

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет  
Кафедра общей физики

Спиридонова Кристина Юрьевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изучение зависимости тока отраженных электронов от типа материала  
при обработке поверхности электронным пучком**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №23309

**Научный руководитель:**

к. ф.-м. н. Сеньков Д.В.

Оценка научного руководителя

«                      »                      2024 г.

**Преподаватель практикума**

к. ф.-м. н. Шестаков Ю.В.

Оценка преподавателя практикума

«                      »                      2024 г.

**Куратор практикума:**

к. ф.-м. н. Чуркин Д.С.

Итоговая оценка

«                      »                      2024 г.

Новосибирск – 2024

## Аннотация

С середины XX века в науке и промышленности все активнее применяются электронно-лучевые технологии, основанные на использовании ускоренного электронного пучка. Электронный луч с энергией в десятки кило электрон-вольт, воздействуя на поверхность материала, вызывает как нагрев, так и разнообразные вторичные излучения. На анализе разных типов вторичных излучений основаны электронная микроскопия, рентгеновская спектроскопия. На тепловом воздействии на материал - аддитивные технологии, электронно-лучевая сварка, термообработка поверхностей. Все основные энергетические и геометрические параметры электронного пучка могут регулироваться с высокой скоростью и быстродействием. Это позволяет вводить в металл точно дозированную энергию, реализовывать различные технологические приемы и обеспечивать высокую воспроизводимость процесса пайки, плавки, сварки, термообработки и др.

В работе изучалась зависимость типа тока отраженных электронов от типа материала. Все образцы, участвовавшие в эксперименте, относились к металлам, характеризующиеся своим атомным номером.

Ток отраженных электронов возникал при воздействии на образец электронного луча энергией в 60 кэВ.

Сигнал с датчика отраженных электронов наблюдался на цифровом осциллографе. Уже на этом этапе можно определить тип материала и изучить рельеф образца.

Итогом выполнения данной работы стало получение значения тока отраженных электронов, с помощью которого была изучена зависимость потока отраженных электронов от типа образца, то есть от его атомарного номера.

Работа была выполнена в ИЯФ СО РАН.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, ток отражённых электронов.

## Оглавление

1. Введение .....	4
2. Теоретическая часть .....	5
3. Экспериментальная часть .....	6
3.1. Принцип работы электронно-лучевой сварки .....	6
3.2. Приемник отраженных электронов .....	8
3.3. Эксперимент .....	9
3.4. Обработка результатов .....	10
4. Заключение .....	11
5. Список литературы .....	12

## 1. Введение

В данной работе изучалась зависимость потока отраженных электронов в зависимости от типа материала.

Актуальность работы состоит в том, что электронно-лучевые технологии (ЭЛТ) уже достаточно давно используются в различных направлениях науки и техники. Электронно-лучевая сварка - это наиболее перспективный способ соединения деталей из тугоплавких металлов и сплавов, когда термическая обработка нежелательна, кроме того, расплавленный металл не насыщается газами. С помощью такой технологии можно эффективно производить изделия из металлов, толщина которых достигает 300 мм.

Технология ЭЛС широко применяется в производстве электровакуумных приборов и машиностроении. Она подразумевает наличие рабочего объема, в котором находится вакуум с давлением  $10^{-2}$  Па. В камере электронной пушки также необходимо поддерживать вакуум с давлением  $10^{-2}$  -  $10^{-4}$  Па. В этой технологии важно следить за точностью положения луча, относительно свариваемого стыка.

К проблемам, возникающим на производстве, которые решаются применением ЭЛС, относятся совершенствование способов замыкания кольцевых швов, ремонта дефектных участков швов и другие.

На данный момент в ИЯФ СО РАН в эксплуатации находится установка ЭЛУ, в которой управление положением электронного пучка относительно образца может осуществляться непосредственным управлением положения самого образца в рабочей камере или отклонением самого пучка электронов. Ток на электроде, получаемый от отраженных металлом электронов, создает на подключенном резисторе напряжение, которое фиксируется осциллографом. Осциллограмма, полученная таким образом, даёт достаточно полное представление о рельефе образца и материале, из которого он создан.

Основной целью данной работы является изучение рассеяния электронов при сварке электронным лучом, который генерируется в электронно-лучевой пушке. По нему можно определить плотность тока и оценить количество отраженных электронов в зависимости от образца. Образцы в работе представлены титаном, никелем, а также нержавеющей сталью.

## **2. Теоретическая часть**

ЭЛУ условно разделяется на две части: на электронно-лучевую пушку и рабочий объем. Генерация и управление пучком происходит в электронной пушке. В рабочем объеме находится сам образец, на который воздействует этот пучок. В зоне встречи пучка и образца происходит процесс передачи энергии электронов на нагрев и последующую плавку заготовки, однако это не единственный процесс, который происходит в этой точке. Также присутствуют следующие процессы:

- тепловая эмиссия электронов;
- выделение рентгеновского излучения;
- появление потоков тепла во внешнюю среду;
- возникновение вторичных электронов;
- отражение электронов поверхностью металла.

На все эти процессы тратится энергия электронов. Потерями на тепловую эмиссию, возникновение вторичных электронов и рентгеновское излучение можно пренебречь, так как общая доля не превышает 1% от общей энергии пучка. При этом следует учитывать потерю энергии от отражения электронов: она может составлять примерно 40% от общей энергии пучка в зависимости от материала, из которого сделан образец, точнее - от его атомного номера. Потеря мощности пучка, обусловленной отражением электронов, представлена на рис. 1.

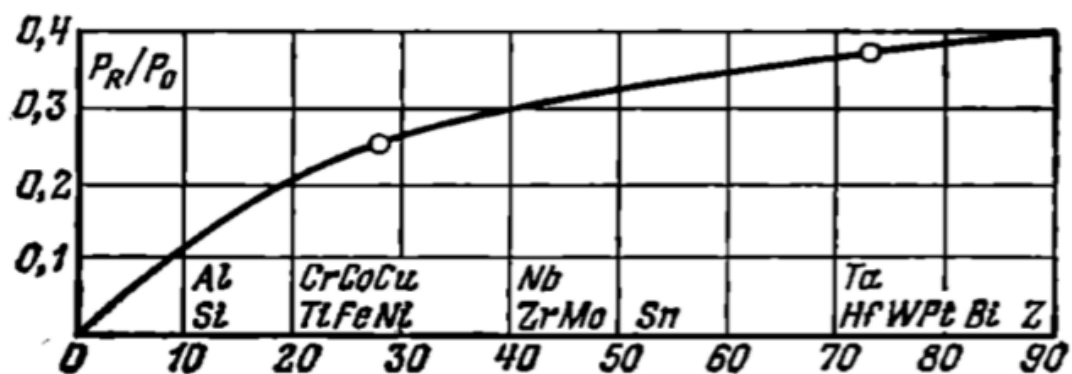


Рис. 1. Соотношение между мощностью рассеянных электронов  $P_R/P_0$  в зависимости от атомного номера  $Z$  при отвесном падении пучка на плоскую мишень.

### 3. Экспериментальная часть

#### 3.1. Принцип работы электронно-лучевой сварки

Принцип получения мощного электронного луча показан на рис.2.

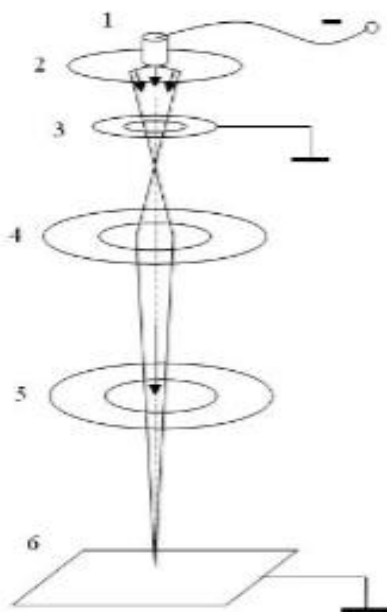


Рис.2. Электронная пушка. 1 - катод, 2 - электрод, 3 - анод, 4 - электромагнитная линза, 5 - отклоняющая катушка, 6 - свариваемое изделие.

Электроны получают с помощью термоэмиссии с нагретого катода (1). При этом катод находится под высоким потенциалом (на него подано отрицательное напряжение), так что электроны, покинувшие вследствие термоэмиссии катод, начинают отталкиваться от него и двигаться к аноду (3), находящемуся под нулевым потенциалом. В таком режиме работает диодная электронная пушка.

Её ток регулируется потоком термоэлектронов, т.е. накалом катода и потенциалом между катодом и анодом.

Электронная пушка может быть по конструкции и триодом – т.е. иметь специальный электрод (2), регулирующий ток электронов. Этот электрод расположен в высоковольтной части пушки, на пути электронов, около катода и с помощью подачи на него отрицательного относительно катода напряжения можно частично или полностью запирает (уменьшает) ток луча. Такая конструкция предоставляет больше возможностей, но она, очевидно, сложнее в связи с тем, что необходимо дополнительное оборудование, расположенное под высоким (50-70кВ) потенциалом. В данной работе эксперименты проводились с триодной пушкой.

Далее после прохождения анода электронный луч, уже имеющий полную энергию, равную в электрон-вольтах разности потенциалов между катодом и анодом проходит фокусирующую катушку (4) и систему развертки луча (5). Фокусирующая катушка создает фокусирующее магнитное поле, собирающее электроны на некотором расстоянии от среза пушки. Это позволяет сфокусировать луч на образце (6), так что вся энергия электронов выделится на очень маленькой площади.

Система развертки создает поперечное магнитное поле, отклоняющее луч от вертикального направления. Тем самым появляется возможность перемещать точку выделения энергии на образце. Обычно система развертки имеет 2 катушки – тогда возможно движение по двум координатам, или 4 катушки (2 комплекта по 2 катушки, установленные на некотором расстоянии) – такая система называется системой с двойным лучепреломлением и позволяет регулировать еще и наклон, с которым луч падает на образец.

При попадании электронного луча на поверхность металла из последнего выбиваются электроны, летящие в противоположном направлении в камеру. Поставленный на их пути датчик в форме диска, ось которого совпадает с осью пушки, выделяет сигнал, пропорциональный их количеству, и передает его в

систему управления положением луча. Число отраженных электронов зависит от состояния и металла, из которого сделан образец. Их число максимально при гладкой поверхности металла, перпендикулярной лучу, и уменьшается, если луч пересекает неровности. При попадании луча в глубокие полости число вторичных электронов уменьшается практически до нуля. При пересечении лучом стыка происходит скачкообразное изменение сигнала вторичных электронов. Положение этого импульса сравнивается с положением луча при отсутствии тока в отклоняющей системе и при необходимости автоматически корректируется в процессе сварки.

### 3.2. Приемник отраженных электронов

Для проведения эксперимента по изучению зависимости тока отраженных электронов от атомного номера на установке ЭЛС был дополнительно создан приемник отраженных электронов (рис. 3).

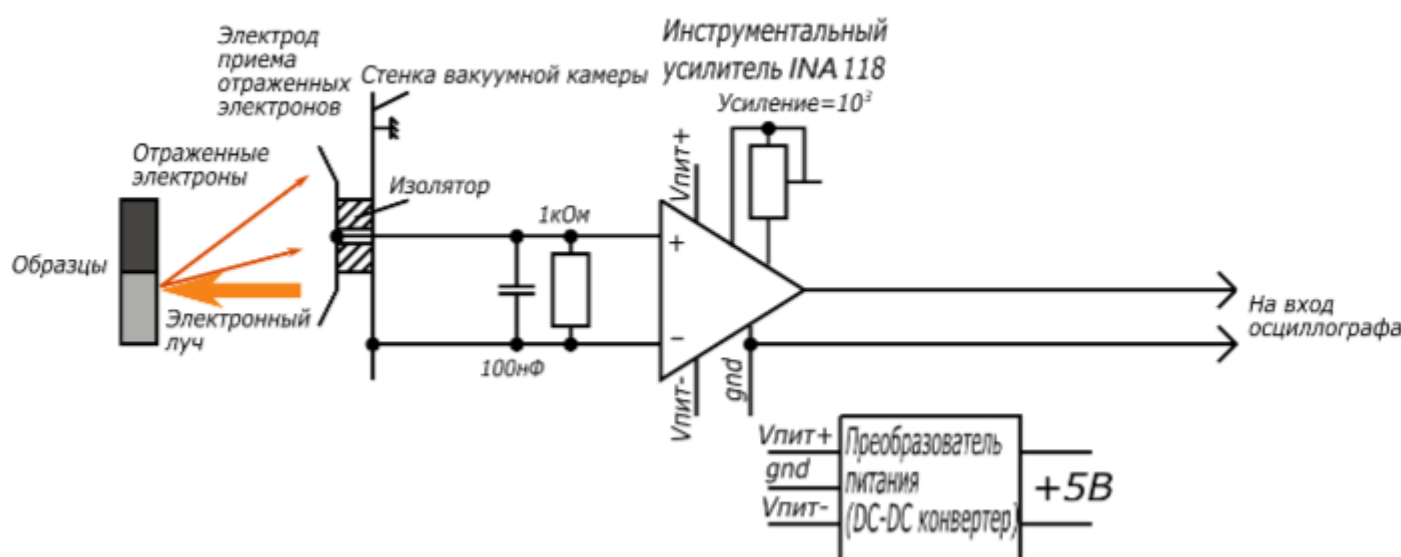


Рис. 3. Схема приёмника отражённых электронов.

Установка уже была оборудована электродом для приема отраженных электронов. Он установлен на выходе тракта электронной пушки в вакуумную камеру на изоляционных стойках таким образом, что его контакт выведен на разъём. К этому разъёму и подключалась созданная схема приемника.



Ток отраженных электронов поступает с электрода на шунт 1 кОм. Току 10 мкА соответствует напряжение на входе усилителя 10 мВ. Емкость 100 нФ, установленная параллельно шунту, отфильтровывает высокочастотные помехи, оставляя сигнал полосой около 1 кГц.

### 3.3. Эксперимент

Для проведения эксперимента были взяты три образца металлов с разными атомными номерами: титан (Ti), никель (Ni) и нержавеющая сталь. Имеющиеся материалы плотно приставлялись друг другу, закреплялись в данном положении (рис. 5) и помещались в рабочий объем (рис. 6). В рабочей камере присутствует освещенное пятно, которое возникает из-за нагрева катода. Благодаря ему удалось получить фотографию образца, подвергающегося воздействию электронного луча. Тонкая красная линия слева на рис. 6 и есть этот электронный луч.

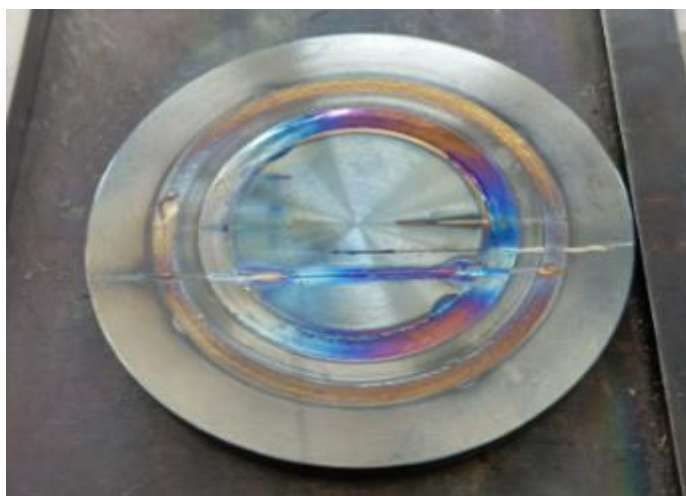


Рис. 5. Образцы

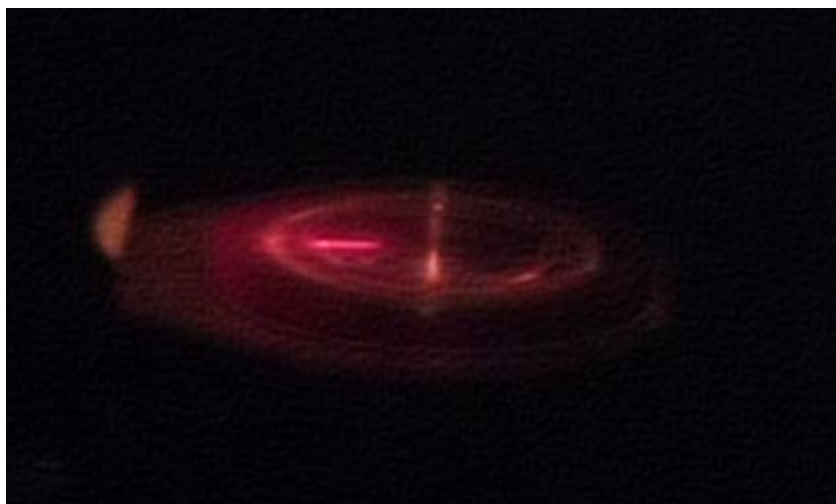


Рис. 6. Образцы в рабочем объёме

В результате были получена осциллограмма, приведённая ниже на рис. 7. В них синий луч – это сигнал развертки луча: максимальное напряжения соответствует максимальному смещению вправо, минимальное - влево. Желтый луч - это сигнал с датчика отраженных электронов.

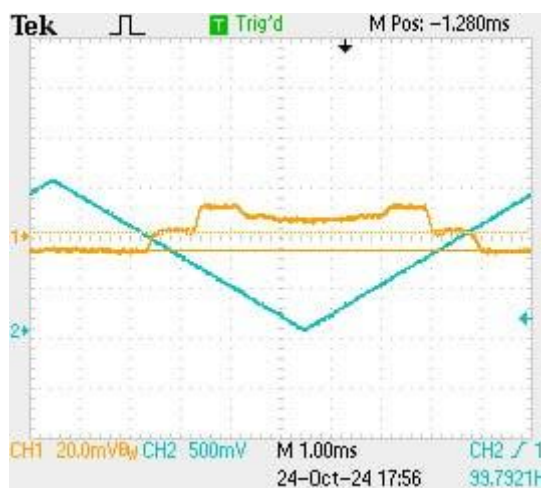


Рис. 7. Полученная осциллограмма

### 3.4. Обработка результатов

Данные с усилителя подвались на цифровой осциллограф, данные каждого канала получались путем усреднения по 64 измерениям. Это позволяет в 8 раз улучшить соотношение сигнал шум, что важно для получения более точных

результатов. Для синхронизации по фазе запуск каждого измерения производится по сигналу развертки луча.

Шум канала измерения тока отраженных электронов, определяющий точность измерения, без применения усреднения составляет 20-25 мВ. После усреднения по 64 выборкам шум уменьшается в 8 (корень из 64) раз и, в результате, статистическая точность измерения тока отраженных электронов получается  $\pm 3$  мВ ( $\pm 1\%$ ).

По полученным данным была составлена таблица. Для нее с помощью формулы:

$$U_{\text{вых}} = I_{\text{отр.э.}} \cdot R_{\text{шунт}}$$

Был определен уровень тока отражённых электронов. Как видно из формулы,  $U_{\text{вых}}$  пропорционально  $I_{\text{отр.э.}}$ , поэтому можно рассматривать отношение напряжений. Исходя из этого, отношение  $U_{\text{вых}} / Z$  должно быть постоянным.

Таблица. Полученные данные.

Материал	$U_{\text{вых}}$ , мВ	$Z$	$Z / U_{\text{вых}}$ , мВ
Титан	282	22	7,8
Никель	356	28	7,87
Нержавеющая сталь	344	26	7,56

#### 4. Заключение

В работе была получена зависимость потока отраженных электронов для титана, никеля и нержавеющей стали. Согласно теории, доля отраженных электронов от электронов пучка и их спектр энергий зависят от угла падения пучка и от атомного номера элемента материала. Полученные значения хорошо согласуются с теорией и демонстрируют возможность уверенной селекции материалов с близким атомным номером. Небольшое отклонение коэффициента для нержавеющей стали (5%), скорее всего, связано с тем, что это не чистое железо, а сплав с большим количеством примесей.

## **5. Список литературы**

1. З. Шиллер, У. Гайзинг, З. Панцер. Электронно-лучевая технология: Пер. с нем.: Энергия, 1980.- 528 с.