

## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

### ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY IN MEASURING THE ELECTRON BEAM DIAMETER

*В.Н.Масловский, (ORCID: 0000-0003-0725-986X), К.М.Моисеев, (ORCID: 0000-0002-8753-7737) / maslovskiyv.n.nano@ya.ru*

**V.N.Maslovsky, K.M.Moiseev**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

*Метод электронно-лучевой сварки (ЭЛС) является перспективным для соединения тугоплавких нагревательных элементов вакуумной техники. Недостатками метода являются сложность наладки оборудования и малая воспроизводимость процесса. Для повышения воспроизводимости необходимо регулярно проводить контроль параметров электронного пучка, в частности, его диаметра. В данной работе проведена оценка неопределенности измерения диаметра электронного луча. Для этого была оценена неопределенность входных факторов: время импульса зондового тока, время оборота двигателя, межосевое расстояние между осью двигателя и электронным лучом, диаметр вольфрамовой проволоки. Показано, что наибольший вклад в суммарную неопределенность измеряемой величины вносит измерение межосевого расстояния.*

*Ключевые слова: электронный луч, диаметр электронного пучка, метод вращающегося зонда, неопределенность измерений.*

*The method of electron beam welding (EBW) is promising for joining refractory heating elements in vacuum technology. The disadvantages of the method are the complexity of setting up the equipment and the low reproducibility of the process. To improve reproducibility, it is necessary to track regularly the parameters of the electron beam, in particular, its diameter. In this paper, the uncertainty in measuring the electron beam diameter is estimated. To do this, the uncertainty of the input factors was estimated: the probe current pulse time, the motor rotation time, the center distance between the motor axis and the electron beam, and the diameter of the tungsten wire. It is shown that the greatest contribution to the total uncertainty of the measured quantity is made by the measurement of the interaxial distance.*

*Keywords electron beam, diameter of electron beam, rotating probe method, uncertainty in measuring.*

## ВВЕДЕНИЕ

Тугоплавкие металлы при повышенных температурах, характерных для сварки плавлением, активно взаимодействуют с атмосферными газами и другими окислителями, являющимися примесями внедрения, которые резко ухудшают пластические свойства, деформируемость в холодном и горячем состояниях, обрабатываемость резанием и особенно свариваемость. Поэтому сварку тугоплавких металлов осуществляют в вакууме или контролируемой атмосфере, а также с применением геттерной защиты [1].

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 [2,3].

Мощность электронного пучка  $q=UI$ , Вт. При заданном рабочем расстоянии  $l$ , токе фокусировки  $I_\phi$  и мощности сварки можно определить диаметр электронного луча  $d$  и, следовательно, удельную мощность  $q_2$ , Вт/см<sup>2</sup>, которая является одним из определяющих параметров процесса:

$$q_2 = \frac{UI}{\pi d^2/4}$$

Ограничения метода ЭЛС: сложная наладка оборудования, которая обусловлена малой воспроизводимостью процесса. Воспроизводимость процесса можно повысить путем контроля параметров электронного пучка.

Наиболее существенным и одновременно наиболее трудноопределяемым параметром электронного луча является его диаметр. Существует много различных способов экспериментального определения диаметра электронного луча. Наиболее простым является метод вращающегося зонда [4,5].

Целью этой работы является оценка неопределенности измерения диаметра электронного луча методом вращающегося зонда.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Проведение измерения

Измерения проводились на установке электронно-лучевой размерной обработки «ЛУЧ», оснащенной электронно-лучевой пушкой ЭЛТА60.15-ДП [6,7]. Схема метода измерения представлена на рис.Рис. 2.

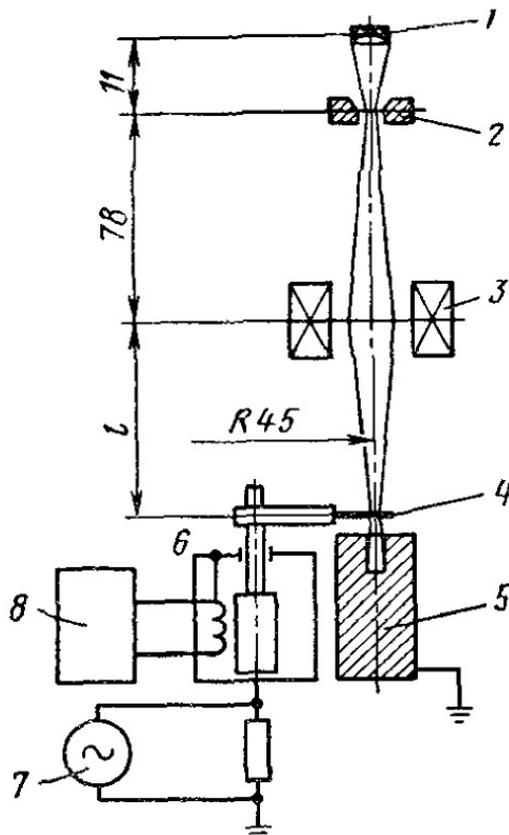


Рис. 2. Схема измерения методом вращающегося зонда. 1 – катод, 2 – анод, 3 – фокусирующая система, 4 – вращающийся зонд, 5 – коллектор, 6 – электродвигатель, 7 – осциллограф, 8 – источник питания электродвигателя.

Вольфрамовая проволока 4 диаметром 0,1 мм и длиной от 5 до 7 мм вращается с частотой 33 об/с. Электронный пучок фокусируется на плоскость вращающегося зонда. При прохождении зонда через пучок осциллографом 7 регистрируется ток пучка. О длительности импульса тока можно судить о значении диаметра пучка.

Для снижения влияния вторичных электронов на показания осциллографа за зондом на расстоянии от 2 до 3 мм устанавливается медный коллектор 5 с отверстием.

Диаметр электронного пучка определяется по формуле (1).

$$d = \frac{2\pi r \cdot \tau}{T} - \delta, \tag{1}$$

где  $r$  – расстояние от оси вращения зонда до оси пучка;  $\tau$  и  $T$  – соответственно длительность импульса зондового тока и период вращения зонда,  $\delta$  – диаметр зонда.

В качестве средства измерения используется Осциллограф Owon SDS1022 с диапазоном частот 20 МГц, калиброванный по ГОСТ Р 8.964-2019. Осциллографом измеряют падение напряжения на резисторе и по закону Ома определяется ток на данном участке цепи.

Для исследования неопределенности измерения диаметра электронного луча взята выборка из 5 значений входных параметров. Значения параметров представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Измеренные значения входных параметров

№	$\tau$ , мкс	$T$ , мс	$r$ , мм	$\delta$ , мм
1	117,33	30,00	45,1	0,10
2	120,10	30,01	45,0	0,11
3	117,54	30,00	45,0	0,10
4	116,89	29,98	45,0	0,10
5	115,72	29,99	45,1	0,11

Для значений, приведенных в таблице 2, получены следующие средние значения входных параметров:

$$\bar{\tau} = 117,516 \cdot 10^{-3} \text{ мс}$$

$$\bar{T} = 29,996 \text{ мс}$$

$$\bar{r} = 45,04 \text{ мм}$$

$$\bar{\delta} = 0,104 \text{ мм}$$

Результат измерения диаметра электронного пучка составляет:

$$\bar{d} = 2\pi \bar{r} \frac{\bar{\tau}}{\bar{T}} = 2\pi \cdot 45,04 \cdot \frac{117,516 \cdot 10^{-3}}{29,996} - 0,104 = 1,00413 \text{ мм.}$$

#### **Анализ факторов, определяющих формирование неопределенности измерения**

Для анализа факторов, определяющих формирование неопределенности измерения диаметра электронного луча, построена диаграмма Исикавы (рис. Рис. 3), на которой приведены все факторы, влияющие как на прямые, так и на косвенные измерения, проводимые в рамках данной исследовательской работы.

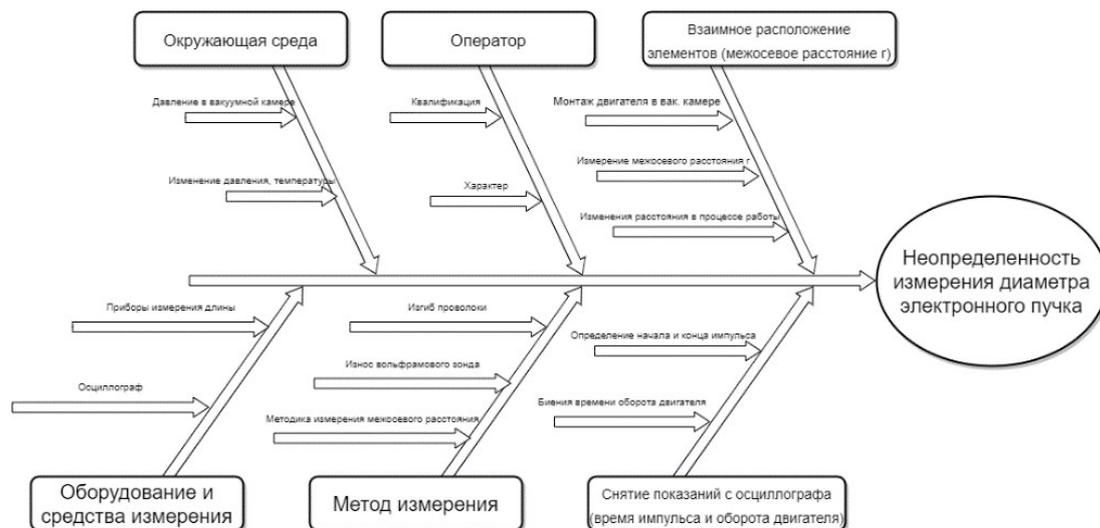


Рис. 3. Диаграмма Исикавы для анализа факторов, определяющих формирование неопределенности измерения диаметра электронного пучка.

### Оценка неопределенности входных величин

Значения времени импульса тока измеряются цифровым осциллографом SDS1022. Граница неисключенной систематической погрешности  $\theta_1$  для данного осциллографа в диапазоне времени порядка сотни микросекунд (мкс) составляет 1 мкс.

Расчеты осуществлялись по методике, представленной в работе [8].

Неопределенность типа А измерений времени импульса:

$$u_{\tau A} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2} = \sqrt{\frac{1}{5 \cdot (5-1)} \sum_{i=1}^5 (\tau_i - 117,516 \cdot 10^{-3})^2}$$

$$= 0,719 \cdot 10^{-3} \text{ мс}$$

Неопределенность типа В измерений времени импульса:

$$u_{\tau B} = \frac{\theta_1}{\sqrt{3}} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ мс}}{\sqrt{3}} = 0,58 \cdot 10^{-3} \text{ мс}$$

Суммарная неопределенность измерения времени импульса:

$$u_{\tau C} = \sqrt{u_{\tau A}^2 + u_{\tau B}^2} = \sqrt{(0,719 \cdot 10^{-3})^2 + (0,58 \cdot 10^{-3})^2} = 9,238 \cdot 10^{-3} \text{ мс}$$

Аналогичным образом вычисляются значения неопределенностей времени оборота двигателя, межосевого расстояния и толщины вольфрамовой проволоки. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

### Оценка неопределенности диаметра электронного пучка

Для определения коэффициента чувствительности входных величин берутся частные производные уравнения диаметра электронного луча по входным величинам.

Далее по формуле (2) вычисляется суммарная стандартная неопределенность.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (2)$$

Суммарная стандартная неопределенность получилась равной 0,0870 мм

Для подсчета расширенной неопределенности косвенного измерения диаметра электронного луча определяется эффективное число степеней свободы ( $\nu_{eff} = 1107327,138$ ) и коэффициент охвата ( $k = 2$ ). Тогда расширенная неопределенность косвенного измерения удельной скорости осаждения равна:

$$U_{dc} = k \cdot u_{dc} = 2 \cdot 0,0870 = 0,174 \text{ мм} \quad (3)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты удобно представить в виде бюджета неопределенности, который включает в себя список всех входящих величин, их оценок и приписанных им стандартных неопределенностей измерения и коэффициентов чувствительности (таблице 3).

Таблица 3.

Бюджет неопределенности

Входная величина	Время импульса, мс	Период оборота, мс	Межосевое рас-ие, мм	Диаметр проволоки, мм
Оценка входной величины	$\bar{\tau} = 117,516 \cdot 10^{-3}$	$\bar{T} = 29,996$	$\bar{r} = 45,04$	$\bar{\delta} = 0,104$
Стандартная неопределенность	$u_{\tau A} = 0,719 \cdot 10^{-3}$	$u_{TA} = 5,099 \cdot 10^{-3}$	$u_{rA} = 0,024$	$u_{\delta A} = 2,449 \cdot 10^{-3}$
Систематическая погрешность	$u_{\tau B} = 0,58 \cdot 10^{-3}$	$u_{TB} = 0,58 \cdot 10^{-3}$	$u_{rB} = 0,0289$	$u_{\delta B} = 2,887 \cdot 10^{-3}$
Тип оценивания, закон распределения	А и В	А и В	А и В	А и В
Коэффициент чувствительности	$\left. \frac{\partial d}{\partial \tau} \right _{T=\bar{T}, \delta=\bar{\delta}, r=\bar{r}, \tau=\bar{\tau}} = 8,545 \frac{\text{мм}}{\text{мс}}$	$\left. \frac{\partial d}{\partial T} \right _{T=\bar{T}, \delta=\bar{\delta}, r=\bar{r}, \tau=\bar{\tau}} = 0,0335 \frac{\text{мм}}{\text{мс}}$	$\left. \frac{\partial d}{\partial r} \right _{T=\bar{T}, \delta=\bar{\delta}, r=\bar{r}, \tau=\bar{\tau}} = 0,0223$	$\left. \frac{\partial d}{\partial \delta} \right _{T=\bar{T}, \delta=\bar{\delta}, r=\bar{r}, \tau=\bar{\tau}} = 9,655$
Вклад в суммарную стандартную неопределенность	0,078939	0,00172	0,000845	0,036554

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наибольший вклад в суммарную неопределенность измеряемой величины вносит измерение межосевого расстояния. Одинаково значимы для неопределенности измерения межосевого расстояния являются составляющие типа А и В. Относительно большая итоговая неопределенность измерения диаметра электронного пучка обусловлена также большим количеством прямых измерений, входящий в уравнение измерения.

## ВЫВОДЫ

Результат измерения диаметра электронного луча с учетом неопределенности измерения:  $1,004 \pm 0,174$  мм. Значение расширенной неопределенности меньше измеряемой величины на один порядок, что говорит о средней точности измерений, следовательно, метод вращающегося зонда применим только для предварительной оценки диаметра электронного луча.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абитов А.Р. et al. Способ электронно-лучевой сварки тонкостенных труб из молибденовых сплавов. 2018.
2. Tabernig B., Reheis N. Joining of Refractory Metals and its Application.

3. Новокрещенов В.В., Родякина Р.В. Формирование структуры металла шва при электронно-лучевой сварке монокристаллов вольфрама // Вестник МЭИ, 2013. № 4. Р. 19–24.

4. Зуев И.В., Углов А.А. Об измерении диаметра электронного луча методом вращающегося зонда // Физика и химия обработки материалов. 1967. Vol. 5. Р. 110–112.

5. Назаренко О.К., Локшин В.Е., Акопьянц К.С. Измерение параметров мощных электронных пучков методом вращающегося зонда // Электронная обработка материалов. 1970. № 1. Р. 87–90.

6. Электронно-лучевое сварочное оборудование, технология электронно-лучевой сварки [Electronic resource]. URL: <https://tekarte.ru/> (accessed: 30.12.2020).

7. Zhuo Y. et al. Possibilities of the Electron-Beam Machine «LUCH» for Dimensional Microprocessing of Glass and Ceramic Materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 781, № 1. Р. 012014.

8. Захаров И.П., Кукуш В.Д. Теория неопределенности в измерениях // Харьков: Консум. 2002. Vol. 256.