

**УДК 62-982**

## **ТУГОПЛАВКИЕ НАГРЕВАТЕЛИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ**

Валерий Николаевич Масловский

*Магистр 2 года,*

*кафедра МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении»*

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

*Научный руководитель: К. М. Мусеев*

*кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении»*

Развитие инновационной техники выдвигает требования к материалам, способным работать в условиях высоких температур (от 700 до 1500°С [1]), при которых традиционные сплавы (АД31, 20Х13, У10, 15Х11МФ) применяться не могут [2]. Для таких задач применяют тугоплавкие материалы. Например, вольфрам применяется в качестве материала для производства нагревателей высокотемпературных водородных и вакуумных печей. Нагреватели из вольфрама способны работать при температурах до 3000°С, обладают жаропрочностью и жаростойкостью. Высокотемпературные вакуумные печи широко применяются в производстве изделий из технической керамики и нанопорошков оксида циркония [3,4]. Вольфрамовые тигли применяются для выращивания прозрачных сапфировых стекол аэрокосмической промышленности [5].

Вольфрамовые нагреватели применяются в производстве ячейки с алмазными наковальнями [6]. Конструкция ячейки предполагает наличие двух алмазов конической формы, передающих сжимающее усилие на рабочие площадки диаметром менее 1 мм. Важным фактором для выращивания алмазов [7] является наличие атомарного водорода в процессе. Один из методов получения атомарного водорода – термическая диссоциация [8]. Тугоплавкие нагревательные элементы для таких задач обычно изготавливаются из рения высокой чистоты (99,97 %) в форме прямой проволоки (диаметром от 0.127 до 1.016 мм) или плоского листа (толщиной от 0.025 до 1.016 мм).

Вольфрамовые тигли применяются для испарения различных материалов, в том числе непроводящих электрических ток ( $Al_2O_3$ ) и получения тонких пленок различной конфигурации [9,10]. В работе [11] представлен обзор конструкций высокотемпературных вакуумных печей с нагревательными элементами из вольфрама технической чистоты. Диапазон применения температур  $W$  нагревателей составляет от 1200 до 2500°С. Вольфрамовые нагреватели используются при создании печей, работающих в вакууме  $10^{-2}$ - $10^{-7}$  Па с размерами рабочего пространства от 0,1 до 1000 дм<sup>3</sup>. В работе [12] рассматривается конструкция малогабаритной высокотемпературной вакуумной печи, нагревательным элементом которой является толстая вольфрамовая спираль.

Печь с нагревателем в виде вольфрамовой проволоки применяется в рентгеновском дифракционном спектрометре для изучения фазовых переходов и равновесных процессов при высоких температурах [13]. В работе [14] вольфрамовый нагреватель используется для задачи электротермического испарения материалов с последующим определением редкоземельных металлов в составе методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. В работе [15] для изучения тугоплавких материалов методами спектроскопии применяются плоские вольфрамовые нагреватели. Толщина вольфрама составляет 0,127 мм.

Известны методы соединения тугоплавких деталей с токопроводами: с помощью клепки, с помощью клиньев, сваркой, свободной навеской. В качестве перспективного метода соединения нагревателей и токопроводов предлагается к рассмотрению метод ЭЛС. В сравнении с другими методами сварки электронный пучок обладает следующими преимуществами: низкая зона термического воздействия, контролируемость процесса переноса тепла в заготовку (легкое управление электронным пучком), минимизация остаточных газов и, следовательно, дефектов внутри шва. Предполагается, что данный метод сможет расширить область применения вольфрамовых нагревателей в сторону больших рабочих температур, нагрузок и т. д.

### Литература

1. Arata Y., Terai K., Matsuda S. Study on Characteristics of Weld Defect and Its Prevention in Electron Beam Welding // Transactions of JWRI., 1973. Vol. 2, № 1. P. 103–112.
2. Оспенникова О.Г., Подъячев В.Н., Столянков Ю.В. Тугоплавкие сплавы для новой техники // Труды ВИАМ. 2016. № 10 (46). P. 53–62.
3. Кийко В.С., Вайспапир В.Я. Технологические особенности получения и свойства керамических изделий из смеси низко- и высокообоженного порошков BeO.
4. Мармер Э.Н. Вакуумное спекание керамики из нанопорошков оксида циркония // Альтернативная энергетика и экология. 2007. P. 41–43.
5. Wu M. et al. Effects of crucible cover on heat transfer during sapphire crystal growth by heat exchanger method // Journal of Crystal Growth. North-Holland, 2014. Vol. 404. P. 130–135.
6. Yan J. et al. A tungsten external heater for BX90 diamond anvil cells with a range up to 1700 K // AIP Publishing LLC AIP Publishing, 2021. Vol. 92, № 1. P. 013903.
7. Jansen F., Chen I., MacHonkin M.A. On the thermal dissociation of hydrogen // Journal of Applied Physics. American Institute of Physics AIP, 1998. Vol. 66, № 12. P. 5749.
8. Moore G.E., Unterwald F.C. Thermal Dissociation of Hydrogen // The Journal of Chemical Physics. American Institute of Physics AIP, 2004. Vol. 40, № 9. P. 2639.
9. Reichelt K., Jiang X. The preparation of thin films by physical vapour deposition methods // Thin Solid Films. Elsevier, 1990. Vol. 191, № 1. P. 91–126.
10. Панфилов Ю. Нанесение тонких пленок в вакууме // Технологии в электронной промышленности, 2007. № 3. P. 76–80.
11. Мармер Э.Н. Высокотемпературные вакуумные технологии и электропечи для термообработки и спекания // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2009. P. 22–75.
12. Zagulyaev D. et al. A Small High-Temperature High-Vacuum Furnace // Journal of Scientific Instruments. IOP Publishing, 1950. Vol. 27, № 10. P. 280.
13. McKeand I.J., Hursh R.K. A Tungsten Coil Furnace for High-Temperature X-Ray Diffraction Investigations // Journal of the American Ceramic Society. John Wiley & Sons, Ltd, 1955. Vol. 38, № 2. P. 63–65.
14. Shibata N., Fudagawa N., Kubota M. Electrothermal vaporization using a tungsten furnace for the determination of rare-earth elements by inductively coupled plasma mass spectrometry // Analytical Chemistry. American Chemical Society, 2002. Vol. 63, № 6. P. 636–640.
15. Bacon J.F., Veltri R.D., Whittier J.Y. High Temperature Vacuum Furnace with Metallic Sheet Resistance Elements // Review of Scientific Instruments. American Institute of Physics AIP, 2004. Vol. 34, № 11. P. 1200.