

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Войтов Даниил Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**«Система поиска стыка в реальном времени на установке сварки  
электронным лучом»**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18352

**Научный руководитель:**

к. т. н, с. н. с. ИЯФ, Д. В. Сеньков  
Оценка научного руководителя

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума:**

\_\_\_\_\_

Оценка преподавателя практикума

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к. т. н. В. Т. Астрелин  
Итоговая оценка

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## **Аннотация**

Данная работа посвящена системе поиска стыка свариваемых деталей на объекте электронно-лучевой сварки при помощи поля отраженных электронов. В работе проводится обзор электронно-лучевой технологии, описывается установка сварки электронным лучом и процесс поиска стыка. В процессе проведения работы, мною была разработана логическая схема для управления процедурой поиска стыка при помощи ПЛИС (Программируемой Логической Интегральной Схемы). Разработка схемы проводилась в среде разработки Quartus.

Проведены эксперименты для проверки схемы на примере стыка трех металлов: медь, алюминий и нержавеющая сталь. Данные предоставлены в виде осциллограмм, соответствующих токам отраженных от металлов электронов. Работа проводилась на установке электронно-лучевой сварки Института Ядерной Физики Сибирского Отделения Российской Академии Наук (ИЯФ СО РАН).

## Оглавление

Введение.....	4
1. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС).....	5
1.1 Принцип работы ЭЛС.....	5
1.2 Взаимодействие электронов с металлом.....	6
2. Постановка задачи.....	6
3. Описание установки электронно-лучевой сварки в ИЯФ СО РАН.....	8
4. Эксперимент .....	10
5. Заключение .....	13
6. Список используемой литературы .....	13

## Введение

Физика электронных пучков имеет важное место в современной науке и технике. В частности, электронно-лучевая технология (ЭЛТ) является неотъемлемой частью как в производстве, так и в научной отрасли. Она используется для сварки и испарения металлов, для получения субмикроскопических структур в микроэлектронике, для термической обработки металлов и т. д.

Из преимуществ электронно-лучевой сварки можно отметить:

- 1) Возможность сварки тугоплавких металлов;
- 2) Сравнительная чистота сварного шва;
- 3) Позволяет сваривать металлы толщиной в несколько сантиметров;
- 4) Для сварки требуется в 10 раз меньше энергии, чем для дуговой сварки.

Из недостатков метода можно выделить:

- 1) Необходимость создания вакуума, что может привести к дополнительным затратам времени и средств;
- 2) Вероятность неконтролируемого брака вследствие прожогов и полостей в корне шва.

# 1. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС)

## 1.1 Принцип работы ЭЛС

Ниже приведена схема установки ЭЛС.

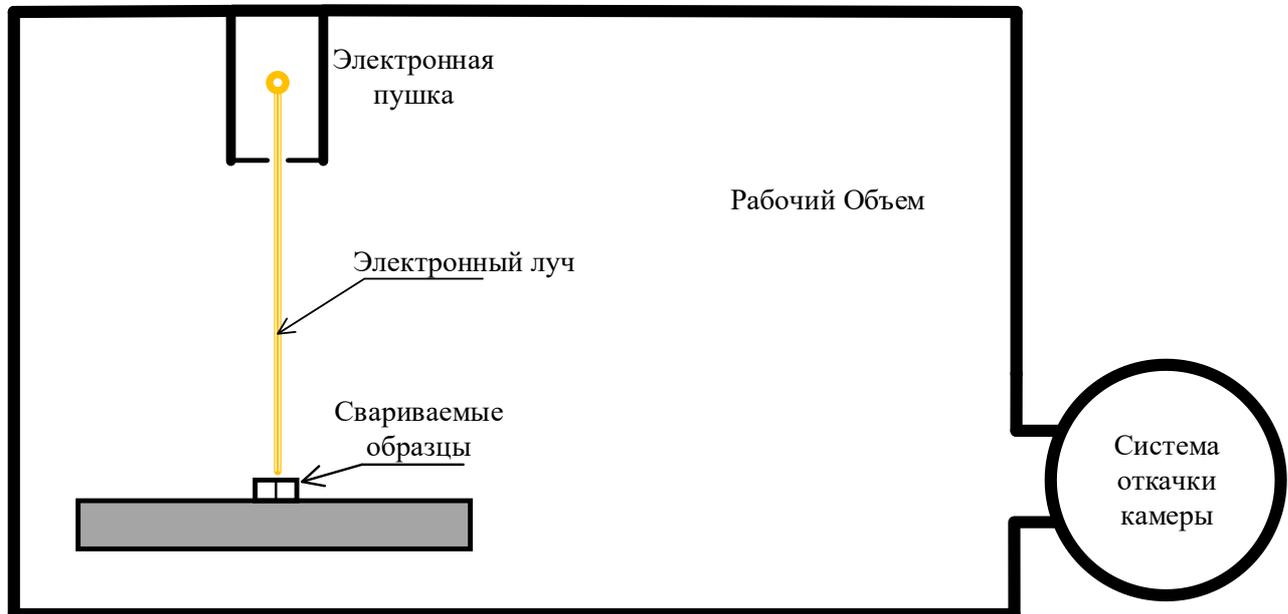


Рис. 1. Схема установки электронно-лучевой сварки

В электронной пушке генерируется, ускоряется и фокусируется пучок электронов. Попадая на объект, пучок расплавляет стык, чтобы расплав при затвердевании соединил детали.

Для работы установки ЭЛС необходимо точное попадание в область стыка деталей. При недостаточном вакууме электронный пучок сильно искажается, поэтому в рабочем объеме необходимо поддерживать вакуум. В камере электронной пушки поддерживается вакуум порядка  $10^{-4} - 10^{-2}$  Па, а в рабочем объеме – порядка  $10^{-2}$  Па.

После создания необходимого вакуума, можно приступить к сварке. Форма и глубина шва регулируется варьированием ускоряющего напряжения, величины тока электронов, выдаваемого пушкой, а также степенью фокусировки луча.

Свойства электронного пучка позволяют сваривать тугоплавкие материалы. Более того существуют материалы, сварка которых возможна только методом электронно-лучевой сварки.

## 1.2 Взаимодействие электронов с металлом

На рисунке ниже схематично представлен процесс взаимодействия электронного пучка с поверхностью металла.

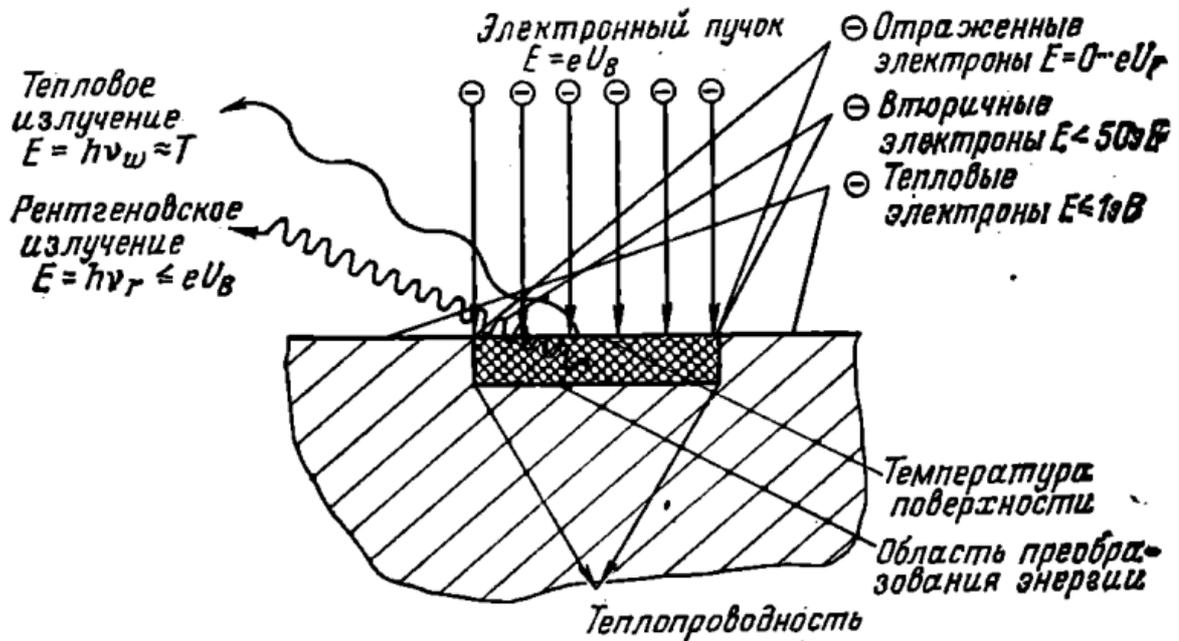


Рис. 2. Явления при бомбардировке объекта электронным пучком [1]

При попадании электронов на поверхность, атомам вещества передается энергия, происходит переход кинетической энергии электронов в энергию возбуждения или тепловую энергию атомов. Масса одного электрона много меньше массы атома металла, следовательно, электрон передает очень малую часть своего импульса и отражается. Кинетической энергии электрона не хватает, чтобы передать достаточную для плавки материала энергию, поэтому электронов должно быть много.

Также, при достаточной энергии пучка, часть энергии электронов уходит на образование теплового и рентгеновского излучения, на эмиссию вторичных электронов.

## 2. Постановка задачи

Зачастую, ширина сварного шва составляет порядка 0,1 мм. Поэтому, для сварки необходима точная система позиционирования электронного пучка относительно места стыка. Существует несколько способов (вариантов) поиска

стыка. В некоторых установках ведут оптическое наблюдение за положением пятна пучка. Такой способ применим для сварки больших деталей.

При сварке мелких серий деталей с узкими стыками, предпочтительнее использовать автоматический поиск шва. Положение стыка непосредственно перед зоной сварки можно определить с помощью оптических или механических датчиков.

Однако даже эти методы не учитывают возможного отклонения пучка от заданной траектории. Причинами отклонений могут быть:

- 1) Изменение геометрии генерации пучка из-за нагрева деталей;
- 2) Действие магнитных полей, источниками которых могут быть детали или устройства перемещения деталей. Влияние этих полей может стать значительным в установках с большой длиной пути пучка;
- 3) Электронный пучок может быть несколько смещен относительно оси электронной пушки, что в свою очередь, приводит к отклонению пучка фокусирующей линзой.

Вследствие этих причин, зона действия пучка может сместиться на несколько миллиметров. Избежать неопределенностей от этих факторов позволяет явление отражения электронов от места падения луча. Как упоминалось выше, при столкновении пучка с поверхностью, часть электронов отражается в определенном спектре энергий. Этот спектр зависит от угла падения пучка и от атомного номера вещества объекта. При этом спектр энергий отраженных электронов не зависит от других параметров, таких, как температура или адсорбированные слои на поверхности, в отличие от вторичных и термоэлектронов. [1] Если пучок пересекает стык, то меняется интенсивность потока отраженных электронов и ее распределение в пространстве.

Таким образом, располагая приемники отраженных электронов соответствующим образом, можно с их помощью формировать сигналы, по которым определяется место стыка. Кромки стыка образцов из одинаковых материалов подготавливаются соответствующим образом, чтобы повлиять на распределение отраженных электронов. Если материалы свариваемых объектов

различны, то они могут быть просто прижаты друг к другу, в таком случае для определения положения стыка достаточно будет изменения интенсивности. Когда пучок используется для поиска стыка, его мощности не должно хватать для проплавления образцов.

### 3. Описание установки электронно-лучевой сварки в ИЯФ СО РАН

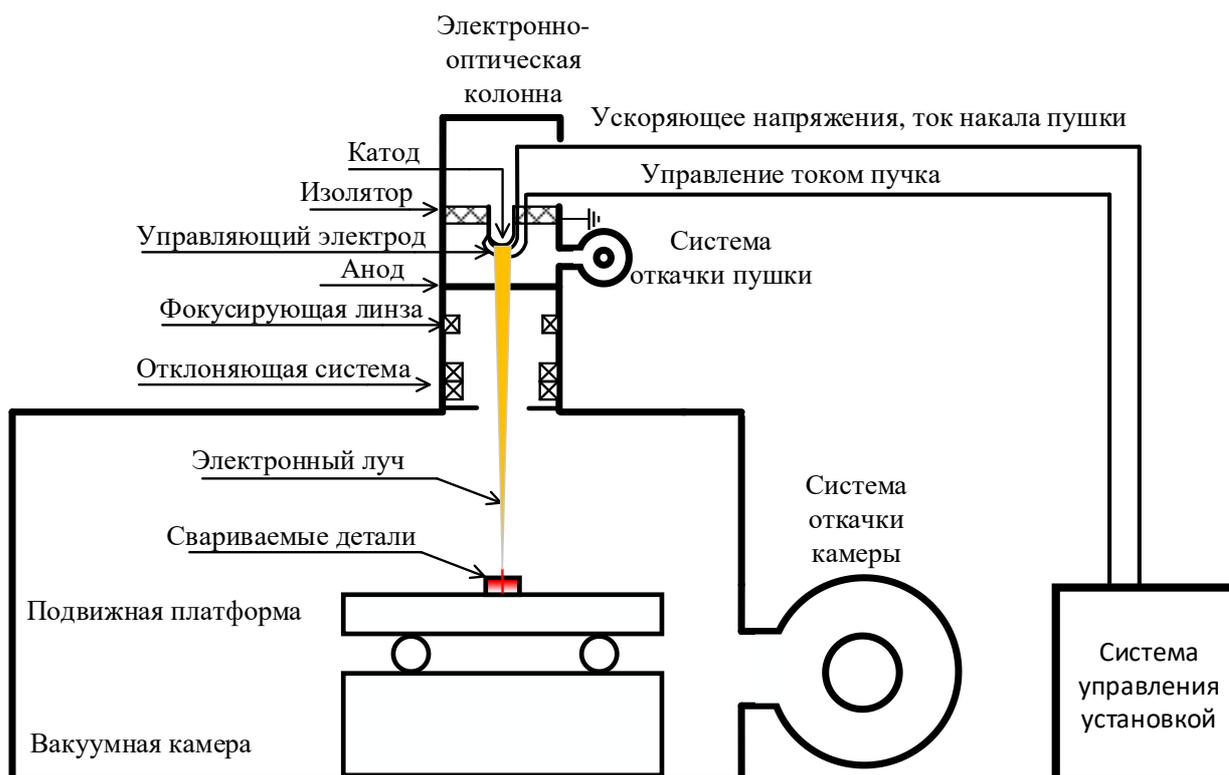


Рис. 3. Установка электронно-лучевой сварки в ИЯФ СО РАН

Как видно из схемы (рис. 3), электронная пушка установки закреплена. Катод разогревается током накала и, вследствие явления термоэлектронной эмиссии, электроны эмитируют с катода. Для регулировки тока луча около катода расположен управляющий электрод, который позволяет, при подаче на него отрицательного относительно катода напряжения, запирает ток пушки. Далее электроны ускоряются электрическим полем до анода и фокусируются в пучок специальной линзой. Проходя через отклоняющую систему, пучок попадает в рабочий объем.

Свариваемые образцы фиксируются на многокоординатной платформе, позволяющей варьировать положение деталей относительно пучка.

Также в схему входит система управления установкой ЭЛС. Она обеспечивает управление механическими движениями платформы, током луча, управление системой отклонения пучка, системой откачки камеры и электронной пушки, а также обеспечивает видеонаблюдение за процессом сварки.

В дополнение к установке ЭЛС ИЯФ СО РАН, в работе используется программируемая логическая интегральная схема Cyclone 5 от фирмы IntelPSG(ранее Altera).

Под «программируемостью» понимается возможность изменения внутренней структуры схемы таким образом, чтобы она обеспечивала реализацию заданных функций алгебры логики на аппаратном уровне. ПЛИС состоит из функциональных блоков, связанных между собой так, что пользователь при помощи специальной программы может задать какую-либо булеву функцию и встроить ее в ПЛИС (прошить). В данной работе для создания блок-схемы и прошивки ПЛИС использовалась среда разработки QuartusII.

В эксперименте используется сигнал треугольной формы (рис. 4). Для его получения была разработана блок-схема (рис. 5).

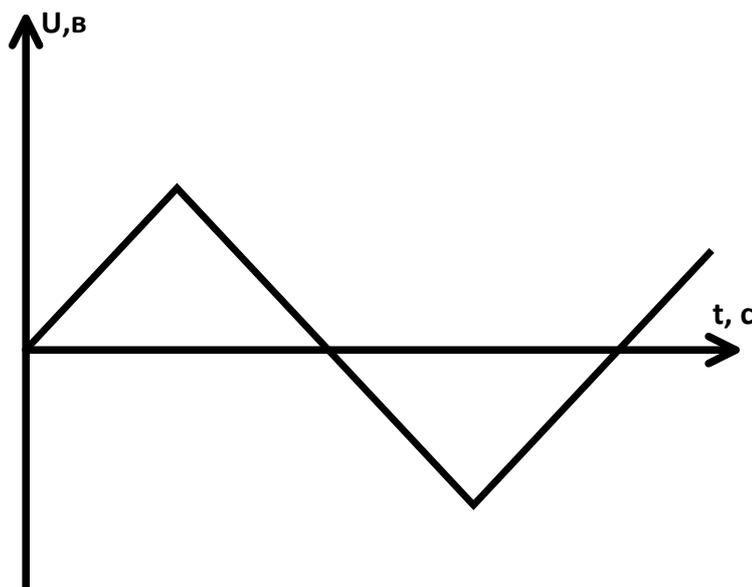


Рис. 4. Форма сигнала, подаваемого на систему отклонения пучка:

ось  $t$  – развертка сигнала по времени, ось  $U$  – значение напряжения подаваемого на систему

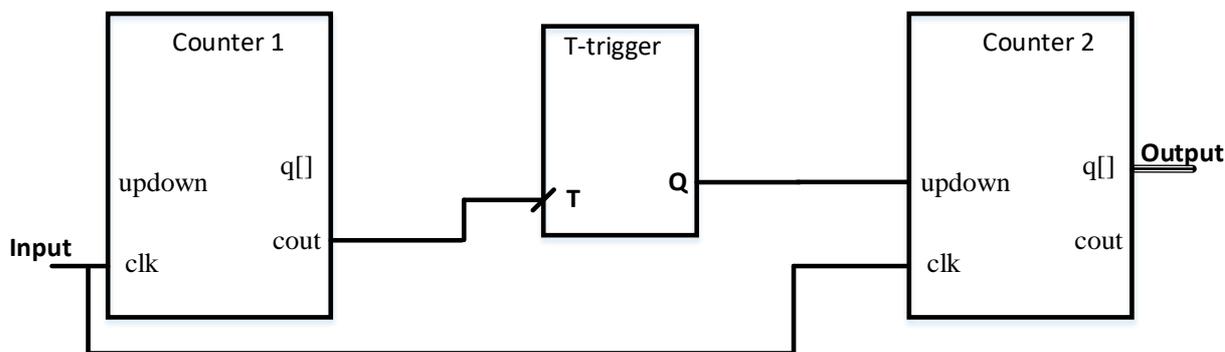


Рис. 5. Блок-схема. Counter 1,2 – счетчики с двумя входами и выходами: updown – счет вверх, если на этом входе «1», иначе – вниз; clk – вход частоты; q[] – выходной массив данных; cout – выход, равный «1», если все биты q[] – «1». T-trigger – триггер, меняющий значение выхода Q, если на входе T «1».

В схеме используются такие функциональные элементы, как счетчики. На вход clk счетчиков Counter 1 и Counter2 подается тактовая частота ПЛИС. Счетчики считают количество тактов до определенного значения (задается пользователем). На каждом такте, подсчитанное число подается на выход q[] в виде двоичного числа. Затем, досчитав до максимума выход q[] полностью обнуляется, и счет начинается заново. Вход updown нужен для направления счета. Так, если на этом входе «0», то счетчик будет считать вниз. На counter 1 подается инверсный updown, т. е. этот счетчик считает всегда вверх. Выход cout, при заполнении массива q[], подает «1» на T-trigger, который инвертирует предыдущее значение своего выхода Q. Таким образом, получаем деленную в разы частоту. Счетчик counter 2 используется для генерации треугольного сигнала: на выход схемы подается q[], который, проходя через внешний цифро-аналоговый преобразователь, подается на установку.

#### 4. Эксперимент

Для качественного обозрения зависимости поля отраженных электронов от материала в эксперименте использовалось 3 образца из различных материалов: нержавеющей стали, алюминия и меди. Ниже приведено фото фиксированных на подвижной платформе образцов. Фронтальная поверхность всех образцов располагается в одной плоскости.

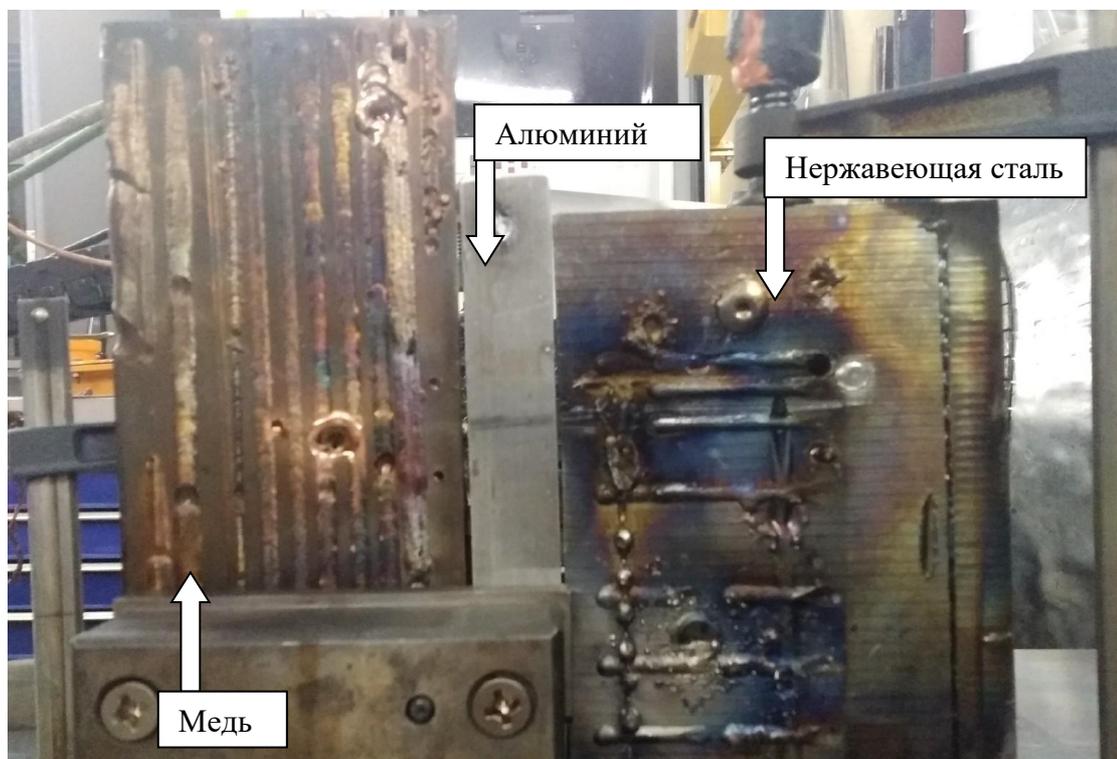


Рис. 5. Фото образцов. Слева объект из меди, по центру – из алюминия, справа – из нержавеющей стали

Эта система образцов закатывается вместе с подвижной платформой в рабочий объем, из которого далее из рабочего объема и из электронной пушки откачивается воздух. Система образцов при помощи платформы устанавливается в такое положение, чтобы пучок попадал на материал.

После включения ускоряющего напряжения электронной пушки, можно приступать к поиску стыка. Как упоминалось в описании установки (раздел 3), на систему отклонения пучка подается треугольный сигнал от ПЛИС.

Принимая сигнал от системы регистрации отраженных электронов, ждем момента резкого изменения интенсивности отраженных электронов – на осциллограмме это будет характеризоваться скачком сигнала.

Ниже приведены полученные осциллограммы тока электронов отраженных от разных материалов. На всех осциллограммах синий цвет (канал 2) соответствует напряжению, подаваемому на усилитель системы отклонения пучка, а зеленый (канал 4) – сигналу, принятому от системы регистрации отраженных электронов.

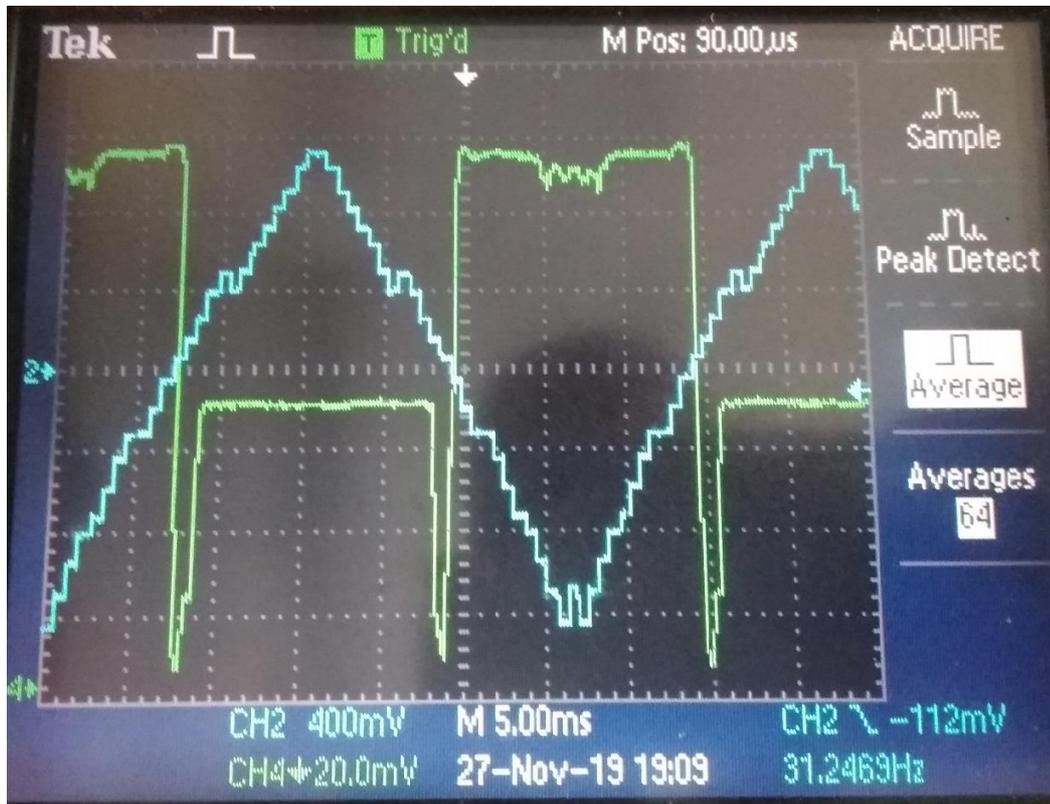


Рис. 6. Граница меди и алюминия: верхний уровень отраженного сигнала соответствует поверхности меди, нижний – алюминия



Рис. 7. Граница алюминия, нержавеющей стали и меди. Верхний уровень отраженного сигнала соответствует поверхности меди, чуть ниже меди – соответствует нержавеющей стали, нижний – алюминию

На рисунках 6 и 7 пучок пересекает границу, вследствие чего наблюдается резкое уменьшение (практически до нуля) тока отраженных электронов и установление их на уровень напряжения, соответствующего поверхности материала.

## **5. Заключение**

На установке ЭЛС ИЯФ СО РАН были получены осциллограммы токов отраженных от различных материалов электронов. На осциллограммах четко видны скачки тока, соответствующие месту стыка.

Таким образом, зная положение материала относительно стационарного пучка и границы отклонения пучка от стационарного положения, можно найти положение стыка для определения места сварки.

## **6. Список используемой литературы**

1. З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер Электронно-лучевая технология. Перевод с немецкого М.: «Энергия», 1980.