уменьшение размера прожога (отверстие диаметром до 3 мм) и его смещение (вытягивание) вдоль сварного шва. Были подготовлены новые заглушки соответствующих размеров, и заварка происходила за один проход с полным проплавлением при сохранении изложенных выше этапов. В результате было получено полное устранение прожога с удовлетворительным качеством лицевой и обратной сторон сварного шва. Многократное повторение технологических операций на модельных прожогах позволило отработать технологию, подобрать оптимальные режимы и выполнить операцию по успешному восстановлению прожога на резонаторе (рис. 4).

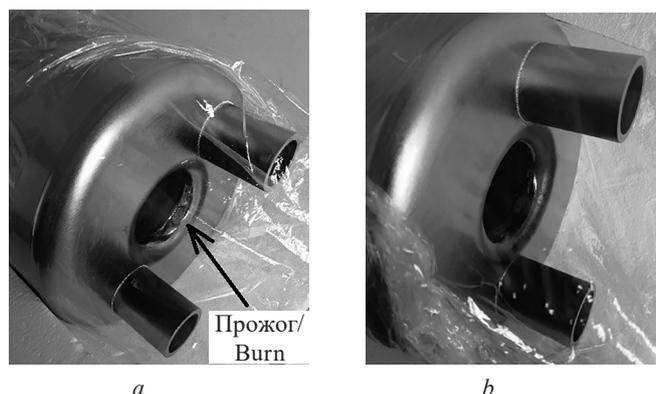


Рис. 4. Резонатор с прожегом (a) и после устранения дефекта (b)
 Fig. 4. Resonator with a burn-through (a) and after the defect has been eliminated (b)

Измерение одного из ключевых параметров резонатора – резонансной частоты, до возникновения прожога (325,18 МГц) и после восстановления (325,074 МГц) показало, что заплавление отверстия не привело к изменению электрофизических характеристик, а проведенные вакуумные и криогенные испытания (при температуре жидкого азота и жидкого гелия) подтвердили герметичность сварных соединений и работоспособность резонатора в режиме сверхпроводимости.

Заключение. Разработанная технология и выбранные режимы электронно-лучевого наплавления и сварки для восстановления и ремонта ниобиевого сверхпроводящего коаксиального полуволнового резонатора позволили успешно устранить критические дефекты сварных соединений типа прожогов.

Представленные технологические режимы и результаты работы будут полезны при разработке базовых технологий восстановления и ремонта сложных в изготовлении и дорогостоящих элементов ускорительной техники, в частности сверхпроводящих высокочастотных резонаторов из листового особо чистого ниобия.

Список использованных источников

1. Pobol, I. L. Developing of superconducting niobium cavities for accelerators / I. L. Pobol, S. V. Yurevich // J. Phys.: Conf. Series. – 2015 – Vol. 653, № 1. – Art. ID 012008. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012008>
2. Status of R&D on new superconducting injector linac for Nuclotron-NICA / A. V. Butenko [et al.] // 61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, Daejeon, Korea, 17–22 June 2018: Proceedings. – Daejeon, 2018. – P. 83–87. <http://doi.org/10.18429/JACoW-HB2018-TUA2WC02>
3. Текущее состояние работ по созданию сверхпроводящих ускоряющих резонаторов для проекта Нуклотрон-Nica / М. А. Гусарова [и др.] // VII Междунар. конф. «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (Лaplaz-2021), Москва, НИЯУ МИФИ, 24–26 марта 2021 г. – М., 2021. – С. 112–114.
4. IHEP low-loss large grain 9-cell cavity fabrication and processing / J. Gao [et al.] // 1st Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC'10), Kyoto, Japan, May 23–28, 2010: Proceedings. – Geneva, 2010. – P. 2974–2976.
5. ILC-higrade cavities as a tool of quality control for European XFEL / A. Navitski [et al.] // 16th Intern. Conf. on RF Superconductivity, SRF 2013, Paris, France, 23–27 September, 2013: Proceedings. – 2013. – P. 209–212.
6. Fabrication and testing of SSR1 resonators for PXIE / L. Ristori [et al.] // 4th Intern. Particle Accelerator Conf., IPAC 2013, Shanghai, China, 12–17 May, 2013: Proceedings. – Geneva: JACOW, 2013. – P. 2429–2431.
7. Development and performance of 325 MHz single spoke resonators for Project X / L. Ristori [et al.] // 16th Intern. Conf. on RF Superconductivity, SRF 2013, Paris, France, 23–27 September 2013: Proceedings. – 2013. – P. 1187–1192.
8. KEK Production and investigation of superconducting 9-cell cavity made of large grain Nb in KEK / T. Dohmae [et al.] // 7th Intern. Particle Accelerator Conf., IPAC 2016, Busan, Korea, 8–13 May, 2016: Proceedings. – Geneva, 2016. – P. 2141–2144.
9. Experience with the fabrication, processing and testing of the prototype “C75” 5-cell cavities [Electronic resource] / G. Ciovati [et al.] // JLAB-TN-17-029, May 17, 2017. – Mode of access: https://indico.jlab.org/event/251/attachments/2501/3068/FabricationProcessTesting_of_C75-JLAB-TN-17-029.pdf – Date of access: 22.10.2022
10. Production of superconducting 1.3-GHz cavities for the European X-ray Free Electron Laser / W. Singer [et al.] // Phys. Rev. Accel. Beams. – 2016. – Vol. 19. – Art. ID 092001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.092001>

References

1. Pobol I. L., Yurevich S. V. Developing of superconducting niobium cavities for accelerators. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 653, no. 1, art. ID 012008. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012008>
2. Butenko A. V., Emelianov N. E., Sidorin A. O., Syresin E. M., Trubnikov G. V., Gusarova M. A., Kulevoy T. V., et al. Status of R&D on new superconducting injector linac for Nuclotron-NICA. *61st ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, Daejeon, Korea, 17–22 June 2018: Proceedings*. Daejeon, 2018, pp. 83–87. <http://doi.org/10.18429/JACoW-HB2018-TUA2WC02>
3. Gusarova M. A., Lalayan M. V., Nemchenko R. E., Polozov S. M., Butenko A. V., Syresin E. M., Bychenok D. S., et al. Current state of work on the creation of superconducting accelerating cavities for the Nuclotron-Nica project. *VII Mezhdunarodnaya konferentsiya “Lazernye, plazmennye issledovaniya i tekhnologii” (Laplaz-2021), Moskva, NIYaU MIFI, 24–26 marta 2021 g.* [7th International Conference “Laser, Plasma Research and Technologies” (Laplaz-2021), Moscow, MEPhI Research Institute, March 24–26, 2021]. Moscow, 2021, pp. 112–114 (in Russian).
4. Gao J., Zhai J. Y., Li Z. Q., Zhao T. X., Dai J. P., Wang Q. Y., Guo Z. D., et al. IHEP low-loss large grain 9-cell cavity fabrication and processing. *1st International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto, Japan, May 23–28, 2010: Proceedings*. Geneva, 2010, pp. 2974–2976.
5. Navitski A., Elsen E., Foster B., Iversen J., Laasch R., Matheisen A., Reschke D., et al. ILC-higrade cavities as a tool of quality control for European XFEL. *16th International Conference on RF Superconductivity, SRF 2013, Paris, France, 23–27 September 2013: Proceedings*. 2013, pp. 209–212.

6. Ristori L., Awida M. H., Berrutti P., Khabiboulline T. N., Merio M., Passarelli D., Rowe A., Sergatskov D. A., Sukhanov A. I. Fabrication and testing of SSR1 resonators for PXIE. *4th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2013, Shanghai, China, 12–17 May, 2013: Proceedings*. Geneva, JACOW, 2013, pp. 2429–2431.

7. Ristori L., Awida M. H., Berrutti P., Ginsburg C. M., Gonin I. V., Khabiboulline T. N., Merio M., et al. Development and performance of 325 MHz single spoke resonators for Project X. *16th International Conference on RF Superconductivity, SRF 2013, Paris, France, 23–27 September 2013: Proceedings*, 2013, pp. 1187–1192.

8. Dohmae T., Inoue H., Umemori K., Watanabe Y., Yamanaka M. KEK Production and investigation of superconducting 9-cell cavity made of large grain Nb in KEK. *7th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2016, Busan, Korea, 8–13 May, 2016: Proceedings*. Geneva, 2016, pp. 2141–2144.

9. Ciovati G., Anderson A., Clemens W., Combs D., Davis K., Dail J., Dreyfuss C., et al. Experience with the fabrication, processing and testing of the prototype “C75” 5-cell cavities. *JLAB-TN-17-029, May 17, 2017*. Available at: https://indico.jlab.org/event/251/attachments/2501/3068/FabricationProcessTesting_of_C75-JLAB-TN-17-029.pdf (accessed 22 October 2022).

10. Singer W., Brinkmann A., Brinkmann R., Iversen J., Matheisen A., Moeller W.-D., Navitski A., et al. Production of superconducting 1.3-GHz cavities for the European X-ray Free Electron Laser. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2016, vol. 19, art. ID 092001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.092001>

Информация об авторах

Бурин Александр Алексеевич – научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича 10, 220084, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-0143-3962>. E-mail: burin1992@mail.ru

Залесский Виталий Геннадьевич – доктор физико-математических наук, директор, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича 10, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.zallesski@phti.by

Поболь Игорь Леонидович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича 10, 220084, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-4487-7245>. E-mail: pobol@phti.by

Information about the authors

Alexander A. Burin – Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-0143-3962>. E-mail: burin1992@mail.ru

Vitali G. Zaleski – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.zallesski@phti.by

Igor L. Pobol – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-4487-7245>. E-mail: pobol@phti.by