

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.9.048.7

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ДЛЯ
СОЗДАНИЯ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
(ТЭП) ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМА**

© 2015 г. В.Н. Ластовирия*, В.В. Новокрещенов**,
Р.В. Родякина**

* *Московский государственный индустриальный университет, Москва*
** *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

В статье рассматриваются две различные технологии получения моногранной полой трубки требуемых размеров. Одна из них основана на изготовлении двух полуцилиндров с заданной кристаллографической ориентацией рабочей поверхности, а вторая — на ориентированном сопряжении двух предварительно изготовленных полых заготовок. Полученные в работе результаты свидетельствуют, что рассмотренные технологии позволяют получать моногранные полые трубки, которые могут быть использованы для изготовления ТЭПов.

Ключевые слова: монокристалл, электронно-лучевая сварка (ЭЛС), моногранная полая трубка, кристаллографическая ориентация, субструктура, углы разориентации.

Поступила в редакцию 15.05.2015

В настоящее время методы выращивания монокристаллов тугоплавких металлов, в том числе вольфрама, позволяют получать их в виде слитков диаметром до 50 мм и длиной до 500 мм. Создание из таких полуфабрикатов изделий сложной геометрии и формы возможно только путем сварки отдельных элементов в виде пластин, полос, полуцилиндров и других элементов небольших размеров. Такие элементы получают путем электроискровой резки предварительно ориентированных монокристаллических слитков. В этом случае наряду с решением чисто конструктивных задач, существует возможность в максимальной степени использовать главное достоинство монокристалла — анизотропию его физических и механических свойств. Кроме того, отсутствие в структуре монокристалла большеугловых ($\theta > 5$ град.) границ, обеспечивает высокую устойчивость и сопротивляемость разрушению катодов при воздействии на их структуру продуктов деления ядерного топлива.

Технология получения моногранной полой трубки требуемых размеров основана на изготовлении двух полуцилиндров с заданной кристаллографической ориентацией рабочей поверхности. Для этого монокристаллический слиток предварительно ориентируют методом обратной съемки по Лауэ, а затем вырезают из него пластины требуемых размеров и кристаллографической ориентации поверхности (рис. 1). Основные типы кристаллографической ориентации вырезаемых пластин представлены в таблице 1. Затем пластину деформируют в специальной оснастке для придания ей формы полуцилиндра (рис. 2). Деформирование проводили в специализированной вакуумной камере при температуре 1750 °С. Скорость приложения нагрузки P составляла 0,5 мм/мин. Скорость нагрева до рабочей температуры и скорость

охлаждения после завершения процесса деформирования пластины в полуцилиндр не превышала 20 °С/мин. Затем полуцилиндры в специальной оснастке соединяют двумя сварными швами (рис. 3), выполняемыми навстречу друг другу, электронно-лучевой сваркой (ЭЛС). Скорость сварки составляет не менее 70 м/ч. После сварки и электрохимической полировки рабочих поверхностей трубка может быть использована для изготовления катода ТЭП, вид которого представлен на рисунке 4.

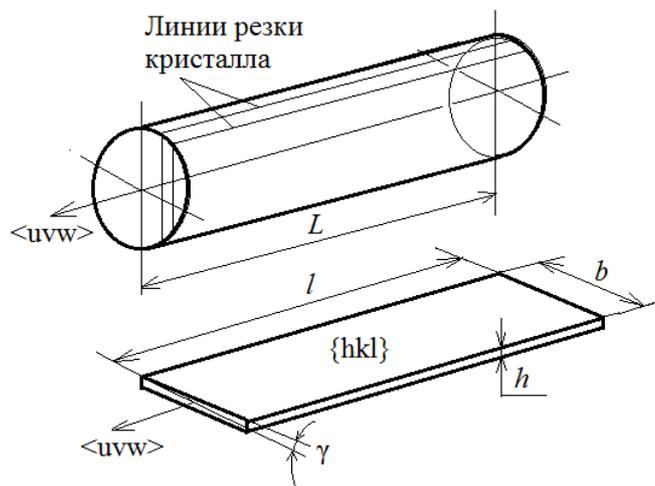


Рис. 1. – Схема вырезки пластины с требуемой ориентацией плоскости на поверхности $\{hkl\}$ из монокристаллического слитка с продольной осью, совпадающей с кристаллографическим направлением $\langle uvw \rangle$; γ — угол отклонения плоскости на поверхности пластины от плоскости $\{hkl\}$, величина которого не должно превышать 1 град

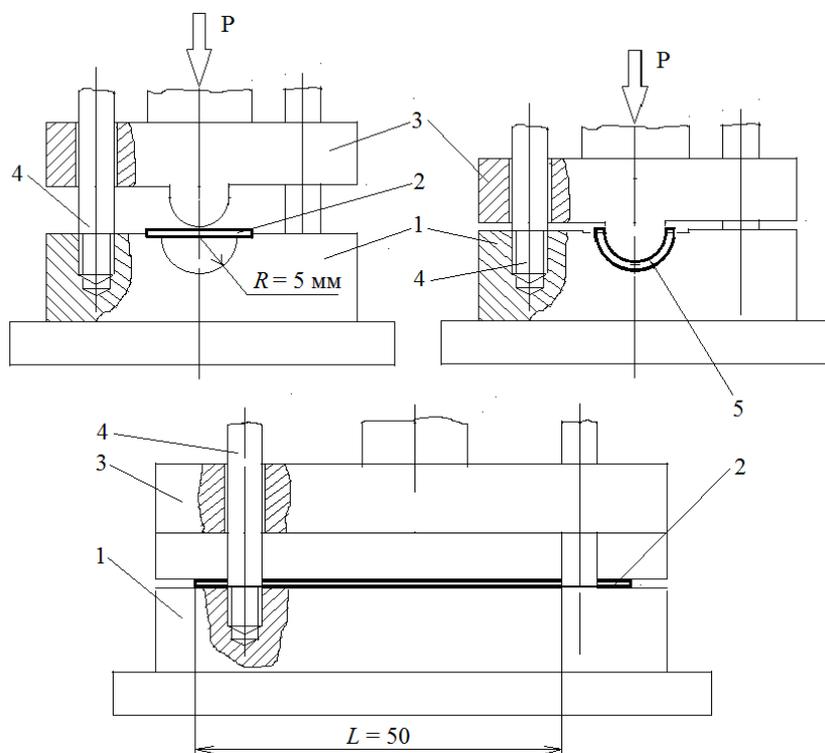


Рис. 2. – Оснастка для формирования монокристаллических полуцилиндров диаметром 5 мм

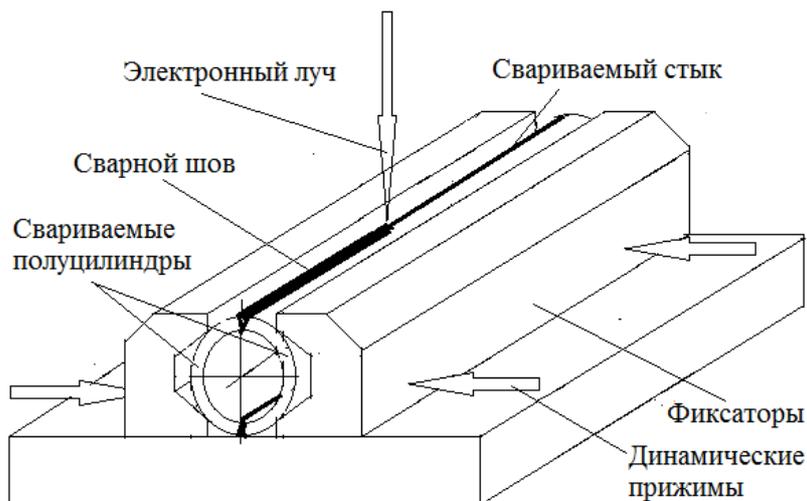


Рис. 3. – Оснастка для сварки монокристаллического цилиндрического катода из двух полуцилиндров



Рис. 4. – Моногранный монокристаллический катод диаметром 10 и длиной 40 мм, полученный электронно-лучевой сваркой двух полуцилиндров

Таблица 1. – Основные типы кристаллографической ориентации вырезаемых пластин

Ориентация поверхности пластины	Ориентация продольного направления пластины (продольная ось слитка)	Ориентация плоскости, совпадающей с продольной плоскостью сварного шва
{100}	<100>	{100}
{100}	<110>	{110}
{110}	<100>	{110}
{110}	<110>	{100}
{110}	<111>	{112}
{111}	<110>	{112}
{111}	<112>	{110}

Основной операцией данной технологии изготовления моногранной трубки является высокотемпературная пластическая деформация монокристаллической пластины. В этом случае важным критерием является влияние процесса деформирования на изменение плотности дислокаций и углы разориентации по субграницам. В исходном состоянии монокристалл вольфрама, полученный методом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки (ЭЛБЗП), отличается высоким совершенством кристаллического строения: плотность дислокаций, оцениваемая количеством ямок травления на плоскости (100), составляет $6 \cdot 10^6 - 10^7 \text{ см}^{-2}$, а угол разориентации по субграницам не превышает 0,5–1 град. (рис. 5). После формирования полуцилиндра его структура сохраняет монокристалльность, но ее показатели существенно изменяются: плотность дислокаций увеличивается примерно до $10^8 - 8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$, а углы разориентации по субграницам до 2–3 град.



Рис. 5. – Субструктура монокристалла вольфрама в исходном состоянии; $\times 80$

Полуцилиндры с такими характеристиками структуры сваривались, а затем подвергались высокотемпературному отжигу при температуре $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ продолжительностью до 40 часов. Цель данной термообработки – оценка стабильности кристаллографии и структурного состояния сварной моногранной трубки.

Результаты проведенных исследований показывают, что в результате проведенной термообработки в структуре происходят заметные изменения, но при этом кристаллографическая ориентация поверхности трубки сохраняется без изменения. Плотность дислокаций существенно снижается, практически вплоть до исходных значений ($10^7 - 8 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$), а углы разориентации в металле шва изменяются неоднозначно. В основной зоне металла шва их величина несколько снижается, стабилизируясь, как правило, после 10-часовой термообработки (рис. 6 и 7), а угол разориентации по субгранице, образующейся в процессе сварки по центру шва, увеличивается (рис. 8 и 9). Максимальные значения его и стабилизация наблюдаются после 20-часового отжига при температуре $2500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Другой вариант получения моногранных монокристаллических трубок, предназначенных для изготовления ТЭП, основан на ориентированном сопряжении двух предварительно изготовленных полых заготовок.

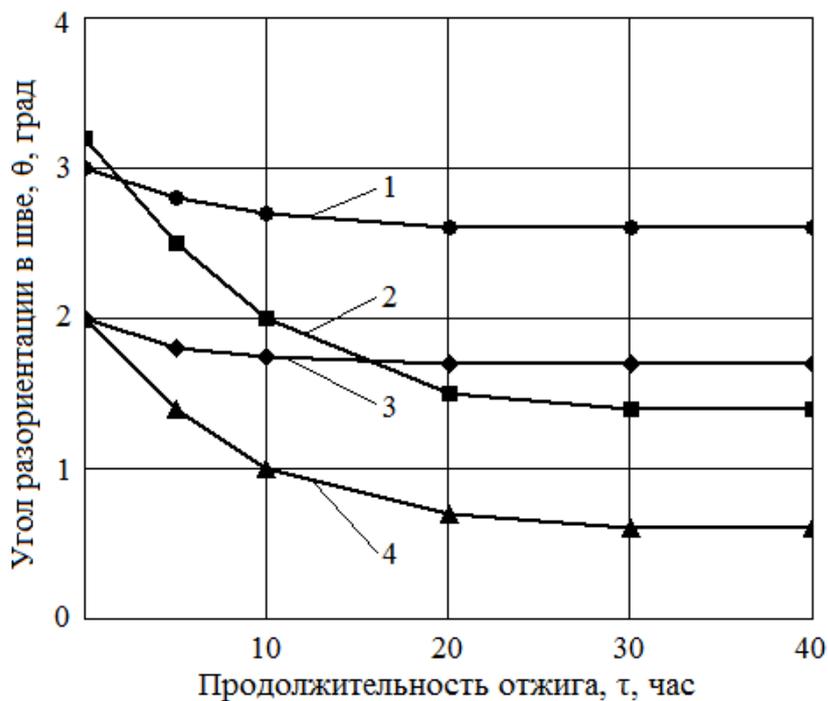


Рис. 6. – Изменение угла разориентации по субграницам в металле шва сварного катода после отжига при температуре 2500 °С: 1 – (100)<100>, $V_{св}=32$ м/ч; 2 – (100)<100>, $V_{св}=96$ м/ч; 3 – (100)<110>, $V_{св}=32$ м/ч; 4 – (100)<110>, $V_{св}=96$ м/ч

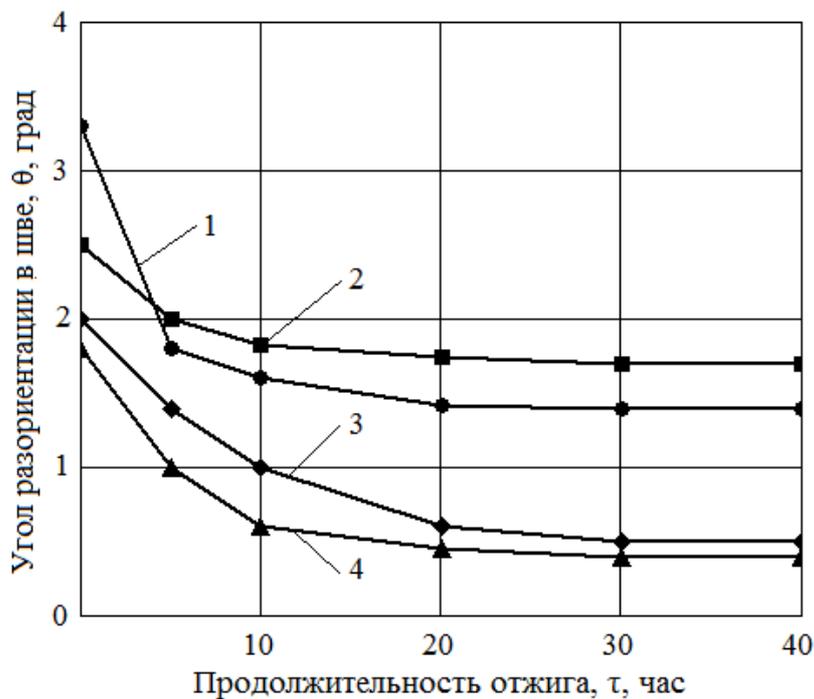


Рис. 7. – Изменение угла разориентации по субграницам в металле шва сварного катода после отжига при температуре 2500 °С: 1 – (110)<100>, $V_{св}=32$ м/ч; 2 – (110)<100>, $V_{св}=96$ м/ч; 3 – (110)<110>, $V_{св}=32$ м/ч; 4 – (110)<110>, $V_{св}=96$ м/ч

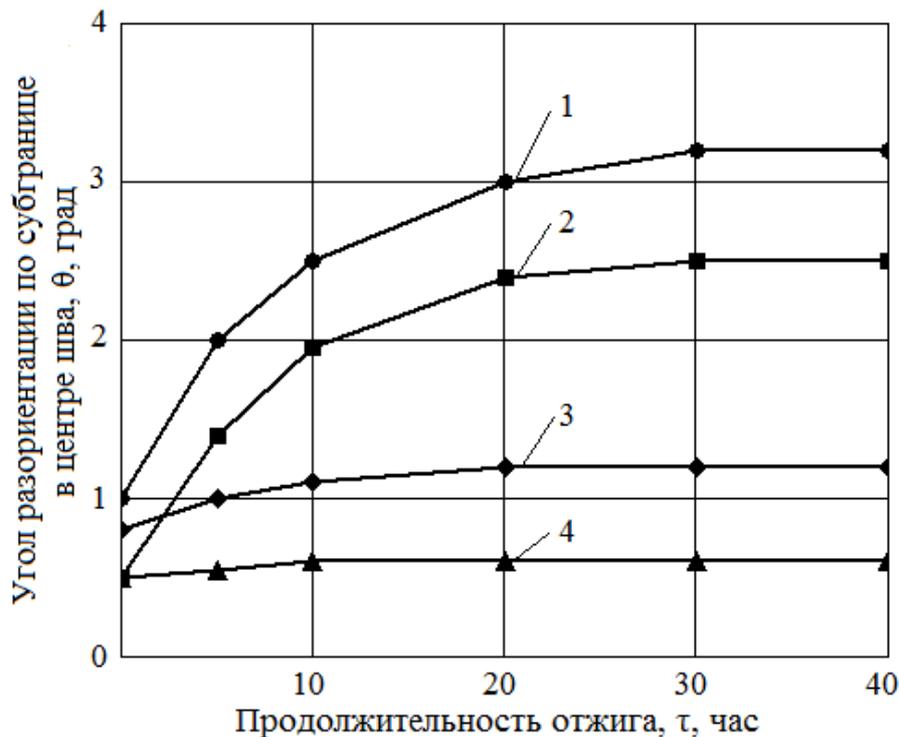


Рис. 8. – Изменение угла разориентации по субгранице в центре шва сварного катода после отжига при температуре 2500 °C: 1 – (100)<100>, $V_{св}=32$ м/ч; 2 – (100)<100>, $V_{св}=96$ м/ч; 3 – (100)<110>, $V_{св}=32$ м/ч; 4 – (100)<110>, $V_{св}=96$ м/ч

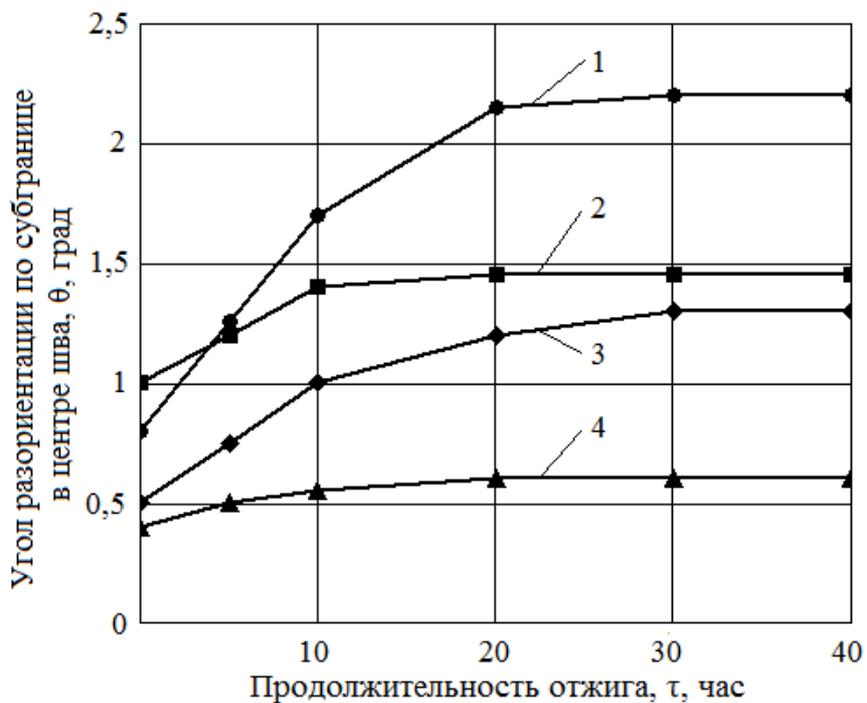


Рис. 9. – Изменение угла разориентации по субгранице в центре шва сварного катода после отжига при температуре 2500 °C: 1 – (110)<100>, $V_{св}=32$ м/ч; 2 – (110)<100>, $V_{св}=96$ м/ч; 3 – (110)<110>, $V_{св}=32$ м/ч; 4 – (110)<110>, $V_{св}=96$ м/ч

Из монокристаллического слитка диаметром $D > d_0$ и длиной $L > 2l_0$ механической и последующей электрохимической обработкой изготавливают две заготовки I и II (рис. 10).

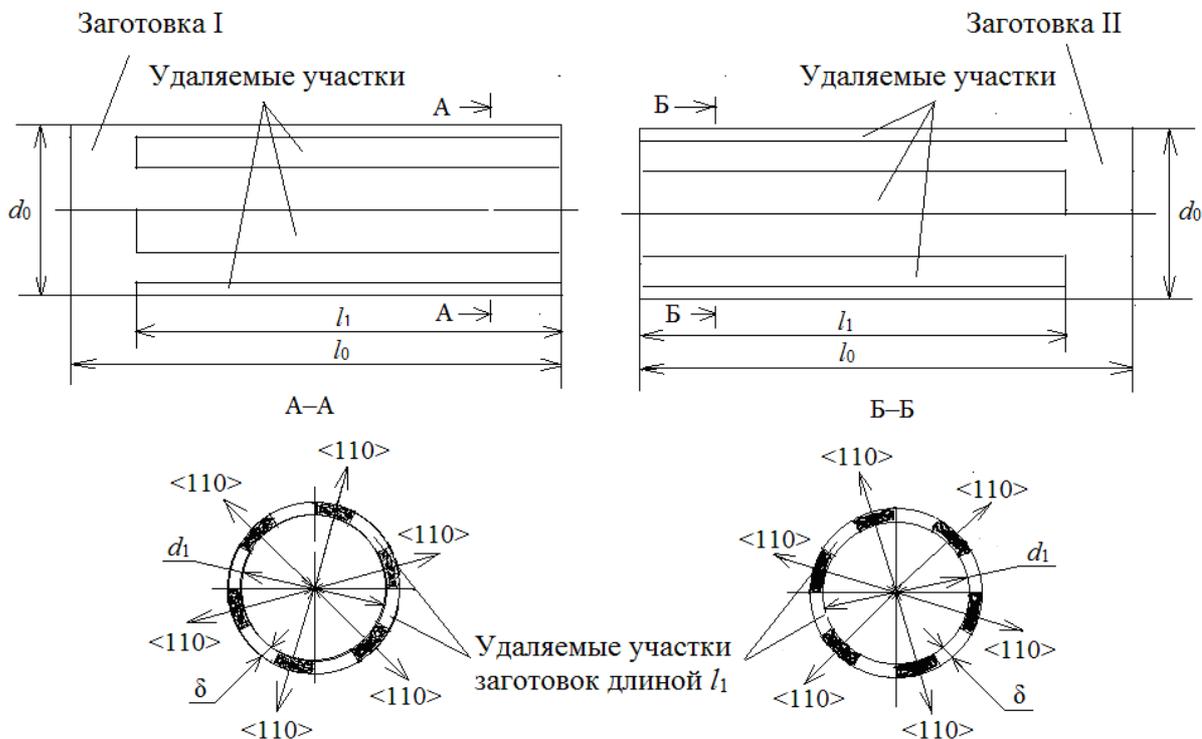


Рис. 10. – Вид и геометрия заготовок для изготовления монокристаллического катода после механической обработки и вырезки участков с непрофильной ориентацией поверхности

В рассматриваемом случае был использован монокристалл вольфрама, продольная ось которого совпадала с кристаллографическим направлением $\langle 111 \rangle$. В соответствии со стереографией, у такого слитка на боковой поверхности имеется шесть зон, ориентация которых совпадает с кристаллографической плоскостью (110) . Они располагаются симметрично относительно друг друга с интервалом в 60° . У полученных заготовок с толщиной стенки $\delta = d_0 - d_1$ электроискровой резкой по предварительной разметке удаляются участки с промежуточной кристаллографической ориентацией. Ширина удаляемых участков определяется по соотношению $\pi d_0 / 12$. После этого заготовки сопрягаются по схеме, представленной на рисунке 11. Предварительно в технологическом участке одной из заготовок выполняется отверстие диаметром d_b для вакуумирования внутреннего объема собранных под сварку заготовок. У такой заготовки получается 12 стыков сопряженных участков, кристаллографическая ориентация которых однородна. В данном случае она совпадает с кристаллографической плоскостью (110) . Таким образом, получается заготовка с практически однородной, монокристаллической кристаллографией поверхности. Сварку стыков осуществляют электронным лучом в вакууме (рис. 12). Технология ЭЛС монокристаллов достаточно полно и подробно рассмотрена в работах [3, 4].

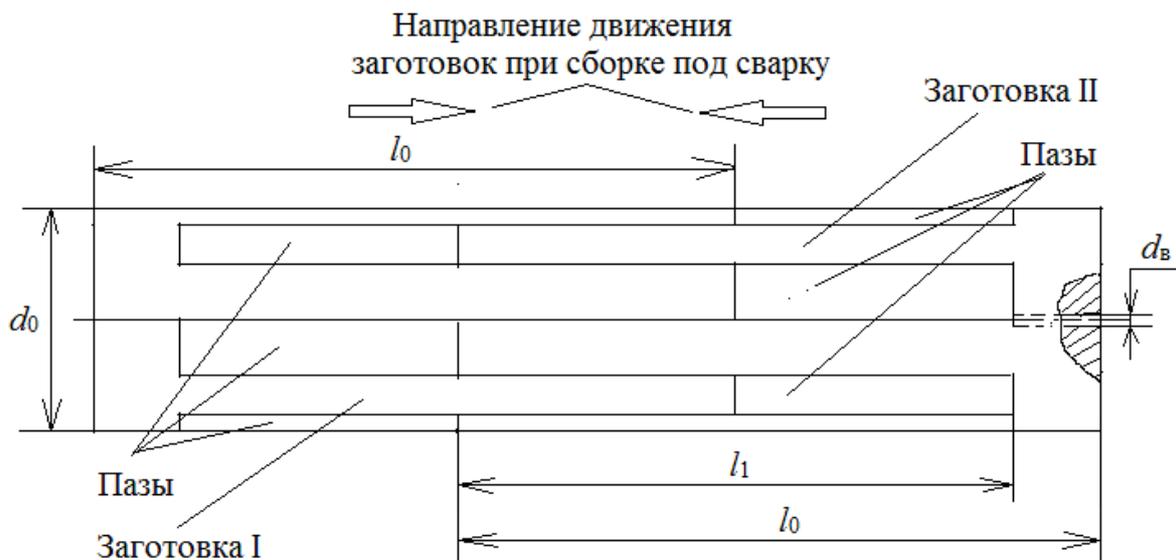


Рис. 11. – Сборки заготовок под сварку; d_0 — технологическое отверстие для вакуумирования внутренней полости заготовок при сварке

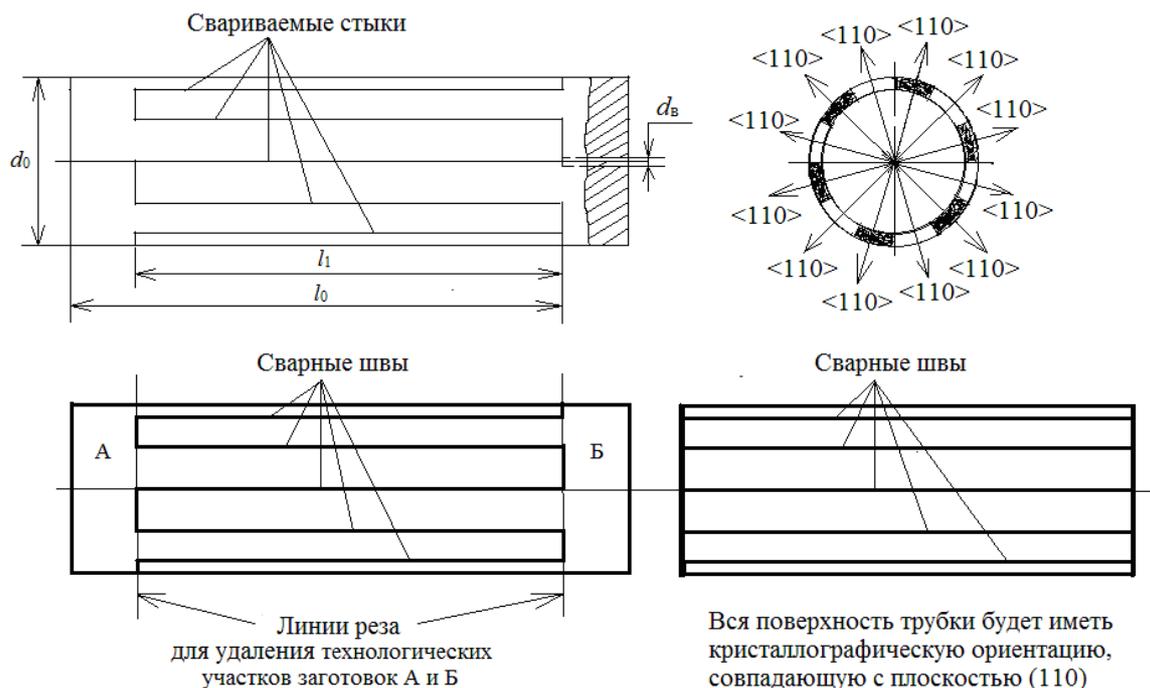


Рис. 12. – Электронно-лучевая сварка стыков и окончательная вырезка монокристаллического катода

Проведенные исследования показали, что при ЭЛС монокристаллов вольфрама обеспечиваются условия для эпитаксиальной кристаллизации металла шва, в результате чего его кристаллография соответствует кристаллографии свариваемых монокристаллов. После сварки стыков электроискровой резкой от заготовки отделяют технологические участки, получая, таким образом, полу моногранную трубку, которая также может быть использована для изготовления катода термоэмиссионного преобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лякишев, Н.П. и др.* Металлические монокристаллы [Текст] / Н.П. Лякишев, Г.С. Бурханов. – М.: ЭЛИЗ, 2002. – 312 с.
2. *Новокрещенов, В.В. и др.* Формирование структуры металла шва при электронно-лучевой сварке монокристаллов вольфрама [Текст] / В.В. Новокрещенов, Р.В. Родякина. // Вестник МЭИ. – 2013. – №4. – С. 19–24.
3. *Новокрещенов, В.В. и др.* Структура и механические свойства сварных соединений монокристаллов вольфрама, выполненных электронно-лучевой сваркой [Текст] / В.В. Новокрещенов, Р.В. Родякина. // Вестник МЭИ. – 2013. – №5. – С. 16–22.
4. *Ластовирия, В.Н. и др.* Формирование субструктуры и кристаллографии сварных соединений монокристаллов вольфрама [Текст] / В.Н. Ластовирия, В.В. Новокрещенов, Р.В. Родякина // Сварочное производство. – 2015. – № 3. – С. 20–25.

REFERENCES

- [1] Lyakishev N.P., Burханov G.S. Metallicheskie monokristally [Metal monocrystals]. M. Pub. ELIZ [E- Pub], 2002, ISBN 5-901179-04-8, 312 p. (in Russian)
- [2] Novokreshhenov V.V., Rodyakina R.V. Formirovanie struktury metalla shva pri elektronno-luchevoj svarke monokristallov volframa [Formation of structure of metal of a seam at electron beam welding of monocrystals of tungsten]. Vestnik MEI [Bulletin of the Moscow power institute], 2013, №4, ISSN 19936982, p. 19–24. (in Russian)
- [3] Novokreshhenov V.V., Rodyakina R.V. Struktura i mexanicheskie svojstva svarnyx soedinenij monokristallov volframa, vypolnennyx elektronno-luchevoj svarkoj [Structure and mechanical properties of welded connections of the monocrystals of tungsten executed by electron beam welding]. Vestnik MEI [Bulletin of the Moscow power institute], 2013, №5, ISSN 19936982, p. 16–22. (in Russian)
- [4] Novokreshhenov V.V., Rodyakina R.V. Formirovanie substrukturny i kristallografii svarnyx soedinenij monokristallov volframa [Formation of a substructure and crystallography of welded connections of monocrystals of tungsten]. Svarochnoe proizvodstvo [welding fabrication], 2015, №3, ISSN 0491-6441, p. 20–25. (in Russian)

Use of Electron Beam Welding for Creation of Thermoissue Converters (TEC) from Tungsten Monocrystals**V.N. Lastovirya*¹, V.V. Novokreshhenov**², R.V. Rodyakina**³**

* *Moscow state industrial university,
16 Avtozavodskaya, Moscow, Russia 115280*

** *National research university "MPEI",
14 Krasnoznamennaya St., Moscow Russia 111250*

¹*e-mail: lvn3@mail.msiu.ru; ²e-mail: novik161041@mail.ru*

³*email: reginarodyakina@mail.ru*

Abstract – In article two various technologies of receiving a mono-faced hollow tube of the demanded sizes are considered. One of them is based on production of two semi-cylinders with the set crystallographic orientation of a work face, and the second is on the focused interface of two previously made hollow preparations. The results received in work testify that the considered technologies allow to receive mono-faced hollow tubes which can be used for production TECs.

Keywords: monocrystal, electron beam welding (EBW), mono-faced hollow tube, crystallographic orientation, substructure, orientation corners.