

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Ерохин Александр Дмитриевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование эффекта рассеяния электронов при обработке материала
электронным лучом**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20306

Научный руководитель:

к.т.н. Д.В. Сеньков

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. Е.И. Солдаткина

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Целью работы является изучение рассеяния электронов при сварке электронным лучом. По такому рассеянию можно получить значение тока отраженных от исследуемого образца электронов, определить все неровности рельефа поверхности, а также определить место контакта разных материалов. Эти данные могут существенно упростить навигацию по образцу при управлении электронным пучком, а также создать автоматизированную систему сварки электронным лучом. В работе в качестве образцов были взяты медь, алюминий и нержавеющая сталь. Сигнал с датчика отраженных электронов снимался с осциллографа. Для увеличения соотношения сигнал-шум использовался метод накопления (статистический метод при сильно зашумленном сигнале). В итоге выполнения данной работы были получены рельефы исследуемых образцов, подробно описан метод измерения плотности токов и получены их значения.

Ключевые слова: электронный пучок, электронно-лучевая пушка, отраженные электроны.

Оглавление

1. Введение	4
2. Экспериментальная установка	6
3. Методика измерения.....	7
4. Проведение эксперимента.....	9
5. Обсуждение результатов.....	11
Список литературы	12

1. Введение

Электронно-лучевые установки применяются во многих отраслях машиностроения из-за своих уникальных возможностей, таких как сварка, плавка и обработка различных материалов с помощью сфокусированного в пятно малых размеров электронного пучка. Типичная электронно-лучевая установка состоит из энергетического и электромеханического комплексов. Энергетический комплекс предназначен для формирования электронного пучка с заданными параметрами управления его интенсивностью и положением в пространстве, определяемыми толщиной, теплофизическими характеристиками свариваемых материалов и требованиями к коэффициенту формы шва. Электромеханический комплекс не имеет отношения к пучку электронов, он необходим для герметизации и вакуумирования рабочего объёма, а также для обеспечения взаимного перемещения электронного луча и свариваемого изделия и управления всеми этими процессами. Энергетический комплекс ЭЛУ состоит из электронной пушки с источником питания и системой управления. Электромеханический комплекс включает в себя вакуумную камеру, систему позиционирования и перемещения детали, систему наблюдения за ходом процесса.

Если у электронного пучка установить значение тока, недостаточное для повреждения материала, то вместо процесса сварки можно извлечь информацию о рельефе исследуемого образца и его атомном номере из плотности *тока отраженных электронов*. Он возникает при облучении поверхности вещества электронным пучком, когда за счет взаимодействия электронов с атомами этого вещества порождается отраженный поток электронов с некоторым спектром энергий, направленный в широкий телесный угол. Кроме отраженных электронов в реакции участвуют рассеянные, присутствует вторичная эмиссия (за счет возбуждения атома вещества), а также термоэмиссия, но основной вклад при низкой температуре облучаемого образца дает ток вторичных электронов.

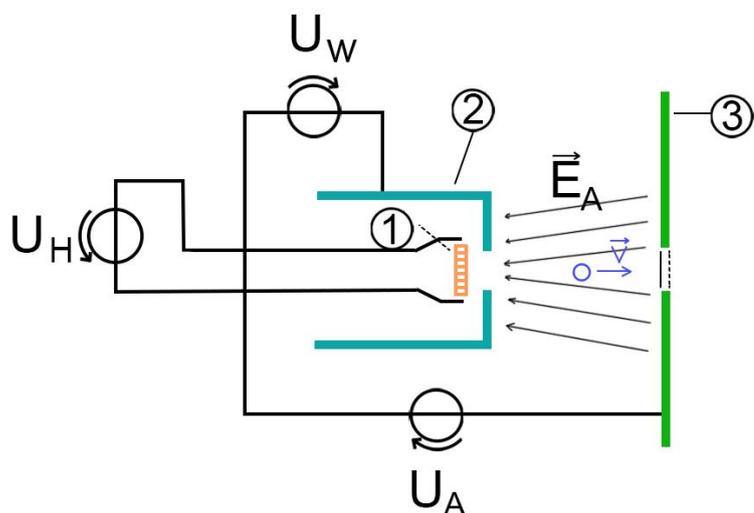


Рисунок 1. Пушка Пирса. 1 – горячий катод, 2 – модулятор, 3 – анод, U_H – напряжение накала, U_W – напряжение модулятора, U_A – ускоряющее анодное напряжение

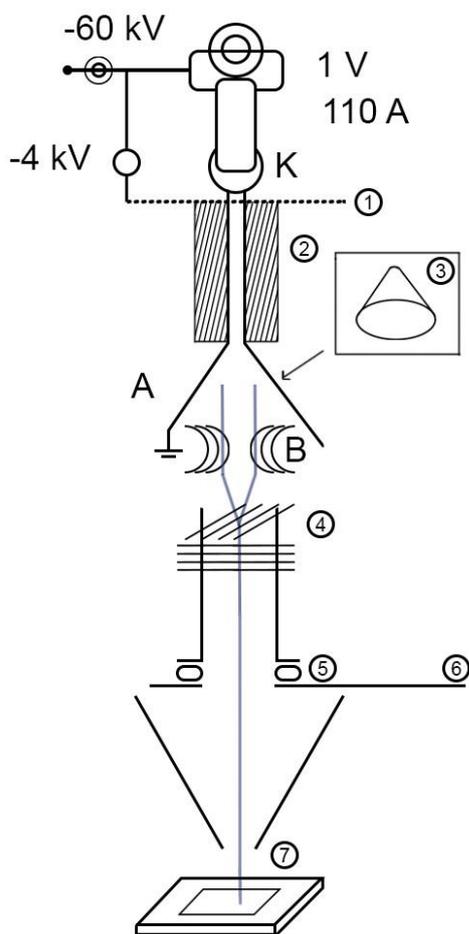


Рисунок 2. Схема установки. К – катод с потенциалом -60кВ , А – анод, 1 – запирающая сетка, 2 – изолятор, 3 – цилиндрический электрод, В – фокусирующая катушка, 4 – отклоняющие катушки, 5 – керамические изоляторы, 6 – электрод приема отраженных электронов, 7 – подставка с фиксатором + исследуемый материал

2. Экспериментальная установка

Основные составляющие экспериментальной установки: электронно-лучевая пушка (она же пушка Пирса, рис.1), высоковольтный блок питания, приёмник отражённых электронов, видеокамера (для наблюдения за сварочным лучом), исследуемые материалы: медь, железо, алюминий.

Пушка Пирса – устройство для получения пучка электронов с заданной кинетической энергией. Чаще всего используется в кинескопах и других электронно-лучевых трубках, СВЧ-приборах, а также в различных приборах, таких как электронные микроскопы и ускорители заряженных частиц. Работа электронной пушки возможна только в условиях глубокого вакуума для большей длины свободного пробега электронов и исключения столкновения с молекулами различных газов.

В данной работе установка (рис. 2) включает в себя электронную пушку. На потенциал катода подается потенциал -60 кВ, для накала катода необходимо его подогревать, ток накала составляет 110 А. Следом идет запирающая сетка. При потенциале -4 кВ ток через сетку не проходит, при нулевом потенциале ток пушки принимает максимальное значение. Между запирающей сеткой и анодом находится опорный электрод. Анод заземлен, под ним находится магнитная линза – устройство для фокусировки электронов, представляющее собой цилиндрический электромагнит, который создает сильное неоднородное магнитное поле и отклоняет электроны. Отклоняющие катушки дают возможность регулировать расположение пучка. Предпоследняя составляющая установки – приемник отраженных электронов, который отделен от трубы керамическими подставками. Расположен он непосредственно над исследуемым образцом, который установлен на специальном держателе с видеокамерой.

3. Методика измерения

В результате взаимодействия ускоренных электронов с веществом происходит ряд процессов, которые приводят к выходу из исследуемого образца электронов или квантов электромагнитного излучения.

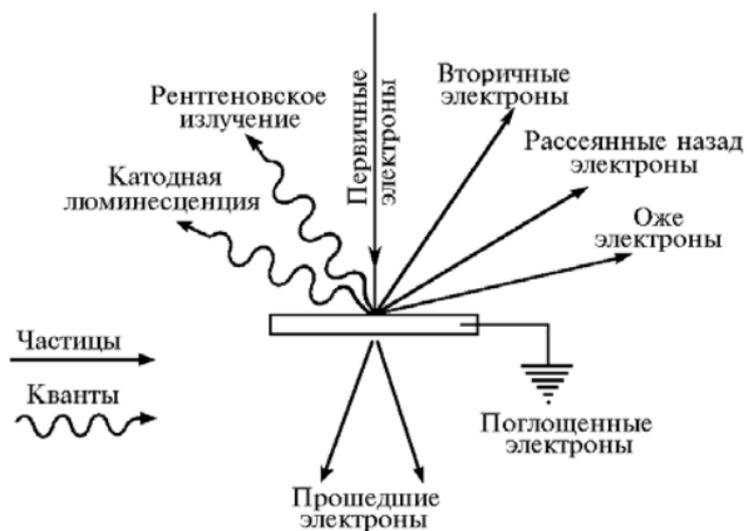


Рисунок 3. Взаимодействие электронного пучка с веществом

Основными сигналами, которые регистрируются приемником отраженных электронов являются вторичные электроны, отраженные электроны и рентгеновское излучение. Ускоренные электроны пучка (первичные электроны) проникают в материал на глубину порядка микрон, рассеиваясь. Глубина проникновения определяется энергией первичных электронов и плотностью материала, в котором они рассеиваются. Электроны пучка, вылетевшие в результате рассеяния (столкновения с атомами и электронами образца) из образца назад называются *отраженными* (обратно-рассеянными) электронами.

Для получения тока отраженных электронов вначале необходимо снизить давление в вакуумной камере, пользуясь форвакуумным, а затем турбомолекулярным насосами. Затем на катод подается накал, формируется ускоряющее напряжение и задается в соответствии с требуемым током напряжение управляющей сетки. Для фокусировки и управления электронным лучом использовалась магнитная линза и отклоняющие катушки

соответственно. Также был дополнительно создан приемник отраженных электронов, изображенный на схеме (рис. 4). Для наблюдения за электронным лучом использовалась камера (рис. 5), помещенная над исследуемым материалом.

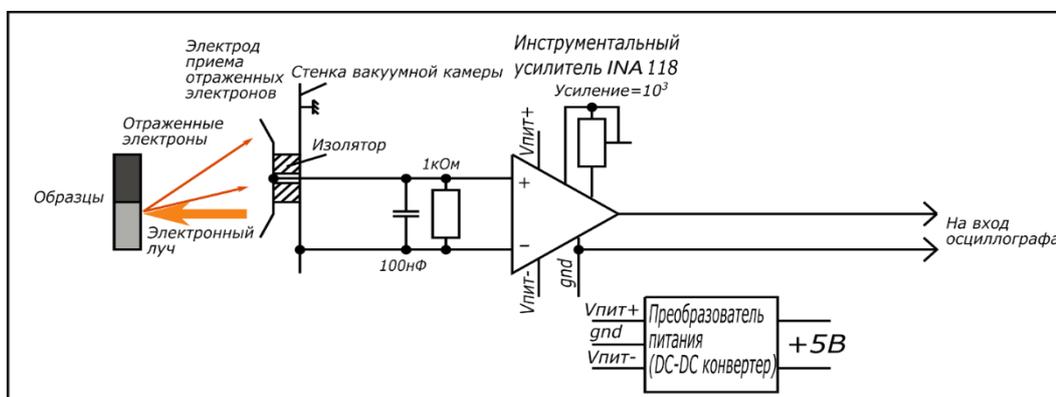


Рисунок 4. Схема приемника отраженных электронов

Ток отраженных электронов поступает с электрода на шунт 1 кОм. Току 10мкА соответствует напряжение на входе усилителя 10мВ. Емкость 100нФ, установленная параллельно шунту отфильтровывает высокочастотные помехи, оставляя сигнал с полосой около 1 кГц. Далее сигнал поступает на специализированную микросхему инструментального усилителя INA118 (рис. 6).



Рисунок 5. Снимок камеры видеонаблюдения

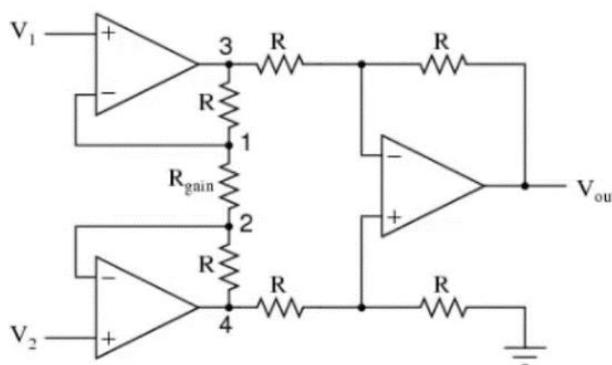


Рисунок 6. Усилитель INA-118

Она специально предназначена для усиления дифференциальных сигналов и имеет регулируемый внешним резистором коэффициент усиления по формуле $k = 1 + \frac{50\text{кОм}}{R}$ и ослабления синфазного сигнала около 100дБ. Иначе говоря,

помехи, наведённые на каждый из проводов, ослабляются в 100 000 раз. Применение такой схемы позволяет достаточно сильно подавить входные шумы, так как их воздействие одинаково на оба входа микросхемы. Коэффициент усиления выставлен равным 1000, и в результате мы получаем выходной сигнал отраженных электронов с коэффициентом преобразования 1В/мкА и низким уровнем шумов.

4. Проведение эксперимента

Помещаем исследуемые образцы на опору и закрепляем их в стык струбцинами, минимизируем расстояние. (рис. 6). Настраиваем и направляем видеокамеру на образцы, задвигаем конструкцию внутрь вакуумной камеры и откачиваем вакуумный объем. Когда устанавливается необходимое давление (3-6 мПа), подаем напряжение на катод (60кВ), ставим ток накала 110 А. Программным обеспечением контролируется ток луча, его фокусировка и расположение. К приемнику отраженных электронов подключается осциллограф и настраивается таким образом, чтобы на одном канале воспроизводился сигнал управления разверткой луча треугольным сигналом (линейная развертка по одной координате), на другом же сигнал тока отраженных электронов, который нам в итоге необходимо зафиксировать (рис. 7)



Рисунок 7. Закрепленные образцы на подставке

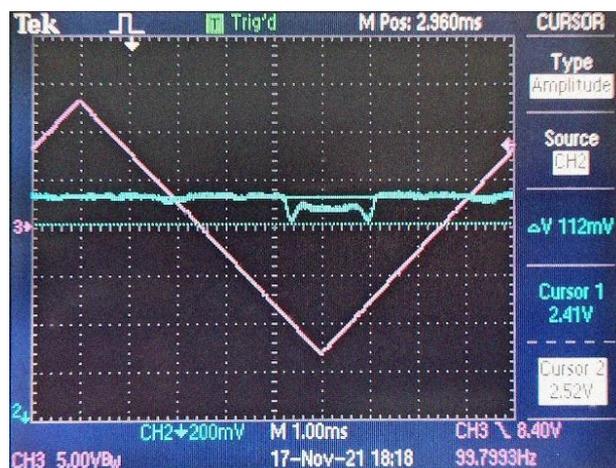


Рисунок 8. Развертка + Ток отраженных электронов

Также с помощью ПО поиска стыка установки и штатного детектора отраженных электронов при той же линейной развертке (одна координата) и движении стола с образцом (перпендикулярная координата) было получено изображение двумерной картины тока отраженных электронов в виде цветовой гаммы (рис. 8), чем оттенок теплее, тем больше ток отраженных электронов, темно-синий цвет – зазор между образцами. Дальнейшая обработка с помощью программы Autodesk ArtCAM позволила получить рельеф изображения в зависимости от цвета (Рис. 9).

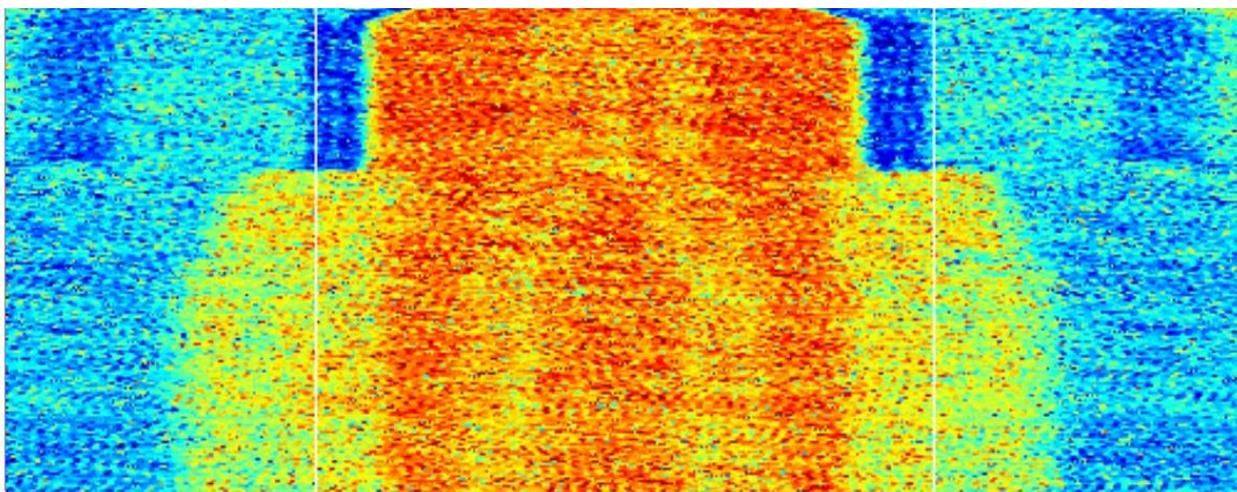


Рисунок 9. Картина тока отраженных электронов от времени

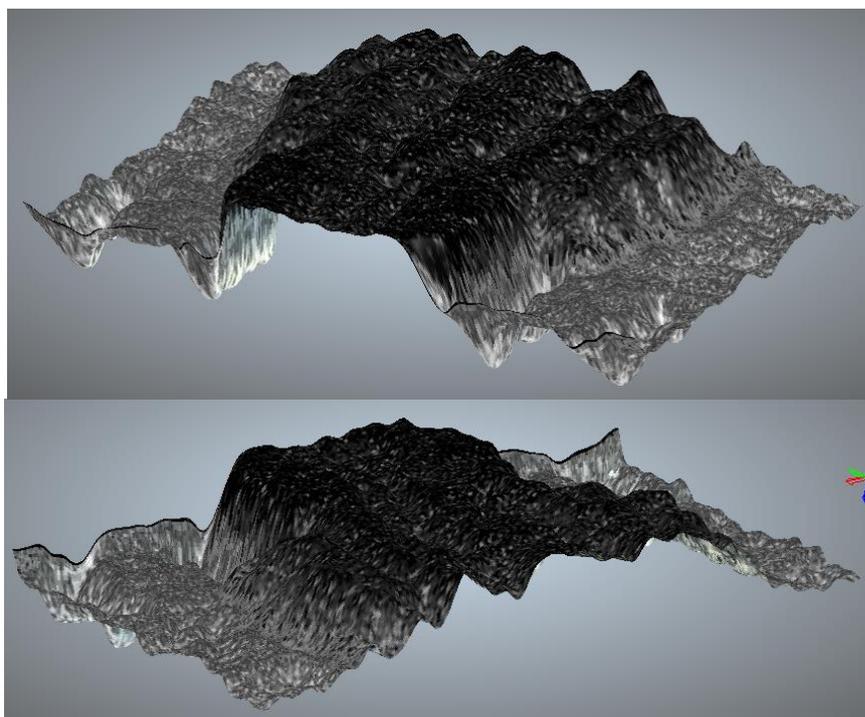


Рисунок 10. Рельеф изображения

Помещаем три образца (медь, нержавеющую сталь и алюминий) последовательно и закрепляем их, после чего, управляем сфокусированным электронным лучом, пробегая линейно по образцам. Сканируем неровности, снимаем осциллограммы с током отраженных электронов. (Рис. 11 – 12)

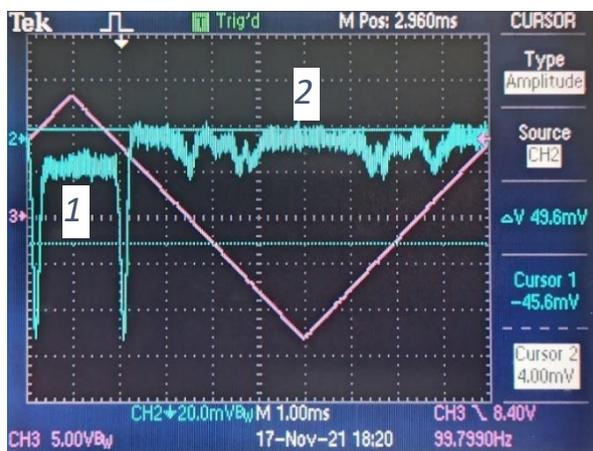


Рисунок 11. Осциллограмма тока отраженных электронов 1) Fe – 2) Cu

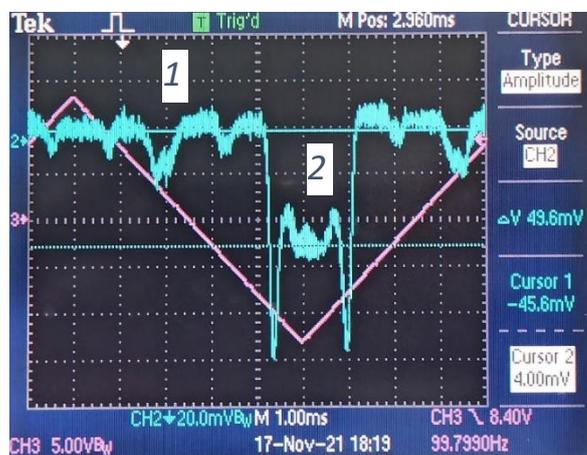


Рисунок 12. Осциллограмма тока отраженных электронов 1) Cu – 2) Al

5. Обсуждение результатов

По итогу проведения эксперимента установлено, что интенсивность потока обратных электронов прямо зависит от атомного номера Z (Таблица 1), что объясняется теоретически. Чем больше атомный номер материала, тем больше у него количество протонов, и, следовательно, электронов в атомном ядре. Значит первичный электронный пучок выбивает больше электронов при столкновении с атомами и электронами образца с большим атомным номером. Из этого следует, что ток отраженных электронов возрастает с увеличением атомного номера

Материал	Al	Cu	Fe
Атомный номер	13	29	26
Сила тока I , А	$48,8 \mu\text{A} \pm 5,36 \mu\text{A}$	$86 \mu\text{A} \pm 9,46 \mu\text{A}$	$74 \mu\text{A} \pm 8,14 \mu\text{A}$

Таблица 1. Зависимость Z от I

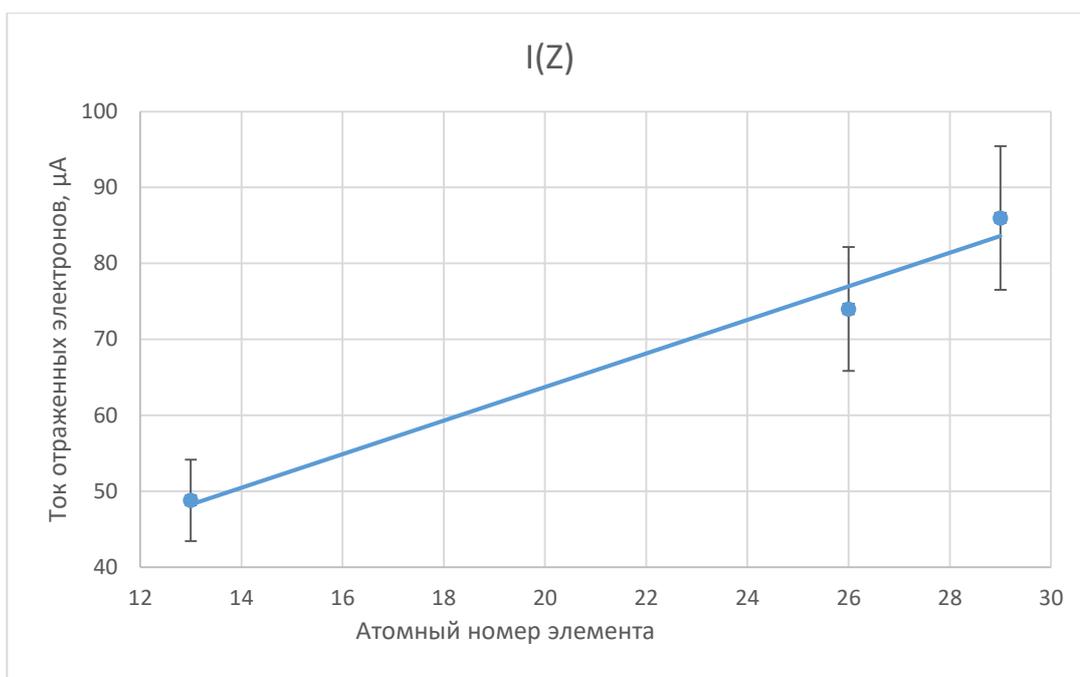


Рис. 13. Зависимость тока отраженных электронов от атомного номера элемента

Также мы выяснили, что при адекватных параметрах установки и корректной настройке программного обеспечения можно исследовать рельеф, что позволяет как определить место стыка, так и понять, где находится более легкий, а где более тяжелый материал, что, собственно, и было сделано при проведении эксперимента.

Основные погрешности составляют 10%, они возникают в результате воздействия шумового сигнала, вызванного работой узлов установки на сигнал тока отраженных электронов. На входе без фильтрации соотношение сигнал-шум составляет примерно 1. Благодаря применению усреднения 128 измерений шум подавляется в 11 раз.

Несущественные погрешности: возможен случай непрогретого или перегретого усилителя INA-118, который может давать разный коэффициент усиления из-за перечисленных выше причин (около 0,01%)

Список литературы

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

2. Сидоров, В. П. Электронно-лучевая сварка. Технологические особенности и оборудование: учеб. пособие / В. П. Сидоров, А. В. Мельзитдинова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 96 с.: обл.