

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП НА УСТАНОВКЕ ЭЛО «ЛУЧ»**

Я. Чжо, К. А. Махкамбоев, В. Н. Масловский, К. М. Моисеев

## **АННОТАЦИЯ**

Для электронно-лучевой размерной обработки необходимо знать фактическое значение диаметра электронного пучка. Однако точное его значение можно определить только экспериментальным путем. В статье реализован модернизированный метод вращающегося зонда, в котором вращающаяся проволока заменена на неподвижную вольфрамовую пластину, а вместо вращения использовано сканирование электронного пучка по прямой линии. В результате получены значения диаметра электронного пучка электронно-лучевой пушки ЭЛТА-60.15ДП на установке электронно-лучевой обработки «ЛУЧ» в диапазоне тока пучка от 1 до 20 мА.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ПУШКА, ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА, ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК, МЕТОД ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЗОНДА, НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

## **ELECTRON BEAM DIAMETER INVESTIGATION OF THE E-BEAM GUN AT THE E-BEAM TREATMENT MACHINE «LUCH»**

Y. Zhuo, K. A. Makhkamboev, V.N. Maslovsky, K. M. Moiseev

## **KEYWORDS**

ELECTRON-BEAM GUN, ELECTRON-BEAM TREATMENT, ELECTRON BEAM, ROTATING PROBE METHOD, MEASUREMENT UNCERTAINTY

For electron-beam sizing it is necessary to know the actual value of the electron beam diameter. However, its exact value can only be determined experimentally. In this article, an upgraded rotating probe method is implemented, in which the rotating wire is replaced by a stationary tungsten plate, and instead of rotation, scanning of the electron beam in a straight line is used. As a result, the values of the electron beam diameter of the ELTA-60.15DP electron-beam gun at the "LUCH" electron-beam treatment facility in the beam current range from 1 to 20 mA were obtained.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Электронно-лучевая обработка (ЭЛО) становится все более популярной технологией для получения высококачественных изделий электронной, космической, атомной, автомобильной промышленности. Технологическим инструментом ЭЛО является электронный пучок (ЭП), формируемый электронно-лучевой пушкой (ЭЛП). Параметры ЭЛ, такие как ускоряющее напряжение, ток пучка, распределение плотности энергии по сечению, определяют технологические возможности и качество ЭЛО. Однако настройка диаметра электронного пучка, который также влияет на плотность мощности и тип обработки, как правило, происходит вручную, что приводит к недостаточной точности и воспроизводимости процесса обработки. В связи с этим, контроль параметров электронного пучка является критически важным для обеспечения высокого качества изделий при ЭЛО [1, 2].

Одним из наиболее простых способов определения диаметра электронного пучка является метод вращающегося зонда [4, 5]. Сущность метода состоит в том, что тонкий вращающийся зонд пересекая электронный пучок перпендикулярно его оси, отбирает на себя часть тока. По кривой зондового тока можно судить о диаметре луча. В качестве зонда используется вольфрамовая проволока диаметром 0,1 мм и длиной от 5 до 7 мм, которая крепится к металлическому стержню, приводимому в движение электродвигателем. В работе [3] рассчитана неопределенность измерений диаметра электронного пучка методом вращающегося зонда. Выявлено, что наибольший вклад в неопределенность измерения вносит измерение межосевого расстояния между осью вращения двигателя и осью электронного пучка.

Для электронно-лучевых пушек с автоматическим управлением отклонения пучка возможно модернизировать предложенный выше метод измерения параметров пучка. Вместо вращающегося зонда возможно использовать неподвижную вольфрамовую пластину в сочетании со сканированием ЭП по прямой линии с заданной частотой. Изменение тока при прохождении пучка через зонд предлагается измерять с помощью осциллографа.

Цель работы – диагностика параметров электронного пучка модернизированным методом вращающегося зонда.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Проведение измерения

Схема проведения эксперимента показана на рисунке 3. Для экранирования зонда от действия вторичных электронов электронный луч на расстоянии от 2 до 3 мм от плоскости оптимальной фокусировки (плоскость зонда) улавливается отверстием в медном коллекторе (глубина отверстия 10 мм, ширина 3 мм и длина от 5 до 7 мм), следовательно, погрешность измерения диаметра зонда вследствие влияния вторичной электронной эмиссии на ток зонда несущественна.

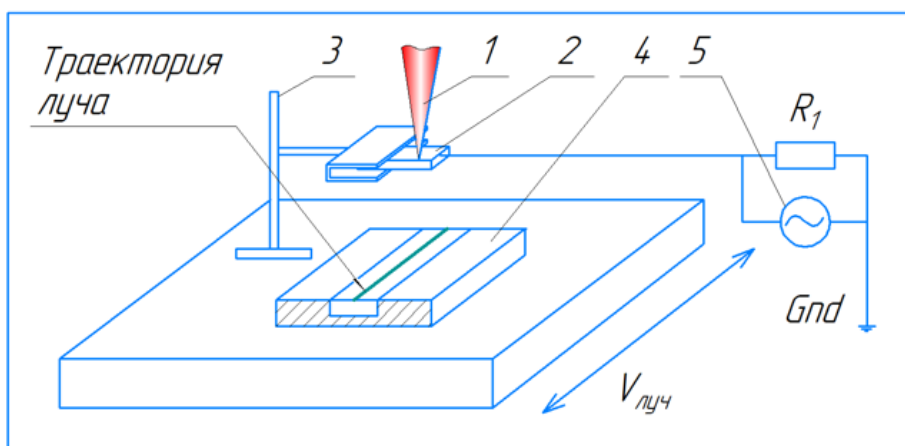


Рисунок 3 – Схема метода после модификации

1–электронный пучок; 2 – зонд (вольфрамовая пластинка); 3 – штатив; 4 – коллектор; 5 – осциллограф.

На рисунке 4, а показан вид сверху прохождения пучка по вольфрамовой пластине. Для вывода формулы диаметра пучка исходя из литературы на рисунке 4, б показан характерный график распределения напряжения (падение напряжения на резисторе) от времени.

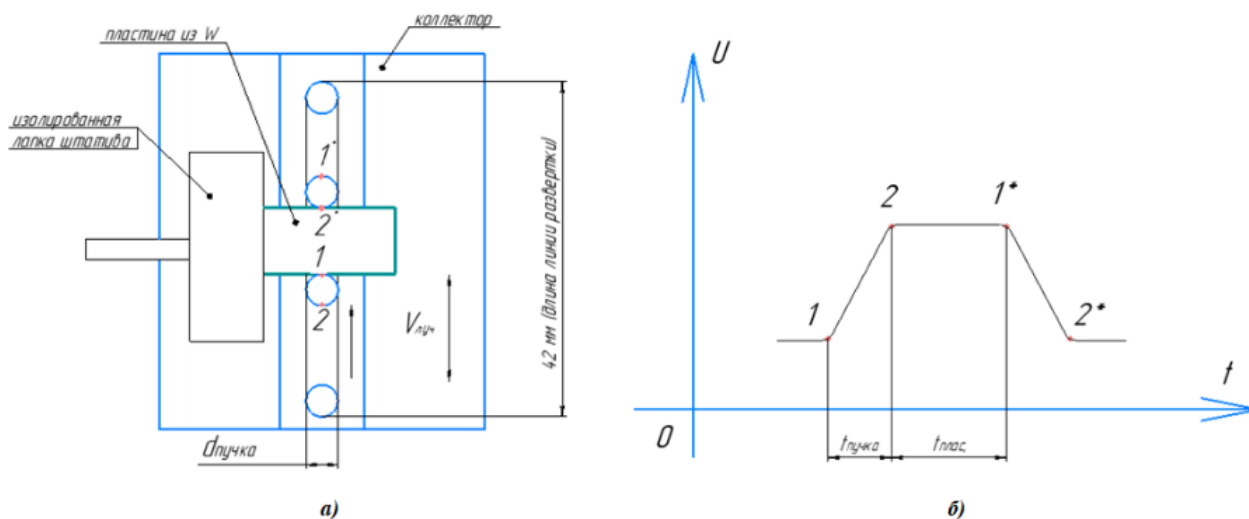


Рисунок 4 – Измерение диаметра пучка

*a* – процесс измерения; *b* – показание осциллографа;  $t_{\text{пучка}}$  – отрезок времени, за который точка 2 перемещается на величину равную диаметру пучка;

Зная частоту развертки и величину перемещения луча (длина линии развертки) ( $S$ ), определяется скорость луча.

$$V_{\text{пучка}} = 2 \cdot S \cdot n \quad (1)$$

где  $V_{\text{пучка}}$  – скорость пучка,  $S$  – траектория пучка (развертка),  $n = 20 \dots 1200$  частота развертки, Гц

После проведение эксперимента определяется время зондового тока  $t_{\text{пучка}}$ , по показаниям осциллографа.

$$d_{\text{пучка}} = V_{\text{луч}} \cdot t_{\text{пучка}} \quad (2)$$

где  $d_{\text{пучка}}$  – диаметр электронного пучка

Для закрепления зонда во время обработки требуется оснастка в виде штатива для настройки фокусного расстояния при измерении диаметра пучка. Резистор нагрузки  $R_l = 500 \text{ Ом}$ , ( $P = 1 \text{ Вт}$ ) позволяет измерять ток в пучке до 40 мА. Эксперименты проводятся на уровне выше столика на 50 мм, в дальнейшем на этом уровне проводится ЭЛЮ. Ток в пучке варьируется от 1 до 20 мА, определяется фокус для каждого тока в пучке. Длина развертки равна 42 мм. Средство измерения: осциллограф ОМЦ.20.

В таблице 1 приведены входные параметры экспериментов по определению диаметра пучка.

Таблица 1 – Результаты экспериментов по определению диаметра электронного пучка

№	Ток в пучке, мА	Ток фокусировки, мА	Частота развертки 1-го измерения, Гц	Частота развертки 2-го измерения, Гц	Диаметр пучка, мм
1	1	625	200	20	0,747
2	2	635	200	20	0,882
3	3	645	200	20	1,1844
4	4	655	200	20	1,554
5	5	659	1000	20	2,184
6	6	661	1000	20	2,814

7	7	653	1000	20	2,604
8	8	647	1000	20	2,226
9	9	644	1000	20	1,764
10	10	642	1000	20	1,428
11	11	645	1000	20	1,218
12	12	644	1000	20	1,092
13	13	644	1000	20	1,1844
14	14	646	1000	20	1,2348
15	15	647	1000	150	1,407
16	16	650	1000	150	1,512
17	17	647	1000	150	1,722
18	18	647	1000	100	1,869
19	19	647	1000	100	1,932
20	20	647	1000	200	1,974

Фокусное расстояние и длина линии развертки не изменяются,  $f = 516$  мм и  $S=42$  мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения приведены на рисунке 6.



Рисунок 6 – График зависимости диаметра пучка от тока в пучке

Наблюдается 3 этапа изменения графика диаметра электронного пучка: возрастание (от 1 до 6 мА), уменьшение (от 7 до 12 мА) и возрастание (от 13 до 20 мА). На первом этапе диаметр увеличивается, когда ток растёт до 6 мА, не наблюдается эффект пространственного заряда (расхождение пучка по поперечному сечению) первично меньше  $10^{-8}$  А/В<sup>3/2</sup> [7]. Во втором этапе диаметр уменьшается из-за явления пространственного заряда (расхождение пучка по поперечному сечению), до входа в магнитное поле, так как увеличивается площадь поперечного сечения пучка в центре магнитной линзы и магнитное поле сильнее воздействует на пучок. В третьем этапе так же, как и во втором этапе наблюдается расхождение пучка до входа в магнитное поле, но диаметр увеличивается это объясняется тем, что наблюдается эффект сферической аберрации. Из-за несовпадения фокусов для лучей электрона, проходящих на разных расстояниях от оптической оси, наблюдается эффект сферической аберрации [8]. Данный эффект приводит к увеличению диаметра электронного пучка при повышении тока на третьем этапе графика.

## ВЫВОДЫ

Для определения диаметра электронного пучка рекомендуется реализовывать на установках ЭЛО метод вращающегося зонда, поскольку данный метод прост в реализации и позволяет определить диаметр пучка в пределах от 0,25 мм до 10 мм. В результате экспериментов по определению диаметра пучка ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП установлено, что диаметра пучка варьируется от 0,75 до 2,8 мм при изменении тока в пучке в пределах от 1 мА до 20 мА.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Clogston., Н. Heffner., Focusing of an Electron Beam by Periodic Fields [Текст] // Journal of Applied Physics., 2004. С. 436-447.
2. Кайдалов, А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии / А.А. Кайдалов. – Киев: Экотехнология, 2004. – 260 с
3. В. Н. Масловский, К. М. Моисеев., Оценка неопределенности измерения диаметра электронного пучка [Текст] // XVI Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», 2022. С. 146–151.
4. В. Н. Мартынов, А. Г. Сысоев., Экспериментальные методы определения диаметра электронного пучка при электронно-лучевой сварке [Текст] // Электротехника, электромеханика. 2011.С.52-56.
5. Зуев, И.В. Об измерении диаметра электронного луча методом вращающегося зонда / И. В. Зуев, А.А. Углов // Физика и химия обработки материалов. -1967.-№ 5.-с. 110–112.
6. Назаренко О.К. Измерение параметров мощных электронных пучков методом вращающегося зонда / О.К. Назаренко, В. Е. Локшин, К.С. Акопьянц // Электронная обработка материалов. - 1970. - № 1. - с. 87–90.
7. Елизаров А. А. Физика интенсивных электронных и ионных пучков: учеб. пособие. М.: Моск. гос.ин-т электроники и математики, 2007. 40 с.
8. Хокс П., Каспер Е. Основы электронной оптики. Т. 1. М.: Мир, 1993. 551 с

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чжо Янян, аспирант, (ORCID: 0000-0003-4108-5971). МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва. e-mail: zhuoou@yandex.ru

Масловский Валерий Николаевич, магистр 2 года, (ORCID: 0000-0003-0725-986X). МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва. e-mail: maslovskiyvn.nano@yandex.ru

Махкамбоев Карим Абдурасулович, магистр 1 года, (ORCID: 0000-0002-5010-5762). МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва. e-mail: makhkamboevkarim@gmail.com

Моисеев Константин Михайлович, кандидат технических наук, доцент (ORCID: 0000-0002-8753-7737). МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва. e-mail: k.moiseev@bmstu.ru