

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 025.441.47.02(047.31)

СОГЛАСОВАНО
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

УТВЕРЖДАЮ
НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА АСПИРАНТУРЫ
ИЯФ СО РАН

_____ А. А. СТАРОСТЕНКО

_____ С. В. ПОЛОСАТКИН

« ____ » _____ 2022 г.

« ____ » _____ 2022 г.

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ
ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)
АСПИРАНТА

ПО ТЕМЕ: РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ АБЕРРАЦИЙ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА
УСТАНОВКЕ ЭЛС С ПРЯМОНАКАЛЬНЫМ КАТОДОМ

Специальность 01.04.20 Физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

АСПИРАНТ _____ К. А. МЕДВЕДЕВА

НОВОСИБИРСК 2022

Оглавление

Введение	2
Цель работы и основные положения, выносимые на защиту	3
Глава 1 Физические основы электронно-лучевой обработки	5
1.1 Получение электронного пучка	5
1.2 Проведение электронного пучка к образцу	7
1.3 Характеристики электронного пучка	10
1.4 Взаимодействие электронного пучка с веществом	13
Глава 2 Диагностика пучка на установке ЭЛС	16
2.1 Устройство для измерения плотности мощности	21
2.2 Устройство для определения положения и угла наклона пучка	25
2.3 Наблюдение за пучком с напуском газа	29
2.4 Датчик проплава	33
2.5 Определение температуры в зоне сварки	38
2.6 Магнитоиндукционный датчик положения пучка	41
Глава 3 Контроль качества электронного пучка	44
3.1 Автоподбор анодной коррекции и фокусировки	45
3.2 Консультационное программное обеспечение для подбора параметров сварочного пучка	50
Заключение	54
Список литературы	55

Введение

В ИЯФ СО РАН в области электронно-лучевых технологий (ЭЛТ) ведется разработка как отдельных комплектующих, так и укомплектованных экспериментальных стендов и электрофизических установок. Одной из наиболее востребованных из их числа для выполнения внутренних производственных заказов и проведения научно-исследовательских работ с использованием электронного пучка остается установка электронно-лучевой сварки (ЭЛС) [6]. Для ЭЛС характерна высокая плотность мощности и небольшой поперечный размер пучка. Таким образом, технология позволяет получить глубокий проплав при малом объеме расплава в сравнении с другими видами сварки. Помимо выполнения сварочных работ, установка ЭЛС является универсальным инструментом для решения различных задач поскольку является достаточно укомплектованной, обладает широким спектром настраиваемых параметров, быстро выходит на рабочий режим и в случае необходимости имеет возможности для подключения дополнительного оборудования. К таким задачам можно отнести плавку деталей и порошков широким модулированным пучком, производство не повреждающей чистки изделий в результате нагрева пучком с малой плотностью мощности, проведение экспериментов по 3D-печати, тестирование новых элементов магнитной оптики и др.

Поэтому прежде всего на установке ЭЛС регулярное проведение диагностики необходимо для настройки требуемого распределения пучка, повторения ранее подобранного режима сварки или условий для серии научных экспериментов. Из-за чувствительности электронного пучка к любым изменениям в параметрах магнитной оптики и электростатики важна повторяемость не самих значений параметров, а сохранение качества пучка при их изменении.

В данной работе описывается разработка системы автоматической подстройки параметров магнитной системы установки ЭЛС и прототипов различных диагностических устройств, которые могут быть интегрированы в подсистему диагностики и контроля качества электронного пучка. Работа состоит из 3 глав.

В первой главе описаны физические основы электронно-лучевой обработки материалов, имеющие место на установке ЭЛС.

Во второй главе перечислены диагностические устройства, которые были разработаны в ходе выполнения данной работы.

В третьей главе описаны система автоматического подбора параметров магнитной оптики и первая версия консультационной части программного обеспечения для получения параметров сварочного пучка.

В заключении приводится краткое перечисление результатов работы.

Цель работы и основные положения, выносимые на защиту

Для ускорения и повышения точности настройки перед проведением работ на установке ЭЛС с прямонакальным катодом и контроля качества формируемого электронного пучка требуется разработать систему, которая позволит в автоматическом режиме подбирать параметры оптической системы в зависимости от предъявленных требований к пучку.

В рамках данной работы были исследованы и проанализированы особенности установки, определены возможности для разработки системы с частичной автоматизацией, позволяющей подобрать значения параметров магнитной оптической системы для минимизации aberrаций электронного пучка. С учетом выявленных особенностей было принято решение о том, в каком виде будет реализована функция подбора рабочих режимов для обработки материалов и выполнения других работ.

На защиту выносятся следующие положения:

- Разработаны и протестированы прототипы диагностических устройств для определения плотности мощности, размера, точки фокусировки, угла наклона и положения пучка; прототипы устройств для определения температуры в области сварного шва и наличия проплава на рентгеновском излучении. Обозначены планы дальнейших работ по каждому из них.
- В рамках разработки системы коррекции aberrаций была разработана подсистема для автоматического подбора оптимальных значений параметров элементов магнитной оптики с их последующей уставкой.
- Была разработана первая версия консультационной части программного обеспечения для операторов установки. Вычислительные алгоритмы созданы на основе экспериментально полученных данных оптимальных параметров оптики при различных режимах работы установки и набранной статистики по режимам сварки различных материалов.

Глава 1 Физические основы электронно-лучевой обработки

Электронно-лучевые технологии занимают важное место в современной промышленности благодаря своим уникальным особенностям, выделяющим их из большого разнообразия технологий обработки материалов[11]. В качестве энергоносителя используется электронный пучок, энергии которого достаточно для проплавления тугоплавких металлов и деталей толщиной до сотен миллиметров. Работы по обработке металлов, как правило, производятся в технологическом вакууме, что гарантирует высокую чистоту производимых изделий. Стабильный и равномерный проплав в режиме постоянного тока обеспечивает качественные сварные швы, которые удовлетворяют требованиям к вакуумной плотности компонентов ускорительных и плазменных комплексов. [13]

В текущей главе описаны особенности генерации, формирования и ускорения электронного пучка, которые помогают улучшить понимание физических процессов, используемых в работе установок ЭЛТ. Дается краткое описание основных оптических элементов, которые используются на установках для фокусировки и отклонения пучка в лучепроводе. Перечислены основные характеристики электронного пучка и их влияние на его качество. Дается краткое описание физических процессов, происходящих в материале под воздействием электронного пучка в процессе электронно-лучевой обработки.

1.1 Получение электронного пучка

В электронных пушках генерация пучка свободных электронов происходит за счет явления электронной эмиссии с катода. Различают следующие виды эмиссии: термоэлектронную (дополнительная энергия сообщается электронам в результате нагрева катода), фотоэлектронную (на

поверхность катода воздействует электромагнитное излучение), вторичную электронную (является результатом бомбардировки катода потоком электронов или ионов,двигающихся с высокими скоростями), электростатическую (сильное электрическое поле у поверхности катода создает силы, способствующие выходу электронов за его пределы). Для получения стационарных электронных пучков наиболее широко применяется термоэлектронная эмиссия. В качестве материалов для катодов чаще всего применяют вольфрам, тантал, а также гексаборид лантана. Выбор материала для изготовления катода определяется его эмиссионной способностью с учетом уровня давления и состава остаточных газов в электронной пушке. Достижимая плотность тока эмиссии этих катодов (плотность тока насыщения) зависит от температуры согласно закону Ричардсона-Дэшмана [1]:

$$J = (1 - R) AT^2 e^{-\frac{A_v}{kT}},$$

где R - коэффициент отражения электронов на границе тело-вакуум, A – термоэмиссионная постоянная Зоммерфельда, T - температура, A_v - работа выхода электронов из катода, k - постоянная Больцмана.

Значение тока, которое можно рассчитать по формуле Ричардсона-Дэшмана, достигается только в том случае, если все эмитирующие электроны сразу же удаляются от катода электростатическим ускоряющим полем пушки. Если напряженность поля вблизи катода недостаточна, чтобы удалить от него все эмитированные электроны, то перед катодом образуется облако электронов, также называемое виртуальным катодом. Его пространственный заряд изменяет картину поля таким образом, что поле ограничивает эмиссию электронов с поверхности катода [2]. Плотность тока эмиссии J, ограниченного пространственным зарядом, определяется по закону Чайлда-Ленгмюра:

$$J = 2,3 \cdot 10^{-6} KU^{3/2},$$

где U – ускоряющее напряжение между катодом и анодом, K – коэффициент, зависящий от геометрии, см^{-2} . Если напряженность поля вблизи поверхности катода достигает 10^6 В/см или превышает это значение, то электроны можно извлекать и из холодного катода посредством автоэлектронной эмиссии, как например в работе [8].

Электростатическое поле между катодом и анодом позволяет сформировать и ускорить электронный пучок, и затем направить его к детали. Помимо диодных конструкций пушек существуют пушки с дополнительными электродами, которые могут выполнять функцию второго анода, апертурных диафрагм, фокусирующих и ускоряющих электродов. Электростатическая фокусировка аксиально-симметричных пучков может осуществляться сеточными линзами; линзами, образованными коаксиальными цилиндрическими электродами; линзами, образованными плоскими электродами в виде диафрагм с отверстиями; иммерсионными объективами; смешанными системами (линзы и цилиндры, цилиндры и конические электроды).

В пушках с одним дополнительным электродом между катодом и анодом предварительная фокусировка происходит за счет влияния этой системы как иммерсионной линзы. Классической реализацией этой идеи является триодная пушка с управляющим (или “запирающим”) электродом, и регулировка тока пучка осуществляется путем изменения потенциала управляющего электрода. Отрицательное напряжение на управляющем электроде относительно катода запирает часть электронов в прикатодной области, таким образом уменьшая размер электронного пучка.

1.2 Проведение электронного пучка к образцу

Проведение электронного пучка от области его генерации к месту взаимодействия с материалом происходит по лучепроводу. В канале

лучепровода для уменьшения поперечного размера пучка применяются различные фокусирующие системы, т.к. в отсутствие внешних фокусирующих полей электронный пучок расширяется. Его размер можно ограничить, разместив вдоль его пути фокусирующие линзы. Размер пучка при этом будет не постоянен вдоль оси - радиус огибающей будет иметь максимумы в области линз, и минимумы - в промежутках между ними. Прежде всего, главными задачами при этом становятся компенсация расширения пучка и преодоление пучком канала с минимальными потерями, а потом уже получение пучка в конечной точке с минимально возможным размером.

Для корректировки параметров электронного пучка применяются элементы магнитной оптики. Для аксиально-симметричной системы поля как электрические, так и магнитные, должны удовлетворять двум условиям: они должны обладать круговой симметрией, а степень отклоняющего воздействия при фокусировке должна возрастать с увеличением расстояния от оси, а на самой оси равняться нулю. Для того, чтобы последнее условие соблюдалось в реальных пушках, помимо фокусирующих используются системы с возможностью подстройки (корректоры) для отклонения или параллельного переноса пучка, которые позволяют совмещать центр пучка с осью линзы.

Простейшим вариантом для фокусировки пучка может быть магнитное поле, создаваемое соленоидальной катушкой, намотанной вокруг лучепровода. На электрон, влетающий в область магнитного поля с прицельным параметром p , начинает действовать сила Лоренца, направленная перпендикулярно направлению движения электрона и направлению к центру катушки. Величина этой силы тем больше, чем больше параметр p . В результате электрон начинает двигаться по спирали, вылетает из соленоида с меньшим прицельным параметром и ненулевой компонентой скорости, направленной к центральной оси. На некотором

расстоянии от катушки пучок достигает своего минимального размера. В зависимости от величины тока, протекающего по катушке, меняется величина магнитного поля и фокусное расстояние катушки.

Другой вариант исполнения модуля фокусировки представляет собой пару квадрупольных линз, повернутых друг относительно друга на 90 градусов. Каждая линза создает фокусирующее поле по одной координате и дефокусирующее по другой. Установленные друг за другом в целом линзы позволяют фокусировать пучок по обеим координатам. В работе [10] показано, что в некоторых случаях предпочтительней использовать системы квадрупольной фокусировки.

Помимо корректировки положения пучка, возможность отклонять пучок требуется в системах модуляции пучка, когда пучок под действием переменного магнитного поля описывает некую фигуру на поверхности обрабатываемого образца, и при проведении экспериментов, где требуется исключить прямую видимость области воздействия пучка на материал со стороны катодного узла. Также возможно использование магнитных корректоров в случае необходимости компенсации паразитных магнитных полей.

Есть множество вариантов исполнения магнитных корректоров, основывающихся на применении диполей сложной формы для каждой из координат корректора. Однако, одним из наиболее идеологически простых корректоров является косинусный корректор, обеспечивающий равномерность магнитного поля в области воздействия на пучок [12]. Корректор устроен таким образом, что распределение плотности намотки витков есть косинус угла для каждой конкретной точки корректора. Двухкоординатный корректор может произвольным образом модулировать пучок посредством формирования управляющих сигналов для него. Частота перемещения пучка по детали ограничена сверху, помимо технических параметров системы развертки, вихревыми токами,

возникающими в лучепроводе.

При разработке методов увеличения срока службы катодов [15] одна из идей заключается в том, чтобы убрать прямую видимость между областью формирования пучка и точкой взаимодействия пучка с образцом для того, чтобы вылетающие в обратном направлении ионы не попадали в электростатическое поле, которое точно также ускоряло бы их и направляло в катод, постепенно его разрушая. Для этого реализуются различные магнитные элементы, в том числе, обладающие ахроматическими свойствами альфа-магниты [4].

1.3 Характеристики электронного пучка

В зависимости от области применения электронного пучка, его основные характеристики зависят от параметров источника электронов и особенностей конструкции пушки.

Для получения пучков с высокой мощностью используются большие токи, и это приводит к резкому увеличению собственного пространственного заряда пучка. Пространственный заряд в свою очередь оказывает существенное влияние на динамику частиц электронного пучка. Параметром, характеризующим влияние пространственного заряда, является первеанс пучка:

$$P = I / U^{3/2}$$

Если первеанс пучка меньше $10^{-7} \text{ A/V}^{3/2}$, то считается, что на практике влиянием его пространственного заряда можно пренебречь. На промышленных установках в области ЭЛТ первеанс используемых электронных пучков принимают широкий диапазон значений. К примеру, в установках ЭЛС, где пучки должны обладать большой мощностью (~ десятки-сотни киловатт) и при этом иметь минимальные поперечные размеры в точке фокусировки, первеанс принимает значения в пределах

0.01 - 2.0 мкА/В^{3/2}. На установках электронно-лучевой плавки, требующих пучки еще более высокой мощности (~ сотен киловатт), первеанс находится в диапазоне 1-10 мкА/В^{3/2}.

Первеанс принято считать наиболее удобным параметром для сравнения между собой различных пушек. Это объясняется тем, что величина первеанса не зависит от геометрических размеров и абсолютных значений потенциалов электродов пушки, а зависит только от формы самих электродов и относительных напряжений между ними.

Часто при разработке электронных пушек для ЭЛТ стремятся добиться таких рабочих режимов, при которых полный ток может принимать большие значения при сравнительно небольших ускоряющих напряжениях. Такой подход позволяет создавать установки, которые позволяют выполнять широкий спектр производственных работ, однако при получении пучков с большими токами, первеанс увеличивается до значений, при которых пространственный заряд приводит к чрезмерному расширению пучка, осаждению его части на аноде и, как следствие, нарушению токопрохождения. От величины первеанса в значительной степени зависит распределение потенциалов и скоростей частиц в пучке.

Все частицы электронного пучка в каждый момент времени обладают определенным положением x, y, z и импульсом (p_x, p_y, p_z). Согласно теореме Лиувилля, объем в шестимерном пространстве координат-импульсов всех частиц является инвариантом для стационарной комбинации электрического и магнитного полей [2]. В случае рассмотрения поперечного движения обычно переходят от рассмотрения частиц в пространстве координат-импульсов к рассмотрению в пространстве координат x и углов распространения $x' = \frac{p_x}{p_0}$.

Эмиттанс пучка: $\varepsilon_x = \frac{1}{\pi} \iint dx dx'$ является надежной характеристикой качества пучка, которая позволяет оценить его форму и угловую

расходимость. Поскольку эмиттанс не сохраняется при изменении энергии пучка, часто для описания движения пучка используют нормализованный эмиттанс: $\varepsilon_{nx} = \beta\gamma \cdot \varepsilon_x$

На практике пучки имеют сложный характер распределения на фазовой плоскости и принято определять некоторый процент площади, занимаемой пучком. Частицы могут быть рассмотрены как статистическое распределение со средними значениями $\langle x \rangle$ и $\langle x' \rangle$, а эмиттанс в таком случае определяется по стандартным отклонениям от средних значений (среднеквадратичный эмиттанс):

$$\varepsilon_{RMSx} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

Одной из причин, вызывающих нарушение формирования потока, является действие начальных тепловых скоростей электронов. Если магнитное поле в пушке отсутствует, то такие скорости приводят к увеличению размеров пучка и к перераспределению плотности тока. Электроны, эмитированные накалимым катодом, обладают определенными начальными тепловыми скоростями. Эти скорости тем больше, чем выше температура катода. Тепловые электроны вылетают с катода под всевозможными углами. В числе их имеются электроны, вылетающие параллельно или почти параллельно поверхности катода. Разброс термоэлектронов по скоростям на катоде приводит к росту эмиттанса, обычно называемым термоэмиттанс. Если считать, что распределение по скоростям соответствует распределению Максвелла, то термоэмиттанс рассчитывается: $\varepsilon_t = \sigma_x \sqrt{\frac{kT}{mc^2}}$.

Кроме того, существуют анодные aberrации из-за того, что эквипотенциальные поверхности проваливаются за анодную область. Это приводит к тому, что анодное отверстие действует как дефокусирующая линза, при этом характер изменения силы этой линзы в зависимости от

расстояния от оси имеет нелинейности высокого порядка, что затрудняет численные расчеты. Для компенсации этого явления существуют различные модификации конструкций пушек, например, может использоваться сферическая модель пушки с уменьшенным радиусом кривизны катода.

Прирост эмиттанса осуществляется за счет неидеальности оптики пушки как области формирования, так и в области канала лучепровода. Соответствующий вклад в эмиттанс может быть оценен с помощью программного моделирования. Все факторы, влияющие на рост эмиттанса невозможно полностью убрать в реальных пушках. Однако в литературе можно найти способы для подавления каждого из них тем образом, чтобы получить качественный пучок в точке его воздействия на детали.

1.4 Взаимодействие электронного пучка с веществом

При энергии электронов до 100 кэВ между электронами и атомами вещества происходят упругие и неупругие столкновения. При упругих столкновениях направление движения электрона изменяется, и он проникает глубже в материал, либо отражается. При неупругих столкновениях энергия может уйти на возбуждение атомов обрабатываемого вещества, а также на излучение.

В зависимости от параметров электронного пучка (ускоряющее напряжение, ток, ток фокусировки, время воздействия) меняются скорость введения энергии в материал и объем, в котором она выделяется. Различия между процессами электронно-лучевой обработки материалов обуславливаются различиями в наборах этих параметров.

Несмотря на то, что глубина проникновения электронов в вещество невелика, сварные швы, полученные по электронно-лучевой технологии, обладают большой глубиной проплавления и самым большим отношением глубины проплавления к ширине шва среди всех других технологий сварки.

Это объясняется появлением в зоне воздействия пучка кинжалообразного парогазового канала, перемещаясь по которому, электроны могут достигать значительных глубин в материале. Формирование парогазового канала сопровождается достаточно сложными процессами, такими как локальные перегревы и взрывное вскипание материала, периодические перемещения зоны взаимодействия пучка с металлом по глубине канала и смыкание канала в верхней части, и образование волн на поверхности расплава [3].

На рисунке 1.1 схематично изображены процессы, происходящие в парогазовом канале. Электронный пучок плавит материал и заглубляется внутрь (см. Рисунок 1.1 а), после чего вызывает интенсивное испарение на дне канала с образованием потока пара V . Реактивная отдача пара создает давление на расплав. Происходит постепенное заглубление пучка вместе с поверхностью, на которую он падает в образовавшийся канал (см. Рисунок 1.1 б). Часть вводимой в материал энергии идет на испарение, а часть отводится из зоны воздействия пучка за счет теплопроводности по материалу, а также за счет разнообразных излучений (переизлученные электроны, термоэлектроны, фотоны, рентгеновское излучение). Боковые стенки канала удерживаются давлением пара P_v (см. Рисунок 1.1 в). Поток пара препятствует охлаждению в канале, т.к. пар конденсируется на поверхности стенок канала. Парогазовый канал устойчиво существует и продолжает углубляться пока тепловой энергии пара достаточно для поддержания температуры стенок на том уровне, при котором давление пара противодействует капиллярным силам, стягивающим канал. При этом по мере заглубления уменьшается количество пара, выходящего из канала, поскольку все большая его часть конденсируется на боковой поверхности. В момент поглощения пара стенками исчезает давление пара в верхней части, противодействие капиллярным силам прекращается и происходит схлопывание канала (см. Рисунок 1.1 г). Без воздействия электронного пучка прекращается испарение со дна и может образоваться полость, если материал охлаждается быстрее, чем сила капиллярного давления стенок

заполнит его расплавом. Повторное заглубление пучка и образование канала может залить эту полость расплавом (см. Рисунок 1.1 д). Вероятность этого зависит от материала, скорости сварки и периода колебаний глубины парогазового канала.

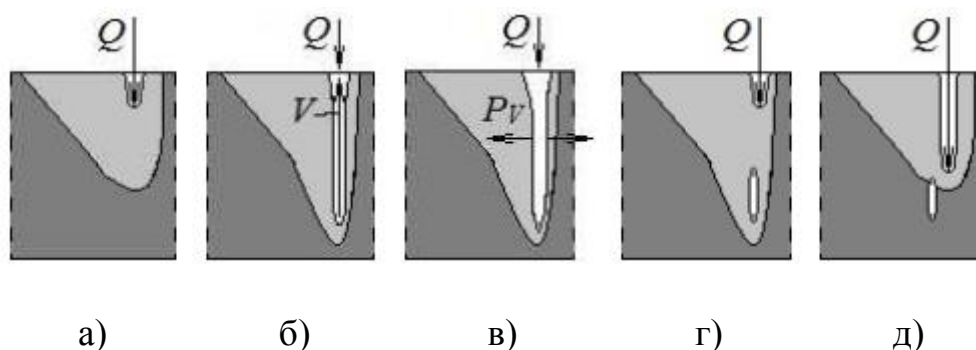


Рисунок 1.1 – Стадии формирования парогазового канала и пример образования полости [18, 22].

Технологическим приемом, способствующим повышению устойчивости парогазового канала за счет изменения его формы, является модуляция пучка/фокуса. Развертки электронного пучка могут иметь различные траектории (линейные, круговые, формы с повышенным энерговыделением в области шва и др.). В литературе описано применение множества различных разверток, однако нельзя однозначно определить рекомендации по выбору их траекторий. [19 - 21]

Глава 2 Диагностика пучка на установке ЭЛС

Электронная пушка установки ЭЛС, разработанная в ИЯФ СО РАН, предназначена для генерации электронного пучка с регулируемой энергией и размерами, перемещением в зоне обработки детали по двум поперечным координатам, включая параллельный перенос пучка. Ускоряющее напряжение составляет 60 кВ, при установке дополнительной радиационной защиты может быть увеличено до 65 кВ. Полный ток электронного пучка может достигать 750 мА. На рисунке 2.1 показана схема электронной пушки установки ЭЛС.

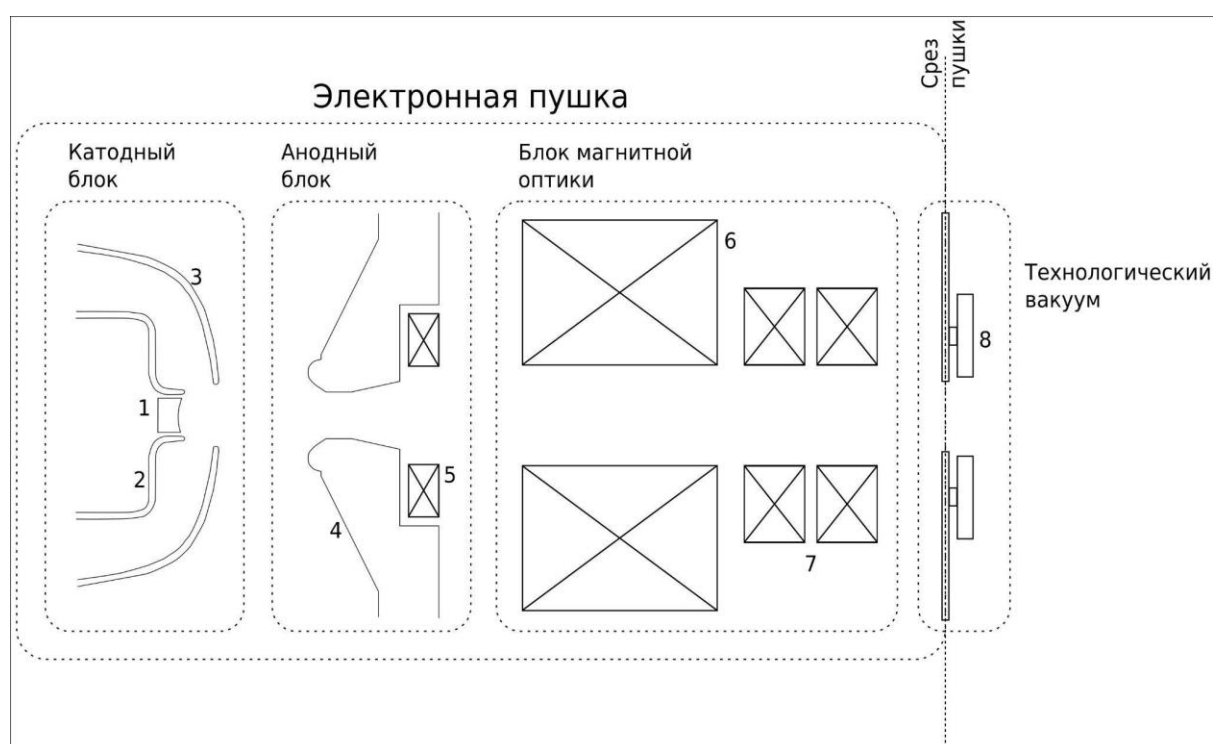


Рисунок 2.1 – Схема электронной пушки: 1 – катод, 2 – прикатодный электрод, 3 – запирающий электрод, 4 – анод, 5 – двухкоординатный анодный корректор, 6 – фокусирующая линза, 7 – двухкоординатные магнитные корректоры, 8 – электрод вторичной эмиссии.

Эмитирующая поверхность катода выполнена из танталовой фольги толщиной 0.2 мм и имеет круглую вогнутую форму. Катод разогревается проходящим через него током накала до температуры свыше 2000°С. Быстрое управление величиной тока пучка осуществляется подачей на

запирающий электрод отрицательного относительно катода напряжения величиной до 4 кВ. Катод, прикатодный и запирающий электроды смонтированы в одном узле, конструкция которого является быстроразборной. В области за катодным блоком в случае замены катода пушка разбирается и снимается ее верхняя часть вместе с катодным блоком. В оставшейся части пушки находится анодный блок, который включает в себя анод и магнитный корректор, предназначенный для компенсации магнитного поля тока накала катода, – двухкоординатный анодный корректор.

Далее за анодным блоком располагается блок магнитной оптики, который обеспечивает фокусировку и отклонение луча во всех режимах работы прибора. Фокусировка электронного пучка осуществляется аксиальной магнитной линзой. За фокусирующей линзой располагается пара двухкоординатных отклоняющих катушек (корректоры), каждая из которых обеспечивает отклонение пучка в телесном угле 7° от оси. Каждый корректор состоит из двух косинусных обмоток с ферритовым экраном, что обеспечивает хорошую однородность поля внутри большой апертуры. Отклоняющие катушки имеют небольшую индуктивность, что позволяет модулировать пучок с частотой до 2 кГц.

На выходном фланце электронной пушки размещен изолированный от корпуса кольцевой электрод для сбора вторичных электронов. Данный электрод используется в системе поиска стыка деталей при настройке процесса сварки [7]. Этой системой генерируется пилообразный сигнал и передается на магнитный корректор. С электрода снимается ток вторичных и отраженных электронов, изменяющийся в зависимости от рельефа сканируемой поверхности. В результате отображается карта поверхности, на которой четко виден стык между свариваемыми деталями.

Обработка деталей производится в технологическом вакууме, создаваемом в цилиндрической вакуумной камере длиной 3.5 м и диаметром 98 см. [6] Свариваемые детали располагаются на двухкоординатном подвижном столе, который при необходимости дополняется системой перемещения с третьей координатой (изменение высоты или ось вращения).

Электронная пушка установки ЭЛС обладает широким спектром настраиваемых параметров, однако существуют некоторые особенности, которые необходимо учитывать при выборе режима работы.

Использование прямонакального катода с постоянным током накала наряду с преимуществами (долгий срок службы, упрощение конструкции пушки) влияет на формирование пучка негативным образом, т.к. вблизи эмитирующей поверхности создается магнитное поле, которое отклоняет электроны от оси. Другими эффектами, приводящими к расталкиванию, являются пространственный заряд и рассеяние пучка на анодной линзе, но в данной работе они не рассматриваются. Напряженность электрического поля вблизи катода в триодной пушке регулируется как ускоряющим напряжением, так и потенциалом запирающего электрода. При работе в диодном режиме (0 кВ на запирающем электроде относительно катода), плотность тока эмиссии с катода описывается законом трех вторых с предельным ограничением по максимальному току, определяемым температурой катода. С увеличением напряжения на запирающем электроде уменьшается область эмитирующей поверхности путем подавления эмиссии с краев. Таким образом, размер электронного пучка уменьшается, снижается количество электронов, эмитировавших под углом с краев катода, что в совокупности улучшает качество пучка. При этом для получения пучков с большим полным током требуется повысить температуру катода (поднять ток накала) для ослабления ограничений по

плотности тока эмиссии. Большинство сварочных работ и научных исследований на установке проводятся с током пучка до 100 мА, при этом на запирающий электрод подается напряжение порядка 2-3 кВ при умеренном подогреве катода. Однако в случае, если необходимо получить пучок с током свыше 200 мА поднятие тока накала до значений, которые превысят рабочее напряжение накала, приведет к выходу из строя катода, поэтому приходится снижать потенциал на запирающем электроде для увеличения эмитирующей области. Это позволяет получить больший ток с катода, но в целом негативно сказывается на качестве пучка.

Конструкция пушки с прямонакальным катодом требует инструмента для компенсации отклонения пучка, вызванного магнитным полем при различных значениях тока накала. Катоды, используемые в этой пушке, изготавливаются вручную и имеют небольшие различия в форме, которых достаточно для того, чтобы создавать различные магнитные поля при тех же значениях тока накала, а также различия в радиусах скругления эмитирующей поверхности влияют на динамику пучка в самом начале траектории движения. Кроме того, на качество пучка оказывают влияние погрешности в изготовлении и сборке конструкции пушки, а также неточности позиционирования катодного узла при замене катода влияют на положение пучка в лучепроводе. Для корректной работы фокусирующей магнитной линзы необходимо позиционировать пучок таким образом, чтобы его центр совпадал центральной осью фокусирующей катушки. Для выполнения этой задачи используется двухкоординатный анодный корректор.

Для моделирования динамики пучка в электронных пушках, разрабатываемых в лаборатории, используются расчетные программы WinSAM и CST. Теоретические расчеты необходимы для оценки и сравнения возможных способов реализации того или иного решения

поставленной задачи, а также без них нельзя разработать качественную конструкцию пушки. Однако для достаточно точного сопоставления уже существующей пушки с ее моделью не хватает как программных возможностей, так и в целом полного понимания того как учитывать в теоретической модели все особенности реальной пушки. Поэтому достаточно достоверная информация о пучке, сформированном в существующей пушке, может быть получена только в результате множества экспериментальных измерений. Несмотря на это, теоретический расчет в той или иной мере совпадающий с экспериментально полученными в процессе диагностики измерениями может быть полезен для качественного понимания процессов, происходящих на уже работающей установке.

Согласно численным расчетов динамики пучка в пушке [5], характеристики пучков с полным током до ~ 30 мА имеют схожую зависимость от входных параметров. Это было экспериментально подтверждено для пучка с током до 8 мА (ограничения диагностических устройств). Однако известно, что поведение пучка меняется и его качество ухудшается при увеличении его тока. Поскольку многие сварочные работы выполняются в диапазоне токов 30-100 мА, в дополнение к диагностике пучка с малыми токами требуется диагностика с большими токами. Большинство методов диагностики, которые были предложены для этой цели, перечислены и описаны в текущей главе. Также описаны соответствующие инструменты для проведения различных диагностик, а именно устройства для измерения: плотности мощности, размера, положения точки фокусировки, угла наклона и положения пучка, температуры в зоне сварки, интенсивности рентгеновского излучения для определения наличия проплава. На рисунке 2.2 показана схема расположения разработанных диагностических устройств в вакуумной камере установки ЭЛС.

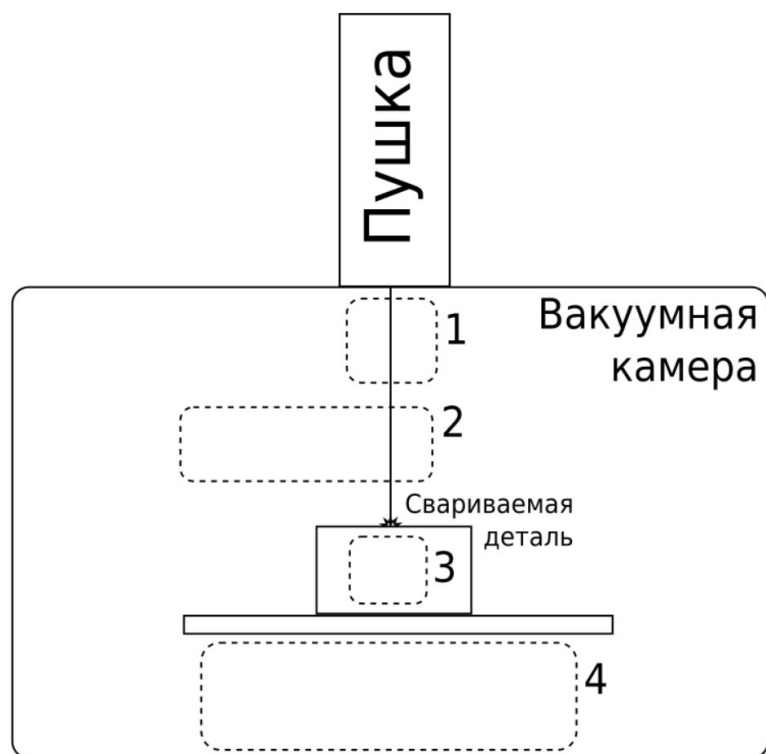


Рисунок 2.2 – Схема расположения диагностических устройств, описанных в текущей главе: 1 – Зона для размещения устройства для определения положения и угла наклона пучка (см. Раздел 2.2), и в перспективе - зона для размещения магнитоиндукционного датчика положения пучка (см. Раздел 2.6), 2 – Зона для размещения цифровой видеокамеры для определения положения точки фокусировки пучка (см. Раздел 2.3) и пирометра для определения температуры в зоне сварки (см. Раздел 2.5), 3 – Зона для размещения цилиндра Фарадея с микроотверсием (см. Раздел 2.1), 4 – Зона для размещения датчика проплава (см. Раздел 2.4).

2.1 Устройство для измерения плотности мощности

Материал данного раздела частично опубликован в работе [23].

Обоснование выбора конструкции устройства

Наиболее простые и широко применяемые устройства для измерения тока и получения проекций распределения тока в одной плоскости (профиля) пучка – это контактные, такие как щелевые детекторы, проволочные датчики и т.д. При использовании устройств такого типа информация о профиле пучка определяется из известной скорости перемещения устройства относительно пучка, геометрии

устройства и измеренного времени воздействия пучка на датчик. [15]

Для задачи получения пространственного распределения плотности мощности из упомянутой группы устройств наиболее подходящим приемником тока можно считать цилиндр Фарадея в силу его высокой точности измерения тока. Решение о конструкции исходного устройства было принято на основании того, что планировалось проводить измерения при том же токе пучка, при котором происходит настройка перед сваркой. Благодаря малой принимаемой мощности небольшие размеры устройства позволяют ему находиться в вакуумной камере постоянно и не создают помех при параллельном проведении сварочных работ.

В качестве материала маски наиболее подходящим был признан графит. Графит обладает высокой температурой плавления, что позволяет ему продолжительное время подвергаться воздействию пучка. Графит обладает малым коэффициентом отражения электронов (~ 0), что означает отсутствие искажения сигнала (например, медные маски давали плохое отношение сигнал/шум). Графит легко обработать и придать ему любую форму, и это также позволяет в случае повреждения быстро изготовить деталь на замену.

В результате в качестве маски для системы измерения распределения плотности мощности была выбрана графитовая пластина с симметричным относительно центра круглым отверстием диаметром 0.1 мм.

Метод проведения измерений

Развертка пучка в плоскости диафрагмы задается магнитной системой путем периодического отклонения пучка корректорами, что позволяет выделить и измерить ток малой части пучка, проходящей через диафрагму. (См. Рисунок 2.3)

Положение пучка относительно отверстия контролируется показаниями АЦП ($U_{рез}$), который подключен к шунту R цилиндра Фарадея. В системе поиска стыка эти же показания АЦП используются для измерения напряжения на электроде вторичной эмиссии и наблюдения карты поверхности. Собранные массивы данных в процессе сканирования записываются в отдельный текстовый файл. Считая сопротивление резистора постоянным, находим ток в каждой точке $U_{рез}(x) = I(x)R$.

Аналитически ток пучка рассчитывается по формуле:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y) dy,$$

где $I(x)$ – мгновенный ток цилиндра, а $J(x, y)$ – распределение плотности тока в пучке на единицу площади поверхности.

Затем, распределение мощности в пучке рассчитывается с учетом того, что ускоряющее напряжение является постоянным, согласно формуле:

$$P(x, y) = J(x, y)U_{уск}$$

Диагностика пучка проводится с током пучка 1-8 мА, поскольку больший ток может разрушить устройство.

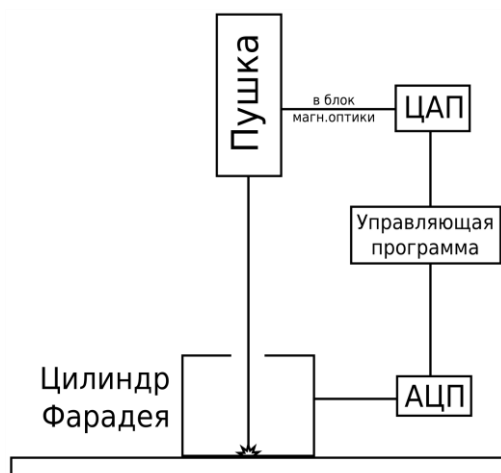


Рисунок 2.3 - Схема проведения измерений

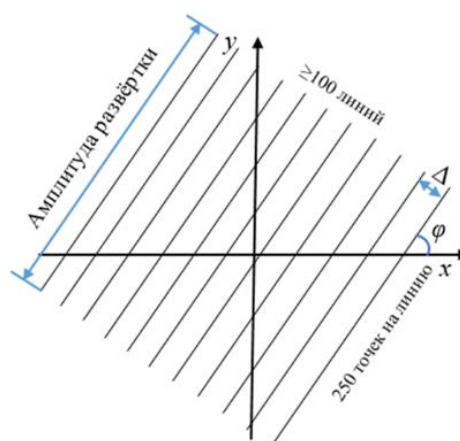


Рис. 2.4 - Сканирующая развертка пучка

Для формирования сканирующей развертки пучка используется система формирования разверток, применяемая также для поиска стыка [6, 7]. Значения тока в паре магнитных корректоров задаются через ЦАП. Значения, подаваемые на ЦАП, задаются периодической функцией, написанной на функциональном языке Elixir с плавным изменением тока (до 500 точек) в одном направлении и последовательным смещением в другом. Значения падения напряжения на резисторе, пройдя через усилитель, считываются с АЦП для каждой точки. Развертка формирует симметричный пилообразный сигнал, с последующим перемещением на шаг (Δ), величина которого задается пользователем (см. Рисунок 2.4). Помимо шага перемещения развертки, пользователем задаются такие параметры как угол поворота (φ) и амплитуда сканирующей развертки. В основе функции развертки лежит формула матрицы поворота. Для обработки и отображения данных используется среда разработки Python Spyder.

Получение распределения плотности тока пучка

Сканирование производится по растру 250 точек на линию, ~100 линий на каждую проекцию. После окончания сканирования в цикле можно запустить изменение одного из параметров сканирования (угол φ) или установить изменение параметров магнитной оптики.

Шумы в сигнале единичного сканирования в начальных экспериментах были достаточно велики, потому в исполняющую функцию развертки был добавлен параметр, управляющих количеством проходов по одной скан-линии для того, чтобы таким образом набирать статистику, что в значительной мере позволяло уменьшить шумы. Позже было реорганизовано заземление всех элементов установки, что позволило минимизировать шумы даже при единичном сканировании.

Предполагается, что с течением времени распределение энергии в пучке одинаково. Однако, чтобы избежать возможных ошибок, тем не менее, необходим набор статистики в том случае если был скачок энергии для усреднения флуктуаций. Для получения достоверных данных количество повторов в существующей системе должен быть не менее 3. Набор данных полного сканирования пучка с ≥ 100 линий сканирования для получения одной проекции таким способом занимает около 1 мин. На рисунке 2.5 показан пример построения распределения плотности тока. По полученным данным был вычислен минимальный достижимый размер пучка с полным током ~ 2 мА и он составил 0.45 мм в диаметре. Также были рассчитаны пиковые значения плотности мощности - 18 кВт/см².

В главе 3 описано применение данного устройства при создании системы автоматического подбора параметров магнитной оптики.

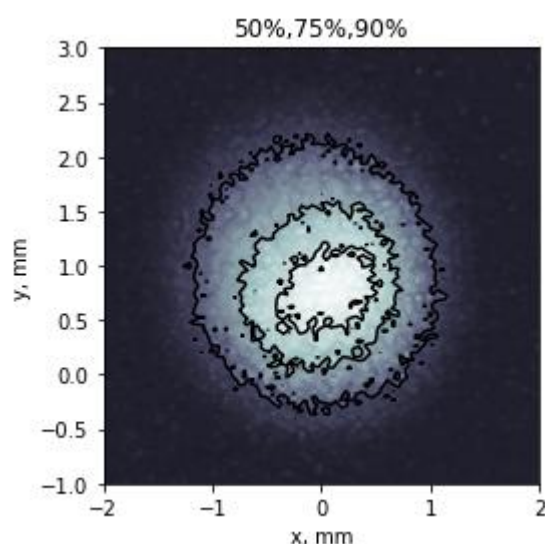


Рисунок 2.5 - Пример построения распределения плотности тока в отсчетах АЦП с обозначением уровней сигнала 50%, 75 % и 90%

2.2 Устройство для определения положения и угла наклона пучка

В связи с разработкой новых электронных пушек, а также потребностью в инструменте для проверки существующих, возникла задача

разработки концепции универсального устройства для определения точного положения и угла пролета пучка в лучепроводе, пригодного для электронной пушки установки ЭЛС, а также для схемы с альфа-магнитом, где отклонения практически не допускаются. Для этой цели было предложено небольшое диагностическое устройство, размещаемое на выходе внутри лучепровода, как показано на схеме на рисунке 2.6. Устройство состоит из независимой отклоняющей катушки (двухкоординатный корректор) и электродов - приемников пучка, расположенных дальше по направлению движения пучка. Центральная область свободна для пролета пучка. Общая информация о концепции устройства и описания первых прототипов опубликованы в работе [23].

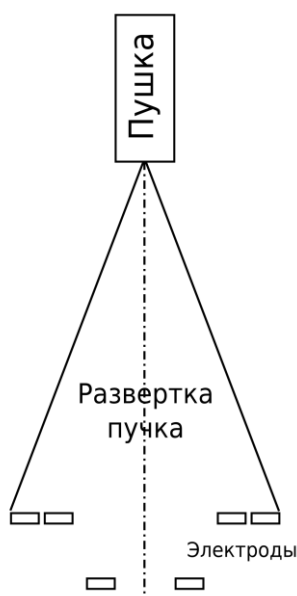


Рисунок 2.6 – Схема расположения устройства для определения положения и угла пролета пучка.

Был изготовлен и испытан прототип этого устройства для обеих осей магнитного корректора с тремя медными электродами-кольцами, симметрично расположенными относительно центра (см. Рисунок 2.7).

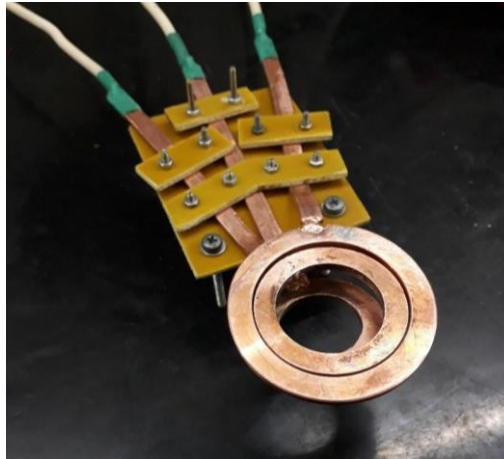


Рисунок 2.7 – Прототип с тремя медными электродами-кольцами

В ходе испытаний задавалась функция развертки пучка с током 1-2 мА с частотой 2,2 Гц. Для минимизации шумов используется схема с RC фильтрами второго порядка, а также программное усреднение. Разрешение конструкции для определения положения пучка оказалось достаточно хорошим и составило 10 мкм (См. Рисунок 2.8 а, б). На рисунке сигнал с центрального электрод показан желтым цветом, следующего электрода - фиолетовым, внешнего электрода - бирюзовым. Курсоры установлены в положении, соответствующем крайним точкам развертки на внешнем электроде, и перемещение пучка на 10 мкм соответствует $\Delta V_{2-1} = 6 \text{ mV}$.

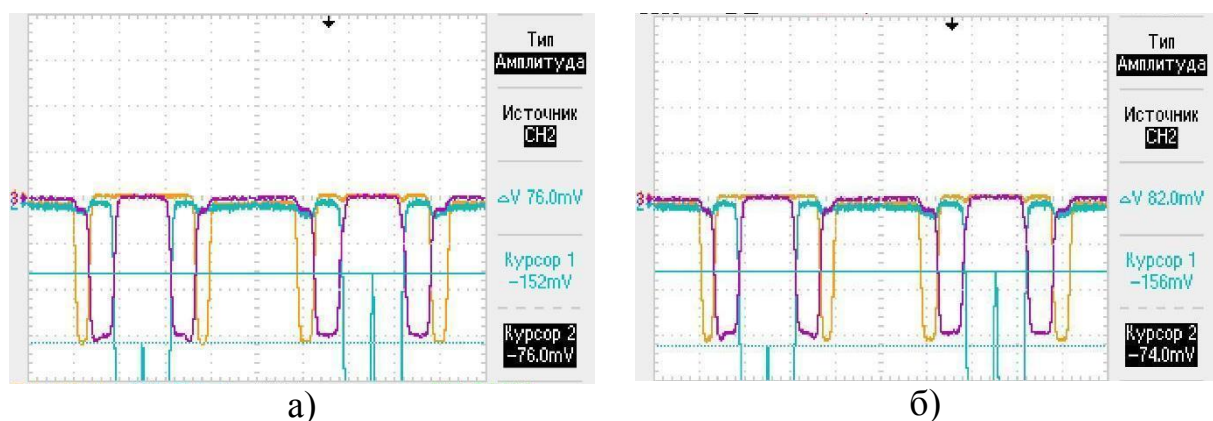
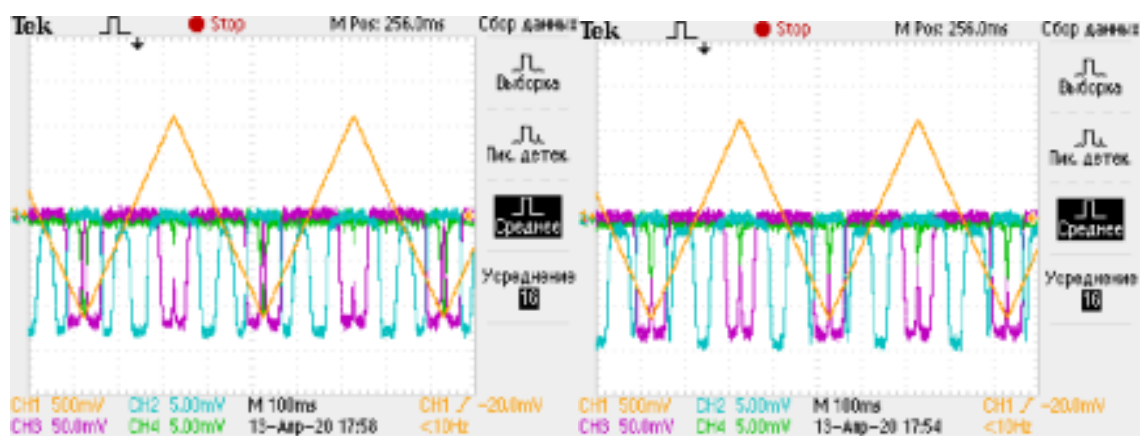


Рисунок 2.8 – Измерения уровня сигнала на границе электрода, а) начальное положение, б) смещение на 10 мкм.

После этого центральный электрод был перемещен в направлении пролета пучка на 13 см, чтобы добавить возможность оценки угла отклонения пучка от оси. В результате достигнуто предельное разрешение данной конструкции в случае небольших углов наклона пучка (см. Рисунок 2.9) в $\pm 0.5^\circ$. Это превышает требуемое значение в 5 раз. Возможно улучшение разрешения в случае изготовления деталей для прототипа с высокой точностью, т.к. изготовленные вручную детали не обладают в нужной степени симметрией и нарушается соосность. На рисунке 2.9 сигналы с электродов синхронизированы с сигналом развертки (желтый цвет), амплитуда развертки выбрана меньше, чем использовалась ранее (см. Рисунок 2.8), поэтому внешний электрод практически не попал под воздействие пучка. Наклон отображается в виде смещения сигнала с центрального электрода (бирюзовый) на следующий электрод большего диаметра (фиолетовый). Программа для корректного анализа получаемых данных в зависимости от угла наклона электронного пучка находится в разработке.



а)

б)

Рисунок 2.9 – Сигналы с осциллографа для оценки угла наклона пучка, а) центральное положение (0А в корректоре), б) наклон на 1° (80 мА в корректоре).

2.3 Наблюдение за пучком с напуском газа

На установке проводилась серия экспериментов по наблюдению за пучком в остаточном газе и с напуском газа (аргон) при помощи аналоговой и цифровой видеокамер внутри защищенного от внешнего светового воздействия затемненного бокса, расположенного в технологическом вакуумном объеме (см. Рисунок 2.10).

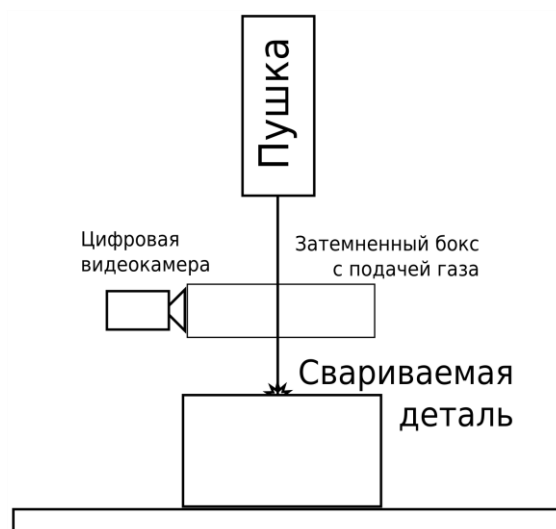
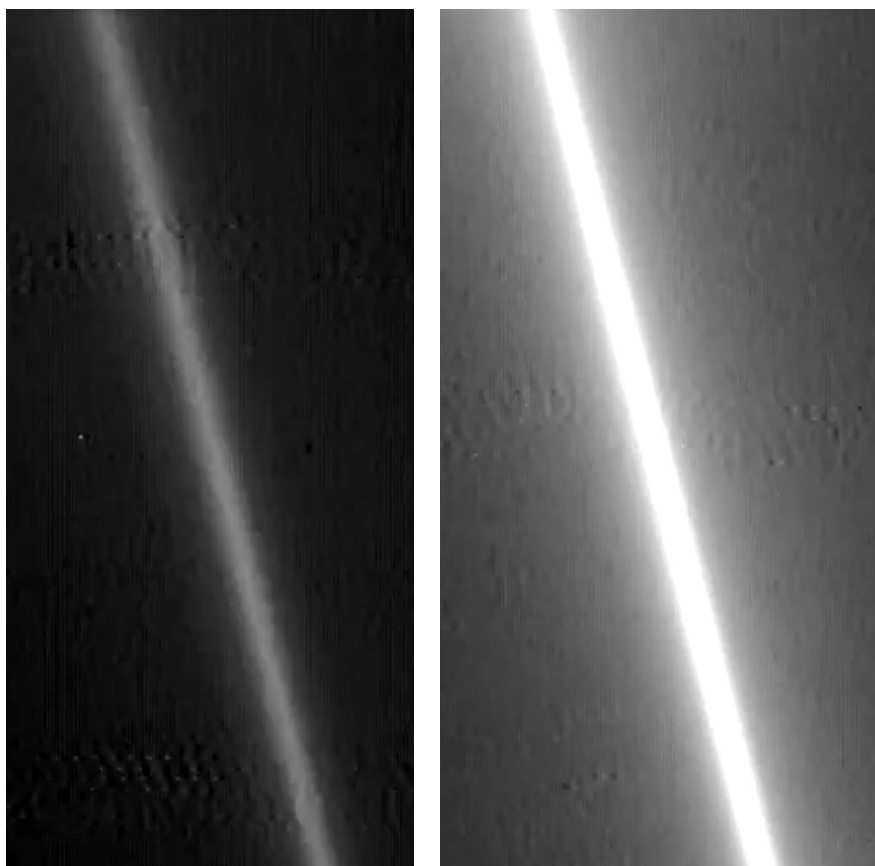


Рисунок 2.10 - Схема расположения видеокамеры с затемненным боксом.

На рисунке 2.11 показано изображение пучка (точка фокусировки – сверху), полученное с аналоговой видеокамеры. Напускаемый газ подавался в затемненный бокс для получения повышенной концентрации в объеме в сравнении с концентрацией газа в вакуумной камере. В ходе экспериментов показатели давления в вакуумной камере считывались с датчиков давления, регулировка давления до одинаковых значений производилась вручную.

Для наблюдения за пучком достаточно создать среду с остаточным газом, аргон использовался для изучения процесса ионизации электронным пучком различных газов. Установка ЭЛС использовалась для выполнения курсовой работы, посвященной сравнению измеренных размеров светящейся области вокруг электронного пучка в зависимости от

расстояния, которое проходят атомы различных газов, возбужденные электронами, за время жизни возбужденного состояния.

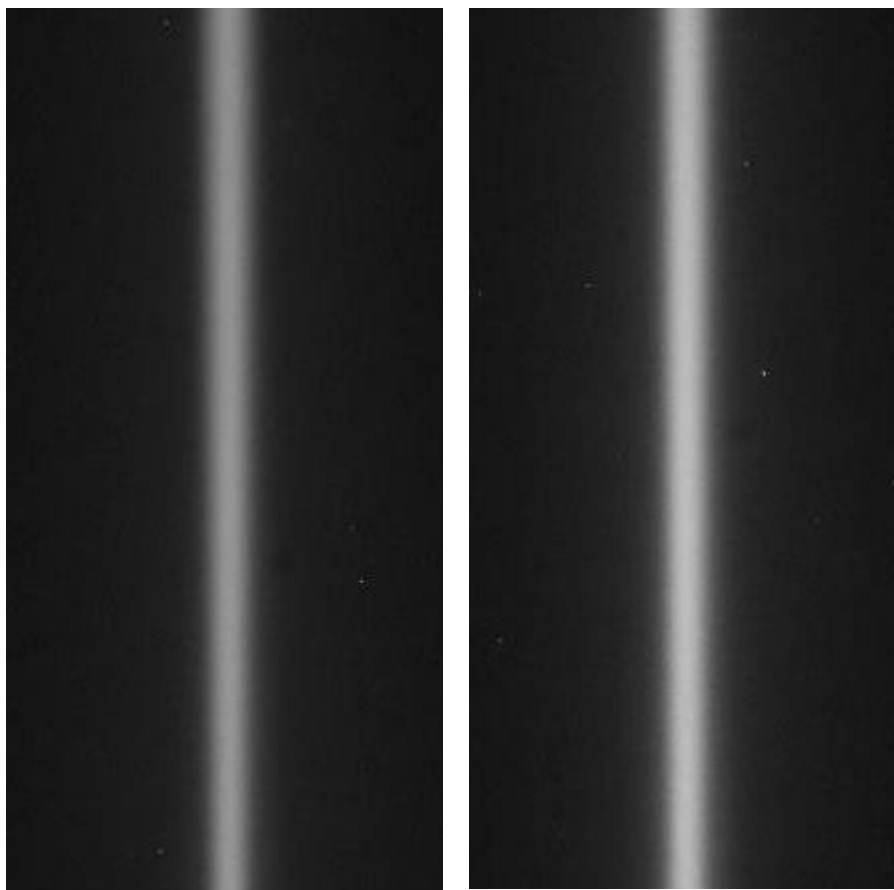


а)

б)

Рисунок 2.11 – Изображение пучка с аналоговой видеокамеры с полным током 10 мА: а) в остаточном газе, б) с напуском аргона.

Качество снимков, получаемых с аналоговой видеокамеры, является недостаточно высоким для выделения характеристик электронного пучка. Поэтому она была заменена на цифровую видеокамеру SDU-285 с программно настраиваемыми параметрами съемки. Снимки пучка, сделанные в различных газовых средах, показаны на рисунке 2.12.



а)

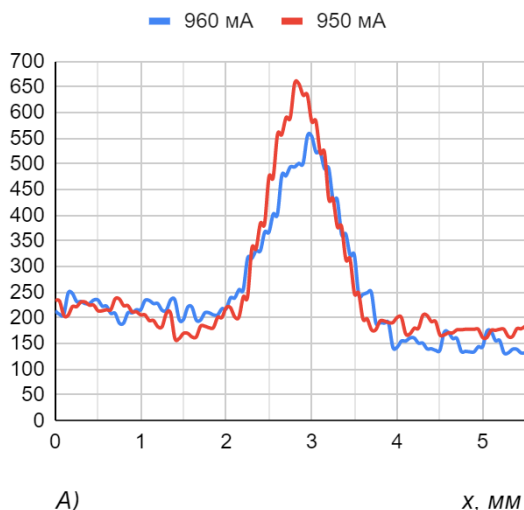
б)

Рисунок 2.12 – Изображение пучка с цифровой видеокамеры с полным током 15 мА: а) в остаточном газе, б) с напуском аргона.

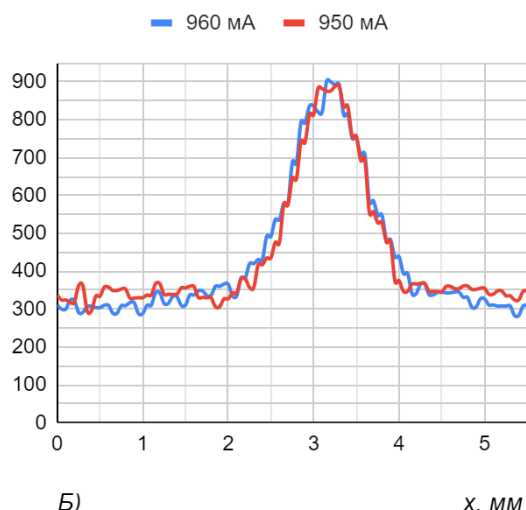
Практическая ценность систем видеонаблюдения для диагностики электронного пучка заключается в возможности быстро оценить размер пучка в диапазоне различных значений полного тока пучка и тока фокусирующей катушки. Кроме того, увеличение расстояния до пучка открывает возможность точного определения угла схождения/расхождения.

С такой конфигурацией системы видеонаблюдения проводились эксперименты с целью оценки вклада влияния полного тока пучка на положение точки фокусировки. Дополнительно определялся размер пучка при близких значениях тока в фокусирующей катушке с сохранением тока пучка и параметров электростатики.

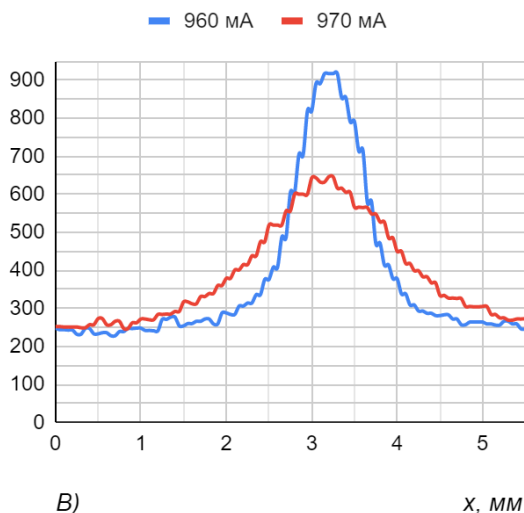
$I_p = 90 \text{ мА}$, $U_{зэ} = 1400 \text{ В}$,
значения тока фок.катушки:



$I_p = 120 \text{ мА}$, $U_{зэ} = 1500 \text{ В}$,
значения тока фок.катушки:



$I_p = 160 \text{ мА}$, $U_{зэ} = 900 \text{ В}$,
значения тока фок.катушки:



$I_p = 190 \text{ мА}$, $U_{зэ} = 700 \text{ В}$,
значения тока фок.катушки:

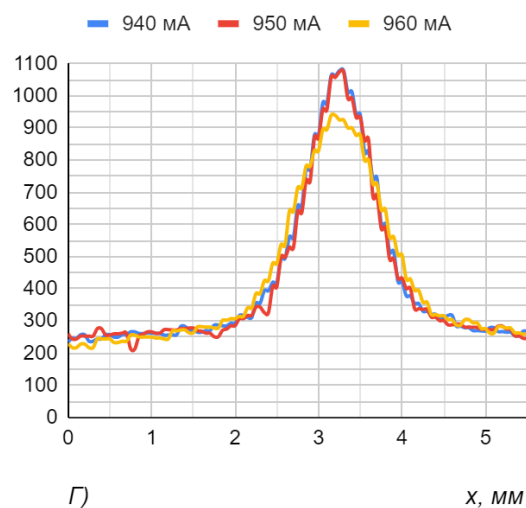


Рисунок 2.13 - Профили интенсивности средней линии: а) ток пучка 90 мА, б) ток пучка 120 мА, в) ток пучка 160 мА, г) ток пучка 190 мА.

На данный момент сложно судить о разрешающей способности системы, поскольку конструкция бокса была повреждена в результате множества экспериментов и требует укрепления и восстановления светозащитных свойств. Известно, что можно определить оптимальную фокусировку с точностью не хуже 10 мА. Эксперименты также показали, что влияние полного тока на положение точки фокусировки имеет нелинейный характер. При увеличении тока пучка, отдаление точки

фокусировки от электронной пушки усиливается. Это связано с тем, что с ростом тока пучка усиливается дефокусирующее действие пространственного заряда и при неизменной фокусирующей силе точка, в которой пучок сфокусирован сдвигается. На рисунке 2.13 показаны профили интенсивности свечения электронного пучка с различными токами и значениями фокусировки, близкой к оптимальной, с учетом влияния электростатики.

Кроме того, эксперименты подтвердили корректность алгоритмов расчета значений оптимального фокуса при различных параметрах для токов 8-60 мА, которые используются при разработке программы, описанной в разделе 3.2 текущей работы.

2.4 Датчик проплава

К качеству сварных швов предъявляется ряд требований, пункты списка которых могут меняться в зависимости от задачи. Многие производственные задачи, выполняемые на установке ЭЛС, требуют наличия сквозного проплава с минимальным равномерным вывалом сварного шва. В качестве примера таких задач можно привести сварку вакуумных камер для проекта FAIR [13], где требуется высокая чистота поверхности и вакуумная плотность швов. Несплавления корня шва в данном случае могут привести к затруднению откачки и снижению вакуума. Другой большой группой задач является сварка деталей, которые требуют гладкую поверхность для создания электрического поля. Острые неисправленные кромки стыка или большой вывал шва в данной случае локально могут привести к получению напряженности поля, превышающей допустимые значения. Во избежание получения в результате чрезмерного вывала шва подбор режима сварки начинается с минимальных энергетических параметров с постепенным увеличением. Таким образом,

при соблюдении температурных условий наряду с корректными параметрами магнитной оптики, электростатики, параметрами развертки, скорости сварки и др., минимальное значения тока пучка, при котором получается сквозной проплав, и будет являться правильным.

На данный момент судить о наличии сквозного проплава возможно только по результатам наблюдения через смотровое окно вакуумной камеры или уже при осмотре обработанной детали в атмосфере. Во избежание временных и материальных затрат была предложена идея датчика провара, регистрирующего рентгеновское излучение во время процесса плавки металла.

Первый прототип датчика проплава представлял собой pin-фотодиод, расположенный под проплавляемым образцом. В качестве образца использовалась медная пластина, толщиной 3 мм, для ее проплавления полный ток пучка составлял 50 мА. Напряжение на фотодиоде выставляется с внешнего источника питания в режиме обратного смещения, токовый сигнал с фотодиода при воздействии радиации снимается с шунта. [16]. Для минимизации электромагнитных помех в оба плеча схемы были подключены резисторы номиналом 10 МОм. Для исключения влияния источников света фотодиод плотно закрывался двумя слоями алюминиевой фольги. На рисунке 2.14 представлены сигналы при такой схеме подключения во время проплавления материала (сигнал постепенно нарастает в процессе и затем выходит на “полочку”) и при попадании пучка в проплавленное отверстие. Начало стабилизации сигнала и достижение максимума считается моментом проплава. Резкий всплеск в начале можно объяснить либо быстротекающими процессами при включении пучка, либо недостатком свободных носителей в фотодиоде или наличием небольшой внутренней емкости.

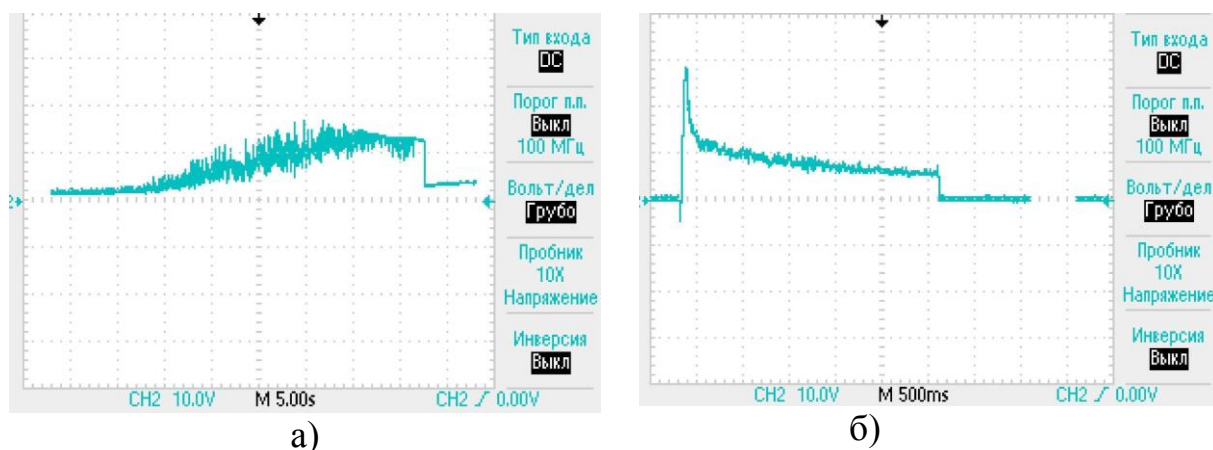


Рисунок 2.14 – Сигнал при проплавлении без RC фильтра а) процесс проплавления б) после проплавления пучок проходит через отверстие.

Была испытана схема с дополнительным RC фильтром, которая подавляет электромагнитные помехи оборудования установки и также этот всплеск в начале (см. Рисунок 2.15).

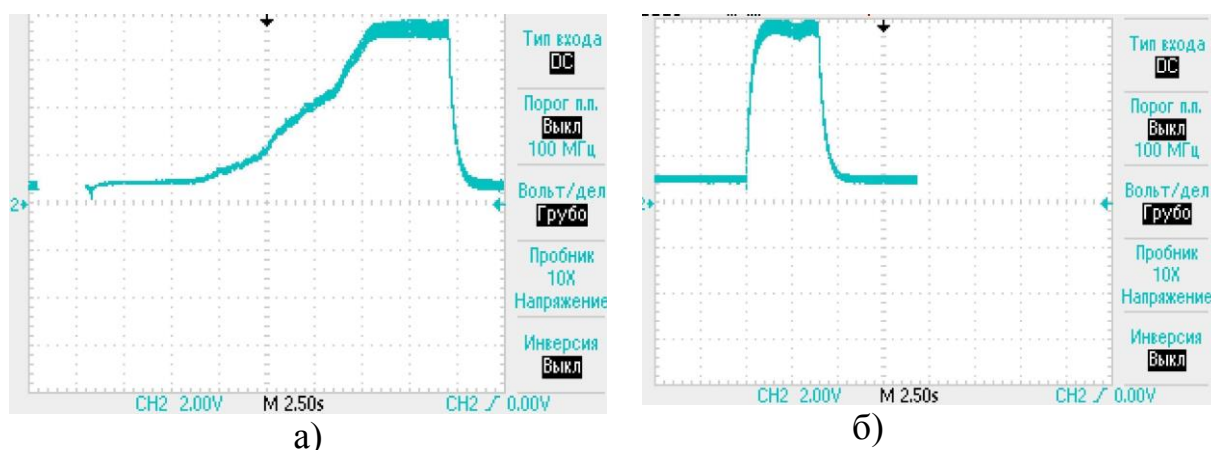


Рисунок 2.15 – Сигнал при проплавлении с RC фильтром а) процесс проплавления б) после проплавления пучок проходит через отверстие.

Испытание прототипа показало, что метод определения наличия проплава, основанный на регистрации рентгеновского излучения, обладает достаточной чувствительностью и быстродействием для изготовления датчика такого типа. Однако используемый фотодиод при нагреве начинает проводить тепловой ток, что вносит искажения в сигнал от рентгена. Время воздействия и возможная мощность пучка, которые позволят избежать

этого явления, очень невелики, а период восстановления рабочего режима фотодиода достаточно длительный. Следовательно, для практического использования такой прототип датчика является непригодным.

Вместо фотодиода в качестве датчика рентгена было предложено расположить внутри вакуумной камеры сцинтиллирующее оптоволокно BCF-20, сигнал с которого по транспортному оптоволокну выводится наружу, где в свою очередь регистрируется детектором и усиливается. Сцинтиллирующее и транспортное оптоволокно было полностью экранировано от внешнего света как внутри, так и снаружи вакуумной камеры, кроме того снаружи дополнительно экранировалось фольгой, сигнал с которой стекал на землю. Сцинтиллирующее оптоволокно располагается на некотором расстоянии от места воздействия электронного пучка для защиты от расплавления. Разрабатываемый датчик имеет 2 канала для получения сигналов с разных точек. При необходимости количество каналов может быть увеличено.

Были проведены испытания этого прототипа датчика с использованием одного канала. В ходе испытаний проплавлялась медная пластина толщиной 1 мм электронным пучком с полным током 1 мА. В сравнении с испытанием первой версии прототипа были уменьшены время воздействия пучка и мощность, необходимая для сквозного проплавления образца. В качестве детектора оптического излучения был использован рп-фотодиод, подключенный в схему в режиме генератора. [16] Диапазон излучения сцинтиллятора BCF-20 (см. Рисунок 2.16 а) находится в зеленой части видимого спектра, а используемый фотодиод эффективнее регистрирует свечение в красной части, поэтому оптический сигнал при проплавлении был хорошо различим визуально, но оказался слишком слабым для регистрации оборудованием. Для оптического усиления

сигнала BCF-20 был заменен на спектросмещающее оптоволокно, вклеенное в кристалл BGO (см. Рисунок 2.16 б) [17].

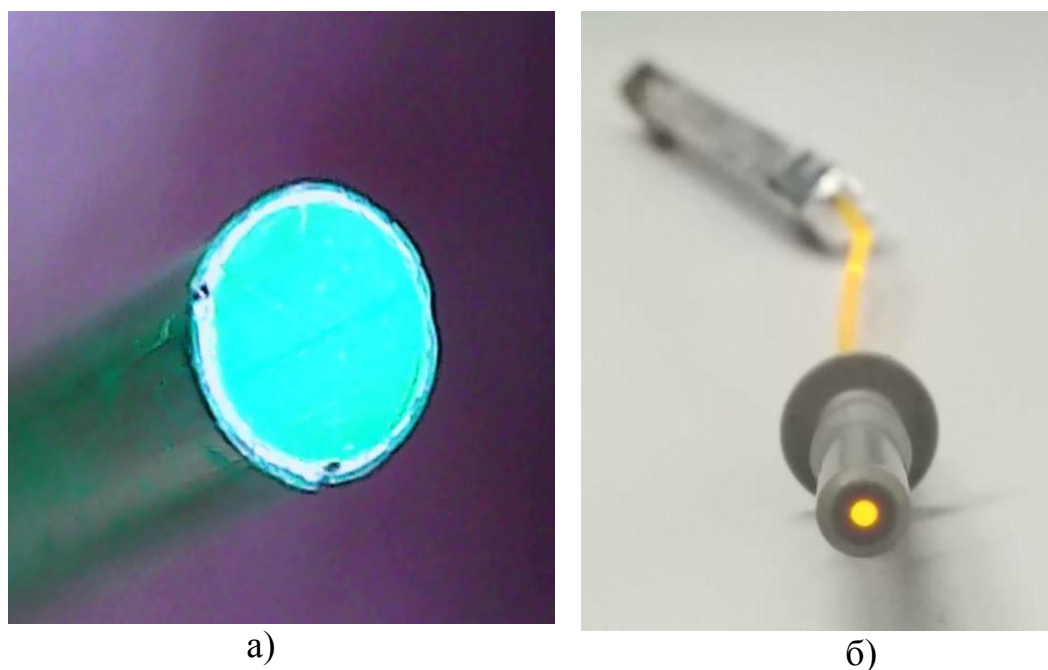


Рисунок 2.16 - а) BCF-20, б) спектросмещающее оптоволокно + BGO.

Для дополнительного усиления сигнала в схему был подключен усилитель INA114 с коэффициентом усиления 18. На рисунке 2.17 показаны осциллограммы зарегистрированных в ходе испытания сигналов.

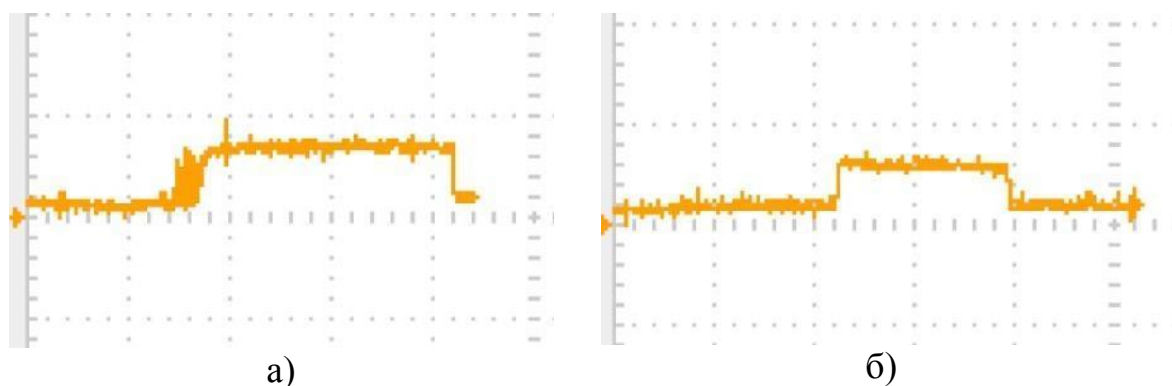


Рисунок 2.17 - Осциллограммы сигналов при регистрации фотодиодом оптического излучения сцинтиллятора (размеры клетки 1 В, 5 сек): а) процесс проплавления, б) после проплавления пучок проходит через отверстие.

Испытания показали работоспособность второй версии прототипа датчика проплава. Для улучшения качества сигнала может потребоваться

замена pin-фотодиода на другой детектор. Поскольку пучок во время сварки неподвижен, а обрабатываемая деталь движется преимущественно по одной координате, требуется разработка оснастки, которая не будет препятствовать движению детали и будет сохранять положение датчиков относительно пучка.

2.5 Определение температуры в зоне сварки

Для определения температуры детали в точке падения пучка в вакуумную камеру была монтирована система с использованием пирометра фирмы Mirco-Epsilon модели CTLM 3H3SF300-C3 (См. рисунок 2.18 а) с лазерным нацеливанием на объект. Фокусное расстояние до мишени 20 см, а диапазон измерения температуры составляет 250-1800°С.

Датчик был помещен в специальный защитный кожух, а система управления расположена снаружи вакуумной камеры.

Известно, что тело с температурой выше абсолютного нуля испускает электромагнитное излучение со своей поверхности, которое пропорционально его внутренней температуре. Частью этого так называемого внутреннего излучения является ИК-излучение, которое используется для измерения температуры тела. С помощью линзы (входная оптика) лучи фокусируются на элементе детектора, который генерирует электрический сигнал, пропорциональный излучению. Сигнал усиливается и, используя последовательную цифровую обработку сигнала, преобразуется в выходной сигнал, пропорциональный температуре объекта. Измеренные значения температуры отображаются на дисплее, а также выводятся на графике в виде аналогового выходного сигнала (1 точка в 1мс).



а)



б)

Рисунок 2.18 – а) Используемая модель пирометра. б) Лазеры, нацеленные на свинец.

Для калибровки пирометра был проведен эксперимент с плавлением свинца (температура плавления 327°). Измерение температуры в момент перехода свинца в жидкую фазу (см. Рисунок 2.18 б), а затем обратно в твердую, проводилось через свинцовое стекло кожуха и через свинцовое стекло + защитное стекло. На графиках на рисунках 2.19, 2.20 выделены моменты начала плавления свинца, находящегося под датчиком, и моменты кристаллизации. Исходя из полученных результатов можно предположить, что свинцовое стекло снижает показания на $\sim 10^{\circ}\text{C}$, а защитное стекло линейно снижает их дополнительно.

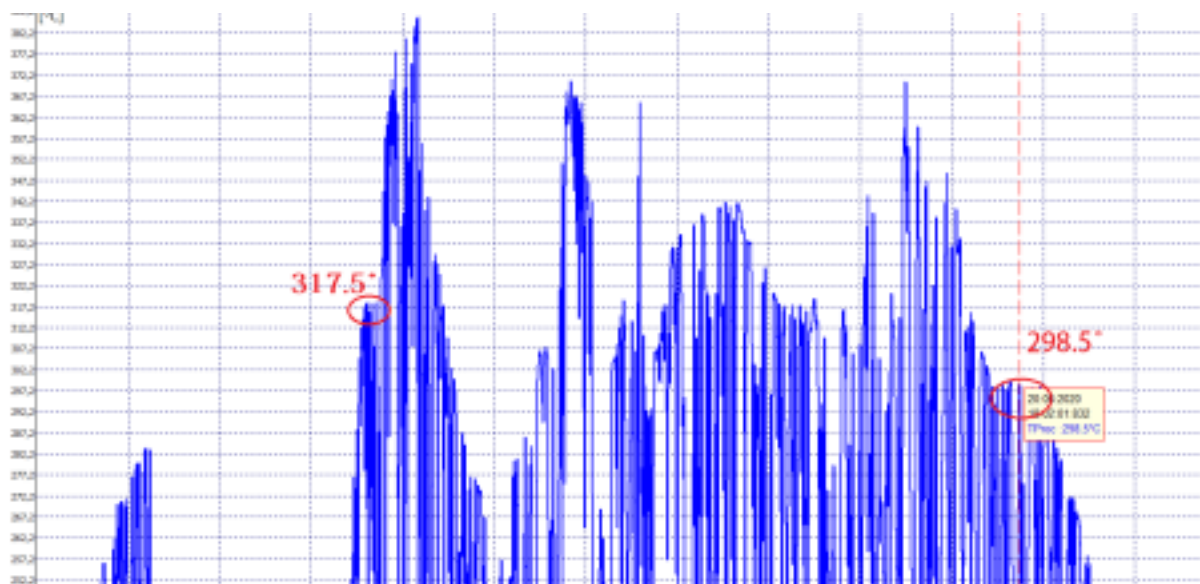


Рисунок 2.19 – Измерение температуры свинца через свинцовое стекло

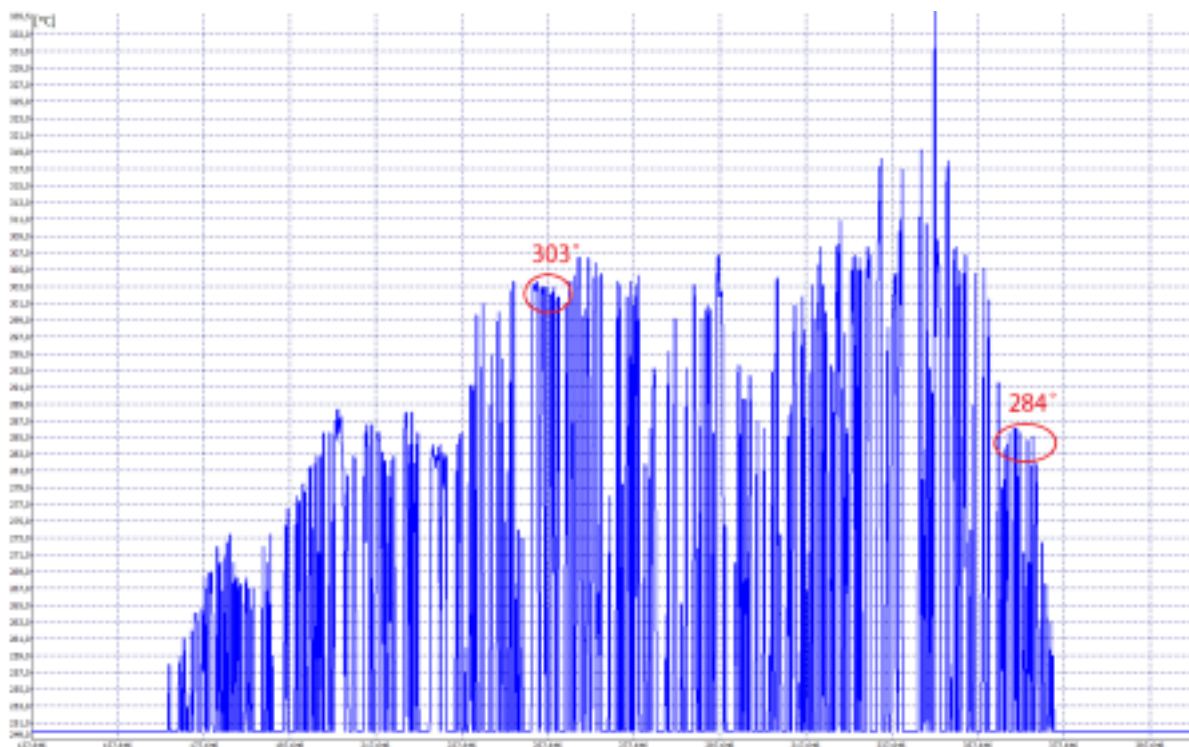


Рисунок 2.20 – Измерение температуры свинца с дополнительным защитным стеклом.

Были проведены эксперименты по измерению температуры в условиях вакуума. По причине ограничения расстояния, на котором измеряется температура (20 см), защитный кожух с пирометром был расположен вблизи обрабатываемой детали, как показано на схеме на рисунке 2.21. Для защиты свинцового стекла кожуха используется дополнительно защитное стекло. Расположение пирометра возле места падения пучка с использованием защитного стекла быстро привело к искажению получаемых данных по причине запыления стекла.

С целью решения этой проблемы была разработана модель системы, перематывающей защитную пленку между мишенью и датчиком. Таким образом, после изготовления, подбора требуемой пленки и скорости ее вращения, станет возможным измерение температуры в процессе сварки.

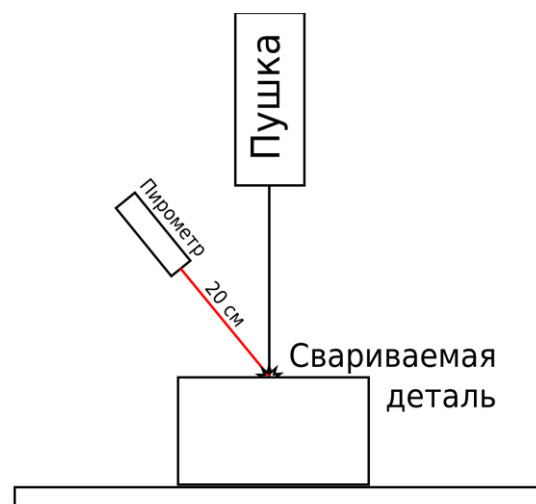


Рисунок 2.21 – Схема расположения пирометра.

Для определения границ области с определенной температурой в лаборатории разрабатывалась система видеонаблюдения, состоящая из двух видеокамер, и ПО [9], которое позволяет выделить области по яркости свечения. Разработка системы приостановлена, в случае возобновления работы перспективной видится синхронизация этих двух систем.

2.6 Магнитоиндукционный датчик положения пучка

Поскольку известно, что параметры электронного пучка заметно меняются при увеличении его полного тока, был предложен метод, позволяющий определить положение (без осаждения на электроды и, как следствие, без ограничения по полному току пучка), а также эллиптичность пучка. На траектории пучка устанавливается мультипольный магнит (октуполь) (см. Рисунок 2.2) и задается круговая развертка электронного пучка. По различному электромагнитному воздействию пучка на разные полюсы магнита можно определить положение пучка, если развертка происходит не вокруг центральной оси магнита, и направление, в котором пучок вытянут, т.е. эллиптичен. Эллиптичность пучка может быть связана с применением больших токов анодной коррекции для компенсации магнитного поля, вызванного током накала, или может возникнуть на этапе

формирования пучка при использовании катодов, у которых в результате производственного брака эмитирующая поверхность не является круглой. На рисунке 2.22 показано схематичное изображение магнита в натуральную величину. При токе в катушках 1.2А значения магнитного поля имеют тот же порядок, что и значения магнитного поля пучка с током 200мА в диапазоне различных расстояний от пучка до одного из полюсов. На рисунке 2.23 показано различие между полем на краях противоположных полюсов (кГс) при разных расстояниях до пучка (мм). Таким образом, разрешение конструкции для определения положения пучка не хуже, чем 1 мм.

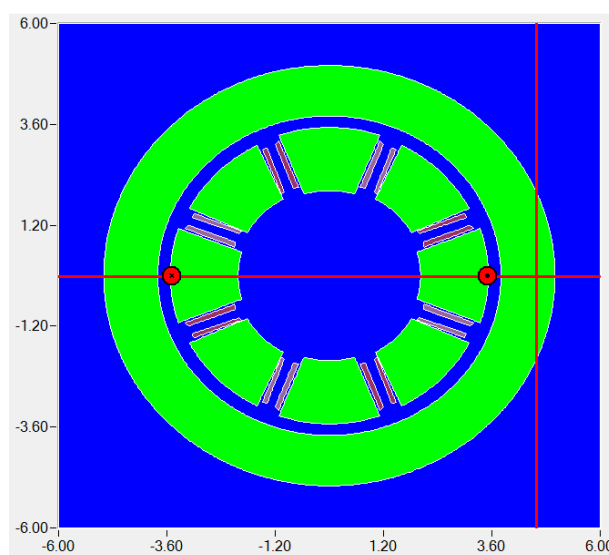
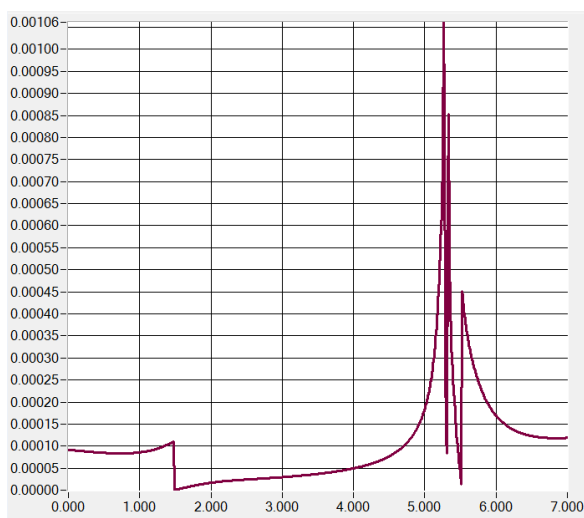
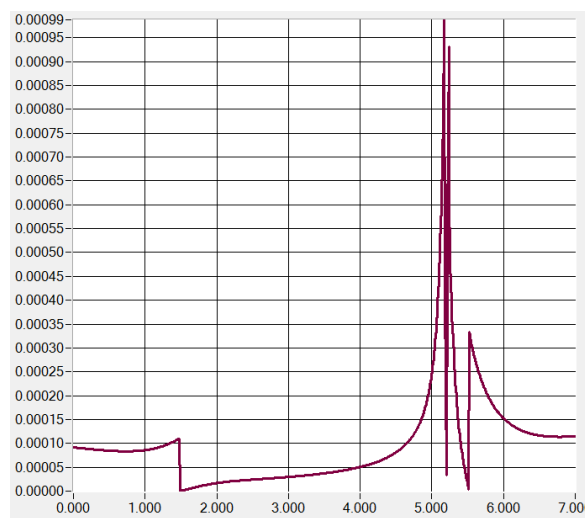


Рисунок 2.22 – Модель диагностического магнита (Mermaid)



а)



б)

Рисунок 2.23 – Поле пучка возле полюса: а) – 2 мм, б) – 3мм

Ввиду сложности проведения регулярной диагностики пучка с током 200 мА и более это устройство требует внесение изменений в конструкцию для того, чтобы снизить ток пучка, который может быть зарегистрирован.

Также необходимо произвести детальный расчет модели. Сформулированы основные требования к магниту и оценены возможности модели диагностического магнита.

Глава 3 Контроль качества электронного пучка

Разрабатываемые подсистемы контроля качества электронного пучка должны быть связаны с существующими модулями аппаратуры и в идеале полностью интегрированы в программу управления. На установке модули соединяются с ПК, на которых установлены управляющие программы, по CAN-линии и Ethernet, как показано на схеме на рисунке 3.1.

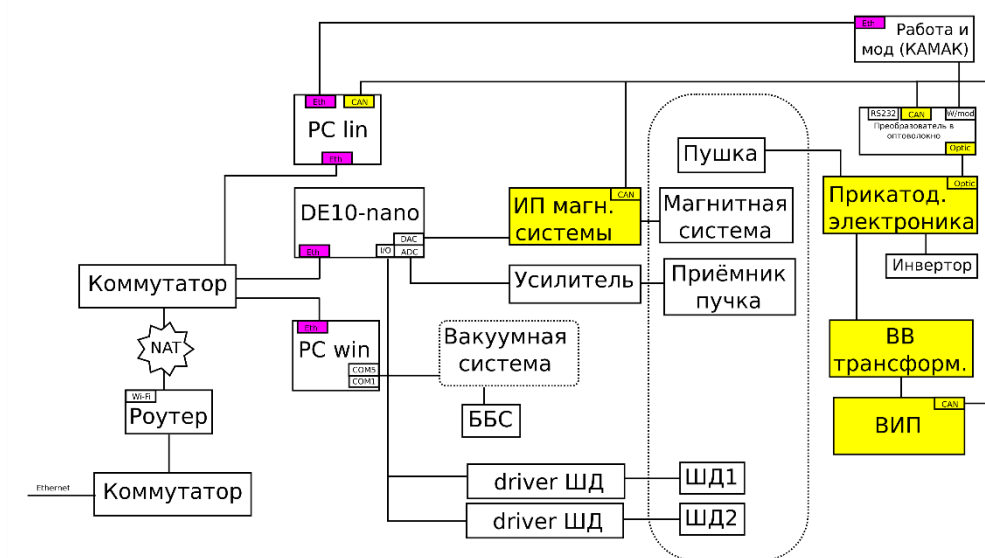


Рисунок 3.1 – Схема оборудования установки ЭЛС

На рисунке 3.2 слева представлена схема архитектуры программного обеспечения установки ЭЛС. На данный момент программа для автоматического подбора параметров развернута на ПК с Windows, и работает посредством связи с СХ-сервером через Elixir (для сбора данных) и напрямую (для передачи данных).

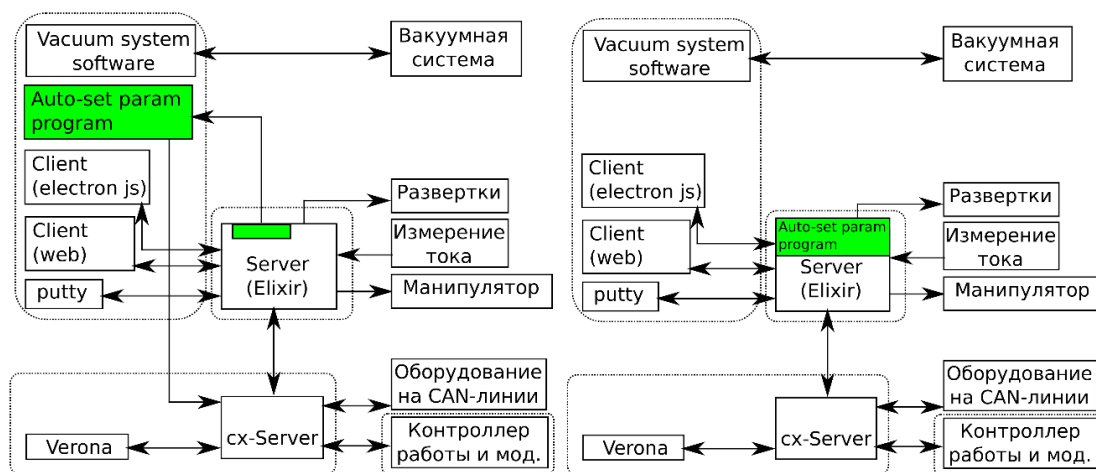


Рисунок 3.2 –Схема архитектуры ПО: слева – сейчас, справа – план.

3.1 Автоподбор анодной коррекции и фокусировки

Для подбора оптимальных режимов сварки и их повторения нужна обратная связь с параметрами получаемого электронного пучка (размер, распределение плотности мощности, положение точки фокусировки и др.) и соответствующими им параметрами оптической системы пушки. В частности, на установке ЭЛС важным фактором, влияющим на качество пучка, является уставка правильных параметров анодной коррекции. Контроль правильности подбора анодной коррекции требует проведения диагностики пучка по ряду причин: изменения рабочего тока накала катода в процессе работы, деградация эмитирующей поверхности и возможные изменения ее формы в результате нагрева или замена катода. В целом по причине неидентичности катодов и неточностей при сборке пушки после замены катода может также измениться влияние фокусирующей линзы на пучок, и, как следствие, положение точки фокусировки.

В рамках разработки системы коррекции aberrаций электронного пучка на установке ЭЛС была реализована функция автоматического подбора тока в фокусирующей катушке и двухкоординатном анодном корректоре, основанная на сравнении и анализе измеренных параметров

электронного пучка. На данный момент приемником пучка служит разработанный ранее цилиндр Фарадея с микроотверстием (см. раздел 2.1), но замена диагностического устройства на некоторые из предложенных не внесет существенных изменений в принцип работы этой подсистемы.

Сначала из консоли запускается скрипт (функциональный язык Elixir), который перебирает значения тока в фокусирующей катушке с изменением токов в анодных корректорах (независимо друг от друга) и записывает соответствующие данные, полученные в результате сканирования. Затем данные сравниваются между собой, и программа выдает значения тока фокусировки, при котором площадь пучка на FWHM минимальна, а также значения тока в анодных корректорах, при которых изменение положения пучка при изменении фокусировки минимально. После этого значения передаются на сх-сервер, откуда передаются в управляющую программу. На данный момент алгоритм сравнения данных реализован в среде разработки Python Spyder, однако с целью улучшения архитектуры было принято решение перевести его на Elixir и запускать одним скриптом из консоли, затем по завершению передавать автоматически значения на сх-сервер, как показано справа на рисунке 3.2. Объем сохраняемых данных небольшой относительно свободного места на плате DE10-nano [6].

Поскольку получаемые в процессе измерений данные не идентичны между собой, было принято решение анализировать подогнанные под данные гауссовы распределения во избежание учета случайных величин. На рисунке 3.3 показан пример данных, полученных в течение одного дня с одинаковыми входными параметрами (слева) и соответствующее им функции Гаусса (справа). Реальные данные имеют небольшие различия, но основная форма и положение сохраняются. Гауссовы распределения при

этом практически совпадают. Также была проведена процедура проверки влияния шумов на результирующую функцию Гаусса.

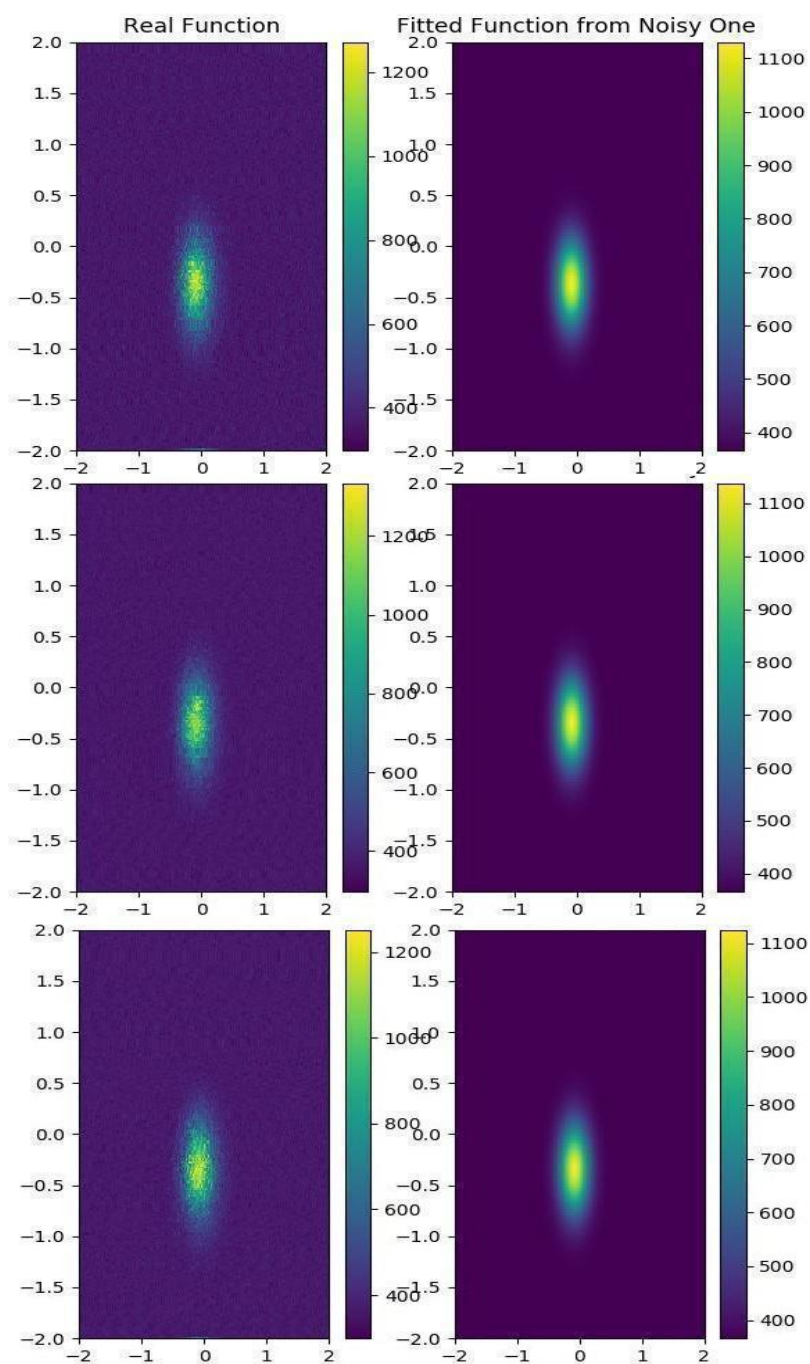


Рисунок 3.3 – Данные с одинаковыми входными параметрами (слева), соответствующее гауссово распределение (справа)

На рисунке 3.4 показаны полученные распределения со включенными источниками шумов и без них при одинаковых входных параметрах, а

также соответствующие им функции Гаусса. Центры функций практически совпадают.

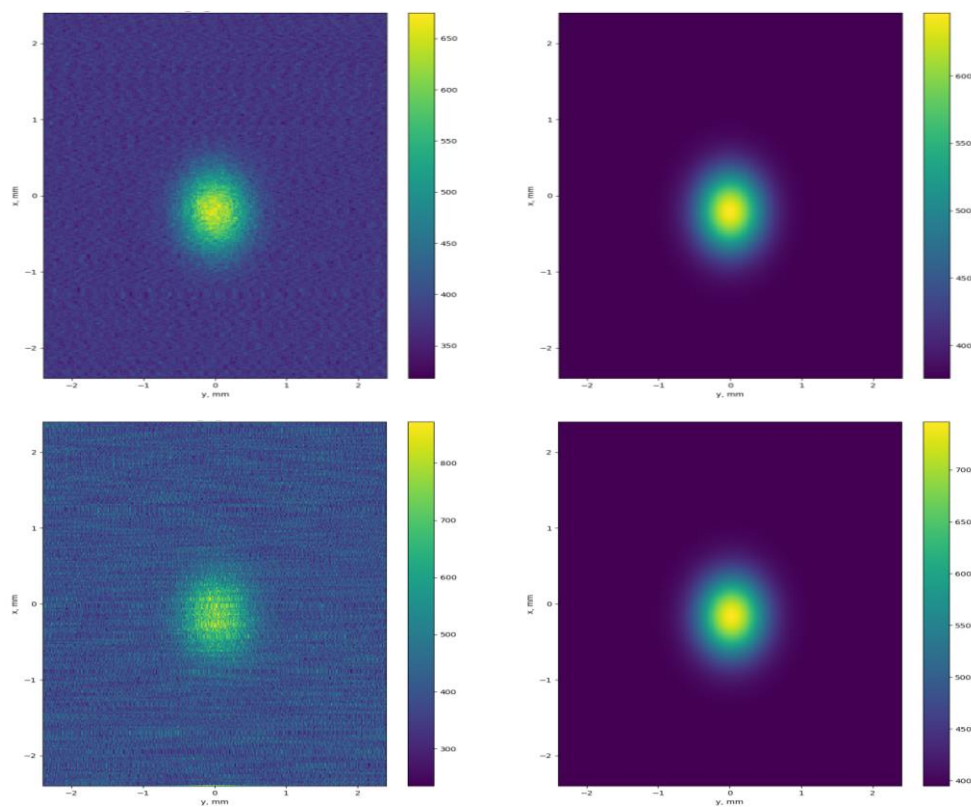


Рисунок 3.4 – Данные с одинаковыми входными параметрами и построенные по ним гауссовы распределения: без источников шума (сверху), с источником шума (снизу)

Сохраняется возможность улучшения качества изображений путем набора статистики, но было принято решение оптимизировать время сбора данных в ущерб качеству для данной задачи. Время набора данных при нескольких входных параметрах ~5 минут.

Первичную настройку анодной коррекции следует проводить после замены катода, а также при изменении тока накала в режиме стабилизации тока напряжением на запирающем электроде (изменение оптики в результате изменения запирающего напряжения для данной задачи не важно). Кроме того, пучок с другой энергией может потребовать другие параметры магнитной оптики, а значит процедуру рекомендуется

проводить также в случае перехода на другие ускоряющие напряжения. Дополнительно рекомендуется проводить проверку в случае истончения эмиссионной поверхности катода и, как следствие, изменений параметров.

Ниже на рисунке 3.5 показан пример данных, по которым определяется анодная коррекция. Ток в анодных корректорах менялся с шагом 10 мА и вычислялась минимальная разница между координатами центра в сечение пучка над точкой оптического фокуса ($I_{\phi}=850$ мА) и после точки оптического фокуса ($I_{\phi}=1030$ мА). Для повышения точности можно уменьшить шаг.

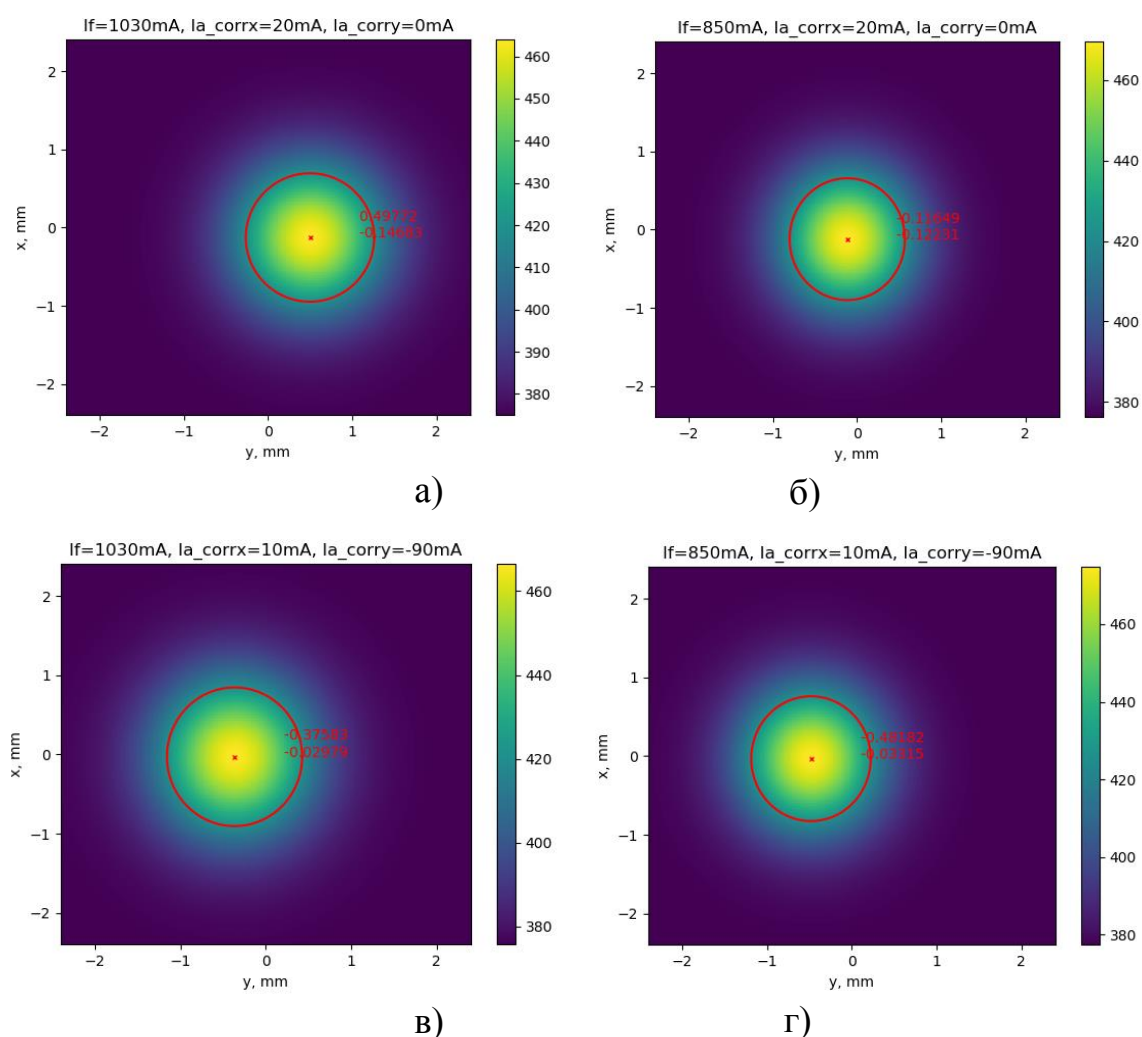


Рисунок 3.5 – Аппроксимированные двумерной функцией Гаусса распределения тока пучка с координатами центра и выделенной областью на FWHM: а) $I_{\phi}=1030$ мА, $I_{k_x}=20$ мА, $I_{k_y}=0$ мА, б) $I_{\phi}=850$ мА, $I_{k_x}=20$ мА, $I_{k_y}=0$ мА, в) $I_{\phi}=1030$ мА, $I_{k_x}=10$ мА, $I_{k_y}=-90$ мА, г) $I_{\phi}=850$ мА, $I_{k_x}=10$ мА, $I_{k_y}=-90$ мА.

Для автоматического поиска фокусировки вычисляются площади, занимаемые пучком и происходит их сравнение. Оптимальная фокусировка соответствует значению тока в фокусирующей катушке, при котором площадь минимальная.

В процессе разработки находится управляющая программа, которая будет развернута на одном компьютере с операционной системой Linux. Таким образом, все программы управления оборудования установкой и клиенты, выполняющие функции управления процессом сварки и диагностики могут быть объединены на одном ПК. Также возможность обмена данными с платой напрямую, а не через СХ-сервер открывает перспективу в будущем полностью интегрировать систему коррекции аберраций в программу управления сварочными процессами.

3.2 Консультационное программное обеспечение для подбора параметров сварочного пучка

Существует несколько возможных способов подбора параметров для сварки. Диагностика во время сварки, например, путем определения температуры в зоне сварки (см. раздел 2.5), является нетривиальной задачей, и по ряду причин не может быть пока реализована на установке ЭЛС. Вычисление параметров путем теоретического расчета в данном случае кажется задачей трудновыполнимой, т.к. сложно учесть в модели все те особенности, которые есть в реальной пушке. Другой известный способ выработки алгоритмов подбора различных параметров — это программирование нейросети. В этом случае для машинного обучения потребуется набор слишком большого количества данных с учетом всех тех же особенностей, поэтому этот способ пока признан слишком трудоемким и потому неподходящим. Однако достаточно обширная база данных с несколькими измерениями, разнесенными во времени при тех же

параметрах способна выполнить эту задачу, если правильно интерполировать промежуточные значения.

На данный момент реализован способ, который использует в расчетах базу данных. База данных содержит в себе экспериментально полученные зависимости тока в фокусирующей катушке, который соответствует минимальному размеру пучка, от расстояния до точки фокусировки на всем диапазоне рабочих значений потенциалов запирающего электрода и анода.

Помощник оператора установки ЭЛС

Для определения запирающего напряжения проводится тест эмиссии

Запирающее напряжение: 2500 В	Оптический фокус: 966.5 мА
Расстояние до образца: 250 мм	
Ускоряющее напряжение: 60 кВ	

Для получения сварочного фокуса и тока выберите материал и толщину

Выберите материал: Сталь	Сварочный фокус: 976.2 мА
Толщина материала: 3 мм	

Рисунок 3.6 – Интерфейс консультационной программы для подбора сварочных параметров

Была реализована первая версия программы (См. рисунок 3.6), написанная на языке JavaScript, использующая оффлайн алгоритмы расчета

оптимального фокуса для настройки перед проведением сварочных работ. Для расчета параметров сварки используются статистически набранные данные из известных режимов.

При таком способе получения настроечных параметров неудобство представляют промежуточные значения, т.к. база данных набиралась с некоторым шагом. На данный момент для вычисления промежуточных значений используется линейная и нелинейная аппроксимация (см. Рисунок 3.7). Также ограничением для пользователя может стать необходимость предварительно провести процедуру подбора значений анодной коррекции, в особенности если ток накала катода для получения пучка с определенным током нужно будет поменять более чем на 15-20%.

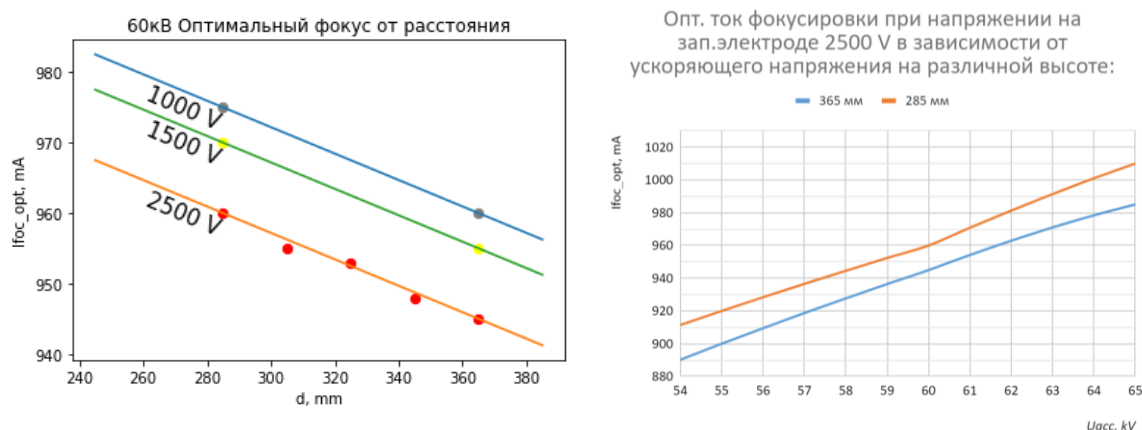


Рисунок 3.7 - Расчетные функции а) оптимальный фокус от расстояния до детали (точки - измеренные значения), б) оптимальный фокус от ускоряющего напряжения.

В базу данных пока не вносились данные о влиянии изменений геометрии в области формирования пучка. Для этого нужно внести несколько различных изменений в конфигурацию пушки и собрать дополнительную информацию, чтобы впоследствии понимать, как учесть это в расчетных формулах.

Кроме того, известно, что минимальный размер пучка с ростом расстояния до пушки увеличивается, и, как следствие, нужно будет это

дополнительно учесть при расчете сварочного тока. Согласно данным, полученным методом, описанном в разделе 2.3, полный ток пучка влияет на положение фокусировки. После проведения ряда калибровочных измерений на всем диапазоне полных токов пучка, расчетные функции будут скорректированы с учетом полного тока.

Также потребуется добавить возможность пользователю менять эталонные значения, используемые в расчетах, если измеренные сильно отличаются при совпадении всех заданных параметров. Это следует предусмотреть на случай деградации элементов магнитной оптики либо их полной замены.

Рассчитываемые параметры режимов сварки справедливы для деталей малых размеров и тестовых пластин. Однако известно, что для некоторых материалов (например, для меди и медных сплавов) с увеличением объема материала вблизи области сварки и в целом массы всей детали может потребоваться значительное увеличение тока (на практике - до 400% для меди). Это пока не было учтено, данные о сварке массивных деталей пока являются справочными для различных успешно сваренных деталей.

Заключение

В рамках данной работы изучены особенности работы оборудования на установке электронно-лучевой сварки ИЯФ СО РАН, разработаны и протестированы устройства для диагностики электронного пучка, реализованы алгоритмы, позволяющие частично автоматизировать подстройку элементов магнитной оптики для получения качественного пучка.

Основные итоги работы:

- Разработаны и протестированы прототипы диагностических устройств для определения плотности мощности, размера, точки фокусировки, угла наклона и положения пучка; прототипы устройств для определения температуры в области сварного шва и наличия проплава на рентгеновском излучении.
- Автором выполнялась большая часть работ по обработке металлов, в том числе экспериментальные работы по сварке и плавке, которые ранее не проводились на установке. Были подобраны сварочные режимы и собраны статистические данные по ним. Была набрана база данных для получения качественных электронных пучков.
- Разработаны подсистема автоматического подбора параметров магнитной оптики и расчетная программа для определения режима сварки при различных параметрах.
- За время выполнения данной работы автором было опубликовано 4 работы, касающихся предмета исследования.

Подготовлен план работы над алгоритмами программного обеспечения для автоматического подбора параметров и консультационной расчетной программы. Составлена программа экспериментов для демонстрации работоспособности диагностических устройств, пополнения базы данных и набора статистике по режимам сварки.

Список литературы

1. Батраков А. В. Эмиссионная электроника. Учебное пособие. Издательство Томского политехнического университета, 2008, с 15-21.
2. Иванов А. В. Динамика заряженных частиц и интенсивных пучков в стационарных полях, 2017.
3. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. Машиностроение, 1978.
4. О. Н. Алякринский, М. А. Батазова, Д. Ю. Болховитянов, М. Ю. Косачев и др., Прототип источника электронов с магнитным поворотом пучка для электронно-лучевых технологий. Научное приборостроение, 2019, том 29, № 1, с. 26–32.
5. Алякринский О.Н., Девятайкина Т.А., Павлюченко В.А. и др., Разработка источника электронов на энергию 120кВ для электронно-лучевой сварки. Сборник докладов конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», Москва, 2021.
6. Медведев А. М., Старостенко А. А., Цыганов А. С., и др. Установка электронно-лучевой сварки в Институте ядерной физики СО РАН. Международная конференция электронно-лучевая сварка и смежные технологии: Сборник материалов и докладов, 2015, с 9-12.
7. M.M. Sizov, A.A. Starostenko, K.A. Blokhina, A.M. Medvedev (2018). FPGA based image processing system for electron beam welding facility. Proceedings of PCaPAC2018, Hsinchu, Taiwan.
8. Дармаев А.Н, Морев С.П. и др. Особенности формирования электронного потока в электронно-оптических системах с автоэмиссионным катодом для установки электронно-лучевой сварки. Международная конференция электронно-лучевая сварка и смежные технологии: Сборник материалов и докладов, 2019, с 102-108.

9. Прокопец В.В, Алякринский О.Н., Старостенко А.А, Цыганов А.С. Видеонаблюдение за процессом ЭЛС. Международная конференция электронно-лучевая сварка и смежные технологии: Сборник материалов и докладов, 2019, с 471-480.
10. Пимонов Д. А. Оптимизация параметров электронной пушки установки электронно-лучевой сварки. Выпускная квалификационная бакалаврская работа, Новосибирский государственный университет, 2015
11. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология: Перевод с немецкого, VEB Verlag Technik, Berlin, 1976, перевод “Энергия”, 1980, с 5-7.
12. Kwok H. M., Filippone B., Plaster B. Magnetic Field Studies of a Cos(theta) Coil. – Department of Physics, The Chinese University of Hong Kong.
13. Medvedev A. M., Semenov A. M., Semenov Yu. I., et. al., EBW assumed manufacturing process of vacuum chambers for the FAIR project // вестник ПНИПУ Машиностроение, материаловедение - Пермь - 2016 - Т. 18, № 3 с. 135-145.
14. Mita N. Degradation Factors of a Coated Impregnated Cathode. IEEE Transactions on electron devices, vol. 39. No. 9. 1992.
15. Shultz H. Electron Beam Welding // Woodhead Publishing Ltd, 1993.
16. У. Титце, К. Шенк. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 507-508 с.
17. Р.Р. Ахметшин, Д.Н. Григорьев, В.Р. Грошев, В.Ф. Казанин, А.А. Комарский, С.Р. Корженевский, А.С. Ромахин, С.И. Середняков, Г.В.Ставриевский, А.В. Тимофеев, Д.А. Штоль, А.С. Чепусов. Измерение плотности энергии излучения импульсного рентгеновского источника. ПТЭ 2019. № 2. С. 99-103.

18. Ерофеев В. А. Моделирование особенностей формирования парогазового канала при электронно-лучевой сварке // Сварка и диагностика. 2009. No 4. С. 2 – 8.
19. 12. Sliva A.P. Improving the quality of welded joints with electron beam oscillation of aluminum alloys with through penetration. Сборник докладов конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии», Москва, 2017, с. 506–520.
20. С.В. Варушкин, В.Я. Беленький, Н.А. Зырянов, А.А. Кылосов. Осцилляция электронного луча как средство улучшения формирования корня сварного шва и облегчения контроля сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке. Вестник ПНИПУ Машиностроение, материаловедение Т. 19, No 2, 2017, с. 151-157.
21. T.V. Ol'shanskaya, D.N. Trushnikov, V.Y. Belen'kii, G.M. Mladenov // Welding International. Effect of electron beam oscillations on the formation of the structure and properties of the welded joint. – 2013. – Vol. 27, iss. 11. – p. 881–885.
22. Васильев А.А., Ерофеев В.А., Судник В.А. Возникновение колебаний глубины парогазового канала при лучевых способах сварки. Известия ТГУ. Технические науки, 2017 №7, с. 130-141.
23. Блохина К.А., Девяткина Т. А, Медведев А.М., Старостенко А.А., Цыганов А.С., Сизов М.М., Семенов Ю.А. Диагностика пучка на установке электронно-лучевой сварки в ИЯФ СО РАН. Международная конференция электронно-лучевая сварка и смежные технологии: Сборник материалов и докладов, 2020, с. 417-427.