

EDN: LOUTZU

УДК 621.78.012.8

## Compact Electron Beam Source for Electron Beam Welding Installations with Transformer Transmission of Power Supply Beam Control Electronics and Electron Guns Cathode

Yuriy I. Semenov<sup>a\*</sup>, Dmitriy Yu. Bolhovityanov<sup>a</sup>,  
Igor A. Gusev<sup>a</sup>, Tatyana A. Devyataikina<sup>a, b</sup>,  
Boris A. Dovzhenko<sup>a</sup>, Aleksandr A. Zharikov<sup>a</sup>,  
Mikhail Yu. Kosachev<sup>a</sup>, Eduard A. Kuper<sup>a</sup>,  
Pavel V. Logachev<sup>a</sup>, Aleksandr Yu. Protopopov<sup>a</sup>,  
Vladimir V. Repkov<sup>a</sup>, Dmitriy Yu. Sen'kov<sup>a, b, c</sup>,  
Aleksandr A. Starostenko<sup>a, b</sup> and Aleksandr S. Tsyganov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS*

<sup>b</sup>*Novosibirsk State University*

<sup>c</sup>*Novosibirsk State Technical University*

*Novosibirsk, Russian Federation*

Received 04.10.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 24.01.2024

**Abstract.** A compact source of electron beam for electron beam welding installations with the arrangement of an electron gun, a source of high-voltage accelerating voltage of the electron gun and an electronics unit for heating the cathode and controlling the electron beam current in a single monoblock housing is presented, which uses a transformer circuit for transmitting power supply to the beam control electronics and the electron gun cathode. This arrangement of the electron beam source for electron beam welding in a single monoblock housing reduces weight and cost by reducing the amount of materials used volume, occupied production space and eliminates expensive high-voltage connectors and cables from the source design. This significantly expands the possibilities of using the presented type of electron beam sources in electron beam technologies. The purpose of the work is to show the feasibility of using a transformer circuit for transmitting power to the beam control electronics and the electron gun cathode in a compact monoblock electron beam source. A transformer circuit for transmitting power to the beam control electronics and cathode was designed and manufactured. It was tested and the following results were obtained:

- a cathode heating current of up to 95 A is provided;

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: Yu.I.Semenov@inp.nsk.su

- an electronic source current of up to 100 mA with an energy of 90 keV was obtained;
- the width of the profile of the electron beam of the source was measured at its half-height of 0.9 mm at a distance from the cut of the electron-optical column of the electron gun 550 mm.

**Keywords:** electron beam welding, laser heating of the cathode, laser heating of the cathode with regulation and stabilization of the cathode current by controlling the power of the laser beam, transformer circuit for transmitting power supply to the beam control electronics and cathode, transmission of power supply to the beam control electronics and cathode heating via isolation capacitors, electron beam profile size, compact electron beam source.

Citation: Semenov Yu. I. et al. Compact electron beam source for electron beam welding installations with transformer transmission of power supply beam control electronics and electron guns cathode. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(1), 73–81. EDN: LOUTZU



## **Компактный источник электронного пучка для установок электронно-лучевой сварки с трансформаторной передачей электропитания электроники управления пучком и катода электронной пушки**

**Ю. И. Семенов<sup>а</sup>, Д. Ю. Болховитянов<sup>а</sup>,  
И. А. Гусев<sup>а</sup>, Т. А. Девятайкина<sup>а, б</sup>, Б. А. Довженко<sup>а</sup>,  
А. А. Жариков<sup>а</sup>, М. Ю. Косачев<sup>а</sup>, Э. А. Купер<sup>а</sup>,  
П. В. Логачев<sup>а</sup>, А. Ю. Протопопов<sup>а</sup>, В. В. Репков<sup>а</sup>,  
Д. Ю. Сеньков<sup>а, б, в</sup>, А. А. Старостенко<sup>а, б</sup>, А. С. Цыганов<sup>а</sup>**

<sup>а</sup>*Институт ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера*

<sup>б</sup>*Новосибирский государственный университет*

<sup>в</sup>*Новосибирский государственный технический университет*

*Российская Федерация, Новосибирск*

**Аннотация.** Представлен компактный источник электронного пучка для установок электронно-лучевой сварки с расположением электронной пушки, источника высоковольтного ускоряющего напряжения электронной пушки и блока электроники накала катода электронной пушки и управления током электронного пучка в едином корпусе-моноблоке, в котором использована трансформаторная схема передачи электропитания электроники управления пучком и катода электронной пушки. Такая компоновка источника электронного пучка для электронно-лучевой сварки в едином корпусе-моноблоке снижает вес и стоимость за счёт уменьшения количества используемых материалов, объёма, занимаемых производственных площадей и исключает из конструкции источника дорогостоящие высоковольтные соединители и кабели. Это существенно расширяет возможности применения представляемого типа источников электронного пучка в электронно-лучевых технологиях. Цель работы – показать целесообразность применения трансформаторной схемы передачи электропитания электроники управления пучком и катода электронной пушки в компактном источнике-моноблоке электронного пучка. Спроектирована и изготовлена трансформаторная схема передачи электропитания электроники управления пучком и катода. Проведены её испытания и получены следующие результаты:

- обеспечивается ток накала катода до 95 А;
- получен электронный ток источника до 100 мА с энергией 90 кэВ;
- измерена ширина профиля электронного пучка источника на его полувысоте 0.9 мм на расстоянии от среза электронно-оптической колонны электронной пушки 550 мм.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, лазерный подогрев катода, лазерный подогрев катода с регулировкой и стабилизацией тока катода посредством управления мощностью лазерного луча, трансформаторная схема передачи электропитания электроники управления пучком и катода, передача электропитания электроники управления пучком и накала катода через разделительные конденсаторы, размер профиля электронного пучка, компактный источник электронного пучка.

Цитирование: Семенов Ю. И. Компактный источник электронного пучка для установок электронно-лучевой сварки с трансформаторной передачей электропитания электроники управления пучком и катода электронной пушки / Ю. И. Семенов, Д. Ю. Болховитянов, И. А. Гусев и др. // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(1). С. 73–81. EDN: LOUTZU

## Введение

Электронно-лучевая сварка имеет ряд неоспоримых преимуществ. Это её высокое качество соединения таких материалов, как сплавы титана [1], алюминия [2] и нержавеющей сталь [3], разнородные и трудно свариваемые материалы с высокой теплопроводностью [4]. Этот метод обеспечивает получение высокого качества и прочности соединения металлов независимо от их химического состава при толщине детали от 0,1 мм до 400 мм при сварке за один проход [5]. Данный способ сварки, применяемый в машиностроении, также обуславливает уменьшение массогабаритных характеристик свариваемых деталей и в целом всего изделия, по сравнению с другими способами сварки [6]. Он обладает высокой энергоэффективностью и может использоваться также в процессах плавки, пайки, резки, нанесения покрытий и в аддитивных технологиях [7,8].

Размещение электронной пушки, источника высоковольтного ускоряющего напряжения электронной пушки и блока электроники накала катода электронной пушки и управления током электронного пучка в едином корпусе-моноблоке существенно улучшает массогабаритные параметры источника, даёт экономические выгоды за счёт уменьшения его веса, объёма используемых материалов и площадей производственных помещений, исключает из конструкции источника дорогостоящие высоковольтные соединители и кабели, а также открывает новые возможности применения в электронно-лучевых технологиях. В связи с этим имеется значительный интерес в разработке источника электронного пучка с компоновкой в виде моноблока. При этом требуется решить задачу передачи электропитания электроники управления пучком и катода, которая находится под потенциалом ускоряющего напряжения электронной пушки. Имеется три возможности передачи:

- лазерный подогрев катода с регулировкой и стабилизацией тока катода посредством управления мощностью лазерного луча;
- передача электропитания электроники управления пучком и накала катода через разделительные конденсаторы;
- передача электропитания электроники управления пучком и накала катода через разделительный трансформатор.

Компактный источник электронного пучка с лазерным подогревом катода на испытаниях работал достаточно надёжно [9]. Способ лазерного подогрева катода описан в [10], а способ регулировки и стабилизации тока катода электронной пушки посредством управления мощностью лазерного луча описан в [11].

Вариант источника с передачей электропитания электроники управления пучком и накала катода электронной пушки через разделительные конденсаторы на испытаниях работал не надёжно. Разделительные конденсаторы часто пробивались при работе в режимах, не превышающих их рабочие параметры.

В настоящей работе представлен компактный источник электронного пучка для установок электронно-лучевой сварки с трансформаторной передачей электропитания электроники управления пучком и катода электронной пушки.

### Описание прототипа

Обычно источники электронных пучков для электронно-лучевых технологий состоят из отдельных друг от друга компонентов, которые между собой коммутируются кабелями, в том числе дорогостоящими высоковольтными кабелями и высоковольтными соединителями [12]. В нашем случае электронная пушка с электронно-оптической колонной, высоковольтный источник ускоряющего напряжения электронной пушки и блок электроники накала катода и управления током электронного пучка располагаются в едином корпусе-моноблоке (рис. 1), и передача электропитания электроники управления током электронного пучка и накала катода осуществляется через разделительный трансформатор. Блок электроники питания накала катода и управления током источника (рис. 1, поз. 4), находящийся под потенциалом ускоряющего напряжения электронной пушки в 120 кВ, является достаточно сложным и дорогим компонентом электронного источника. При этом необходимо передавать мощность электропитания порядка 250 Вт. Электронику надо защищать от пробоев и от рентгеновского излучения.

В настоящей работе для передачи мощности электропитания используются два последовательно включенных трансформатора. Магнитопровод каждого трансформатора представляет собой кольцо из аморфного железа, на котором намотаны две обмотки. Одинаковые обмотки трансформаторов намотаны в два провода (рис. 2). Напряжение изоляции проводов каждой из обмоток – 30кВ. Таким образом, первичная и вторичная обмотки могут быть разнесены на 60 кВ. Два последовательно включенных трансформатора позволяют разнести потенциалы первичной и вторичной обмоток на 120 кВ. Выгода такого решения состоит в том, что используются стандартные покупные детали и не приходится разрабатывать высоковольтный трансформатор, но размер этих трансформаторов значительно больше, чем размер специально разработанных трансформаторов. Однако трансформаторы устанавливаются в таком месте, что дополнительный объем не потребовался. Электрическая прочность обеспечивается за счет высоковольтной изоляции проводов.

На рис. 3 представлена принципиальная схема трансформаторной передачи электропитания электроники управления пучком и катода электронной пушки. Здесь нумерация выделенных блоков совпадает с нумерацией блоков на рис. 1: 2 – электронная пушка с электронно-оптической колонной; 4 – блок электроники накала катода и управления током электронного пучка; 5 – умножитель напряжения; 6 – трансформатор входной 30 кВ.

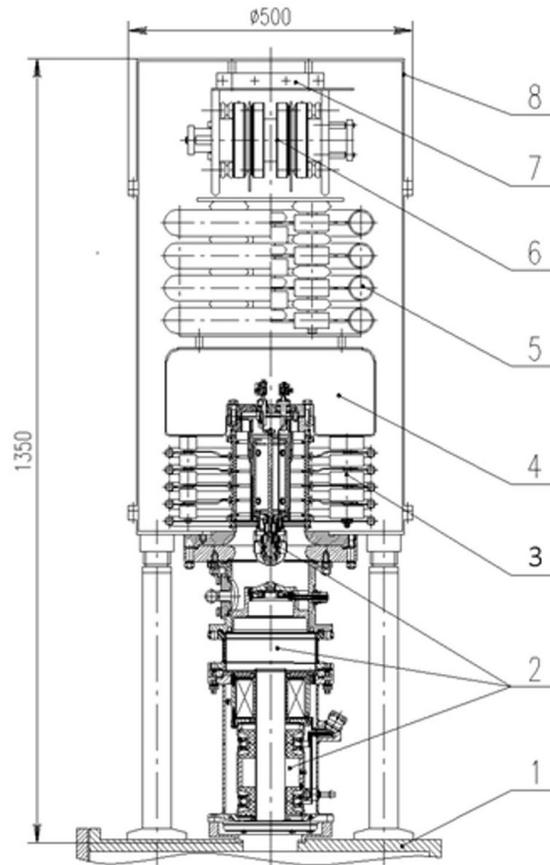


Рис. 1. Компоновка моноблока: 1 – вакуумная камера, 2 – электронная пушка с электронно-оптической колонной, 3 – блок делителя напряжения, 4 – блок электроники нагрева катода и управления током электронного пучка, 5 – умножитель напряжения, 6 – трансформатор входной 30 кВ, 7 – радиатор водяного охлаждения, 8 – корпус моноблока

Fig. 1. Monoblock layout: 1 – vacuum chamber, 2 – electron gun with electron-optical column, 3 – voltage divider block, 4 – tank of electronics for heating the cathode and for electron beam current control, 5 – voltage multiplier, 6 – input transformer 30 kV, 7 – water cooling radiator, 8 – housing of the monoblock

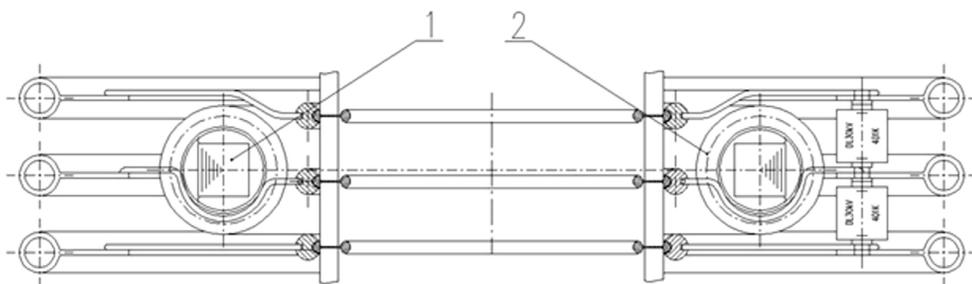


Рис. 2. Поперечное сечение одного из двух трансформаторов и его размещение в блоке делителя моноблока: 1 – магнитопровод, 2 – обмотка из провода с высоковольтной изоляцией

Fig. 2. Cross section of one of the two transformers and its placement in the monoblock divider block: 1 – magnetic circuit, 2 – winding made of wire with high-voltage insulation

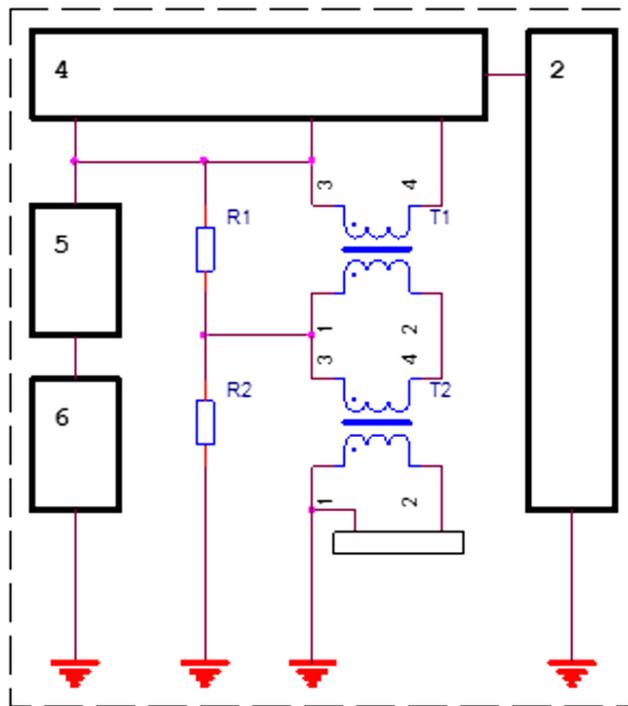


Рис. 3. Принципиальная схема трансформаторной передачи питания электроники управления пучком и катода электронной пушки

Fig. 3. Schematic diagram of transformer transmission power supply for beam control electronics and electron gun cathode

### Результаты и их обсуждение

При испытаниях компактный источник электронного пучка с трансформаторной передачей электропитания электроники управления пучком и катода электронной пушки работал надёжно и были проведены измерения его основных параметров:

- схема трансформаторной передачи питания электроники управления пучком и катода электронной пушки (обеспечивался ток накала катода электронной пушки до 95 А);
- ток электронного пучка измерялся с помощью цилиндра Фарадея и составлял до 100 мА при энергии электронов 90 кэВ;
- ширина профиля пучка на его полувысоте на расстоянии от среза электроно-оптической колонны 550 мм не более 0,9 мм.

Размер профиля тока электронного пучка по его поперечному сечению измерялся методом быстрой развёртки электронного пучка поперек параллельных узких щелей измерительной решётки и осциллографирования тока электронов, прошедших через узкую измерительную щель металлической пластины в цилиндр Фарадея.

В данной компоновке источника электронного пучка магнитопроводы трансформаторов передачи электропитания электроники управления пучком и катода электронной пушки охватывают лучепровод, то есть электронный пучок проходит сквозь кольца трансформаторов. Таким образом, на электронный пучок воздействует не только постоянное напряжение 120 кВ, но и переменное напряжение, наведенное от трансформаторов. Это напряжение невелико –

около 7 вольт и при правильной коммутации обмоток поля двух трансформаторов компенсируют друг друга. Какого-то влияния на сварочный ток не было замечено.

### Резюме и выводы

Измерены основные параметры компактного источника пучка с трансформаторной передачей электропитания электроники управления пучком и катода электронной пушки:

- максимальный ток накала катода электронной пушки;
- ток электронного пучка;
- размер профиля пучка электронов на его полувысоте.

Были проведены испытания компактного источника электронного пучка в виде моноблока в трёх вариантах схемы подогрева катода и электроники управления пучком:

- лазерный подогрев катода с регулировкой и стабилизацией тока катода посредством управления мощностью лазерного луча;
- передача электропитания электроники управления пучком и накала катода через разделительные конденсаторы;
- передача электропитания электроники управления пучком и накала катода через разделительный трансформатор.

Вариант источника с лазерным подогревом эмиссионной поверхности катода на испытаниях работал достаточно надёжно [9], и его основным недостатком является дороговизна источника лазерного излучения.

Вариант источника с передачей электропитания электроники управления пучком и накала катода через разделительные конденсаторы на испытаниях работал не надёжно. Разделительные конденсаторы часто пробивались при работе в режимах, не превышающих их рабочие параметры. После пробоев изменялись их физические свойства.

Вариант с передачей электропитания электроники управления пучком и накала катода через разделительный трансформатор на испытаниях работал надёжно и обеспечивал работу источника электронного пучка во всех его рабочих режимах.

Оценивая результаты испытаний, можно сказать, что для производственного применения наиболее приемлемым является компактный источник электронного пучка с трансформаторной схемой передачи электропитания электроники управления пучком и накала катода электронной пушки.

### Список литературы / References

- [1] Wang G., Chen Z., Li J., Liu J., Wang Q., Yang R. Microstructure and mechanical Properties of electron beam welded titanium alloy Ti-6246, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2018, 34, 570–576
- [2] Mastanaiah P., Sharma A., Reddy G.M. Process parameters weld bead geometry interactions and their influence on mechanical properties: a case of dissimilar aluminium alloy electron beam welds, *Def. Technol.*, 2018, 14(2), 137–150
- [3] Hajitabar A., Naffakh-Moosavy H. Electron beam welding of difficult-to-weld austenitic stainless steel/Nb-based alloy dissimilar joints without interlayer, *Vacuum*, 2017, 146, 170–178
- [4] Enzinger N., Loidolt P., Wiednig C., Stütz M., Sommitsch C. Electron beam welding of thick-walled copper components, *Sci. Technol. Weld Join*, 2017, 22(2), 127–132

[5] Михальченков А. В., Цыплаков Р. Ш., Успенский Н. В. Электронно-лучевая сварка. Преимущества и недостатки, *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2017, 1, 412–14 [Mikhailchenkov A. V., Tsyplakov R. Sh., Uspensky N. V. Electron beam welding. Advantages and disadvantages, *Actual problems of aviation and astronautics*, 2017, 1, 412–414 (in Rus.)]

[6] Львов В. А. Электронно-лучевая сварка крупногабаритных изделий ракетостроения на современном уровне. *Материалы XXIII Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения»*, Красноярск, 2019, 1, 260–261 [Lvov V. A. Electron-beam welding of large rocket products at the modern level. *Materials of the XXIII International Scientific and Practical Conference “Reshetnev Readings”*. Krasnoyarsk, 2019, 1, 260–261 (in Rus.)]

[7] Weglowski M. S., Włacha S., Phillips A. Electron beam welding – techniques and trends – review, *Vacuum*, 2016, 130, 72–92.

[8] Семенов Ю. И., Алякринский О. Н., Болховитянов Д. Ю., Логачев П. В., Медведев А. М., Спесивцев А. Б., Старостенко А. А., Яминов К. Р. Макет 3D-принтера для изготовления металлических структур из тугоплавких металлов с помощью электронно-лучевых аддитивных технологий, *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: Доклады VI Всероссийской конференции, Новосибирск, 24–27 марта 2015 г.*, Новосибирск, Параллель, 2015, 2, 76–79 [Semenov Yu. I., Alyakrinskiy O. N., Bolkhovityanov D. Yu., Logachev P. V., Medvedev A. M., Spesivtsev A. B., Starostenko A. A., Yaminov K. R. Model of a 3D printer for the manufacture of metal structures from refractory metals using electron beam additive technologies, *Interaction of highly concentrated energy flows with materials in advanced technologies and medicine: Reports of the VI All-Russian Conference, Novosibirsk, March 24–27, 2015*, Novosibirsk, Parallel, 2015, 2, 76–79 (in Rus.)]

[9] Семенов Ю. И., Болховитянов Д. Ю., Довженко Б. А., Гусев И. А., Девятайкина Т. А., Косачев М. Ю., Купер Э. А., Логачев П. В., Прокопец В. В., Протопопов А. Ю., Репков В. В., Сеньков Д. Ю., Старостенко А. А., Цыганов А. С., Жариков А. А. Компактный источник электронного пучка для установок электронно-лучевой сварки с расположением электронной пушки и источника высоковольтного напряжения в едином моноблоке. Концепция, стендовые испытания, *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*, 2022, 15(6), 712–724 [Yu. I. Semenov, D. Yu. Bolkhovityanov, B. A. Dovzhenko, I. A. Gusev, T. A. Devyataikina, M. Yu. Kosachev, E. A. Kuper, P. V. Logatchov, A. Yu. Protopopov, V. V. Repkov, D. V. Senkov, A. A. Starostenko, A. S. Tsygunov, A. Zharikov. Compact source of electron beam for installations of electron-beam welding with the location of the electron gun and the sources of high voltage in a single monoblock. Concept, bench tests, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2022, 15(6), 712–724 (in Rus.)]

[10] Алякринский О. Н., Губин К. В., Косачев М. Ю., Купер Э. А., Логачев П. В., Медведев А. М., Овчар В. К., Репков В. В., Семенов Ю. И., Сизов М. М., Старостенко А. А., Федотов М. Г., Цыганов А. С. Прототип источника пучка электронов с лазерным подогревом катода. *Научное приборостроение*, 2018, 28(4), 8–14 [Alyakrinsky O. N., Gubin K. V., Kosachev M. Yu., Kuper E. A., Logachev P. V., Medvedev A. M., Ovchar V. K., Repkov V. V., Semenov Yu. I., Sizov M. M., Starostenko A. A., Fedotov M. G., A. S. Tsyganov. Prototype of an electron beam source with laser heated cathode, *Scientific Instrumentation*, 2018, 28(5), 8–14 (in Rus.)]

[11] Косачев М. Ю., Купер Э. А., Репков В. В., Семенов Ю. И., Старостенко А. А., Цыганов А. С. Управление током электронно-лучевой сварки посредством регулирования мощности

лазера подогрева катода. *Электронно-лучевые технологии КЭЛТ – 2019, Конференция с международным участием «Электронно-лучевые технологии»*, 2019, 144 [Kosachev M. Yu., Kuper E. A., Repkov V. V., Semenov Yu. I., Starostenko A. A., Tsygunov A. S. Controlling the current of electron-beam welding by adjusting the power of the cathode heating laser. *Electron beam technologies KELT – 2019, Conference with international participation “Electron beam technologies”*, 2019, 144 (in Rus.)]

[12] Semenov Yu.I., Akimov V.E., Batazova M. A., Dovzhenko B. A., Ershov V. V., Frolov A. R., Gusev Ye.A., Gusev I. A., Konstantinov V.M, Kuper E. A., Kuznetsov G. I., Kot N. Kh., Kozak V. R., Logachev P. V., Mamkin V.R, Selivanov A.N., Medvedko A. S., Nikolaev I. V., Protopopov A. Yu, Pureskin D.N., Repkov V. V., Senkov D. V., Tsyganov A. S. 60 keV 30 kW electron beam facility for electron beam technology, *Proc. EPAC 2008*, Genoa, Italy, 2008, 1887–1889.