

## ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА В ЭЛЕКТРОННОМ ЛУЧЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЧПУ

А.В. Коваленко, В.А. Хлопонин (ОАО «Национальный институт авиационных технологий»)

Рассмотрены основные методы получения распределения плотности тока по сечению электронного луча. Проведен анализ перечисленных методов с точки зрения достоверности получаемой информации и возможности их реализации в современных системах ЧПУ.

Ключевые слова: система ЧПУ, электронный луч, распределение плотности тока.

Электронно-лучевая обработка является одним из перспективных видов обработки, применяемых в различных отраслях машиностроения. С помощью электронов, разогнанных до околосветовых скоростей и сформированных в электронный луч, реализуются технологические процессы сварки, пайки, прецизионной перфорации, микроструктурирования и микрогравировки поверхности, поверхностной термической обработки [1]. Также электронный луч может использоваться для аддитивных технологий как альтернатива лазерному плавлению и спеканию [2].

Большинство основных энергетических (ускоряющее напряжение, сила тока электронного луча) и геометрических (силы токов электромагнитных линз, осуществляющих фокусировку и отклонение электронного луча) параметров электронного луча хорошо изучено, алгоритмы управления ими известны [3, 4], а современные средства получения электронного луча обеспечивают высокую стабильность данных параметров. Однако форма сечения электронного луча, равно как распределение числа электронов (плотности тока) по этому сечению, в настоящее время практически не контролируются, хотя эти факторы оказывают значительное влияние на качество обработки и повторяемость полученных результатов при проведении процессов электронно-лучевой сварки, послойного синтеза и т. п. [5].

Наиболее критичным является распределение плотности тока по сечению электронного луча (РПТ). Методы определения РПТ можно разделить на две группы: математические и эмпирические.

При математическом моделировании РПТ используются несколько видов распределения: равномерное распределение, нормальное Гауссово распределение, усеченное Гауссово распределение,  $\beta$ -распределение (рис. 1). Конкретный вид распределения и форма сечения электронного луча выбираются исходя из типа

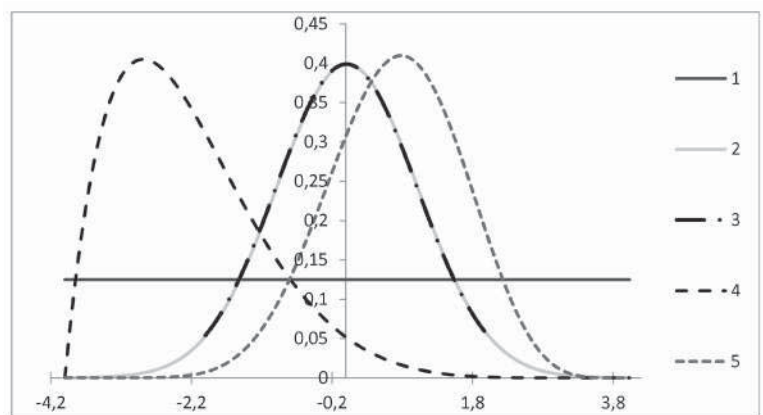


Рис. 1. Виды распределения, используемые при математическом моделировании РПТ: 1 – нормальное Гауссово распределение; 2 – равномерное распределение; 3 – усеченное Гауссово распределение; 4 –  $\beta$ -распределение  $A=2, b=7,3$ ; 5 –  $\beta$ -распределение  $A=10, b=7,3$

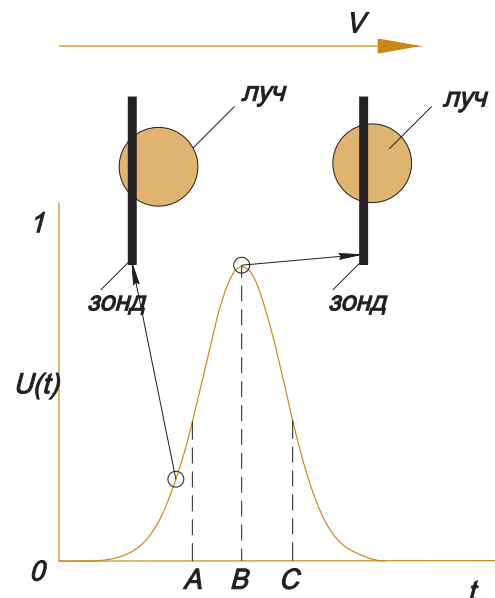


Рис. 2. Зондовый метод. Типичная форма измеренного тока во время движения проволочного зонда, где  $V$  – направление движения зонда,  $B$  – точка пиковой мощности,  $AC$  – полуширина мощности луча

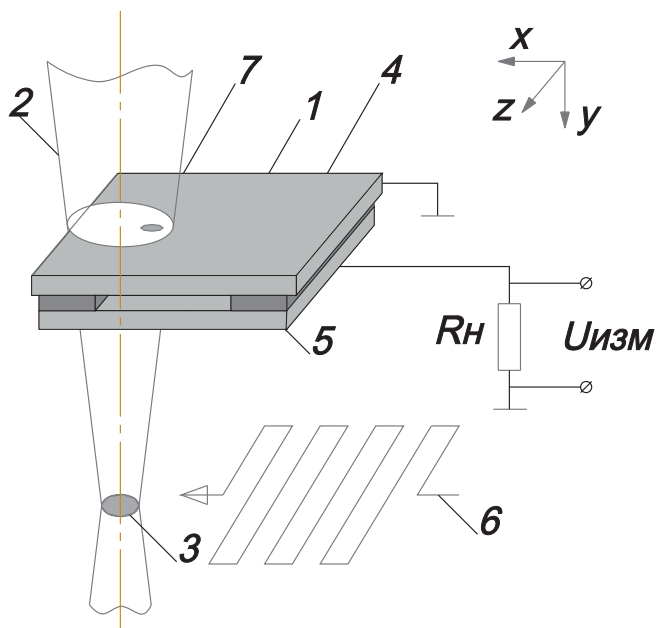


Рис. 3. Щелевой метод. Схема измерения, где 1 – коллектор; 2 – электронный луч; 3 – пятно в точке фокусировки; 4 – экран; 5 – изолятор; 6 – траектория перемещения коллектора; 7 – калиброванное отверстие;  $U_{см}$  – напряжение смещения;  $R_n$  – сопротивление нагрузки для регистрации сигнала

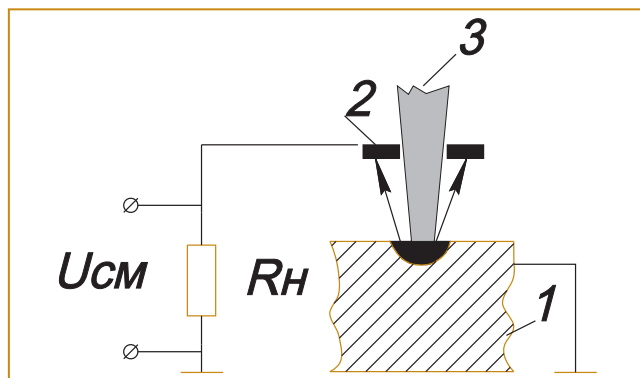
катада, применяемого на конкретной электронно-лучевой установке. Достоинством данного метода является отсутствие необходимости модернизации оборудования электронно-лучевой установки. Однако данный метод не учитывает особенности и текущее состояние катада (износ, наличие геометрических и структурных дефектов), что является серьезным недостатком метода. Таким образом, данный метод наиболее применим для моделирования в системе ЧПУ или САМ-системе.

В отличие от математического моделирования с помощью эмпирических методов определения РПТ возможен контроль реальных параметров. По способу получения информации эмпирические методы можно разделить на методы прямого и косвенного измерения.

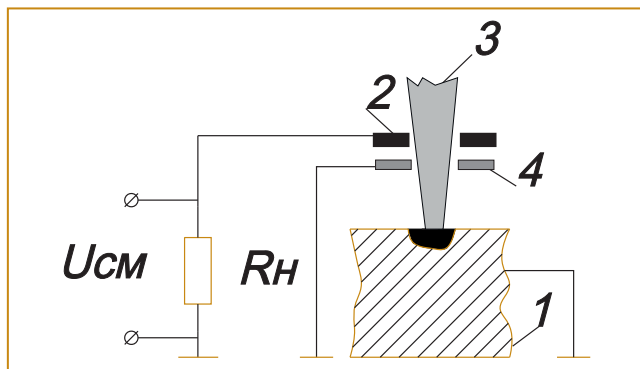
Из эмпирических методов прямого измерения следует отметить зондовый метод, сущность которого состоит в том, что тонкий зонд, выполненный из тугоплавкой проволоки (обычно вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм), пересекает электронный луч перпендикулярно его оси и отбирает на себя часть тока этого луча (рис. 2). По кривой зондового тока (зондовой характеристике) строят РПТ и вычисляют диаметр электронного луча в месте измерения. Также точные результаты получают при отклонении электронного луча на щелевую диафрагму или отверстие малого диаметра, под которым размещен цилиндр Фарадея (рис. 3). Данный метод дает точную информацию о форме сечения электронного луча, что невозможно при использовании зондового метода.

Исследователями были разработаны различные программно-аппаратные решения для изуче-

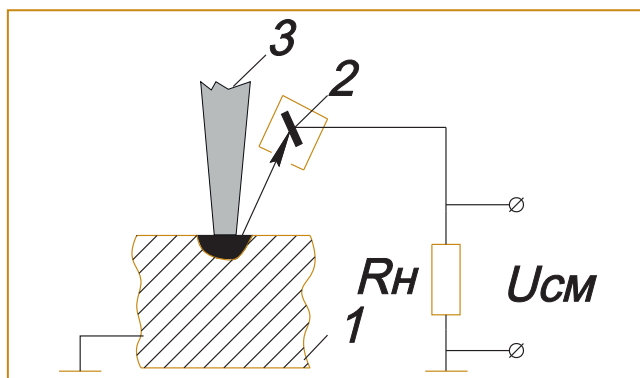
ния РПТ. Одни пошли по пути экспериментальных установок [6], но они ограничены лабораторными исследованиями, так как извлечение катада для измерений во время технологического процесса не представляется возможным. Другие создают экспериментальные стенды, которые можно установить к рабочим установкам, но текущие реализации накладывают большие ограничения на токи измере-



а)



б)



в)

Рис. 4. Метод измерения по вторичным электронам: а – с использованием кольцевого коллектора; б – с использованием коллектора закрытого типа; в – с использованием коллектора типа цилиндра Фарадея, где схематично указаны: 1 – обрабатываемое изделие; 2 – коллектор заряженных частиц; 3 – электронный луч; 4 – заземленный экранирующий электрод;  $U_{см}$  – напряжение смещения, задающее потенциал коллектора;  $R_n$  – сопротивление нагрузки для регистрации сигнала

Таблица. Сравнение методов определения РПТ

Параметр	Методы определения РПТ			
	Математические	Эмпирические		
		Косвенные	Прямого измерения	
		По вторичным электронам	Зондовый метод	Метод целевой диафрагмы
Точность	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Простота интеграции в систему ЧПУ	Высокая	Низкая	Низкая	Низкая
Обнаружение дефектов катода	Невозможно	Условно	Возможно	Возможно
Получение пространственного распределения плотности энергии в пучке	Невозможно	Возможно	Возможно	Возможно
Нахождение отклонений от осевой симметрии	Невозможно	Условно	Возможно	Возможно
Использование для проверки юстировки катодного узла	Невозможно	Условно	Возможно	Возможно
Ток измерения	Отсутствует	Малый/ Большой	Малый/ Большой	Малый
Определение формы	Невозможно	Условное	Условное	Точное

ний (30...100 мА) и возможность применения на других установках [7].

Помимо контроля РПТ, методы прямого измерения позволяют расширить возможности диагностики текущего состояния катода. Например, своевременное обнаружение трещин на поверхности катода или неравномерности распределения температуры может предупредить брак.

Методы косвенного измерения полагаются на вторично-эмиссионные явления, сопровождающие процесс взаимодействия электронного луча с металлом [8]. Для контроля ширины плотности энергии луча на поверхности обрабатываемых деталей используют рентгеновский датчик с коллимированной насадкой. Датчик ориентируют на поверхности обрабатываемых деталей, а для определения геометрических параметров электронный пучок пересекает зону обзора коллимированного датчика (рис. 4).

В таблице приведено сравнение основных характеристик перечисленных методов определения РПТ. Так как математические и эмпирические методы требуют полного или частичного доступа к интерфейсу оператора и ядру системы ЧПУ, то для внедрения реализующего их ПО требуется открытая система ЧПУ [9]. Большинство производителей систем ЧПУ полностью или частично закрывают свои системы, поэтому разработчики вынуждены создавать собственные программно-аппаратные комплексы для решения задачи взаимодействия с системой управления установкой, что часто ведет к несовместимости с другими установками даже в рамках одной системы ЧПУ.

Как видно из таблицы, математический метод пригоден для получения приближенных данных, однако реализующий его алгоритм легко встроить в систему ЧПУ. В условиях производства эмпирические методы являются предпочтительными, так как отображают действительную картину РПТ, но требуют серьезных программно-аппаратных доработок для систем управления и электроавтоматики. Также контроль изменения РПТ может использоваться для уточнения метода прогнозирования остаточного ресурса катода [4].

**Список литературы**

1. Акулич Н.В. Процессы производства черных и цветных металлов и их сплавов. Гомель. 2008.
2. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Конаев В.Н. Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 91-96.
3. Коваленко А.В., Орешкин О.М. Особенности управления технологическими процессами электронно-лучевой и лазерной обработки от системы ЧПУ // Автоматизация в промышленности. 2015. №5. С. 42-46.
4. Коваленко А.В. Автоматизация управления параметрами электронного луча (на примере триодной прямокальной электронно-лучевой пушки) // Автоматизация в промышленности. 2012. №5. С. 34-35.
5. Бочаров А.Н., Мурыгин А.В. Экспериментальное исследование геометрических параметров электронного луча // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени ак. М.Ф. Решетнева. 2005. №3. С. 191-195.
6. Щербakov А.В., Кожеченко А.С., Родякина Р.В., Гапонова Д.А., Хомутский В.А. Пространственные распределения плотности тока технологических электронных пучков // Тр. Междунар. научно-технич. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологий» (XIX Бенардосовские чтения). 2017. Т.1 «Электроэнергетика. Современные инструменты менеджмента. Гуманитарные проблемы развития общества». С. 6-9.
7. Andreev M., Kovalsky S., Kornilov S., Motorin M. and Rempе N. A device for measuring electron beam characteristics // Электронный носитель: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4974499>.
8. Щавлев В.Е. Датчик контроля фокуса луча при электронно-лучевой сварке [Текст] / Щавлев В.Е., Трушников Д.Н. // Известия Тульского государственного университета. 2015. Вып. 6, ч. 2. С. 281-290.
9. Мартинов Г.М., Мартинова Л.И. Современные тенденции в области числового программного управления станочными комплексами // СТИН. 2010. №7. С. 7-10.

*Коваленко Артем Валерьевич – канд. техн. наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской деятельности,*

*Хлопонин Вячеслав Анатольевич – инженер-программист ОАО «Национальный институт авиационных технологий» (ОАО НИАТ).*

*Контактный телефон +7 (495) 312-11-49.*

*E-mail: avk@niat.ru*