

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

Варушкин Степан Владимирович

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКОЙ
ПРОВОЛОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ ПО ПАРАМЕТРАМ
ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Специальность 05.02.10 – «Сварка, родственные процессы и технологии»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Трушников Дмитрий Николаевич

Пермь – 2019

Содержание

Введение	4
Глава 1. Литературный обзор.....	13
1.1. Регистрация возмущений наведенного магнитного поля.....	13
1.2. Позиционирование электронного луча с помощью датчиков отраженных и вторично-эмиссионных электронов	17
1.3. Позиционирование электронного луча с помощью видеокамеры и системы подсветки	23
1.4. Позиционирование электронного луча с помощью рентгеновских датчиков	30
1.5. Формирование тормозного рентгеновского излучения в процессе электронно-лучевой обработки материала.....	34
Выводы и постановка задач	38
Глава 2. Методика проведения исследований	40
2.1 Основные материалы, оборудование и программное обеспечение, использованные в работе.....	40
2.2 Методика обработки сигнала рентгеновского излучения	57
2.3 Экспериментальные исследования взаимодействия электронного луча с проволокой.....	61
Выводы	66
Глава 3. Исследование структуры сигнала тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой наплавке.....	68
3.1 Построение и верификация модели формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе взаимодействия электронного луча с проволокой.....	73

3.2 Влияние фокусировки электронного луча на информационную составляющую в спектре сигнала тормозного рентгеновского излучения	82
3.3 Влияние амплитуды осцилляции электронного луча на информационную составляющую в спектре сигнала тормозного рентгеновского излучения	85
Выводы	87
Глава 4. Разработка способа электронно-лучевой наплавки с оперативным контролем и управлением положением присадочной проволоки	90
4.2 Разработка метода оперативного управления	96
4.4 Разработка системы, обеспечивающей оперативный контроль и управление положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки	105
Выводы	111
Основные результаты и выводы работы.....	113
Литература.....	115
Приложение 1	132
Приложение 2	133

Введение

Наплавка как технологический процесс широко применяется в мире с целью ремонта изношенных участков изделия или придания поверхностным слоям специальных свойств. Кроме того, в последнее десятилетие большое распространение получила наплавка с целью получения требуемой формы изделия путем добавления материала к существующей заготовке, так называемая аддитивная технология или технология послойного синтеза. С точки зрения физики процесса, аддитивные технологии практически не отличаются от других технологий наплавки, поэтому все указанные случаи могут быть рассмотрены вместе. Для выполнения наплавки требуется обеспечить создание межатомных связей между наплавляемым материалом и основой, на которую производят наплавку. Для этого используется источник энергии, позволяющий расплавить присадочный материал и поверхность основы для их смешения и формирования межатомных связей в процессе последующей кристаллизации.

По способу получения наплавленного слоя можно выделить два характерных метода. В англоязычной терминологии применительно к аддитивным технологиям существуют термины, очень точно отражающие различия между этими методами. Метод «bed deposition» (послойное выращивание) подразумевает сначала формирование слоя, например, насыпав на рабочую платформу дозу порошкового материала и разравняв порошок с помощью ролика или «ножа», формируя ровный слой материала определенной толщины. Затем порошок в сформированном слое выборочно обрабатывают лазером или иным способом, сплавляя частички порошка в соответствии с требуемой геометрией наплавки. Метод «direct deposition» (непосредственное осаждение) отличается тем, что материал подается непосредственно в место подведения энергии и выполняется в данный момент наплавки. Номенклатура наплавочных материалов огромна, однако чаще всего в машиностроении применяются металлические материалы. Металлические наплавочные

материалы могут быть в форме порошков или в проволоочном виде. [115, 122, 133, 101, 103]

Способы выполнения наплавки основываются на способах сварки. При использовании порошковых наплавочных материалов обычно применяются лазерная наплавка или плазменная наплавка. При этом лазерная наплавка может производиться как методом «bed deposition», так и методом «direct deposition». В случае наплавки проволоочных материалов чаще всего применяются дуговые способы. Кроме того, для легкоплавких материалов предпринимаются попытки послойного выращивания посредством выдавливания расплавленного металлического материала непосредственно в место наплавки. [129, 117, 141]

Выбор способа наплавки обусловлен материалом изделия, требованиями к геометрии и точности наплавленных слоев, требованиями к механическим свойствам наплавленного материала.

Использование порошковых материалов позволяет получать слои с минимальными отклонениями по высоте. При этом, метод «direct deposition» может обеспечивать производительность процесса до 3 кг наплавленного металла в час с отклонениями по высоте слоя в пределах до 0,1 мм. Данным способом возможно получение наплавленных валиков шириной 1,5...2,5 мм и высотой 0,25...1,0 мм за один проход. При наличии жестких требований к ширине наплавленного валика применяют метод «bead deposition». В этом случае отклонения ширины наплавленного слоя от заданного значения, также, находятся в пределах до 0,1 мм, а минимальная ширина наплавленного валика может достигать 0,25 мм. Однако, такой процесс требует более сложного и дорогостоящего оборудования, кроме того несколько снижается производительность и механические свойства наплавленного материала. [117, 108, 124, 142]

Использование проволоочных материалов позволяет повысить производительность до 10 кг наплавленного материала в час. Точность

геометрических параметров наплавленных слоев зависит от источника тепловой энергии для плавления проволоки. Так, использование электрической дуги и плазмы позволяет получать наплавленные валики с отклонениями по высоте и ширине в пределах до 0,2 мм при ширине 3,0...8,0 мм и высоте 0,8...3,0 мм за один проход. Использование лазерного луча для плавления присадочной проволоки в настоящее время практически не применяется ввиду относительно малой мощности существующих промышленных лазеров, что не позволяет достичь максимальной производительности процесса. Применение электронного луча позволяет получать валики с точностью, не уступающей методу «bed deposition» с использованием порошковых материалов. Высокая точность дозирования вводимой мощности, позиционирования теплового источника и вакуумная защита в процессе электронно-лучевой наплавки обуславливает высокие механические свойства и высокую плотность наплавленного материала. При этом ширина и высота наплавленных валиков может быть 0,5...5,0 мм и 0,25-3,5 соответственно. [141, 116, 112, 140, 80]

Таким образом, электронно-лучевая наплавка проволочным металлическим материалом является наиболее выгодным процессом получения наплавленных слоев в двух случаях:

1. Изготовление деталей из химически активных материалов при одновременно высоких требованиях к уровню механических свойств и к низкой остаточной пористости. Тогда на первый план выходят такие преимущества процесса, как вакуумная защита и высокая концентрация вводимой энергии.
2. Изготовление деталей с большим объемом наплавки и относительно узкими наплавленными участками. В этом случае сочетаются такие возможности электронно-лучевой наплавки, как высокая производительность и точность дозирования тепловой мощности.

Примерами деталей, изготавливаемыми с применением электронно-лучевой наплавки проволокой, могут стать элементы авиационного двигателя

или газоперекачивающей турбины, гребные винты, детали типа «шнек», и многие другие, в том числе изделия с элементами бионического дизайна.

Значительный вклад в изучение процессов, протекающих при электронно-лучевой обработке материалов, внесли такие ученые, как Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Назаренко О.К., Ольшанский Н.А., Кайдалов А.А., Башенко В.В., Миткевич Е.А., Нестеренков В.М., Лесков Г.И., Браверман В.Я., Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Ластовирия В.Н., Язовских В.М., Мелюков В.В., Драгунов В.К., Туричин Г.А., Ерофеев В.А., Судник В.А., Mauer K.O., Mladenov G.M., Arata Y., Kaplan A., Debroy T., Ray R., Wang Ch. и др.

В настоящее время, одной из сложностей проведения процесса электронно-лучевой наплавки проволочным материалом является проблема позиционирования присадочной проволоки относительно электронного луча. Так, диаметр электронного луча в точке фокусировки составляет доли миллиметра, поэтому во избежание отклонения присадочной проволоки от электронного луча при отсутствии управления положением присадочной проволоки относительно электронного луча применяют дополнительные приемы, чаще всего расфокусирование электронного луча. При этом размер электронного луча в плоскости его взаимодействия с присадочной проволокой получают больше размера сечения присадочной проволоки. Это приводит к снижению энергетической эффективности процесса, увеличению припусков под механическую обработку, увеличенному тепловложению в изделие со всеми вытекающими последствиями.

Альтернативой такому подходу служит оперативное управление положением присадочной проволоки по сигналам обратной связи. Существующие системы для осуществления такого управления имеют ряд недостатков. В качестве наиболее общих для них можно отметить потребность в относительно высоких вычислительных мощностях и невысоком быстродействии системы – порядка 0,1 секунды. [56, 113]

Для решения данной проблемы была выдвинута гипотеза, о том, что выполнение электронно-лучевой наплавки с непрерывной осцилляцией электронного луча и управлением положением проволоки по вторичному излучению из зоны электронно-лучевой наплавки позволит решить эту проблему [31, 30, 42]. При этом осцилляция электронного луча производится по траектории, имеющей пересечение с присадочной проволокой. Сигнал вторичного излучения обрабатывается методом синхронного детектирования или методом синхронного накопления. В качестве сигнала вторичного излучения используется тормозное рентгеновское излучение, вторичные высокоэнергетичные электроны, или световая эмиссия из зоны взаимодействия электронного луча с материалом изделия и присадочной проволокой. Величина характеризующая отклонение присадочной проволоки от требуемого положения, полученная в результате обработки сигнала вторичного излучения, поддерживается на уровне, соответствующем требуемому положению присадочной проволоки относительно электронного луча. Это достигается за счет управления отклоняющей системой электронного луча и/или системой позиционирования присадочной проволоки. Результат работы описанной системы достигается за счет дополнительного информационного параметра, формируемого в спектре сигнала вторичного излучения при непрерывной осцилляции электронного луча.

Исходя из вышесказанного **целью диссертационной работы** является разработка метода оперативного управления положением присадочной проволоки относительно электронного луча для обеспечения стабильности качества изделий при многослойной электронно-лучевой наплавке.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих систем оперативного позиционирования электронного луча в процессе электронно-лучевой обработки металлов.

2. Исследование сигнала тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны.

3. Построение модели формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе взаимодействия электронного луча с присадочной проволокой и подложкой.

4. Разработка метода оперативного управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки по сигналу рентгеновского излучения из технологической зоны.

Научная новизна работы:

1. Разработана модель описывающая формирование тормозного рентгеновского излучения в зависимости от технологических параметров при взаимодействии осциллирующего электронного луча с присадочной проволокой и подложкой в процессе наплавки.

2. Установлено наличие области линейной зависимости обработанного методом синхронного детектирования сигнала тормозного рентгеновского излучения из зоны электронно-лучевой наплавки от положения присадочной проволоки относительно центра осцилляции электронного луча.

3. Показано, что линейный характер зависимости обработанного сигнала тормозного излучения от значения отклонения проволоки сохраняется при изменении фокусировки электронного луча, а при переходе амплитуды осцилляции электронного луча от значений больше диаметра присадочной проволоки к значениям меньше диаметра присадочной проволоки происходит смена знака на участке линейной зависимости.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны методики визуализации положения присадочной проволоки относительно электронного луча в процессе электронно-лучевой наплавки.

2. Разработан способ электронно-лучевой наплавки с оперативным контролем и управлением положением присадочной проволоки по параметрам тормозного рентгеновского излучения, позволяющий до 50% повысить стабильность качества наплавленных слоев.

3. Разработаны технологические рекомендации получения наплавленных электронным лучом слоев проволокой из аустенитной хромоникелевой стали, обеспечивающие стабильность процесса плавления присадочной проволоки и отсутствие дефектов наплавленных слоев.

Результаты диссертационного исследования по управлению технологическими параметрами использованы предприятиями АО «Машиностроитель» и ПАО «Протон-ПМ» в процессе разработки технологии электронно-лучевой многослойной наплавки экспериментальных образцов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть) проект № 9.9697.2017 /8.9 «Разработка технологических основ гибридных аддитивных технологий с подачей проволочного присадочного материала», при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (RFMEFI58317X0062) в рамках проекта BRICS «Гибридный процесс изготовления деталей для аэрокосмической отрасли: моделирование, разработка программного обеспечения и верификация», Министерства образования Пермского края (договор № С-26/787 от 21.12.2017) «Послойный синтез материалов в низком вакууме. Разработка экспериментального образца», Российским фондом фундаментальных исследований РФФИ №18-08-01016 А «Разработка научных основ гибридных аддитивных технологий, использующих в качестве источника тепла электрическую дугу в вакууме».

Методология исследования. Для достижения поставленной цели работа включала в себя теоретические и практические исследования. Было применено математическое моделирование формирования тормозного рентгеновского излучения при взаимодействии электронного луча с присадочной проволокой и подложкой в процессе наплавки. Численная реализация математической модели производилась в программном комплексе MathCAD. В работе использован комплекс научно-технологического оборудования: машина электронно-лучевой сварки, компактный механизм

подачи проволоки с приводом на основе шагового двигателя, сцинтилляционный детектор на основе монокристалла активированного йодистого цезия и кремниевый фотоэлектронный умножитель, компьютерная информационно-измерительная система, многоканальные аналого-цифровые преобразователи. В качестве основных методов обработки сигнала рентгеновского излучения использовались синхронное накопление и синхронное детектирование.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель описывающая формирование тормозного рентгеновского излучения от технологических параметров при взаимодействии осциллирующего электронного луча с присадочной проволокой и подложкой в процессе наплавки.

2. Результаты исследования закономерностей сигнала тормозного рентгеновского излучения в зависимости от параметров осцилляции электронного луча и диаметра присадочной проволоки, режима фокусировки электронного луча, положения присадочной проволоки относительно электронного луча в процессе наплавки.

3. Методы определения положения присадочной проволоки и выполнения оперативного управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки.

Степень достоверности и апробация работы:

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием современных средств проведения исследований, обоснованностью методов исследований и верификацией модели по экспериментальным данным, полученным на действующих технологических машинах электронно-лучевой сварки. Результаты исследований не противоречат известным результатам других ученых. Основные результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались на 11 региональных, всероссийских и международных научно-технических конференциях, форумах

и семинарах. По теме диссертационного исследования было опубликовано 23 печатные работы, в том числе 4 в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus или Web of Science, 5 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патента РФ.

Глава 1. Литературный обзор

Первоочередной задачей оперативного управления положением присадочной проволоки является определение положения проволоки относительно электронного луча. Обнаружение проволоки схоже с обнаружением искажений поверхности обрабатываемого металла при электронно-лучевой сварке. При электронно-лучевой обработке металлов с целью их сварки распространены способы обнаружения стыка свариваемых деталей. Следовательно, такие способы могут быть адаптированы к решению поставленной задачи и будут рассмотрены далее.

В настоящее время наиболее распространенные способы слежения за стыком при электронно-лучевой сварке основываются на следующих принципах:

- регистрация возмущений наведенного магнитного поля;
- регистрация отраженных или вторичных электронов со сканированием технологической зоны;
- использование оптической системы в видимом спектре;
- регистрация рентгеновского излучения при сварке статичным лучом или с периодическим сканированием технологической зоны;

1.1. Регистрация возмущений наведенного магнитного поля

Существует несколько способов позиционирования электронного луча. Одним из них является бесконтактный способ определения положения стыка с помощью электромагнитного датчика положения стыка на базе дифференциального феррозонда [44, 45, 46, 85, 47, 48, 49, 83, 93, 94, 77, 74, 19, 22]. Блок-схема предлагаемого устройства представлена на рисунке 1.1.

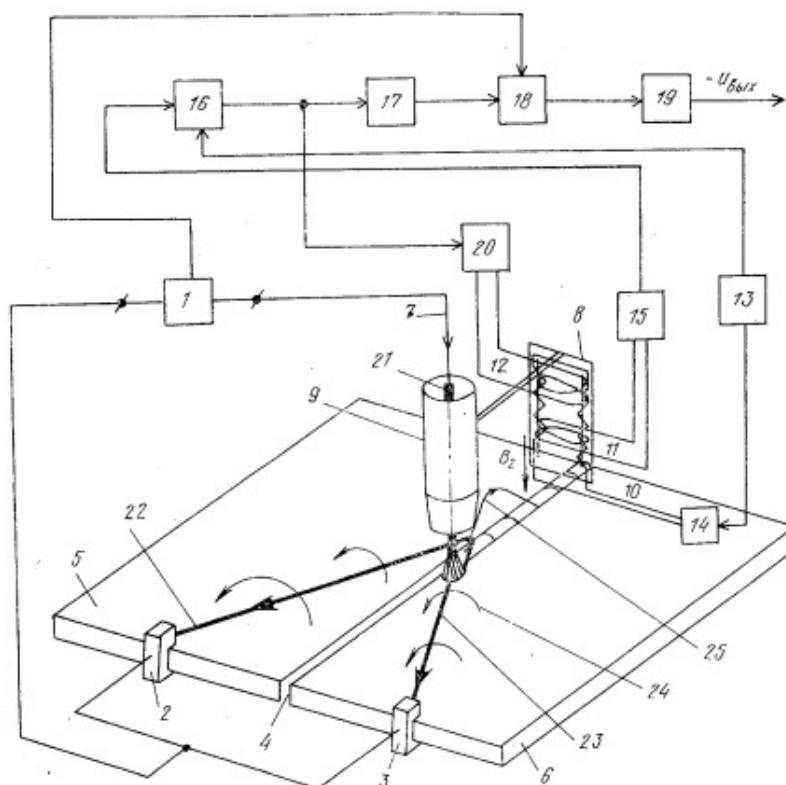


Рисунок 1.1. Блок-схема автоматической системы позиционирования по стыку с помощью электромагнитного датчика на базе дифференциального феррозонда [19]: 1 – источник сварочного тока; 2, 3 – симметричные токосъемники; 4 – стык свариваемых деталей; 5, 6 – свариваемые детали; 7 – цепь сварочного тока; 8 – дифференциальный феррозонд; 9 – электронно-лучевая пушка; 10 – обмотка возбуждения; 11 – выходная обмотка; 12 – компенсационная обмотка; 13 – задающий генератор; 14 – делитель частоты на два; 15, 17 – последовательно соединенные избирательные усилители; 16, 18 – фазовые дискриминаторы; 19 – сглаживающий фильтр, 20 – фильтр обратной связи, 21 – электрод; 22, 23 – две составляющие сварочного тока; 24, 25 – магнитные поля.

Принцип действия данной системы заключается в следующем: магнитное поле высокой частоты наводится в свариваемое изделие, а полученная с помощью датчика информация преобразуется и передается на электропривод исполнительного механизма, корректирующего положение

электронно-лучевой пушки. Датчик располагается на расстоянии 50 мм от технологической зоны во избежание теплового воздействия от сварочной ванны. Система выполняет автоматическое позиционирование электронного луча на стык свариваемого изделия с точностью $\pm 0,2$ мм. Однако, существуют и другие модификации указанного способа регистрации наведенного магнитного поля [44, 45, 46, 85, 47, 48, 49, 83, 93, 94, 77, 74, 19, 22].

Способ позиционирования по параметрам магнитного поля получает значительное преимущество при сварке в атмосфере, так как, конструкция электронно-лучевой пушки не предусматривает поисковых перемещений луча, и, как следствие, при отсутствии перемещений луча указанные системы слежения функционировать не будут. [22, 61]

В своей работе, ученые из СибГАУ Браверман В.Я., Вейсвер Т.Г. и Белозерцев В.С, обосновали возможность получения информации о взаимном положении электронного луча и свариваемого стыка при электронно-лучевой сварке путем регистрации магнитных полей, вызванных протеканием в свариваемых деталях токов без применения дополнительных токоподводов [22].

Основными факторами, влияющими на распределение магнитных полей в зоне электронно-лучевой сварки, являются токи, протекающие в свариваемых деталях, собственное магнитное поле Земли и остаточными магнитными полями деталей. При воздействии электронным лучом точно по стыку возникают элементарные токи I_1 и I_2 , которые направлены противоположно и равны по величине (рисунок 1.2. а), следовательно, вызванные ими магнитные поля будут иметь равные напряженности, в том числе в вертикальном направлении H_{z1} и H_{z2} :

$$H_{z1} - H_{z2} = 0 \quad (1.1)$$

В случае смещения электронного луча от стыка возникает несимметричность свариваемого материала относительно электронного луча, что приводит к изменению на величину ΔH напряженности магнитного поля,

вызванного током I_2 (рисунок 1.2. б). Вертикальная составляющая напряженности ΔH будет определять результирующее магнитное поле [22, 36].

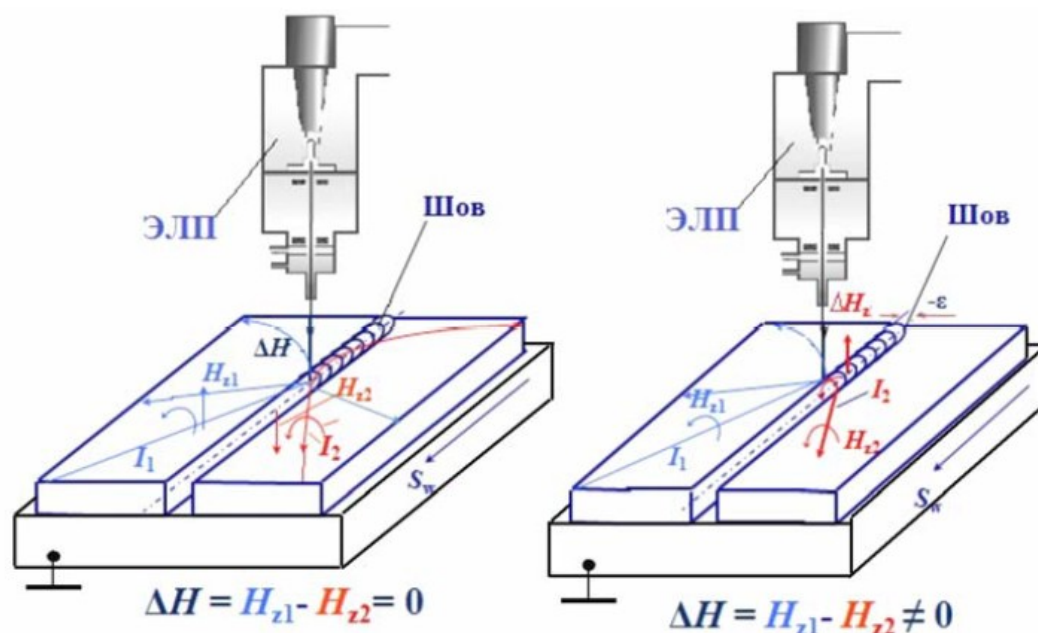


Рис. 1.2. Способ определения отклонения электронного луча от стыка без специальных токоподводов [22].

При электронно-лучевой сварке изделий, выполненных из однородных материалов и имеющих симметричную геометрию стыка, распределение полей симметрично относительно стыка изделия при точном позиционировании электронного луча относительно стыка. При сварке разнородных материалов происходит нарушение симметрии электрофизических характеристик частей изделия, что приводит к изменению распределения токов и вертикальных составляющих магнитного поля [22, 37, 127].

Для осуществления мониторинга и контроля процесса электронно-лучевой сварки разнородных материалов требуется введение корректировки измеряемых величин магнитных полей, при этом осуществляется суммирование измеряемых сигналов с величиной этой корректировки [22].

В соответствии с принципом суперпозиции и законом Био-Савара–Лапласа, расчет вертикальной составляющей магнитного поля ΔH производится

путем интегрирования длин радиусов-векторов по расстоянию от точки измерения до краев деталей. При этом, радиус-векторы соединяют точку измерения с точками, последовательно расположенными вдоль детали. При идентичности материалов, размеров и конфигурации деталей, выражение для определения ΔH имеет вид:

$$\Delta H = \frac{I}{4\pi l} \frac{\varepsilon}{\sqrt{h^2 + l^2 + 4l\varepsilon + 4\varepsilon^2}} \quad (1.2)$$

где I – ток луча; ε – величина смещения электронного луча от стыка; h – высота расположения датчика над плоскостью свариваемых деталей; l – ширина деталей [22, 98].

1.2. Позиционирование электронного луча с помощью датчиков отраженных и вторично-эмиссионных электронов

К способам позиционирования электронного луча относится способ с применением вторично-эмиссионных систем слежения за стыком. Данный метод основан на регистрации электронов, эмитирующих с поверхности изделия, датчиком вторичной эмиссии – коллектором. Вторичные электроны несут сравнительно небольшие энергии, не превышающие 50 эВ. Величина их тока зависит от характеристик материала и поверхности мишени, а также от характеристик падающего на мишень луча электронов. Распределение энергий отраженных электронов имеет непрерывный спектр вплоть до энергии исходного электронного луча. Величина тока отраженных электронов обуславливается характеристиками мишени и взаимным расположением электронного луча и поверхности мишени, практически было установлено что при нормальном падении электронов на поверхность мишени величина тока отраженных электронов может достигать 50% от величины тока исходного электронного луча [83, 24, 10, 71, 107, 138, 28, 16].

При использовании незаряженного коллектора в качестве датчика, величины токов отраженных и вторично-эмиссионных электронов равны. При

подаче напряжения на коллектор -20 В относительно мишени, происходит регистрация только тока отраженных электронов. При подаче напряжения на коллектор +30...+40 В относительно мишени, происходит регистрация всех образующихся вторичных электронов [83, 24, 10, 107, 138].

В условиях интенсивной металлизации, возникающей в процессе сварки, простота и надежность коллектора является неоспоримым преимуществом для улавливания информационного сигнала при сканировании стыка электронным лучом. Во вторично-эмиссионных устройствах слежения за стыком электронный луч предварительно или в процессе сварки сканирует область стыка с высокой скоростью. Во избежание оплавления кромок при сканировании необходима установка достаточно высокой скорости сканирования. Для формирования управляющего сигнала регистрируют временное положение импульсов тока отраженных электронов [83, 24, 10, 107, 138, 13, 17].

Система, представленная на рисунке 1.3, включает в себя блок формирования импульса стыка, генератор сканирования луча, блок коррекции сканирования луча. С помощью генератора сканирования производится выброс электронного луча из зоны сварки в зону зондирования и его перемещение поперек стыка свариваемых деталей. Обычно, время сканирования стыка находится в пределах до 500 мс [86].

В блоке формирования импульса посредством сигнала датчика вторичных электронов преобразуется напряжение, соответствующее изменению эмиссии или отражения электронов в момент пересечения стыка электронным лучом. Сигнал датчика вторичных электронов может быть получен путем преобразования его ключевыми схемами в прямоугольный импульс или линейного преобразования с сохранением формы тока вторичных электронов либо или преобразования его в импульс двойной полярности. Ток вторичных электронов можно описать следующим уравнением:

$$I_{вэ} = k_{вд} \varphi I_{л} \quad (1.3)$$

где $I_{\text{л}}$ – ток луча; φ – коэффициент вторичной эмиссии свариваемых материалов; $k_{\text{вд}}$ – коэффициент, учитывающий количество вторичных электронов, попадающих на датчик [24].

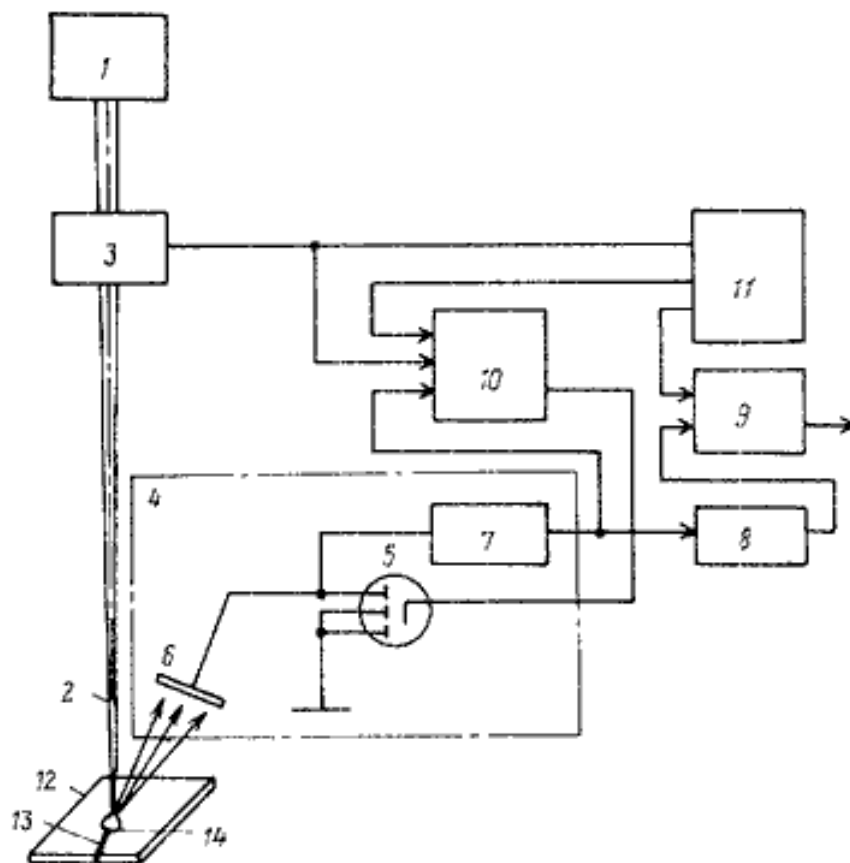


Рисунок 1.3. Блок-схема автоматической системы позиционирования по стыку с помощью вторично-эмиссионной системы слежения за стыком:

- 1 – электронно-лучевая пушка; 2 – электронный луч; 3 – отклоняющая система;
 4 – датчик вторичных электронов; 5 – полевой транзистор;
 6 – коллектор; 7 – усилитель; 8 – блок определения временного положения;
 9 – временной дискриминатор; 10 – блок сравнения; 11 – задающий генератор;
 12 – свариваемая деталь; 13 – стык; 14 – траектория сканирования. [86]

Ток луча представляют через функцию распределения электронов по соответствующим осям ввиду того, что плотность тока в пучке электронов неодинакова по его сечению и носит вероятностный характер (рисунок 1.4) [24].

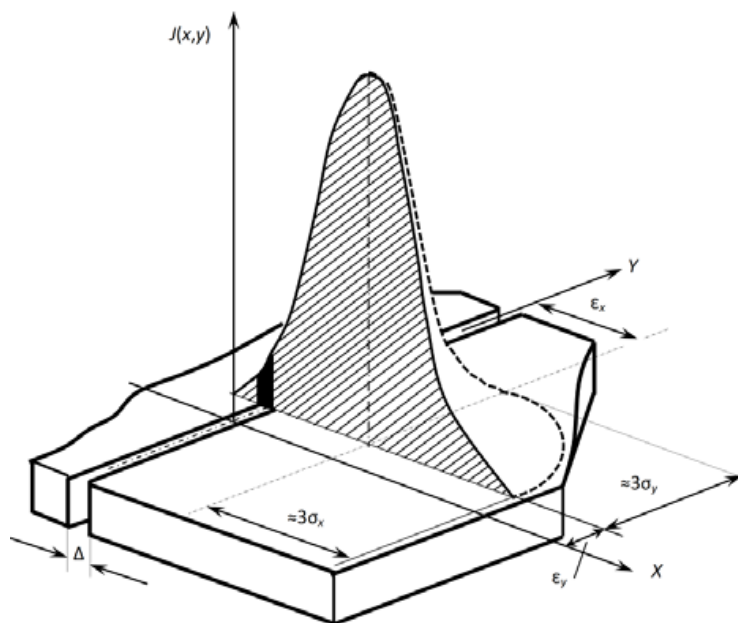


Рисунок 1.4. Распределение электронов в луче по осям. [24]

Формирование управляющего сигнала, который корректирует положение электронного луча относительно стыка свариваемых деталей и контролирование положения импульса стыка относительно развертки электронного луча осуществляет блок коррекции положения луча. Управляющий сигнал, чаще всего, формируют по интегрирующему закону, потому что при этом повышается помехозащищенность при взаимодействии луча со стыком над прихватками. Присутствие разного рода помех является существенным недостатком при использовании такого способа слежения за стыком. Наличие поверхностных неровностей, нестабильность тока луча и ускоряющего напряжения, изменение зазора в стыке, неоднородность свариваемого материала могут являться причиной помех, в процессе электронно-лучевой сварки. Помехи вызывают отклонения (флуктуации) сигнала, влияя на датчик вторичной эмиссии электронов [14, 139, 32, 40].

При сварке мощным лучом, в результате воздействия парогазового облака образуется значительная помеха. Данное облако рассеивает электронный луч и увеличивает его диаметр. Причиной спада сигнала вторичной эмиссии является также выброс пучка вперед стыка свариваемого

изделия. При перемещении электронного луча по траектории сканирования, испарение металла способствует появлению флуктуаций сигнала датчика [51, 52, 88, 76].

Помехозащищенность системы слежения за стыком повышается путем снижения мощности электронного луча в момент обнаружения стыка. Также в системах слежения за стыком возможно использование модулированных источников питания мощностями от 15 до 120 кВт, в которых номинальная мощность луча уменьшается до 100 Вт на короткий промежуток времени, составляющий примерно 2 мс. В данном случае производится динамическая фокусировка электронного луча малой мощности. [14]

Существует способ использующий дифференциальный датчик вторично-эмиссионных электронов, который содержит два коллектора вторичных электронов, расположенных симметрично стыка и дифференциально включенных в измерительное устройство. При этом требуется сканирование электронным лучом вдоль стыка для вынесения электронного луча из сварочной ванны в зону стыка. Сканирующих движений электронного луча поперек стыка не требуется. Дифференциальный датчик вторично-эмиссионных электронов регистрирует асимметрию распределения плотности эмиссии вторичных электронов при смещении электронного луча от оси стыка. [7, 8]

Контроль и управление процессом может быть осуществлен посредством периодического сканирования технологической зоны и построением двумерного изображения в отраженных электронах. [15, 82, 120, 67] Такой контроль за наплавкой и регистрацией отраженных электронов используется компанией Sciaky для наблюдения за процессом электронно-лучевой наплавки сплошной проволокой и для позиционирования электронного луча. Для этого электронный луч периодически осциллирует по растровой траектории для сканирования технологической зоны. Частота осцилляции электронного луча должна составлять не менее 5 раз в секунду. Отраженные

электроны улавливает специальный датчик и затем передает сигнал в блок управления. В блоке управления сигнал обрабатывается и передается на отклоняющие катушки для дальнейшего совмещения положений электронного луча и присадочной проволоки в процессе наплавки. Визуальное отображение зоны сканирования в процессе электронно-лучевой наплавки представлено на рисунке 1.5. [114].

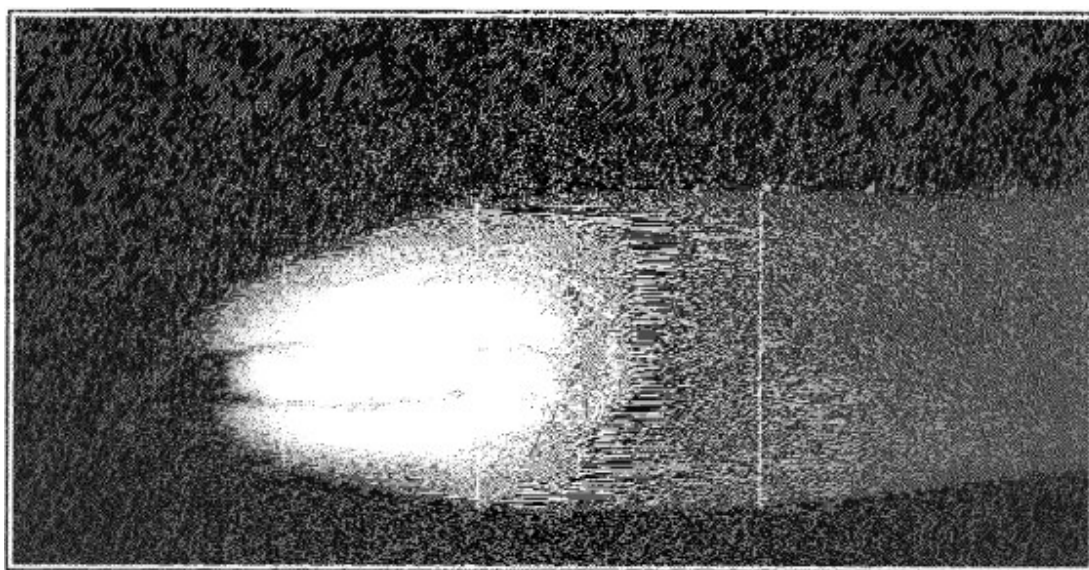


Рисунок 1.5. Визуальное отображение зоны сканирования в процессе электронно-лучевой наплавки. [114]

Схема установки для электронно-лучевой наплавки с применением метода оперативного контроля за положением присадочной проволоки относительно электронного луча, основанного на периодическом сканировании технологической зоны по растровой траектории представлена на рисунке 1.6 [114].

Данный способ контроля за положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки имеет следующие недостатки:

- периодическое прерывание процесса для отклонения электронного луча;

- снижение быстродействия системы за счет сложности обработки двумерного изображения области наплавки.

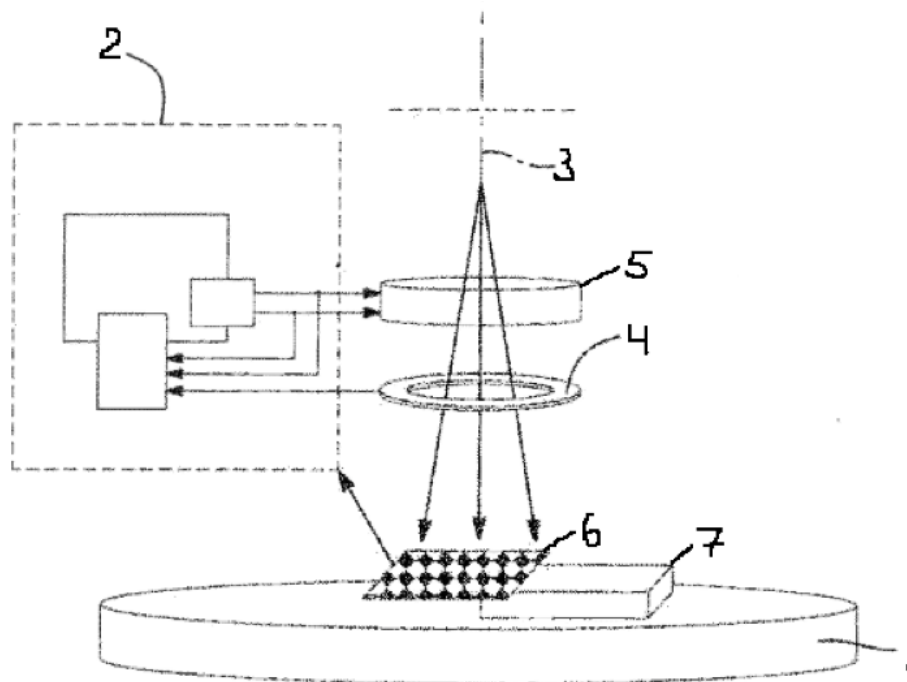


Рисунок 1.6. Схема установки с применением метода контроля, основанном на периодическом сканировании технологической зоны: 1 – поворотный стол; 2 – блок управления системой; 3 – электронный луч; 4 – датчик отраженных электронов; 5 – отклоняющие катушки; 6 – зона сканирования; 7 – наплавленный материал. [114]

1.3. Позиционирование электронного луча с помощью видеокамеры и системы подсветки

Широкое применение в настоящее время получил метод позиционирования электронного луча с использованием герметичной видеокамеры и системы подсветки. Данный способ активно применяется для контролирования процесса электронно-лучевой сварки и наплавки. [91, 54, 97, 34, 78, 84, 9, 53, 79]

Сотрудниками НПП «Исток» была запатентована установка (патент RU2510744C1, В23К 15/066, 2014), которая состоит из вакуумной системы с вакуумной камерой, в которой размещены координатный стол и электронно-

оптическая система с триодной электронной пушкой. Координатный стол имеет возможность периодического поворота и вращения, а также на нем установлены держатели деталей, способные выполнять наклон на угол от 0° до 90° . Электронно-оптическая система имеет возможность как горизонтального, так и вертикального перемещения относительно стола. Съемная диафрагма устанавливается между фокусирующим электродом и катодом. Оптические призмы размещены на держателе внутри второго анода, на котором неподвижно установлены герметичная видеокамера и система подсветки. Отсутствие образования углеводородных соединений в вакуумной камере при сварке и наплавке обеспечивается использованием безмасляных насосов. Структурная схема установки представлена на рисунке 1.7 [91].

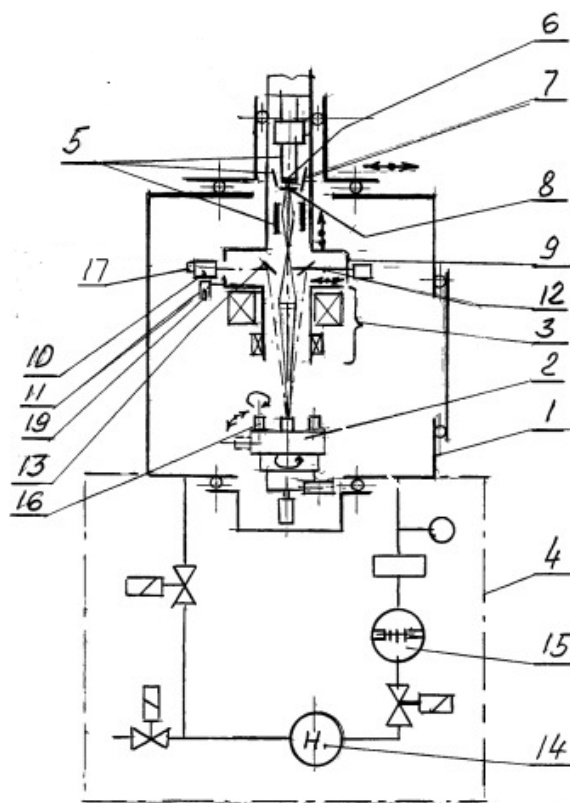


Рисунок 1.7. Структурная схема установки для электронно-лучевой сварки и наплавки с системой контроля на основе герметичной видеокамеры и системы подсветки: 1 – вакуумная камера; 2 – координатный стол; 3 – электронно-оптическая система; 4 – вакуумная система; 5 – триодная электронная пушка; 6 – катод; 7 – фокусирующий электрод; 8 – съемная диафрагма; 9 – второй анод пушки; 10 – герметичная видеокамера; 11 – система подсветки; 12 – держатель; 13 – оптические призмы; 14 – безмасляный форвакуумный насос;

15 – безмасляный турбомолекулярный насос; 16 – держатель детали;
17 – видеомонитор. [91]

Сотрудниками ЧНТУ (Украина) и ЧНУ им. Богдана Хмельницкого (Украина) была разработана система многопараметрического адаптивного управления процессом электронно-лучевой сварки посредством использования изображения в видимом спектре, получаемого из зоны сварки. В качестве источника информации о процессе сварки было рассмотрено тепловое поле технологической зоны сварки. Такие информационные параметры как спектр излучений из зоны сварки, а также форма, размеры и положение высокотемпературной области расплавленного металла могут быть использованы для контроля и корректировки процесса электронно-лучевой сварки. На эти информационные параметры оказывают влияние множество факторов, среди них: технологические параметры сварки и характеристики электронного луча, конфигурация и теплофизические параметры свариваемого деталей, характеристики окружающей среды (вакуума). Следовательно, изменение этих факторов в процессе сварки вносит изменения в получаемое изображение технологической зоны. [54].

Тепловое распределение свариваемого стыка может быть получено путем регистрации и анализа спектра излучений из технологической зоны, с последующей обработкой с целью решения обратной задачи. Высокотемпературная область, излучающая в видимом спектре, несет основной объем информации для системы управления электронно-лучевой сварки. В первую очередь рассматривались форма и размеры этой области, и, распределение интенсивности и спектра излучений в ней. Регистрируемый видимый спектр излучения из зоны сварки может быть использован в качестве сигнала обратной связи для системы управления процессом электронно-лучевой сварки по плотности энергии электронного луча [54].

Использование сенсора на основе приборов с зарядной связью является типовым решением в системах технического зрения. Элементы матрицы

приборов с зарядной связью формируют пропорциональные яркости исходного изображения сигналы. Однако необходимо учитывать наличие областей с очень высокой яркостью на объекте наблюдения в процессе видеомониторинга зоны сварочного процесса для использования видео сенсоров данного типа. Следовательно, необходимо производить трансформацию светового потока или обеспечивать соответствующий динамический диапазон сенсора в пределах оптического тракта системы технического зрения [54].

Такие помехи, как засветки, тени, блики и другие помехи приводят к необходимости принятия мер по снижению их эффектов на механизмы формирования визуальных эффектов в службах технического зрения. Снизить такие помехи позволяет лазерное излучение для подсветки зоны сварки и применение светофильтра с поляризацией светового излучения в плоскости, совпадающей с плоскостью поляризации лазера. Необходимо также учитывать помехи от электронно-лучевой пушки, но при этом может пострадать качество получаемого изображения из-за сужения динамического диапазона сенсора видимого излучения [54, 97, 78].

Перспективным направлением развития средств технического зрения является объединение функций получения изображения и его предварительной обработки. Фирма Omron является примером осуществления такого подхода, что отражается в серии датчиков FQ являющихся регистраторами видимого излучения с распознаванием естественных цветов. В качестве возможностей этих датчиков можно отметить обнаружение объектов и вычисление их расположения, что стало возможно путем совмещения в одном корпусе сенсора с обработчиком сигнала, блоком сопряжения и блоком подсветки. В частности, датчик FQ-S2 способен выполнять регистрацию, измерение и выполнение логических операций, в том числе оценивать цвет, форму, размеры и положение объектов, а также их взаимное расположение [54, 34, 35].

Различные степени сложности модели сварочного пятна могут использоваться для управления процессом сварки. Простая модель овального

изображения расплавленной ванны может быть построена по показателю кривизны и симметрии, минимальной и средней яркости всего пятна. Для отслеживания формы, размеров и положения высокотемпературной области расплавленного жидкого металла вполне достаточно той информации, которую дают такие модели [54, 29].

При необходимости описания сложной формы области расплавленного металла, а также для учета распределения температуры в этой зоне могут применяться более сложные модели. Такие модели дают инструмент выделения зоны распределения жидкой и твердой фаз, более адекватного отображения динамики процессов теплопереноса, осуществления поиска технологически значимых артефактов. В процессе электронно-лучевой сварки прямолинейных участков изделий из однородных материалов наблюдается симметричное тепловое поле в технологической зоне. На рисунке 1.8а. показан вид зоны релаксации и область формирования изображения сварочного стыка, соответствующей данной технологической ситуации. Для построения модели изображения области расплавленного металла были использованы графические примитивы в виде отрезков и окружностей, а также было задано их взаимное расположение. Смещение электронного луча от стыка в процессе сварки приводит к изменениям в распределении тепловых потоков и, следовательно, к искажению теплового поля в технологической зоне. На рисунке 1.8б для данной ситуации показана модель видимой области теплового поля. В этом случае исходная картина (рисунок 1.8а) принимает вид более сложной, описываемой с использованием большего количества примитивов с более сложным взаимным расположением. Описываемая модель высокотемпературной области расплавленного металла может применяться для анализа протекающего процесса по изображению технологической зоны. Перспективным подходом представляется анализ кривизны периметра зоны расплавленного металла и представление ее в виде прямых линий и окружностей. При этом оценку и классификацию высокотемпературной области можно выполнять посредством

анализа количества и взаимного расположения графических примитивов [54, 75].

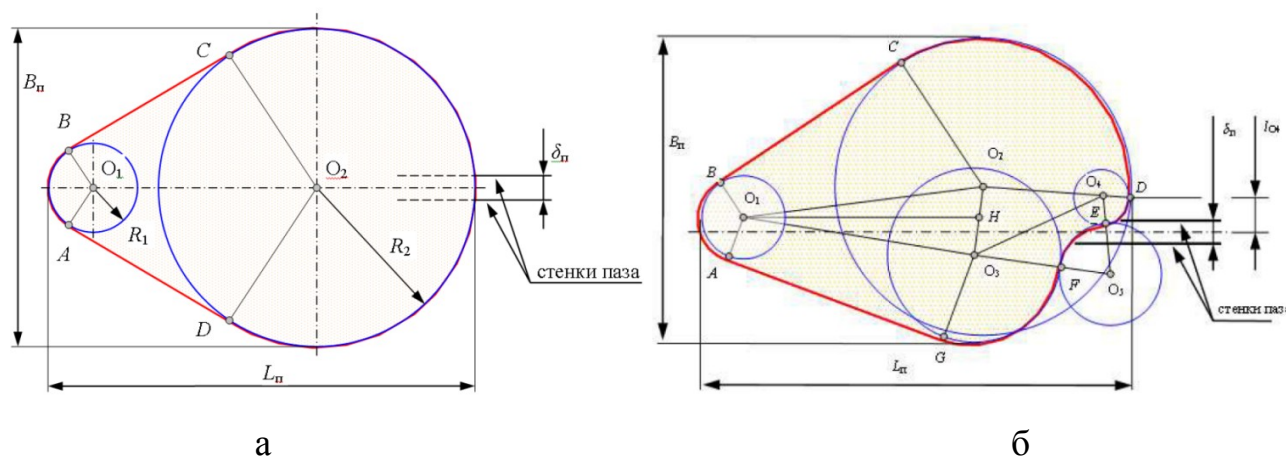


Рисунок 1.8. Модель наблюдаемой области теплового поля.

а – позиция электронного луча по центру паза; б – смещение электронного луча от центра паза. [54]

Также были проведены исследования для разработки алгоритмов выявления характерных особенностей получаемых изображений, связанных с процессами, протекающими при электронно-лучевой сварке, и для учета шумовых эффектов в построении изображения из технологической зоны. Были исследованы изменения следующих характеристик изображения: форма и размеры, угол поворота, наличие шумов. Кроме того, была проведена оценка точности распознавания характерных особенностей изображения по методу, основанному на линейных бинарных шаблонах (рисунок 1.9). Исследование формы и размеров изображения показало ошибку в пределах 1% для симметричного изображения и ошибку до 10% для несимметричного изображения, а оценка точности положения изображения показала незначительные расхождения результатов построения изображения. Качество прогнозируемых результатов исследованных алгоритмов достаточно для достоверного определения информационных признаков наблюдаемого процесса электронно-лучевой сварки [54].

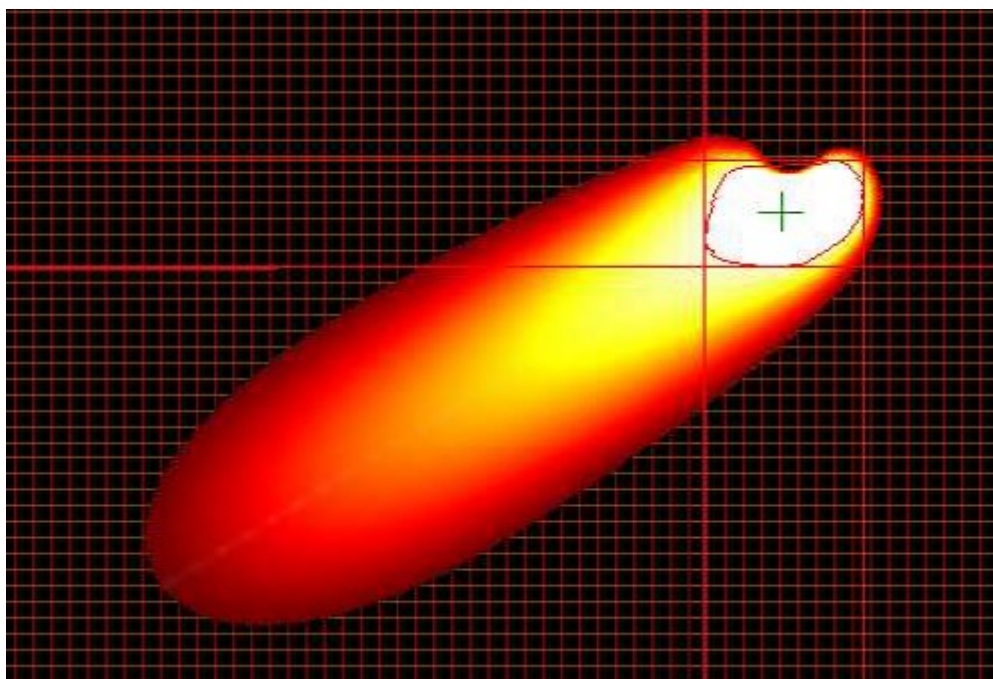


Рисунок 1.9. Определение границы светового пятна и её метрических характеристик методом линейных бинарных шаблонов. [54]

Данный способ позиционирования электронного луча может быть использован для контроля и управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки и имеет как достоинства, так и недостатки. Преимуществами данного способа являются незначительные требования к расположению регистрирующего датчика и высокая информативность видеоданных, которые содержат комплексную информацию о процессе. Недостатками данного метода являются: потребности в относительно высоких вычислительных мощностях из-за необходимости применения дополнительной обработки получаемого видеоизображения для осуществления оперативного контроля и управления, а также относительно высокая стоимость оборудования.

1.4. Позиционирование электронного луча с помощью рентгеновских датчиков

В настоящее время активно применяются системы позиционирования электронного луча, которые основаны на регистрации сигнала рентгеновского излучения с помощью специальных датчиков. Электроны луча испытывают торможение в процессе электронно-лучевой обработки материала что приводит к снижению их энергий посредством, в том числе, испускания излучения рентгеновского спектра. Электрические и магнитные поля не способны отклонить рентгеновские лучи, распространяющиеся точно по прямым траекториям. Минимальному ослаблению рентгеновских лучей способствуют лишь пары металла, сквозь которые проходит данное излучение. Высокая помехозащищенностью рентгеновских датчиков по сравнению с вторично-эмиссионными датчиками обуславливается их перспективность применения. Это связано с тем, что данные датчики гальванически развязаны от сварочного оборудования, а также легко экранируются [18, 23, 24, 25, 27, 30, 123].

Существует два основных способа отслеживания положения электронного луча относительно стыка, в процессе электронно-лучевой сварки. Получить информацию о положении стыка вблизи зоны сварки можно путем кратковременных прерываний процесса на осуществление сканирующих движений электронным лучом. При этом время сканирования электронным лучом должно быть ограничено для избегания плавления сканируемых областей и значительных изменений канала проплавления. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от взаимного положения электронного луча и сварочного стыка имеет характерный экстремум. В условиях сварки этот экстремум является локальным максимумом, а при условиях сканирования – локальным минимумом. Такой характер экстремальной зависимости объясняется изменением плотности изделия при переходе через сварочный стык. Меньшая плотность изделия в стыке приводит

к снижению скорости торможения электронов и к уменьшению интенсивности рентгеновского излучения [20, 131].

При малых зазорах, не превышающих сотой доли миллиметра, интенсивность рентгеновского излучения, при переходе электронного луча через стык, изменяется незначительно (не более 5%). Исходя из этого существует потребность в применении обработки сигнала для получения информационной составляющей спектра сигнала и для снижения влияния на нее шумов. Неровная поверхность свариваемого изделия приводит к возникновению эффекта изменения интенсивности формируемого рентгеновского излучения от угла между осью электронного луча и нормали к поверхности. Характер экстремума в виде локального максимума в процессе электронно-лучевой сварки обусловлен способностью свариваемого материала поглощать рентгеновское излучение. В пределах зазора происходит минимальное ослабление рентгеновского излучения ввиду минимальной толщины материала на пути от области формирования излучения до датчика [20].

Другим способом получения информации о процессах в технологической зоне может стать использование камеры-обскуры, видеокамеры и сцинтилляционного слоя между ними. В работе Бравермана В.Я. и Кучаевой Д.Г., сотрудников СибГАУ, в качестве рентгенофлюоресцентного слоя использовался NaI. Введение в измерительную цепь дополнительного коэффициента ослабления необходимо для наблюдения за каналом проплавления в процессе электронно-лучевой сварки. Ослабление отсутствует при регистрации излучения из корня канала, а максимальное ослабление вводится при регистрации излучения из точки, близкой к поверхности изделия. Практически это может быть реализовано программным способом через управление коэффициентом преобразования в ходе процесса построчного опроса, сформированного на кристалле датчика рентгена, изображения [23].

Чаще всего в процессе контроля положения электронного луча относительно стыка выполняют технологические сканирования поверхности изделия электронным лучом. Эти сканирования могут быть как периодическими, так и непрерывными. Кроме того, применение такого технологического приема может оказать положительное влияние на структуру переплавленного металла и его характеристики пластичности [81, 64, 43]. При этом могут быть применены коллиматоры для экранирования от рентгеновского излучения не из технологической зоны, в том числе излучение, отраженное от стенок вакуумной камеры (рисунок 1.10). [11, 38, 137, 66, 29, 63, 65, 31]

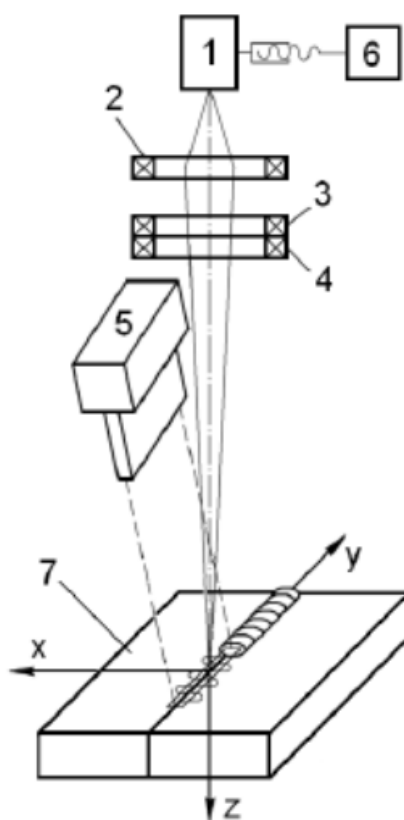


Рисунок 1.10. Схема системы слежения за стыком с использованием коллимированного рентгеновского датчика: 1 – электронно-лучевая пушка; 2 – фокусирующая система; 3, 4 – отклоняющая система; 5 – коллимированный рентгеновский датчик; 6 – электропривод перемещения электронно-лучевой пушки; 7 – свариваемое изделие. [11]

Выходной сигнал рентгеновского датчика, в процессе сканирования электронного пучка поперек стыка, содержит гармоническую составляющую с частотой сканирования. Амплитуда этой составляющей пропорциональна отклонению электронного луча от оптической оси пушки, которое вызвано действием магнитных полей в промежутке от пушки до свариваемых деталей, причем, на направление смещения указывает фаза этой гармонической составляющей [38, 57].

При электронно-лучевой сварке разнородных материалов должен производиться учет их атомных номеров, так как интенсивность тормозного рентгеновского излучения пропорциональна атомному номеру мишени. Пример относительной интенсивности рентгеновского излучения при сварке меди (Атомный номер 29) и стали (Атомный номер 26) представлен на рисунке 1.11 [95].

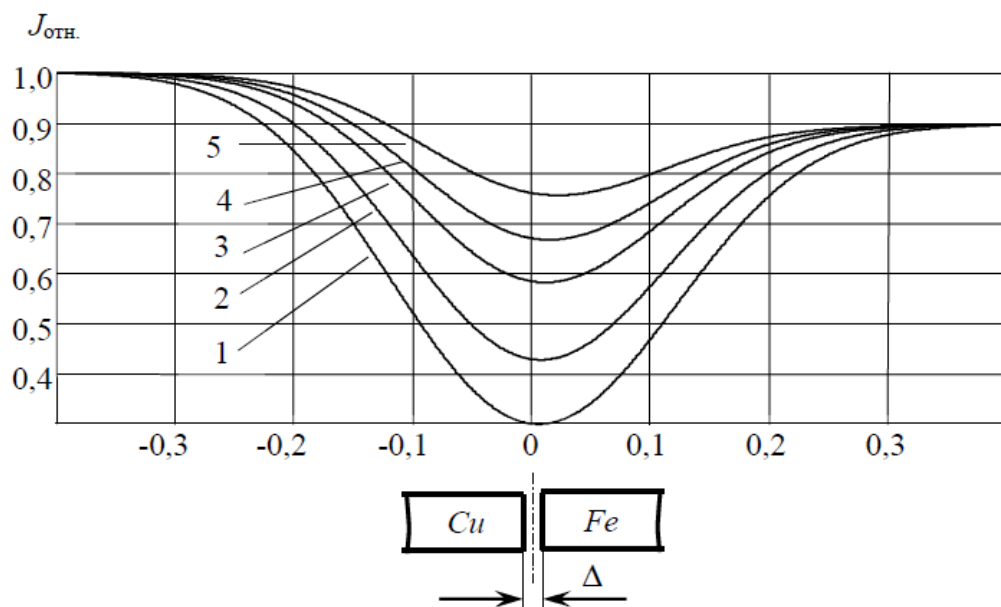


Рисунок 1.11. Относительная интенсивность тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке стали с медью.

Среднеквадратическое отклонение электронов от оси луча 0,1 мм.

1 – $\Delta=0,2$ мм; 2 – $\Delta=0,15$ мм; 3 – $\Delta=0,1$ мм; 4 – $\Delta=0,075$ мм; 5 – $\Delta=0,05$ мм [113]

Как видно из графиков, ветви характеристик имеют разные наклоны при электронно-лучевой сварке разнородных металлов. Большой наклон соответствует материалу с большим атомным номером. Смещение экстремума в сторону металла с меньшим атомным номером является другой особенностью этих характеристик. Это вызвано тем, что равенством излучения с соответствующих поверхностей определяет координату экстремума, при этом, рентгеновское излучение пропорционально току пучка электронов, также как и площади, находящейся на данном металле, части пятна. Площадь пятна на стальной детали, для выполнения названного равенства, должна быть больше площади пятна на медной детали, так как атомный номер железа меньше атомного номера меди. Следовательно, происходит смещение электронного луча в сторону стальной детали. Для систем слежения за стыком, основанных на экстремальных регуляторах, необходимо учитывать при формировании управляющих сигналов, что положение стыка не совпадает с положением экстремума характеристики. При отношении $\Delta/\sigma \leq 1$ проявляются заметные различия положений экстремума характеристик и стыка. Такой случай подтверждает необходимость учета этого различия так как является наиболее распространенным на практике [113].

1.5 Формирование тормозного рентгеновского излучения в процессе электронно-лучевой обработки материала

Основными энергетическими характеристиками процесса обработки материала электронным лучом являются такие энергетические параметры электронного луча, как, ток электронного луча, ускоряющее напряжение, плотность распределения энергии по сечению луча. Необходимое качество технологического процесса невозможно без контроля и стабилизации указанных параметров. В настоящее время системы стабилизации и контроля ускоряющего напряжения и тока достаточно хорошо отработаны. Однако,

требует своего решения задача стабилизации и контроля плотности распределения энергии по сечению электронного луча. Мощность электронного пучка определяется как произведение тока электронного луча на ускоряющее напряжение. Удельная мощность является одним из важнейших параметров и может быть определена если известен диаметр электронного луча:

$$q_2 = \frac{U_0 I}{\pi d^2 / 4} \quad (1.4)$$

где I – ток электронного луча; U_0 – ускоряющее напряжение; d – диаметр электронного луча. [90]

Различную конфигурацию зоны обработки при одинаковой погонной энергии можно получить в зависимости от величины удельной мощности. Эффективный диаметр и распределение в нем энергии являются наиболее трудно определяемым и наиболее существенным параметром электронного луча. В настоящее время разработано достаточно много способов экспериментального определения эффективного диаметра электронного луча и распределения в нем энергии. Метод вращающегося зонда является наиболее простым. Метод прямого края применяют для получения информации о мощном электронном луче. Метод щелевой диафрагмы позволяет получить наиболее точные результаты. Возможность описания, с достаточной степенью точности, нормальным законом распределения плотность тока по сечению электронного пучка подтверждают экспериментальные данные [41, 60, 73, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 39, 55, 59, 68, 69, 70, 111, 118, 121, 128, 132].

Тормозное рентгеновское излучение имеет непрерывный спектр в диапазоне частот от нуля до ν_0 , где граничная частота спектра прямо пропорциональна ускоряющему напряжению [72]:

$$\nu_0 = 2,42 \cdot 10^{14} U_0 \quad (1.5)$$

Для ускоряющего напряжения 60 кВ граничная частота спектра рентгеновского излучения будет $\nu_0 = 2,42 \cdot 10^{14} \cdot 60 \cdot 10^3 = 145,2 \cdot 10^{17}$ Гц.

Вентцель теоретически получил следующую формулу, описывающую зависимость между интенсивностью лучей торможения от частоты:

$$J_\nu = CZ^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{\nu_0 - \nu}} - \frac{1}{\sqrt{\nu_0}} \right)^{-\frac{2}{3}} \cdot (1 + Q), \quad (1.6)$$

где J_ν – плотность интенсивности излучения частоты ν ; $C = \frac{16}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{\pi^2 e^6}{mhc^3} = const$;

$Q = 0,218Z\sqrt{R} \left(\frac{1}{\sqrt{\nu_0 - \nu}} - \frac{1}{\nu_0} \right)^{-\frac{2}{3}}$; c – постоянная Планка; R – постоянная Ридберга,

$R = \frac{2\pi mc}{ch^3} = 109737 \text{ см}^{-1}$; $h = 6,6254 \cdot 10^{-27} \text{ эрг}$.

В работе Крамуса найдена более простая, но менее точная формула, описывающая зависимость интенсивности тормозного излучения от частоты:

$$J_\nu = n \frac{8\pi}{3\sqrt{3}b} \cdot \frac{e^2 h}{c^3 m} Z(\nu_0 - \nu) \quad (1.7)$$

где b – число, приблизительно равное 6; n – число электронов, падающих в 1 с.

После подстановки числовых данных эта формула принимает вид:

$$J_\nu = 0,341 \cdot 10^{-37} IZ(\nu_0 - \nu) \quad (1.8)$$

При взаимодействии электронного пучка с поверхностью обрабатываемого материала, перпендикулярной направлению электронного пучка, поток энергии тормозного рентгеновского излучения определяется выражением:

$$\Phi_e = k_0 IZU_0^2, \quad (1.9)$$

где U_0 – ускоряющее напряжение; Z – атомный номер обрабатываемого материала; k_0 – коэффициент пропорциональности; I – ток электронного пучка [72, 96].

По экспериментальным данным при ускоряющих напряжениях до 200 кВ коэффициент $k_0 = (0,8 \pm 0,2) \times 10^{-9} \text{ В}^{-1}$ [90].

На рисунке 1.12 представлена диаграмма распределения интенсивности тормозного рентгеновского излучения в пространстве при разных углах падения электронного луча на мишень [102]. Из диаграммы видно, что падении луча по нормали к поверхности излучение распространяется равномерно в

пределах $\pm 60^\circ$ от нормали. При падении луча под углом 45° на поверхность, наблюдается небольшое искажение распространения рентгеновского излучения в пространстве.

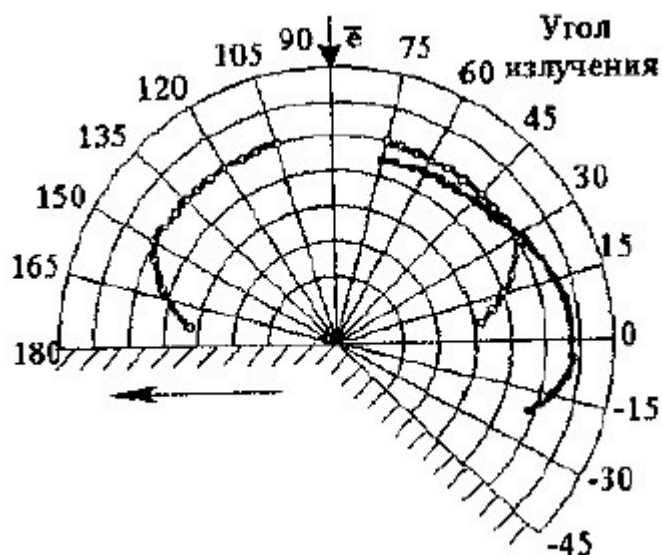


Рисунок 1.12. диаграмма распределения интенсивности тормозного рентгеновского излучения в пространстве. Угол падения луча: $\circ$ – 90° , $\bullet$ – 45° .

[102]

В работе [21] экспериментально определено влияние угла между направлением электронного луча и нормалью к поверхности мишени на значение относительного потока энергии рентгеновского излучения (рисунок 1.13). Относительное значение рентгеновского излучения было определено делением, соответствующих текущему углу φ , интенсивностей излучения на максимальную интенсивность, измеряемую при $\varphi = 0^\circ$. Полученная зависимость была аппроксимирована авторами [21, 26] выражением:

$$\Phi_\varphi(\varphi) = \frac{\Phi(\varphi)}{\Phi_e} = \left[1 - \left(\frac{\varphi}{90} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.10)$$

при изменении угла φ от 0° до 90° . Правую часть выражения 1.10 можно аппроксимировать функцией $\cos^{\frac{1}{3}}(\varphi)$.

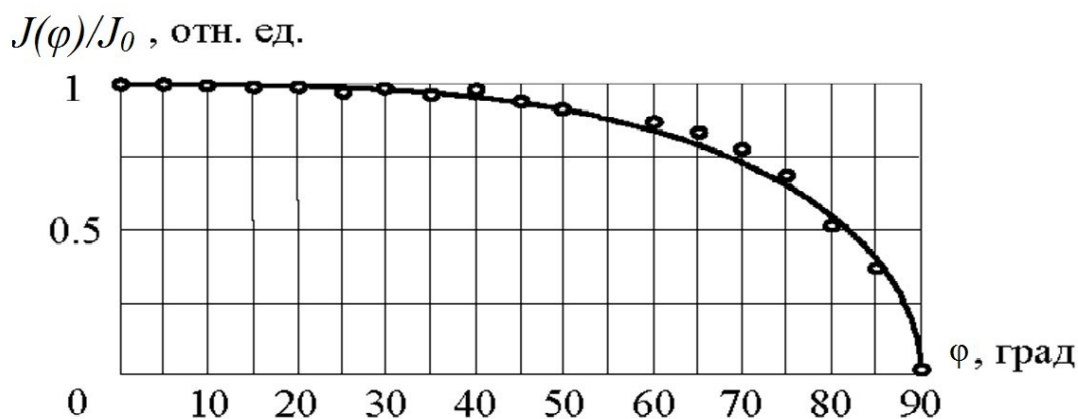


Рисунок 1.13. Изменение потока энергии рентгеновского излучения от угла между направлением электронного луча и нормалью к поверхности свариваемых деталей [21].

Выводы и постановка задач

- При электронно-лучевой обработке материалов широко используются различные способы оперативного контроля за наведением электронного луча на требуемую область, например, на присадочную проволоку или на сварочный стык.
- Чаще всего для процессов электронно-лучевой наплавки, в том числе трехмерной, применяются способы, основанные на получении двухмерного изображения технологической зоны посредством регистрации отраженных электронов.
- Использование рентгеновского излучения из технологической зоны в качестве сигнала обратной связи для осуществления оперативного управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки создает сочетание преимуществ помехозащищенности сигнала и простоты его измерения.
- Необходимо исследование закономерностей и особенностей формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе электронно-лучевой наплавки проволокой для разработки способа оперативного

управления положением проволоки с целью повышения стабильности геометрии и качества наплавленных слоев.

Исходя из вышесказанного **целью диссертационной работы** является разработка метода оперативного управления положением присадочной проволоки относительно электронного луча для обеспечения стабильности качества изделий при многослойной электронно-лучевой наплавке.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих систем оперативного позиционирования электронного луча в процессе электронно-лучевой обработки металлов.

2. Исследование сигнала тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны.

3. Построение модели формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе взаимодействия электронного луча с присадочной проволокой и подложкой.

4. Разработка метода оперативного управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки по сигналу рентгеновского излучения из технологической зоны.

Глава 2. Методика проведения исследований

2.1 Основные материалы, оборудование и программное обеспечение, использованные в работе

Большая часть натурных экспериментов проводилось на установке электронно-лучевой сварки ЭЛУ-М (рисунок 2.1) с энергетическим агрегатом фирмы Selmi – ЭЛА-6ВЧ, обладающей следующими характеристиками:

- Потребляемая мощность не более 8 кВт;
- Ускоряющее напряжение 60 кВ;
- Ток сварки до 100 мА;
- Ток фокусировки 400-1000 мА;
- Угол отклонения луча $\pm 7^\circ$;
- Отклонение луча по двум взаимно перпендикулярным осям;
- Тип катода термоэмиссионный, косвенного накала;
- Материал катода – гексоборидлантана (LaB6);
- Рабочее расстояние от среза пушки 100 – 500 мм.

Вакуумная камера изготовлена из коррозионностойкой стали аустенитного класса марки 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632–72. Данная сталь широко используется в вакуумной технике, она хорошо сваривается и может эксплуатироваться при различных агрессивных условиях. Также не маловажно, что данная сталь является немагнитной. Габариты камеры 1х1х1 м (объем 1 м³), толщина стенки 25 мм. На передней стенке камеры расположена дверь со смотровым окном из свинцового рентгенозащитного стекла СРЗ-3.

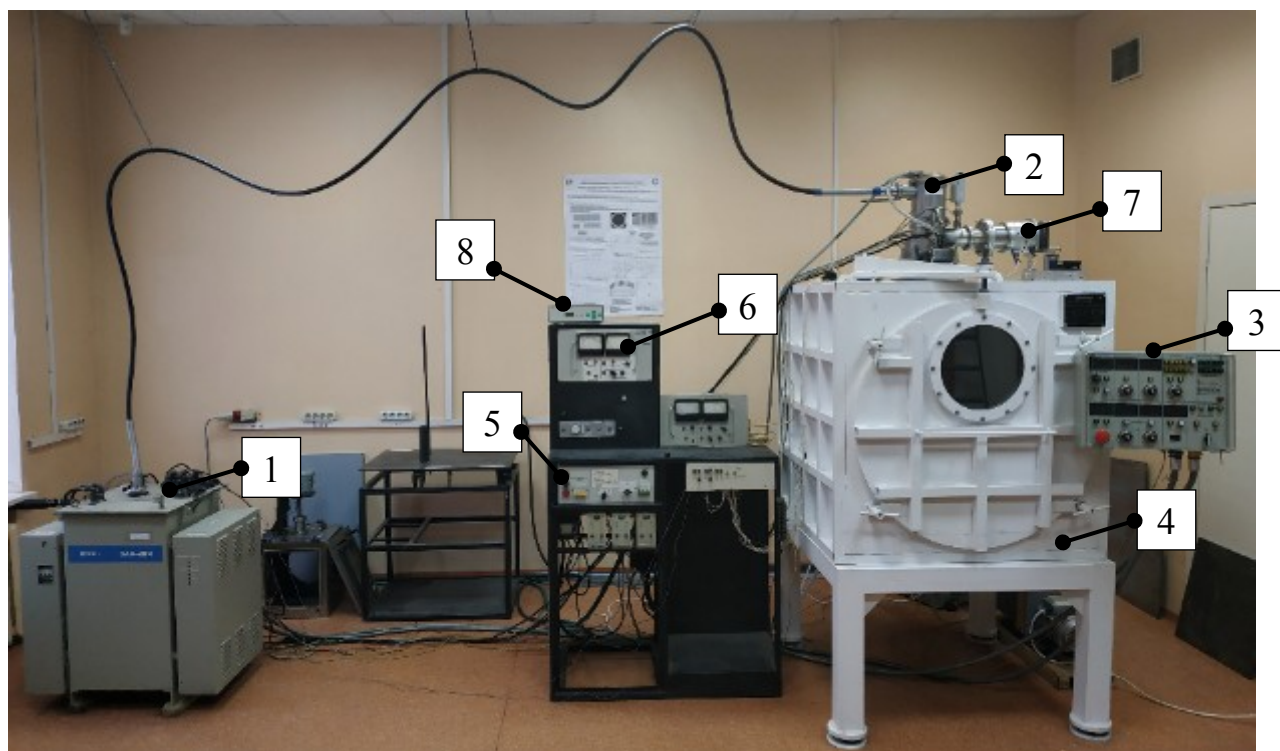


Рисунок 2.1 – Общий вид ЭЛУ-М: 1 – высоковольтный источник питания ЭЛА-6ВЧ; 2 – пушка электронно-лучевая; 3 – панель управления процессом; 4 – камера вакуумная; 5 – панель управления элементами вакуумной системы; 6 – вакуумметры; 7 – насос турбомолекулярный; 8 – блок управления турбомолекулярным насосом.

Турбомолекулярный насос ВВ-150 используется для создания высокого вакуума в электронно-лучевой пушке (рисунок 2.2). На правой стенке корпуса также расположено несколько фланцев для установки дополнительных навесных элементов. Фланец Ду180 (рисунок 2.3) предусмотренный для установки вакуумных электрических разъемов, обеспечивающих коммутацию кабельной инфраструктуры, находящейся внутри вакуумируемого объема с корреспондирующими ответными соединителями снаружи камеры: сигнальных и силовых кабелей установки позиционирования, датчиков и приводов, освещения, телеметрических датчиков вторичных сигналов, возникающих в процессе электронно-лучевой обработки, которые в дальнейшем планируется

использовать для обеспечения быстродействующей обратной связи при управлении процессом наплавки.

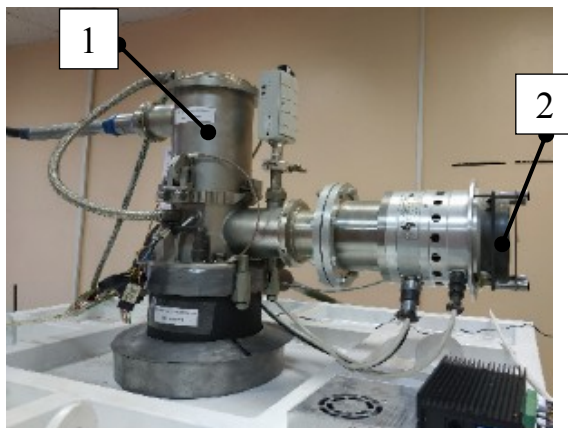


Рисунок 2.2. Электронно-лучевая пушка (1) с турбомолекулярным насосом ВВ-150 (2).

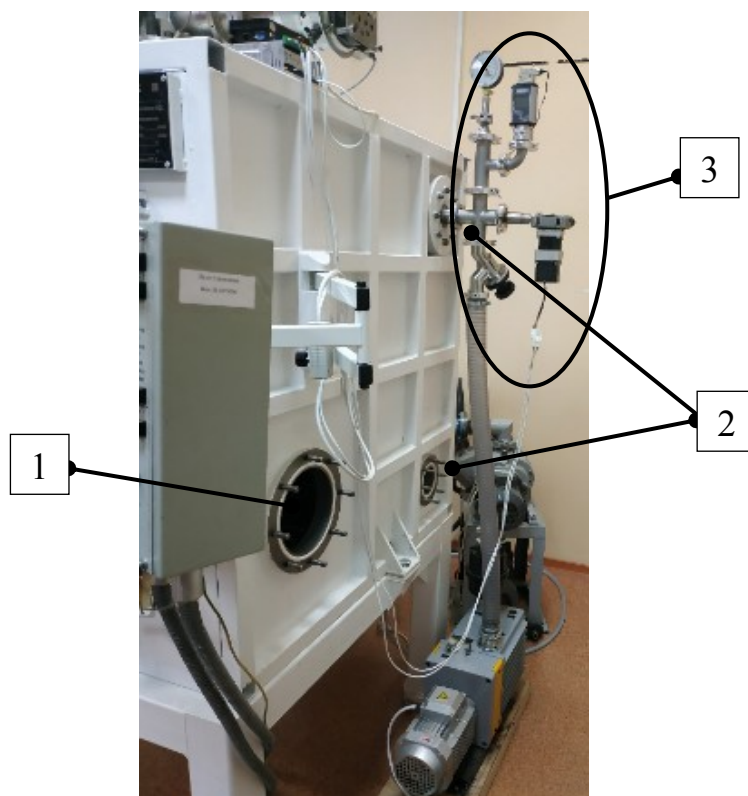


Рисунок 2.3. Правая стенка корпуса вакуумной камеры ЭЛУ-М:
1 – фланец Ду180; 2 – фланец Ду80; 3 – блок подачи присадочной проволоки.

На верхний Ду80 (рисунок 2.3) установлено устройство дифференциальной откачки для осуществления ввода проволочного материала

в объем вакуумной камеры. Нижний фланец Ду80 (рисунок 2.3) предназначен для установки ввода жидкостного охлаждения, для обеспечения возможности теплоотвода от объектов, находящихся внутри камеры для нормальной работы поддержания заданного температурного режима. На задней стенке ВК расположен фланец ДУ260 (рисунок 2.4) на который через отвод смонтирована вакуумная система ЭЛУ-М.

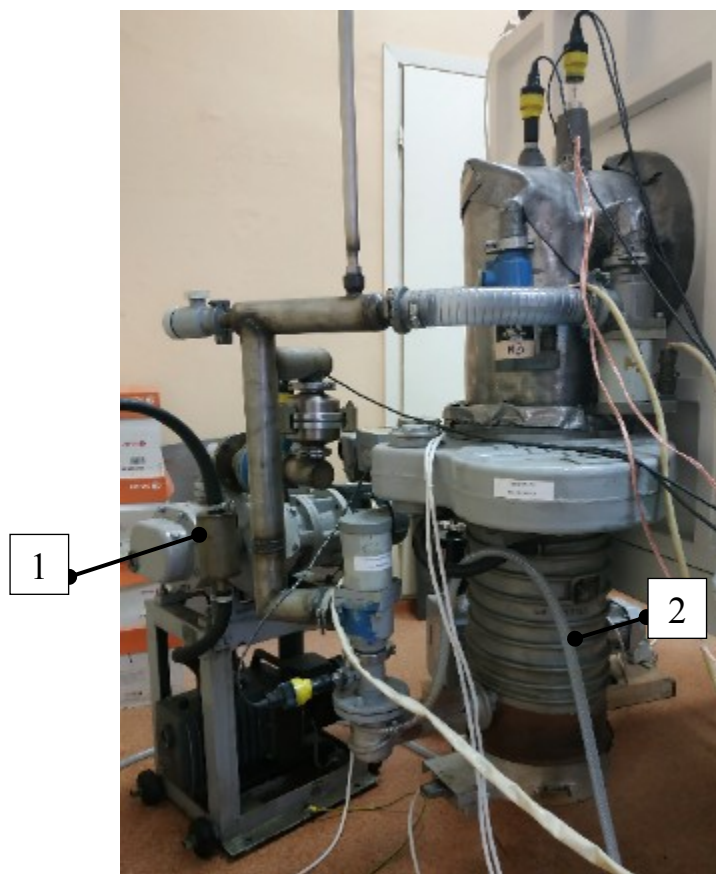


Рисунок 2.4. Задняя стенка корпуса вакуумной камеры ЭЛУ-М:

1 – вакуумный агрегат АВР-50; 2 - диффузионный паромасляный насос НВДМ-250.

Вакуумная система ЭЛУ-М состоит из нескольких ступеней. Агрегат АВР-50 состоит из двух последовательно соединенных вакуумных насосов: двухступенчатого пластинчато-роторного вакуумного насоса 2НВР-5ДМ и двухроторного вакуумного насоса ДВН-50, которые используются для форвакуумной ступени откачки из камеры. Насос вакуумный диффузионный

паромасляный НВДМ-250 используется в качестве высоковакуумной ступени откачки из камеры. В таблице 2.1. приведены характеристики элементов вакуумной системы.

Таблица 2.1 – Технические характеристики компонентов вакуумной системы.

Характеристика	ВВ-150	АВР-50	НВДМ-250	PRM 54
Скорость откачки, л/с	155	50	2350	15
Остаточное давление не более, Па	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$

Система ввода проволоки с дифференциальной откачкой собрана на основе стандартных комплектующих для вакуумных систем (вакуумная арматура и фитинги стандарта KF), измерительных приборов (рисунок 2.5). При вводе в камеру проволока обжимается уплотнительными кольцами из вакуумной резины, количество колец может варьироваться для обеспечения герметичности ВК (рисунок 2.6). Кроме того, в систему с дифференциальной откачкой входят дополнительные устройства, которые обеспечивают их работу. Подача и регулировка скорости присадочной проволоки осуществляется с помощью подающего механизма, на основе шагового двигателя типоразмера NEMA23 с интегрированным редуктором 1:10. Оперативный контроль степени разряжения в вакуумной камере и системе дифференциальной откачки осуществляется посредством технического манометра МПЗ-Уф применяемого для измерения давления неагрессивных жидких и газообразных сред и широкодиапазонного вакуумного датчика с холодным катодом МТМ9D (рисунок 2.5). Для регулировки скорости откачки, а также обеспечения возможности перекрытия вакуумной магистрали используется вакуумный клапан. Для осуществления дифференциальной откачки используется роторный насос PRM 54, характеристики которого указаны в таблице 2.1. Применение данного насоса позволяет обеспечить требуемый уровень разряжения,

достаточный для успешного осуществления процесса аддитивного формообразования с подачей проволоочного материала.

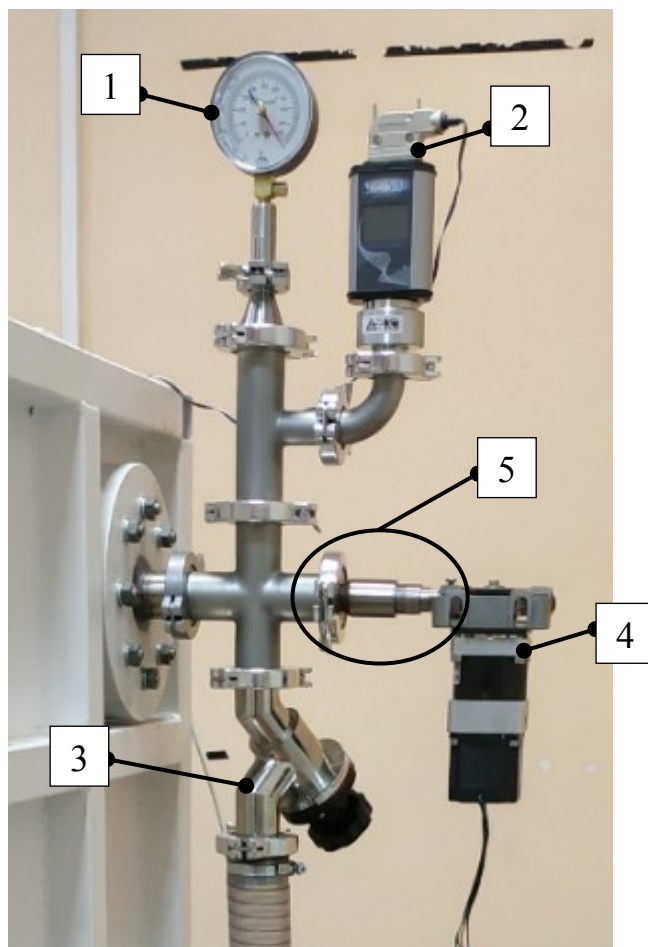


Рисунок 2.5. Устройство для ввода проволоки с дифференциальной откачкой: 1 – манометр МПЗ-Уф; 2 – вакуумный датчик МТМ9D; 3 – ручной прямооточный вакуумный клапан; 4 – механизм подачи проволоки; 5 – диафрагма для ввода проволоки.

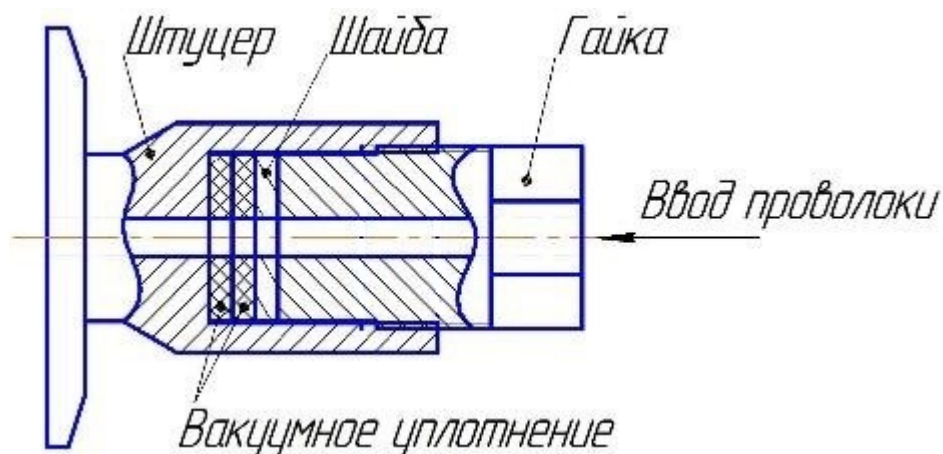
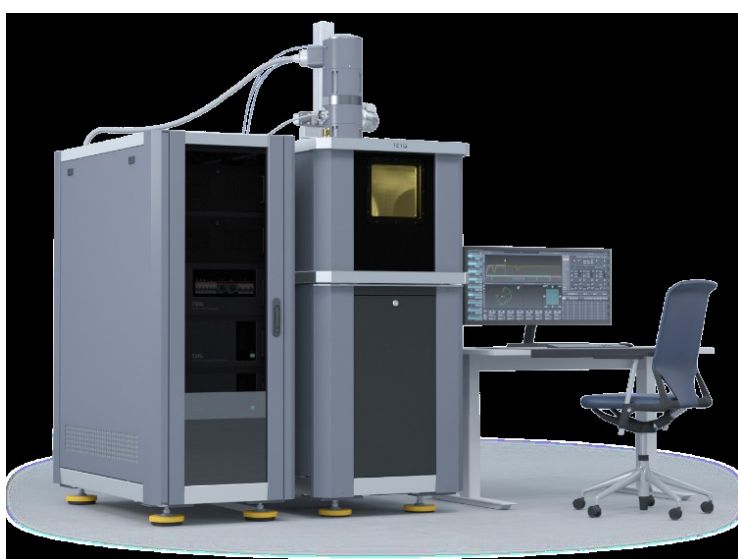
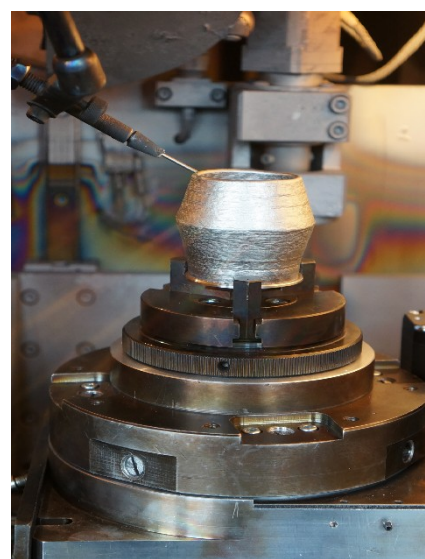


Рисунок 2.6. Схема диафрагмы с уплотнительными кольцами для ввода присадочной проволоки в вакуумную камеру.

Часть экспериментальных исследований была выполнена на оборудовании группы предприятий ТЭТА. Используемая установка электронно-лучевой сварки ТЭТА 6Е250 (рисунок 2.7) обладает следующими характеристиками: Мощность луча 6 кВт; Внутренние размеры вакуумной камеры 500×500×500 мм; Ускоряющее напряжение 60 кВ; Максимальный ток луча 100 мА; Стабильность тока луча 0,1 мА; Угол отклонения луча $\pm 7^\circ$; Тип катода Прямокальный; Рабочий вакуум $5 \cdot 10^{-2}$ Па;



а)



б)

Рисунок 2.7. Установка электронно-лучевой сварки ТЭТА 6Е250 [99]:
а – общий вид; б – вид на технологическую зону.

Для регистрации и измерения рентгеновского излучения из технологической зоны использовался датчик в виде сцинтилляционного детектора на основе монокристалла активированного йодистого цезия для преобразования рентгеновского излучения в видимый спектр и кремниевого фотоэлектронного умножителя для регистрации видимого спектра излучения. Схема и внешний вид датчика представлены на рисунке 2.8.

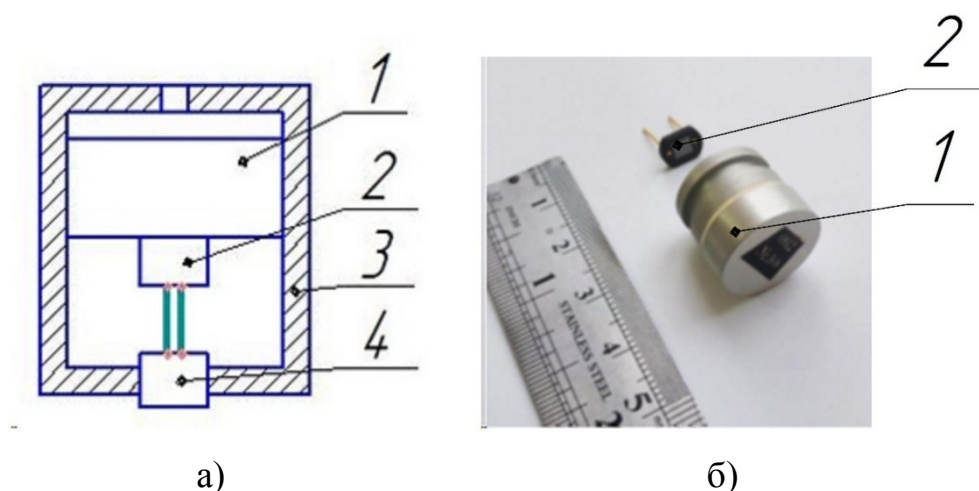


Рисунок 2.8. Схема (а) и фотография (б) малогабаритного датчика рентгеновского излучения: 1 – сцинтилляционный детектор; 2 – кремниевый фотоумножитель; 3 – свинцовый корпус датчика; 4 – разъем сопряжения.

В ходе проведения экспериментальных работ были выбраны комплектующие для реализации такого датчика:

- Сцинтилляционный детектор на основе монокристалла цезия йодистого, активированного таллием – СДН.25.10.10, изготовленный по ТУ 2651-009-26083472-2011. Характеристики сцинтиллятора: Высота – 10 мм; Диаметр – 10 мм; Средний показатель поглощения – $0,010 \text{ см}^{-1}$; Максимум спектра излучения – 560-590 нм; Время высвечивания основного компонента – 0,8 мкс; Коэффициент преломления, усредненный по спектру излучения – 1,79; Эффективный атомный номер – 54; Молярная масса – 259,82; Рабочая плотность потока

Таблица 2.2 – Характеристики преобразователя напряжения ТМА2415D [135].

Наименование характеристики	Значение
Выходная мощность	1 Вт
Входное напряжение	21,6...26,4 В
Номинальное входное напряжение	24 В
Выходное напряжение	+15/-15 В
Выходной ток	до +/-35 мА
Защита от короткого замыкания	да
КПД	80%
Уровень пульсаций	100 мВ
Напряжение изоляции вход-выход	1,0 кВ
Размер	19,5x10,2x7,1 мм

Таблица 2.3 – Характеристики операционного усилителя AD711 [100].

Наименование характеристики	Значение
Напряжение питания	$\pm 4,5 \dots \pm 18$ В
Номинальное напряжение питания	+15/-15 В
Потребляемый ток покоя	2,5 мА
Входное напряжение	± 20 В
Выходное напряжение	+13,9/-13,3 В
Выходной ток	25 мА
Напряжение смещения	0,3 мВ
Полоса пропускания малого сигнала	4 МГц
Полоса пропускания полного сигнала	200 кГц
Скорость нарастания	20 В/мкс

Таблица 2.4 – Характеристики стабилитрона TL431 [134].

Наименование характеристики	Значение
Выходное напряжение	2.495...36 В
Максимальный выходной ток	100 мА
Точность	1 %



Рисунок 2.10. Внешние аналогово-цифровые/цифро-аналоговые преобразователи, использованные в работе. [109, 110]

В таблицах 2.5, 2.6 и 2.7 представлены характеристики, использованных в работе, аналогово-цифровых/цифро-аналоговых преобразователей (АЦП/ЦАП).

Таблица 2.5 – Метрологические и технические характеристики преобразователей модификации E14-140-M и E20-10 [109, 110].

Наименование характеристики	E14-140-M	E20-10
Диапазон измерений напряжения постоянного тока, В	от -10 до +10	от -3 до +3
Пределы допускаемой приведенной (к верхнему значению предела измерений) основной погрешности измерений напряжения постоянного тока, %, для пределов: – 10 и 2,5 В – 0,6 В – 0,15 В – 3; 1; 0,3 В	 $\pm 0,05$ $\pm 0,1$ $\pm 0,5$	 $\pm 0,25$

Таблица 2.5 – продолжение [109, 110].

Наименование характеристики	E14-440-M	E20-10
Диапазон измерений напряжения переменного тока, В в диапазоне частот: – от 0,02 до 99 кГц – от 0,01 до 1000 кГц включительно – в диапазоне частот св. 1000 до 4900 кГц	от 10^{-4} до 7	от $3 \cdot 10^{-4}$ до 2 от 10^{-3} до $0,7^{1)}$
Пределы допускаемой приведенной (к верхнему значению предела измерений) основной погрешности измерений напряжения переменного тока, в диапазоне частот входного канала:	Согласно таблице 2.3	Согласно таблице 2.4
Диапазон воспроизведений напряжения постоянного тока, В	от -5 до $+5^{2)}$	от -5 до $+5^{3)}$
Пределы допускаемой приведенной (к верхней границе диапазона воспроизведений) основной погрешности воспроизведений напряжения постоянного тока, %	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$
Пределы допускаемой относительной основной погрешности частоты преобразований АЦП, %	$\pm 0,005$	$\pm 0,005$
Пределы допускаемых дополнительных погрешностей измерений напряжения постоянного и переменного тока, воспроизведений напряжения постоянного тока, частоты преобразований АЦП от изменения температуры окружающей среды в диапазоне рабочих температур, на каждые 10 °С, в долях от пределов допускаемой основной погрешности	0,5	0,5
Коэффициент подавления синфазных помех, дБ, не менее	70	70
Входное электрическое сопротивление постоянному току, МОм	не менее $10^{4)}$	$10 \pm 0,5$
Количество цифровых входов	16	16
Количество цифровых выходов	16	16
Напряжение питания постоянного тока, В	$5 \pm 0,25$	от 8 до 40
Потребляемая мощность, Вт, не более	2,5	4,5

Таблица 2.5 – продолжение [109, 110].

Наименование характеристики	E14-440-M	E20-10
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм, не более	140 × 96 × 30	142 × 132 × 40
Масса, кг, не более	0,2	0,3
Средний срок службы, лет, не менее	10	10
Средняя наработка на отказ, ч, не менее	20000	20000
¹⁾ Измерение напряжения переменного тока в диапазоне частот свыше 1000 кГц осуществляется только преобразователями исполнений 1, 1-I, D-1, D-1-I. ²⁾ Воспроизведение напряжения осуществляется только преобразователями исполнений M-D, M-D-I. ³⁾ Воспроизведение напряжения постоянного тока осуществляется только преобразователями исполнений D, D-I, D-1, D-1-I. ⁴⁾ Входное электрическое сопротивление постоянному току нормируется для одноканального режима работы преобразователей.		

Таблица 2.6 – Пределы допускаемой приведенной (к верхнему значению предела измерений) основной погрешности измерений напряжения переменного тока преобразователями модификации E14-140-M [109].

Диапазон частот входного сигнала, кГц	Частота преобразований АЦП, кГц	Пределы допускаемой приведенной (к верхнему значению предела измерений) основной погрешности измерений напряжения переменного тока ¹⁾ , %, для пределов	
		10; 2,5 и 0,6 В	0,15 В
от 0,02 до 9/N ²⁾	20	±0,15	±0,5
от 0,02 до 49/N	100	±1,0	±10
от 0,02 до 99/N	200	±3,0	–
¹⁾ Пределы допускаемой приведенной (к верхнему значению предела измерений) основной погрешности измерений напряжения переменного тока нормируются для сигналов, пиковые значения которых не превышают значение установленного предела измерений. ²⁾ N – количество опрашиваемых измерительных каналов.			

Таблица 2.7 – Пределы допускаемой относительной основной погрешности измерений напряжения переменного тока преобразователями модификации E20-10 исполнений 1, 1-I, D-1, D-1-I [110].

Диапазон частот	Пределы допускаемой относительной основной
-----------------	--

входного сигнала, кГц	погрешности измерений напряжения переменного тока ¹⁾ , %
от 0,01 до 20 включ.	$\pm \left[0,2 + 0,02 \left(\frac{X_{AC}}{X} - 1 \right) \right]$ ^{2) 3)}
св. 20 до 300 включ.	$\pm \left[2 + 0,03 \left(\frac{X_{AC}}{X} - 1 \right) \right]$
св. 300 до 1000 включ.	$\pm \left[3 + 0,05 \left(\frac{X_{AC}}{X} - 1 \right) \right]$
св. 1000 до 2000 включ. ⁴⁾	$\pm \left[5 + 0,1 \left(\frac{X_{AC}}{X} - 1 \right) \right]$
св. 2000 до 4900 ⁴⁾	$\pm \left[30 + 0,3 \left(\frac{X_{AC}}{X} - 1 \right) \right]$
¹⁾ Пределы допускаемой относительной основной погрешности измерений напряжения переменного тока нормируются для сигналов, пиковые значения которых не превышают значение установленного предела измерений. ²⁾ X_{AC} – предел измерений напряжения переменного тока, $X_{AC} = \frac{X_K}{\sqrt{2}}$, где X_K – значение установленного предела измерений напряжения электрического тока. ³⁾ X – значение измеряемого напряжения переменного тока. ⁴⁾ Пределы допускаемой относительной основной погрешности измерений напряжения переменного тока в диапазонах частот входного сигнала свыше 1000 кГц нормируются только для предела измерения 1 В в одноканальном режиме работы преобразователей.	

Работа с АЦП осуществлялась посредством, работающей в операционной системе Windows, программной среды LGraph2 производства ООО «Л Кард», предназначенной для сбора, регистрации (сохранения в цифровом виде), визуализации (просмотра в реальном времени и в записи), экспорта, поданных на входы различных устройств сбора данных, аналоговых сигналов [119]. на рисунке 2.11 представлен интерфейс программы. Можно отметить следующие основные возможности программы LGraph2:

- Возможен одновременный сбор данных от 100 различных устройств производства ООО «Л Кард».
- В зависимости от характеристик устройства, возможен ввод данных до 32 каналов при подключении «с общей землей» или до 16 каналов в режиме дифференциального подключения для каждого устройства АЦП.
- Существует режим просмотра входных сигналов; любой момент в процессе просмотра может быть включена запись – программа начнет

производить сохранение, с установленными ранее параметрами сбора, поступающих данных не прерывая демонстрацию графиков. Накопленные в режиме просмотра данные могут быть полностью или частично сохранены после остановки сбора данных, в зависимости от выделенного объема оперативной памяти для просмотра.

- Присутствует ручной или синхронизированный с приходом сигнала на цифровые линии АЦП опрос требуемых каналов; возможна синхронизация запуска по заданному событию на входе выбранного канала.
- Возможна запись данных в серию файлов, при этом пользователем конфигурируется начало записи каждого из них. Процесс записи данных может быть приостановлен в любой момент и возобновлен в последствии. Можно объединять в один сегмент группу последовательных сегментов в файле. Любое количество отдельных сегментов можно удалить из файла. Присутствует возможность ручного внесения меток с комментариями и корректировки их положения при записи в файл и при его последующей обработке. Каждый файл может содержать до 10000 сегментов и меток.
- Имеется поддержка синхронизации, с помощью подключенного к компьютеру GPS-модуля, записи данных на разных компьютерах.
- Предусмотрена возможность запуска программы из командной строки с требуемым набором параметров для запуска программы при старте системы.
- Графики вводимых сигналов могут быть отображены в любом окне (окнах) программы в произвольной комбинации – пользователем устанавливается число окон от 1 до 8.
- Предусмотрена возможность записи данных не на диск, а в ОЗУ для избегания пропусков данных при использовании, обеспечивающих высокую частоту опроса входных каналов, устройств.

- Программа позволяет независимо тарировать отображаемые данные и шкалу Y с учетом измеряемой физической величины для любого используемого канала.
- Возможен поиск по одному из нескольких критериев события в потоке записанных данных.
- Программа позволяет анализировать спектр любого из каналов ранее сделанной записи, просматривать графики в любом из окон в увеличенном виде, строить амплитудные гистограммы ранее записанных сигналов.
- Процедура редактирования данных позволяет сохранить выделенный блок в отдельный файл либо выделить блок и удалить его из файла.
- Предусмотрено использование плагинов, выполняющих специфические пользовательские функции обработки или регистрации данных.
- Существует возможность сохранения всего файла данных или его части, посредством процедуры экспорта, в текстовый файл с выбором экспортируемых каналов. Возможна децимация данных при экспорте (вывод в текстовый файл не всех точек подряд). Также возможен вывод данных, с учетом всех калибровочных коэффициентов, в двоичный файл. Автоматическое создание скриптов для импорта файлов данных в MATLAB возможно при экспорте или записи файлов. Предусмотрен экспорт всех включенных окон или графиков в выбранном окне в графическом формате.

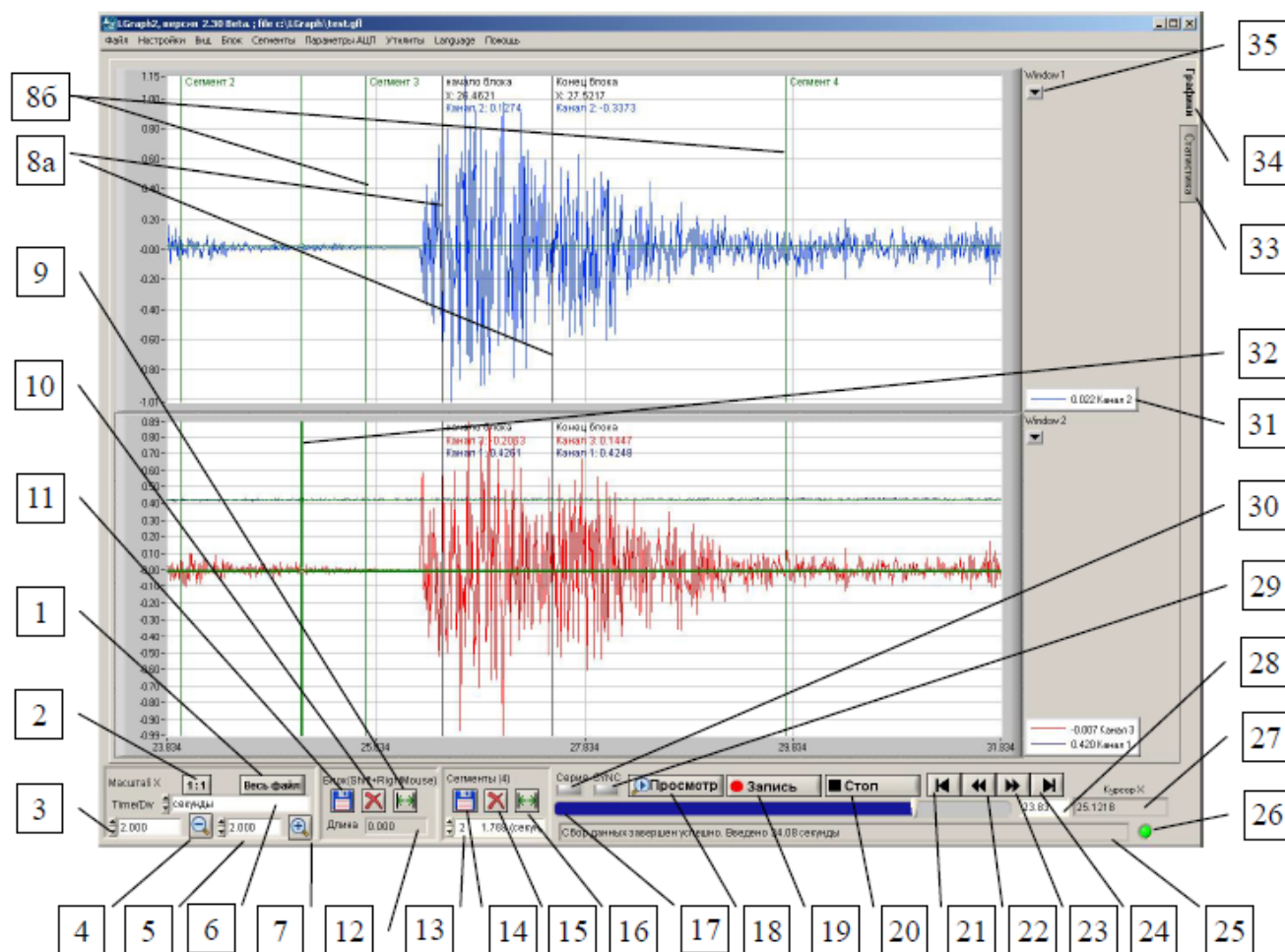


Рисунок 2.11. Интерфейс программы LGraph2.

Интерфейс программы LGraph2 включает в себя следующие элементы управления: 1 – Масштаб X – Разместить весь файл в окне. 2 – Масштаб X – 1:1 – каждой точке на графиках соответствует 1 точка в массиве данных. 3 – Масштаб X – установка времени на 1 деление оси X. 4 – Масштаб X – увеличение времени на деление вдвое 5 – Масштаб X – история. 6 – Выбор размерности времени. 7 – Масштаб X – уменьшение времени на деление вдвое. 8а – метки начала и конца блока с маркировкой положения метки на оси X и значений Y в этой точке 8б – метки границ сегментов. 9 – Блок – растянуть блок на все окно. 10 – Блок – удалить блок из файла. 11 – Блок – сохранить блок в отдельный файл. 12 – Блок – размер (длительность) блока с учетом текущей размерности времени. 13 – Сегменты – окно выбора текущего

сегмента – переход на его начало. 14 – Сегменты – сохранить текущий сегмент в отдельный файл. 15 – Сегменты – удалить из файла текущий сегмент. 16 – Сегмент – растянуть (или сжать) текущий сегмент до размеров окна. 17 – Полоса прокрутки. 18 – Режим «Просмотра». 19 – Включение записи на диск или в ОЗУ. После включения записи кнопка Запись заменяется кнопкой Пауза. 20 – Остановка записи и/или просмотра. 21 – Навигация – переход в начало записи. 22 – Навигация – сдвиг назад на 1 экран. 23 – Навигация – сдвиг вперед на 1 экран. 24 – Навигация – переход в конец записи. 25 – Статусная строка. 26 – Индикатор успешного завершения записи. 27 – Индикатор текущего положения курсора. 28 – Положение левого края окон в выбранной размерности времени. 29 – Индикатор включения аппаратной синхронизации. 30 – Индикатор включения режимов записи серий. 31 – Легенда. 32 – Курсор. 33 – Закладка окна контроля и управления сбором данных Статистика. 34 – Закладка окна отображения данных Графики. 35 – Доступ к краткому меню настройки графиков для любого из каналов, отображенных в данном окне. [119]

2.2 Методика обработки сигнала рентгеновского излучения

Для анализа вторичных сигналов из технологической зоны и исследования процессов, протекающих при электронно-лучевой сварке успешно применяют метод синхронного накопления [136, 89]. Этот метод широко применяется для наведения электронного луча на стык [20, 90, 105] и является частным случаем кросскорреляционного анализа или разновидностью метода синхронного детектирования, [105]. Метод синхронного накопления позволяет наилучшим образом выделить составляющую спектра обрабатываемого сигнала на частоте внешнего воздействия и является методом оптимальной фильтрации [56]. Данный метод обработки не приводит к потере информации о фазе процесса.

Взаимное влияние процессов часто имеет место при исследовании временных последовательностей. Выполнение анализа сигналов и выявления

их характерных черт необходимо для определения наличия такого влияния. Согласованная корреляционная функция является мерой связи во временной области двух случайных процессов (называемая также кросскорреляционной) [56]:

$$r_{xy}(\tau) = \lim \int_0^{t_0} y(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (2.1)$$

где t_0 – время выборки. Кросскорреляционный анализ применяется для периодических сигналов только при условии кратности их периодов. Об отношении периодов исходных функций можно судить по количеству гармоник функции $r_{xy}(t)$, которая также является периодической функцией. Реализации метода синхронного накопления происходит следующим образом: прямоугольный опорный сигнал малой скважности $g(t)$ формируется из сигнала отклоняющих катушек $Osc(t)$ с периодом, соответствующим периоду осцилляции электронного луча T . Следующим образом может быть описано математическое формирование $g(t)$. Влияния неизвестного математического ожидания исключается с помощью алгебраического преобразования сдвига. Постоянные составляющие $Osc1(t) = Osc(t) - \langle Osc(t) \rangle$ вырезаются из сигнала отклоняющих катушек $Osc(t)$, где $\langle Osc(t) \rangle$ – среднее значение сигнала $Osc(t)$. Затем происходит формирование вспомогательной функции $Osc2(t) = Osc1(t - \Delta T)$, которая имеет сдвиг на долю периода ΔT относительно $Osc1(t)$. Определять ширину импульсов опорного сигнала $g(t)$ в дальнейшем будет ΔT .

Далее формируется опорная функция:

$$G(t) = \begin{cases} 1, \{Osc1(t - \Delta T/2) \geq 0 \cap Osc2(t - \Delta T/2) \leq 0\} \\ 0, else \end{cases} \quad (2.2)$$

Пересечение нулевых значений функцией $Osc1(t)$ обуславливает импульсы функции $G(t)$. Но, ситуация, когда импульсы обусловлены максимальными значениями сигнала отклоняющих катушек визуальнее лучше интерпретируется. Этого можно достичь сдвигом функции $G(t)$ еще на одну четвертую периода $g(t) = G(t - T/4)$. На рисунке 2.12 представлен, сдвинутый на

время τ относительно сигнала отклоняющих катушек, полученный опорный сигнал $g(t)$.

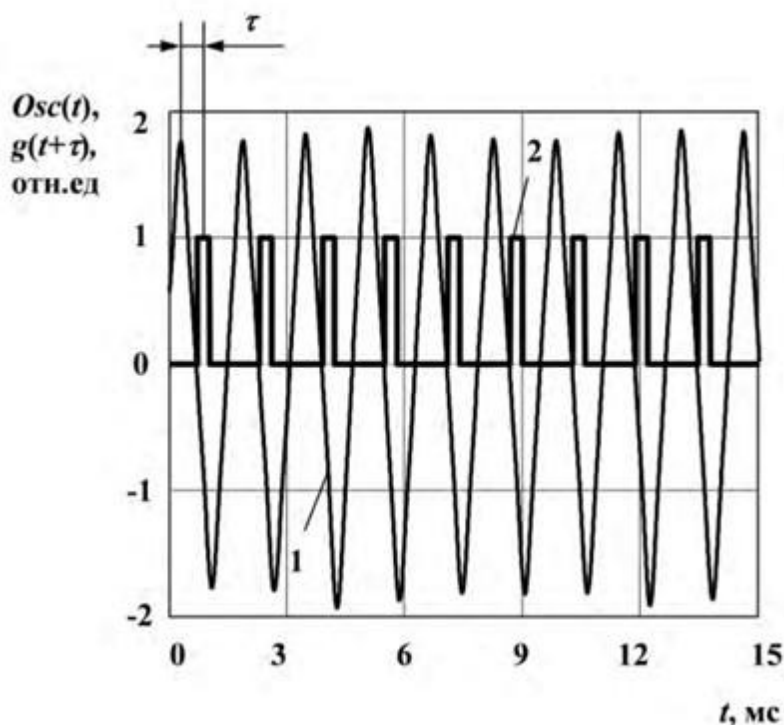


Рисунок 2.12. Формирование опорного сигнала для осуществления синхронного накопления: 1 – сигнал осцилляции электронного луча $Osc(t)$; 2 – полученный опорный сигнал $g(t+\tau)$

Синхронное накопление осуществляется путем умножения сигнала тормозного рентгеновского излучения $Data(t)$ на опорный сигнала $g(t+\tau)$, сдвинутый на некоторое время τ с последующим интегрированием по времени.

$$S(\tau) = \frac{\int_0^{t_0} g(t+\tau) \cdot Data(t) dt}{\frac{t_0}{T} \cdot \Delta T} \quad (2.3)$$

где τ ($0 < \tau < T$, где T – период осцилляции); t_0 – время выборки ($t \gg T$). При этом, выражение, являющееся мерой носителя усредняемого сигнала $Data(t)$ находится в знаменателе [125].

Блок-схема, представленная на рисунке 2.13, поясняет реализацию метода синхронного накопления.

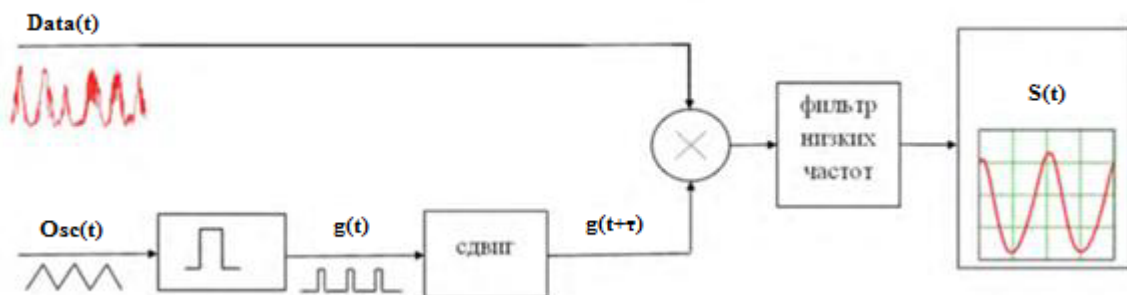


Рисунок 2.13. Блок-схема осуществления метода синхронного накопления [89].

Прямоугольный опорный сигнал малой скважности $g(t)$ формируется из сигнала отклоняющих катушек $Osc(t)$ с периодом, соответствующим периоду осцилляции электронного луча T . Относительно сигнала $Osc(t)$ сдвигается на заданный промежуток времени τ полученный опорный сигнал $g(t+\tau)$ (рисунок 2.12). Опорный сигнал $g(t+\tau)$ перемножается с сигналом тормозного рентгеновского излучения $Data(t)$. С помощью фильтра низких частот результат перемножения интегрируется по времени. Для каждого значения сдвига τ , значение усредненного сигнала тормозного рентгеновского излучения выражается функцией $S(\tau)$ что позволяет проанализировать, каким образом синхронизирован обрабатываемый сигнал $Data(t)$ с сигналом внешнего воздействия $Osc(t)$, или с величиной отклонения присадочной проволоки от центра осцилляции электронного луча. В технологической зоне существует область взаимодействия с лучом, характеризующаяся максимальным энерговыделением. Эта область перемещается, в процессе осцилляции, по подложке и присадочной проволоке. И среднее значение рентгеновского сигнала определяется для каждого положения данной области.

Схемой на рисунке 2.14 поясняется алгоритм метода синхронного детектирования. Переменная составляющая $I_{fm}\sin(\omega t)$ выделяется из сигнала тока отклоняющих катушек с помощью фильтра высоких частот. При необходимости, в зависимости от требуемого положения проволоки, осуществляют сдвиг фазы этой составляющей на величину φ для обеспечения

смещения центра осцилляции электронного луча относительно присадочной проволоки. Многократно измеряют сигнал тормозного рентгеновского излучения $Data(t)$ в соответствии с полученным сигналом $I_{fm}(\omega t + \varphi)$. Умножают полученный сигнал $I_{fm}(\omega t + \varphi)$ на соответствующий ему сигнал тормозного рентгеновского излучения, полученные результаты умножения интегрируют и усредняют по времени:

$$b_{\text{дет}} = \frac{\int_0^{t_0} I_{fm} \sin(\omega t + \varphi) \cdot Data(t) dt}{t_0}, \quad (2.2)$$

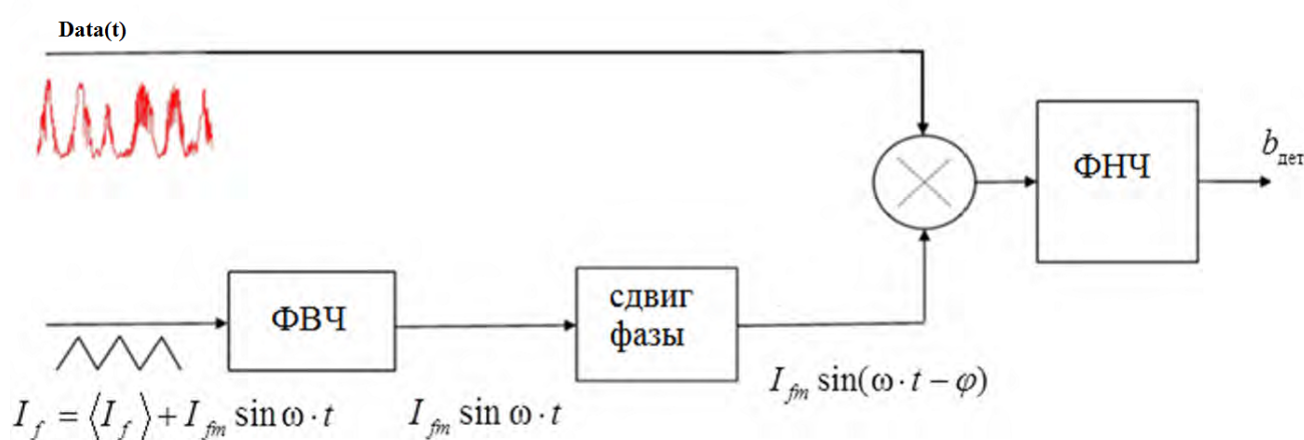


Рисунок 2.14. Схема реализации метода синхронного детектирования [89]

В результате получают величину b , характеризующую отклонение положения присадочной проволоки относительно электронного луча. Возможность простой реализации, как в аналоговой, так и в цифровой форме, является преимуществом метода синхронного детектирования.

2.3 Экспериментальные исследования взаимодействия электронного луча с проволокой

На начальном этапе были проведены экспериментальные исследования с целью определения схемы и параметров режима электронно-лучевой наплавки, обеспечивающих стабильное плавление присадочной проволоки и сплавление с подложкой или с предыдущим валиком в случае многослойной наплавки [12].

Следующим этапом был выполнен ряд экспериментов для определения характеристик и выявления, коррелирующих с положением присадочной проволоки, закономерностей формирования вторичного рентгеновского излучения при взаимодействии электронного луча с проволокой. Эксперименты включали в себя лабораторную, модельную и натурную часть, а также последующий анализ результатов этих экспериментов. Схема выполнения лабораторного эксперимента приведена на рисунке 2.15.

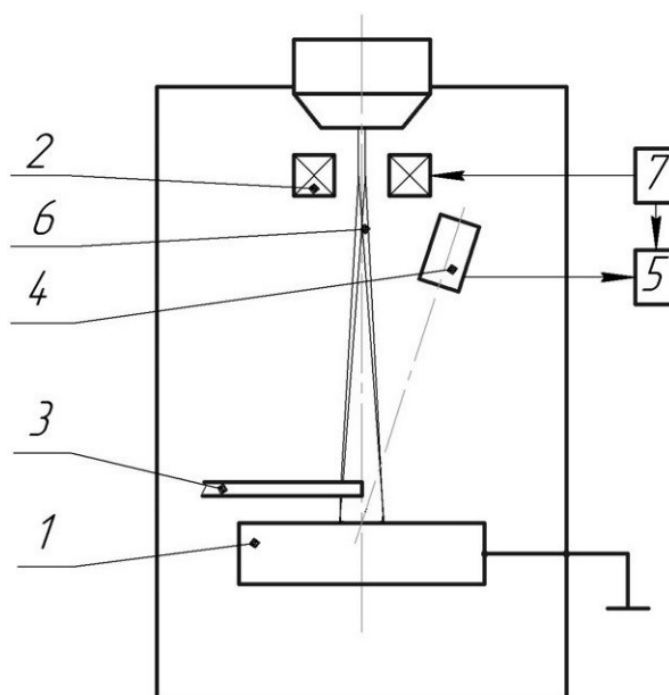


Рисунок 2.15. Схема проведения эксперимента по взаимодействию электронного луча с вольфрамовой цилиндрической мишенью: 1 – подложка из стали 12X18Н10Т; 2 – отклоняющие катушки; 3 – вольфрамовый стержень; 4 – датчик рентгеновского излучения; 5 – блок обработки; 6 – электронный луч; 7 – блок управления токами отклоняющих катушек;

Лабораторный эксперимент представлял из себя регистрацию и измерение относительной интенсивности вторичного рентгеновского излучения из технологической зоны в процессе взаимодействия осциллирующего электронного луча с подложкой и неплавящейся мишенью цилиндрической

формы. В качестве мишени была использована имитация присадочной проволоки в виде вольфрамового стержня диаметром 5 мм, располагаемого перпендикулярно электронного луча. Стержень был установлен на высоте 5 мм от подложки из стали 12X18H10T и на расстоянии 400 мм от среза электронно-лучевой пушки. Поверхность подложки параллельно имитатору присадочной проволоки. Стержень был закреплен на шарнире с возможностью поворота относительно оси, параллельной оси электронного луча. Поворот стержня осуществлялся за счет миниатюрного электродвигателя, соединенного со стержнем посредством эластичного жгута и системы пружин. Электронный луч фокусировался на поверхности подложки и непрерывно осциллировался по кольцевой траектории диаметром 8 мм с частотой 800 Гц. Ток электронного луча в ходе эксперимента составлял 3 мА. Имитатор присадочной проволоки медленно поворачивался на шарнире, так что линейная скорость перемещения в области взаимодействия с электронным лучом составляла 5 мм/с. Датчик рентгеновского излучения располагался над стержнем и был направлен на область взаимодействия электронного луча со стержнем. Угол между осью датчика и осью электронного луча составлял 45 градусов. Результатом лабораторного эксперимента был записанный файл с данными измерений вторичного рентгеновского излучения из технологической зоны в процессе плавного перемещения вольфрамового стержня через область взаимодействия осциллирующего электронного луча с подложкой.

В процессе подготовки и выполнения модельного эксперимента была получены статическая и динамическая математические модели формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе наплавки проволокой. Статическая модель описывает поток энергии тормозного рентгеновского излучения в зависимости от положения электронного луча относительно присадочной проволоки. Динамическая описывает результат синхронного детектирования сигнала, регистрируемого датчиком рентгеновского излучения, в зависимости от смещения присадочной проволоки относительно центра

осцилляции электронного луча. Модели учитывают распределение мощности в поперечном сечении электронного луча, амплитуду осцилляции электронного луча, частоту осцилляции электронного луча, диаметр проволоки, материал проволоки, материал подложки, ускоряющее напряжение электронно-лучевой пушки, ток электронного луча, расстояние от зоны наплавки до датчика рентгеновского излучения. Численная реализация моделей производилась при помощи программного пакета MathCAD.

Натурный эксперимент представлял из себя регистрацию тормозного рентгеновского излучения в процессе выполнения электронно-лучевой наплавки проволокой на перемещающуюся с заданной скоростью подложку. При этом в качестве подложки использовалась сталь 12X18H10T, в качестве наплавляемого материала использовалась проволока ER308L диаметром 0,8 мм. Были использованы параметры режима электронно-лучевой наплавки, определенные в ходе предварительного исследования. Присадочная проволока подавалась со скоростью 10 мм/с параллельно или под небольшим углом (не более 5°) к поверхности подложки на 2 мм выше нее и на расстоянии 400 мм от среза электронно-лучевой пушки. Подложка перемещалась со скоростью 5-6 мм/с. Электронный луч фокусировался на 1 мм выше поверхности подложки и осциллировал по кольцевой траектории диаметром 2 мм с частотой 800 Гц. Ток электронного луча составлял 12-14 мА. В процессе выполнения наплавки осуществлялась регистрация и измерение относительной интенсивности вторичного рентгеновского излучения из технологической зоны. Для этого датчик рентгеновского излучения был установлен над зоной наплавки и был направлен на область взаимодействия электронного луча со стержнем. Угол между осью датчика и осью электронного луча составлял 45 градусов. Результатами натурных экспериментов были записанные файлы с данными измерений вторичного рентгеновского излучения из технологической зоны в процессе электронно-лучевой наплавки проволокой.

Для проверки работоспособности датчика рентгеновского излучения, схемы измерения и методики обработки сигнала, в процессе выполнения предварительных экспериментов были выполнены измерения рентгеновского излучения из технологической зоны при уменьшенной мощности электронного луча, недостаточной для полного расплавления проволоки. В качестве подложки использовалась сталь 12X18H10T, в качестве присадочного материала использовалась проволока ER308L диаметром 0,8 мм. Были использованы параметры режима электронно-лучевой наплавки, определенные в ходе предварительного исследования. Присадочная проволока подавалась со скоростью 10 мм/с параллельно или под небольшим углом (не более 5°) к поверхности подложки на 2 мм выше нее и на расстоянии 400 мм от среза электронно-лучевой пушки. Подложка перемещалась со скоростью 5-6 мм/с. Электронный луч фокусировался на 1 мм выше поверхности подложки и осциллировал по кольцевой траектории диаметром 2 мм с частотой 800 Гц. Ток электронного луча составлял 1-2 мА. Датчик рентгеновского излучения был установлен над зоной наплавки и был направлен на область взаимодействия электронного луча со стержнем. Угол между осью датчика и осью электронного луча составлял 45 градусов. Пример записанного в файл сигнала рентгеновского излучения из зоны взаимодействия электронного луча с проволокой представлен на рисунке 2.16.

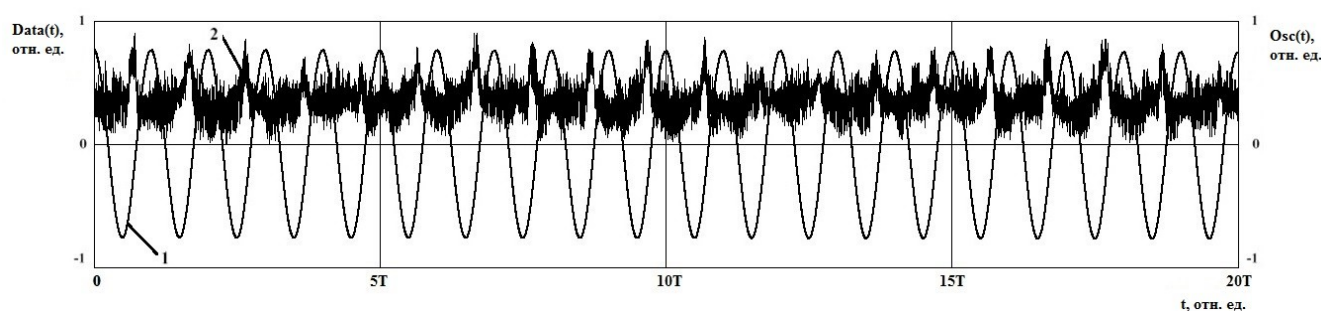


Рисунок 2.16. Записанный сигнал рентгеновского излучения при электронно-лучевой наплавке проволокой: 1 – сигнал $Osc(\tau)$ тока в отклоняющей катушке по оси X, направленной поперек проволоки; 2 – сигнал $Data(\tau)$ рентгеновского излучения; T – период осцилляции электронного луча.

На рисунке 2.17а представлены результаты обработки сигнала этого рентгеновского излучения методом синхронного накопления. Можно также представить полученную функцию в полярных координатах (рисунок 2.17б), соответствующих виду сверху на область наплавки.

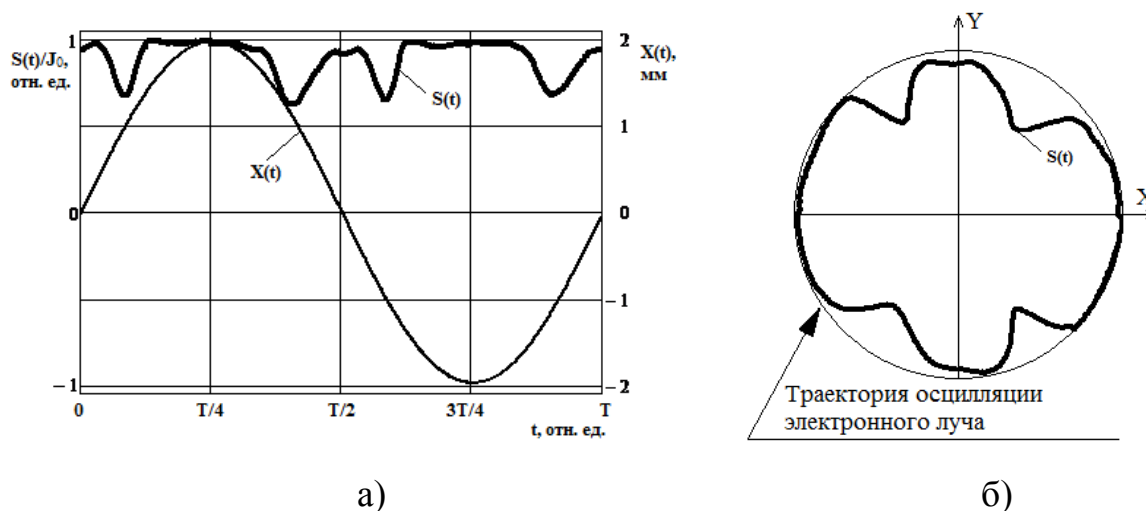


Рисунок 2.17. Результат обработки сигнала тормозного излучения $S(t)$, записанного в процессе электронно-лучевой наплавки проволокой, методом синхронного накопления: $X(t)$ – положение электронного луча по оси X в момент времени t ; T – период осцилляции электронного луча.

Выводы

- Разработана методика исследования процессов формирования тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой наплавке проволокой с осцилляцией луча.
- Разработан компактный датчик рентгеновского излучения в виде сцинтилляционного детектора на основе монокристалла активированного йодистого цезия для преобразования рентгеновского излучения в видимый спектр и кремниевого фотоэлектронного умножителя для регистрации видимого спектра излучения. Разработана схема регистрации и измерения сигнала с разработанного датчика рентгеновского излучения.

- Предложены методы обработки сигнала рентгеновского излучения для выделения составляющих, несущих информацию о характеристиках процесса электронно-лучевой наплавки проволочным материалом. Метод синхронного накопления позволяет наилучшим образом выделить составляющую спектра обрабатываемого сигнала на частоте внешнего воздействия и является методом оптимальной фильтрации. Возможность простой реализации, как в аналоговой, так и в цифровой форме, является преимуществом метода синхронного детектирования.

Глава 3. Исследование структуры сигнала тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой наплавке

На начальном этапе проведения экспериментов был произведен экспериментальный подбор режимов электронно-лучевой наплавки проволочным материалом, обеспечивающих стабильное плавление присадочной проволоки и сплавление с подложкой или с предыдущим валиком в случае многослойной наплавки [58]. Оценка режимов производилась путем визуального контроля процесса и результатов наплавки. Процесс электронно-лучевой наплавки исследовался при воздействии на металл неподвижного электронного луча с различными режимами фокусировки, а также при развертке луча по кольцевой траектории. Подача присадочной проволоки в зону ее расплавления электронным лучом осуществлялась как над зоной наплавки, так и непосредственно в расплавленную ванну.

При проведении экспериментальных исследований использовались следующие режимы фокусировки электронного луча:

- ниже поверхности подложки;
- на поверхности подложки;
- в промежутке между областью воздействия электронного луча на присадочную проволоку и поверхностью подложки;
- на уровне области воздействия электронного на присадочную проволоку;
- выше области воздействия электронного луча на присадочную проволоку.

Было установлено, что при фокусировке электронного луча с незначительным превышением над поверхностью присадочной проволоки обеспечивает наиболее благоприятный режим плавления проволоки и активации поверхности подложки. Это связано с тем, что при таком режиме фокусировки электронный луч взаимодействует с проволокой при пониженной

плотности энергии, что обеспечивает отсутствие перегрева проволоки и разбрызгивания металла. В плоскости взаимодействия с подложкой электронный луч имеет ещё более низкую плотность энергии. Это приводит к снижению интенсивности плавления подложки, снижению её перемешивания с наплавляемым материалом, и увеличению зоны активации поверхности подложки.

Однако ввиду неизбежных отклонений оси присадочной проволоки от своего первоначального положения при ее подаче в зону плавления требуется дополнительное увеличение диаметра электронного луча в плоскости взаимодействия с проволокой. Это позволяет снизить требования к точности позиционирования присадочной проволоки относительно электронного луча. Недостатком такого подхода является необходимость повышения вводимой мощности, что приводит к увеличению ширины наплавляемого валика и не может быть использовано при наличии ограничений по его ширине. Внешний вид наплавленных валиков, полученных при наплавке расфокусированным электронным лучом, представлен на рисунке 3.1.

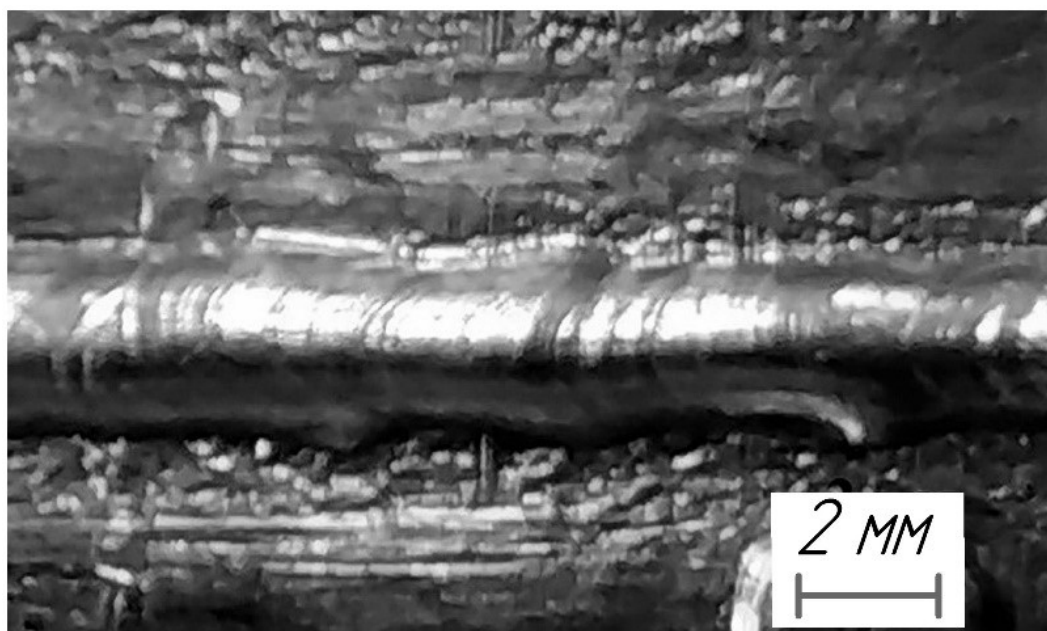


Рисунок 3.1. Внешний вид валика, наплавленного с использованием расфокусированного электронного луча.

Альтернативой предлагаемому способу фокусировки является использование системы оперативного управления положением присадочной проволоки относительно электронного луча, либо применение развертки электронного луча. В частности, развертка электронного луча по кольцевой траектории позволила уменьшить колебания ширины наплавленного валика, вызванные плохой смачиваемостью поверхности подложки, на которую воздействовала периферия электронного луча (рисунок 3.2).

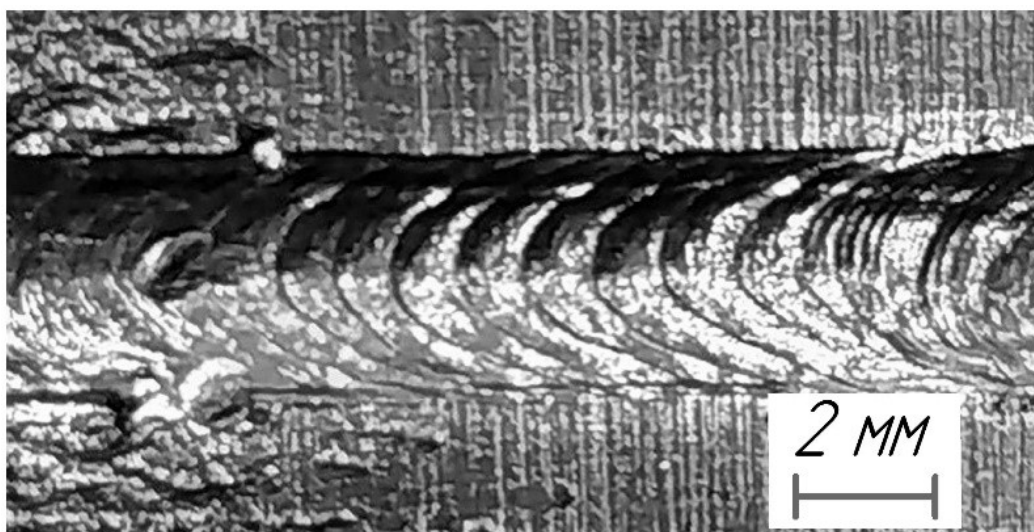


Рисунок 3.2. Внешний вид валика при наплавке с кольцевой разверткой электронного луча.

Далее было исследовано влияние позиционирования присадочной проволоки на качество наплавленного валика. При подаче проволоки в зону наплавки под углом $45-60^\circ$ к поверхности процесс сильно зависит от позиционирования проволоки и мало зависит от направления наплавки. При этом проволока может подаваться прямо в ванну расплавленного металла и происходит равномерный перенос металла. Однако в данном случае существует вероятность залипания проволоки при отклонении от устойчивого режима плавления.

При горизонтальной подаче присадочной проволоки наблюдалась низкая зависимость процесса наплавки от позиционирования проволоки. При передней или боковой подаче присадочной проволоки обеспечивается более гладкая поверхность валика (рисунок 3.3, а, б), в то время как при задней подаче формируется валик с неравномерной поверхностью (рисунок 3.3в). Следует отметить, что при задней подаче проволоки такой характер поверхности наплавленного валика может быть изменён корректировкой мощности электронного луча.

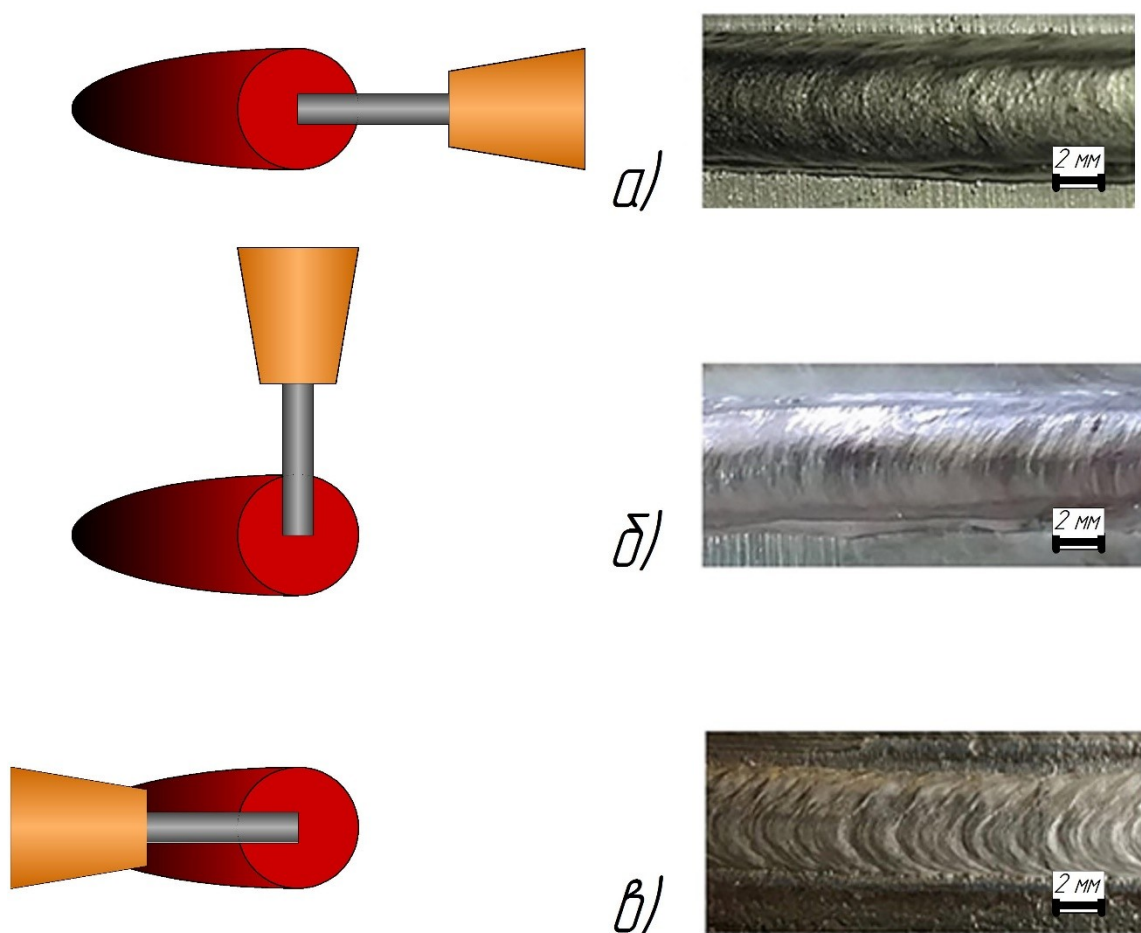


Рисунок 3.3. Внешний вид наплавленного валика в зависимости от ориентации проволоки (направление наплавки слева направо): а – передняя подача проволоки; б – боковая подача проволоки; в – задняя подача проволоки.

Исходя из полученных результатов в заключительной части экспериментальных исследований была выполнена многослойная электронно-лучевая наплавка проволокой (рисунок 3.4). Параметры режимов наплавки представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Параметры режимов электронно-лучевой наплавки

Ускоряющее напряжение	60 кВ
Ток луча	12-14 мА
Положение фокуса электронного луча	на 1 мм выше поверхности проволоки
Скорость подачи присадочной проволоки	10-15 мм/с
Скорость наплавки	3 мм/с
Режим осцилляции электронного луча	кольцо диаметром 2 мм, 800 Гц
Подача присадочной проволоки	параллельно поверхности подложки или под углом до 15° к ней
Расстояние от поверхности подложки до оси проволоки в точке взаимодействия электронного луча с проволокой	1,6-2,0 мм

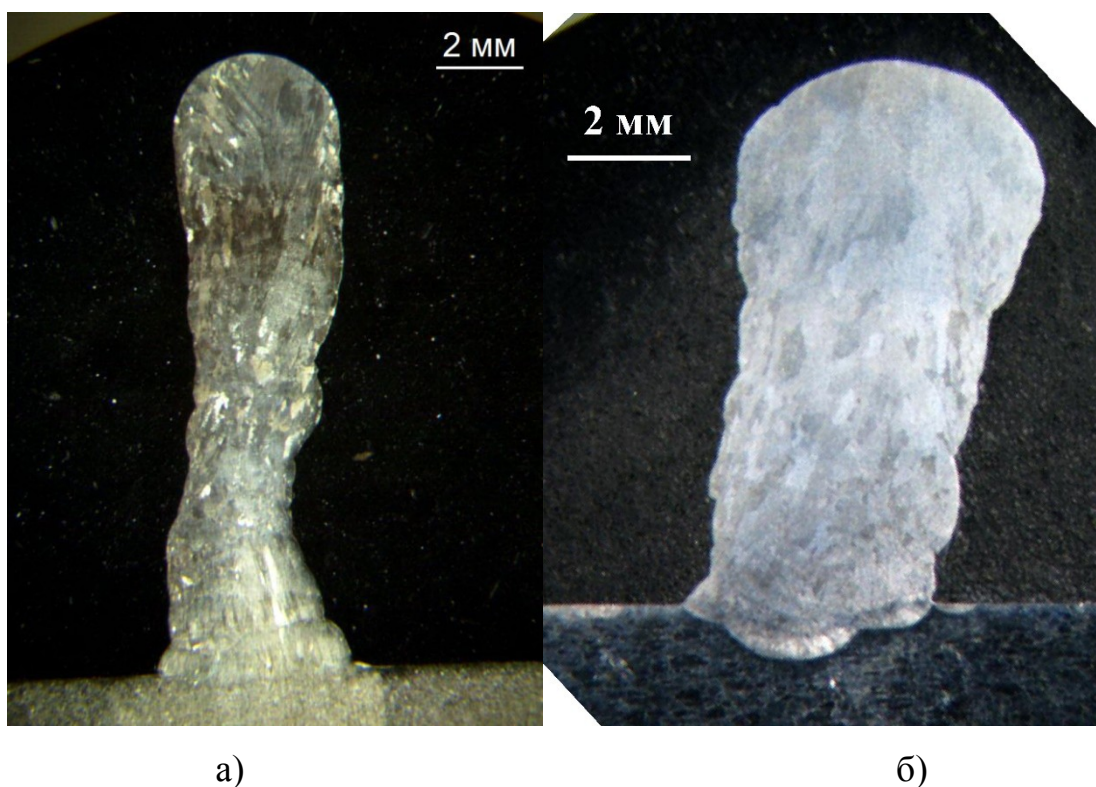


Рисунок 3.4. Поперечный шлиф образцов, полученных в результате электронно-лучевой наплавки проволокой из нержавеющей стали 308L (а) и хромо-никелевого сплава ХН60ВТ (б).

Из рисунка 3.4 видно, что сплавление первого валика с подложкой происходит с минимальным перемешиванием, дефекты сплавления отсутствуют. Поры, раковины, трещины в наплавленном металле отсутствуют. Присутствуют участки смещения наплавленных слоев относительно друг друга и колебания их ширины.

Был сделан вывод что значительные отклонения присадочной проволоки относительно оси наплавки приводят к снижению отношения высота/ширина наплаваемого валика и стабильности качества наплавленных участков.

Следующим этапом был выполнен ряд экспериментов для определения характеристик и выявления, отражающих положение присадочной проволоки, закономерностей формирования тормозного рентгеновского излучения при взаимодействии электронного луча с проволокой. Эксперименты включали в себя лабораторную, модельную и натурную часть, а также последующий анализ результатов этих экспериментов.

3.1 Построение и верификация модели формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе взаимодействия электронного луча с проволокой

В процессе подготовки и выполнения модельного эксперимента была получена модель, описывающая интенсивность формирующегося тормозного рентгеновского излучения при взаимодействии электронного луча, осциллирующего поперек проволоки круглого сечения, в момент времени t в зависимости от смещения проволоки относительно центра осцилляции электронного луча. Данная модель учитывает распределение мощности в поперечном сечении электронного луча, амплитуду осцилляции электронного луча, частоту осцилляции электронного луча, диаметр проволоки, материал проволоки, материал подложки, ускоряющее напряжение электронно-лучевой

пушки, ток электронного луча. Численная реализация модели производилась при помощи программного пакета MathCAD.

При построении математической модели, распределение мощности электронного луча в пятне взаимодействия было описано законом нормального распределения Гаусса (рисунок 3.5):

$$j(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} \cdot e^{\frac{-x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (3.1)$$

где x – координата по оси X ; y – координата по оси Y ; σ_x – среднеквадратическое отклонение по оси X ; σ_y – среднеквадратическое отклонение по оси Y ; σ_x^2 – дисперсия по оси X ; σ_y^2 – дисперсия по оси Y ;

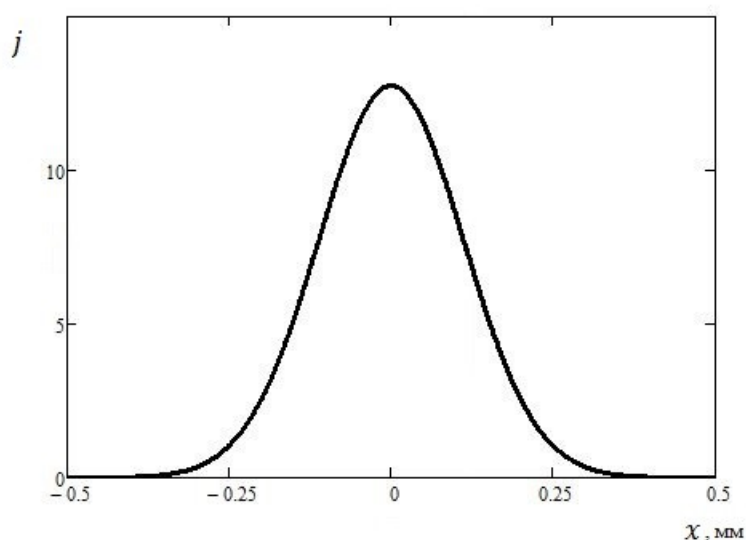


Рисунок 3.5. Распределение мощности в поперечном сечении электронного луча по оси x . Эффективный диаметр 0,5 мм.

Из выражения (1.9) следует что выход тормозного рентгеновского излучения пропорционально растет с увеличением атомного номера мишени, будь то материал подложки или присадочной проволоки. Отсюда следует, что при отличиях химического состава проволоки и подложки возникает дополнительное изменение интенсивности тормозного рентгеновского

излучения при частичном или полном переходе электронного луча с подложки на проволоку и обратно.

Пусть электронный луч с распределением плотности тока $j(x, y)$ взаимодействует с материалом проволоки и подложки, x, y – горизонтальные координаты, при этом x перпендикулярна оси проволоки. Пусть проволока располагается параллельно плоскости подложки. Выделим на поверхности проволоки элементарную площадку dS . Пусть излучение от элемента dS сферическое. Положение элемента dS определяется координатами y и x (или углом φ) (рисунок 3.6). С учетом выражений (1.9) и (1.10) величина потока энергии рентгеновского излучения от элемента dS определяется выражением:

$$d\Phi(\varphi) = k_0 Z U_0^2 \Phi_\varphi(\varphi) \vec{j}(x, y) \cdot d\vec{S} = k_0 Z U_0^2 \Phi_\varphi(\varphi) j(x, y) \cos(\varphi) dS \quad (3.2)$$

Аппроксимировав $\Phi_\varphi(\varphi)$ через $\cos^{\frac{1}{3}}(\varphi)$ получим:

$$d\Phi(\varphi, y) = k_0 Z U_0^2 \cos^{\frac{1}{3}}(\varphi) j(x, y) \cos(\varphi) dS \quad (3.3)$$

При $d\varphi \rightarrow 0$, $dS = dy d\varphi \frac{D_{np}}{2}$, и $d\varphi = \left(\frac{D_{np}}{2}\right)^{-1} \cos^{-1}(\varphi) dx$. Тогда уравнение 3.3 примет вид:

$$d\Phi(\varphi, y) = k_0 Z U_0^2 \cos^{\frac{1}{3}}(\varphi) j(x, y) dx dy \quad (3.4)$$

Выразив угол φ через координату по оси X (рисунок 3.6) получим для потока тормозного рентгеновского излучения с проволоки:

$$\cos^{\frac{1}{3}}(\varphi) = \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D_{np}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}} \quad (3.5)$$

где D_{np} – диаметр проволоки; x – координата по оси X.

$$d\Phi(x, y) = k_0 Z U_0^2 \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D_{np}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}} j(x, y) dx dy, \quad (3.6)$$

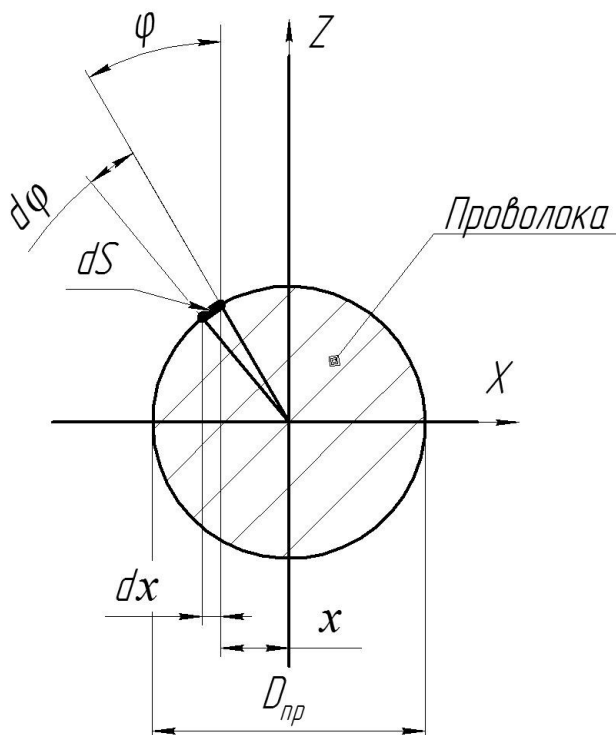


Рисунок 3.6. Схема расчета угла φ через координату по оси X относительно центра сечения присадочной проволоки.

Выражение (3.6) выполняется для $-D_{\text{пр}}/2 < x < D_{\text{пр}}/2$. С учетом распределения энергии электронного пучка (3.1) и смещения проволоки относительно электронного луча Δ_x , поток тормозного рентгеновского излучения для всей области описывается выражением:

$$\Phi(\Delta_x) = \begin{cases} k_0 Z U_0^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{D_{\text{пр}}}{2}}^{\frac{D_{\text{пр}}}{2}} \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D_{\text{пр}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}} \cdot j(x + \Delta_x, y) dx dy, & -\frac{D_{\text{пр}}}{2} < x < \frac{D_{\text{пр}}}{2} \\ k_0 Z U_0^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} j(x + \Delta_x, y) dx dy, & x \leq -\frac{D_{\text{пр}}}{2}, \frac{D_{\text{пр}}}{2} \leq x \end{cases} \quad (3.7)$$

где Δ_x – отклонение по оси X присадочной проволоки от оси электронного луча; k_0 – коэффициент пропорциональности, Z – атомный номер обрабатываемого материала, U_0 – ускоряющее напряжение. $D_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки; x – координата по оси X; y – координата по оси Y; $j(x + \Delta_x, y)$ – распределения

плотности тока электронного луча в поперечном сечении при смещении присадочной проволоки относительно электронного луча на Δ_x .

При измерении интенсивности излучения с помощью датчика сигнал уменьшается по мере увеличения расстояния l от области взаимодействия луча с проволокой и подложкой до приемника. Для точечного источника в отсутствие ослабления излучения средой интенсивность убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. С учетом площади чувствительного элемента S_d регистрируемая интенсивность рентгеновского излучения будет:

$$J_{\text{рег}} = \frac{\Phi \cdot S_d}{l^2}, \quad (3.8)$$

Введем колебания электронного луча поперек проволоки, используя функцию:

$$x(t) = A \cdot \sin(2\pi\omega t), \quad (3.9)$$

где A – амплитуда колебаний, ω – частота колебаний, t – время.

Введем обозначение $\alpha = \omega t$. Пусть $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$. Тогда, с учетом (3.8) и (3.9) выражение (3.7) примет вид:

$$J(\Delta_x, \alpha) = \begin{cases} \frac{k_0 Z U_0^2 S_d}{l^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{D_{\text{нп}}}{2}}^{\frac{D_{\text{нп}}}{2}} \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta_x-A\sin(\alpha))^2-y^2}{2\sigma^2}} dx dy, & -\frac{D_{\text{нп}}}{2} < x < \frac{D_{\text{нп}}}{2} \\ \frac{k_0 Z U_0^2 S_d}{l^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta_x-A\sin(\alpha))^2-y^2}{2\sigma^2}} dx dy, & x \leq -\frac{D_{\text{нп}}}{2}, \frac{D_{\text{нп}}}{2} \leq x \end{cases} \quad (3.10)$$

Изменение сигнала тормозного рентгеновского излучения во времени (3.10) можно представить в виде кратного ряда Фурье от одной переменной:

$$J(\Delta_x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m(\Delta_x) e^{j m \alpha} \quad (3.11)$$

где коэффициенты ряда определяются формулой:

$$C_m(\Delta_x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta_x) e^{-j m \alpha} \quad (3.12)$$

С учетом (3.10):

$$C_m = \begin{cases} \frac{k_0 Z U_0^2 S_d}{2\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{D_{np}}{2}}^{\frac{D_{np}}{2}} e^{-jm\alpha} \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta_x-A\sin(\alpha))^2-y^2}{2\sigma^2}} dx dy d\alpha, & -\frac{D_{np}}{2} < x < \frac{D_{np}}{2} \\ \frac{k_0 Z U_0^2 S_d}{2\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-jm\alpha} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta_x-A\sin(\alpha))^2-y^2}{2\sigma^2}} dx dy d\alpha, & x \leq -\frac{D_{np}}{2}, \frac{D_{np}}{2} \leq x \end{cases} \quad (3.13)$$

Соотношения (3.11) и (3.12) представляют математическую модель сигнала тормозного рентгеновского излучения, как элемента, обладающего частотным спектром выходного сигнала при наличии периодических колебаниях электронного пучка поперек проволоки. Математическая модель позволяет выявить составляющие сигнала датчика с частотами $m\alpha$, где m – целое число.

В тригонометрической форме (3.11) будет иметь вид:

$$J(\Delta_x, \alpha) = \frac{d_0}{2} + 4 \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_m \cos(m\alpha) + b_m \sin(m\alpha) \quad (3.14)$$

где коэффициенты ряда определяются выражениями:

$$d_0(\Delta_x) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta_x, \alpha) d\alpha \quad (3.15)$$

$$d_m(\Delta_x) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta_x, \alpha) \cos(m\alpha) d\alpha \quad (3.16)$$

$$b_m(\Delta_x) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} J(\Delta_x, \alpha) \sin(m\alpha) d\alpha \quad (3.17)$$

В этом случае:

$$C_m = \frac{1}{2} (d_m - j b_m) \quad (3.18)$$

$$b_m = \begin{cases} \frac{k_0 Z U_0^2 S_d}{4\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{D_{np}}{2}}^{\frac{D_{np}}{2}} \sin(2\pi m\alpha) \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D}\right)^2\right]^{\frac{1}{6}} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta_x-A\sin(\alpha))^2-y^2}{2\sigma^2}} dx dy d\alpha, & -\frac{D_{np}}{2} < x < \frac{D_{np}}{2} \\ \frac{k_0 Z U_0^2 S_d}{4\pi l^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sin(2\pi m\alpha) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{\frac{-(x-\Delta_x-A\sin(\alpha))^2-y^2}{2\sigma^2}} dx dy d\alpha, & x \leq -\frac{D_{np}}{2}, \frac{D_{np}}{2} \leq x \end{cases} \quad (3.19)$$

Выражение (3.19) при $m=1$ описывает результат обработки сигнала тормозного рентгеновского излучения методом синхронного накопления $b_{\text{дет}}$ и представляет динамическую математическую модель.

Численная реализации моделей по выражениям (3.7) и (3.19) была проведена с максимальным приближением к лабораторному эксперименту с неплавящейся вольфрамовой мишени. Были использованы следующие постоянные:

$$k_0 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ В}^{-1}; I = 3 \cdot 10^{-3} \text{ А}; Z_{\text{подложки}} = 29,5; Z_{\text{проволоки}} = 26;$$

$$U_0 = 60 \cdot 10^3 \text{ В}; D_{\text{пр}} = 5 \text{ мм}; A = 4 \text{ мм}; \omega = 800 \text{ Гц}; D_{\text{л}} = 0,5 \text{ мм}.$$

Результаты расчетов по выражениям (3.7) и (3.8) приведены на рисунке 3.7а. В качестве диаметра луча $D_{\text{л}}$ принимался диаметр окружности, вмещающей в себя 95% энергии электронного луча.

Результаты численной реализации (рисунок 3.7а) сравнивались с экспериментальными данными, полученными при выполнении лабораторного эксперимента (рисунок 3.7б). Сравнение показало хорошее соответствие теоретических данных практическим. Экспериментальные исследования были проведены на режимах близких к теоретическим параметрам.

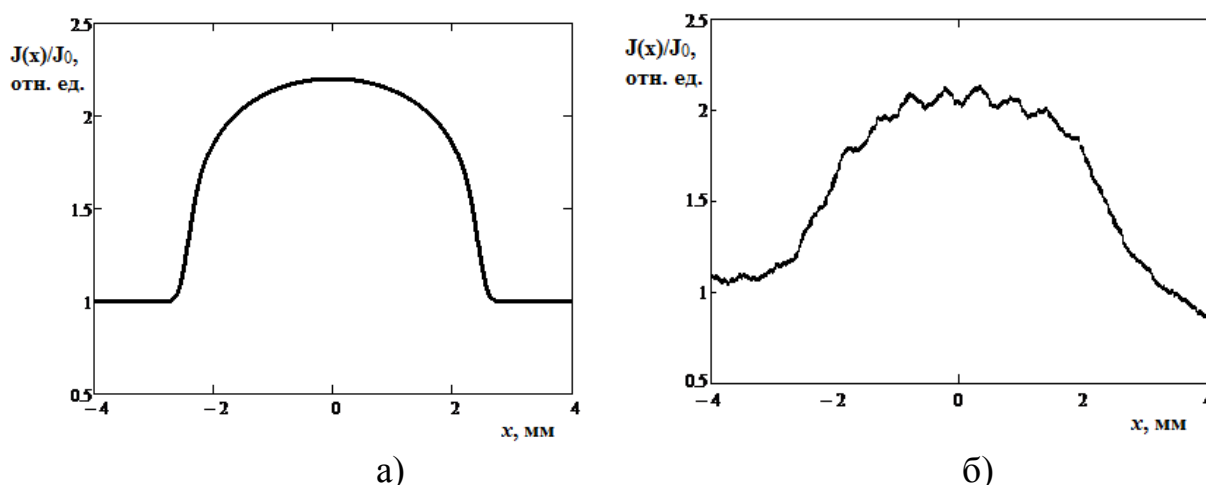


Рисунок 3.7. Величина сигнала рентгеновского излучения в зависимости от положения электронного луча относительно проволоки. Подложка – ХН67МВТЮ ($Z=29,5$), проволока – Вольфрам ($Z=74$). $D_{\text{пр}}=5$ мм; $D_{\text{л}}=0,5$ мм:

а – результаты моделирования; б – экспериментальные результаты.

Верификация полученной математической модели (уравнение 3.7) производилась, используя практические и теоретические данные, представленные на рисунке 3.7, путем вычисления средней ошибки аппроксимации, или среднего отклонения расчетных значений от фактических, по формуле [62]:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{n=1}^n |y_i - y_x|}{n} \cdot 100\%, \quad (3.20)$$

где y_i – фактическое значение; y_x – расчетное значение, n – объем выборки или количество экспериментальных значений.

По результатам расчета, для построенной модели $\bar{A} = 6\%$. Поскольку ошибка меньше 10% [62], то полученную модель можно использовать для вычисления сигнала тормозного рентгеновского излучения от технологических параметров процесса взаимодействия электронного луча с проволокой и подложкой.

Проверка значимости полученной модели с использованием критерия Фишера, расчетное значение которого находится как отношение дисперсии исходного ряда наблюдений изучаемого показателя и несмещенной оценки дисперсии остаточной последовательности для данной модели:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{(n-m-1)}{m}, \quad (3.21)$$

где m – количество параметров модели; R^2 – коэффициент детерминации, вычисляемый по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y_x)^2}{\sum (y_i - y_{cp})^2}, \quad (3.22)$$

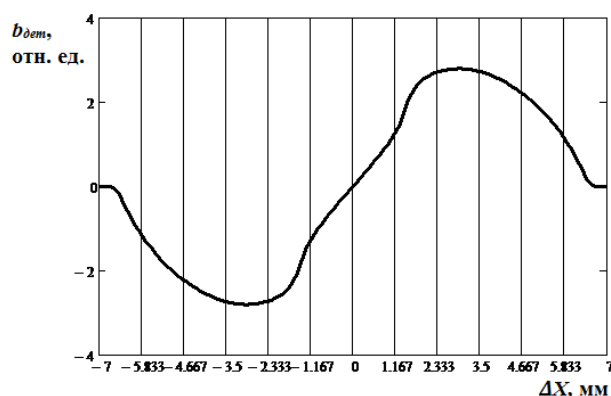
где y_{cp} – среднее арифметическое фактических значений, вычисляемое по формуле:

$$y_{cp} = \frac{\sum_{n=1}^n y_i}{n} \quad (3.23)$$

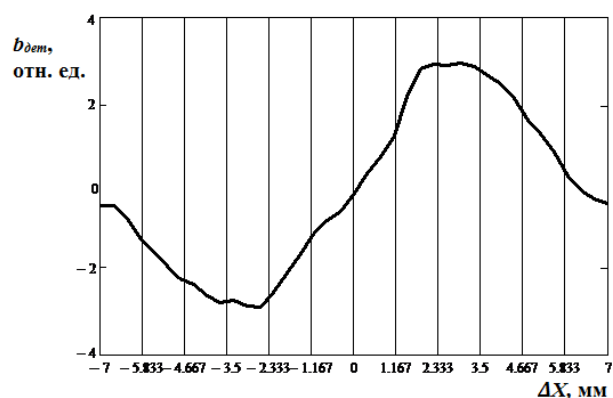
Коэффициент детерминации математически определяется является квадратом коэффициента корреляции R . Следовательно, коэффициент корреляции R , также может быть определен математически путем вычисления квадратного корня от коэффициента детерминации R^2 .

Расчетная величина критерия Фишера [126] для полученной модели $F=611,96$. При этом коэффициент детерминации равен $R^2=0,957$, а коэффициент корреляции $R=0,978$. Табличное значение порогового значения критерия Фишера для надежности 0,95 $F_m=2,05$. Расчетная величина критерия Фишера значительно превышает табличное значение что говорит о детерминированном характере полученной математической модели. Коэффициент корреляции находится в интервале $0,9 < R < 1$, что в соответствии со шкалой Чеддока означает весьма высокую связь между результирующей функцией и наблюдаемыми параметрами. Следовательно, можно считать полученную модель верифицированной.

Результат математической обработки методом синхронного детектирования по выражению (2.2) сигнала тормозного рентгеновского излучения, записанного в процессе лабораторного эксперимента с неплавящейся вольфрамовой цилиндрической мишенью, и результат моделирования на основе полученной модели (3.19) представлены на рисунках 3.8б и 3.8а соответственно.



а)



б)

Рисунок 3.8. Результат обработки сигнала тормозного рентгеновского излучения методом синхронного детектирования. Подложка – ХН67МВТЮ ($Z=29,5$), проволока – Вольфрам ($Z=74$). $D_{\text{пр}}=5$ мм; $A_{\text{осц}}=4$ мм; $f=800$ Гц; $D_{\text{л}}=0,5$ мм: а – результаты моделирования; б – экспериментальные результаты.

Сравнительный анализ данных модели для амплитуды составляющей $b_{\text{дет}}$ (рисунок 3.8а) с эмпирическими значениями (рисунок 3.8б) подтвердил адекватность модели. Средняя ошибка аппроксимации $\bar{A} = 3\%$. Критерий Фишера составил $F=340,52$. Табличное значение порогового значения критерия Фишера для надежности 0,95 $F_m=2,49$. Коэффициент детерминации $R^2=0,993$, коэффициент корреляции $R=0,996$, что говорит о наличии прямой зависимости между результирующей функцией и наблюдаемыми параметрами.

3.2 Влияние фокусировки электронного луча на информационную составляющую в спектре сигнала тормозного рентгеновского излучения

Используя полученную модель процесса электронно-лучевой наплавки сплошной проволокой с поперечной осцилляцией электронного луча, были исследованы различные технологические режимы и их влияние на формирование тормозного рентгеновского излучения. В первую очередь было исследовано влияние фокусировки электронного луча на параметры тормозного рентгеновского излучения. В качестве параметра фокусировки был использован диаметр электронного луча, под которым понимается диаметр окружности, включающей в себя 95% энергии луча в поперечном сечении. Были использованы следующие параметры:

$$k_0 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ В}^{-1}; I = 12 \cdot 10^{-3} \text{ А}; Z_{\text{подложки}} = 26; Z_{\text{проволоки}} = 26;$$

$$U_0 = 60 \cdot 10^3 \text{ В}; D_{\text{пр}} = 1,2 \text{ мм}; A = 1 \text{ мм}; \omega = 800 \text{ Гц}; D_{\text{л}} = 0,5 \dots 1,7 \text{ мм}.$$

Статическая зависимость, характеризующая относительную величину выделяемого тормозного рентгеновского излучения в зависимости от

положения электронного луча относительно присадочной проволоки, для разных режимов фокусировки представлена на рисунке 3.9.

Из рисунка 3.9 видно, что расфокусирование электронного луча приводит к увеличению ширины области вблизи края присадочной проволоки, в которой происходит искажение тормозного рентгеновского излучения, и к уменьшению относительной величины его искажения в этой области.

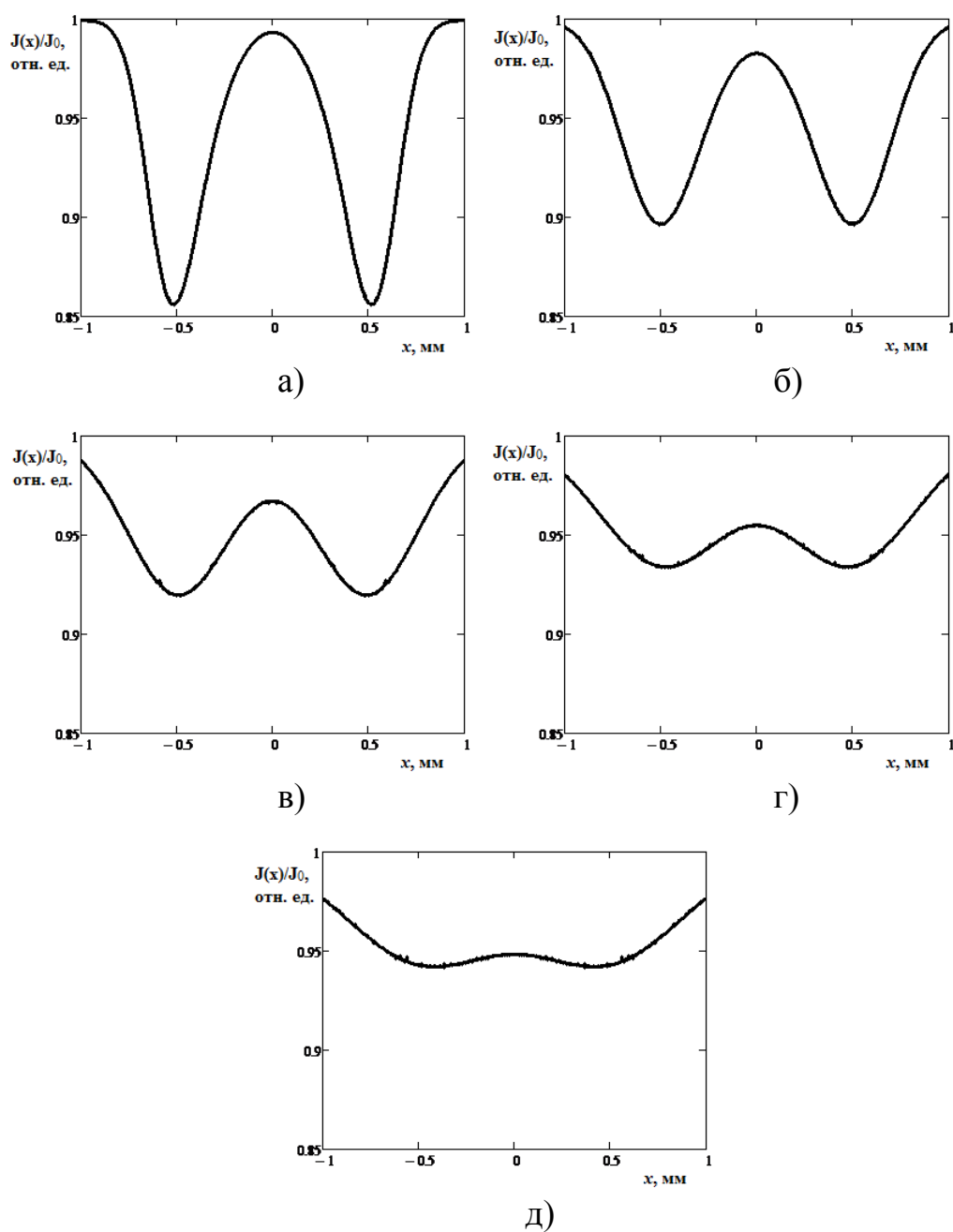


Рисунок 3.9. Величина сигнала относительной интенсивности рентгеновского излучения в зависимости от положения электронного луча относительно проволоки для разных диаметров луча $D_{\text{пр}}=0,8$ мм: а) $D_{\text{л}}=0,5$ мм; б) $D_{\text{л}}=0,8$ мм; в) $D_{\text{л}}=1,1$ мм; г) $D_{\text{л}}=1,4$ мм; д) $D_{\text{л}}=1,7$ мм.

Графики изменения первой гармоники тормозного рентгеновского излучения, обработанного методом синхронного детектирования, в зависимости от значения отклонения проволоки относительно центра осцилляции электронного луча для разных диаметров луча представлена на рисунке 3.10.

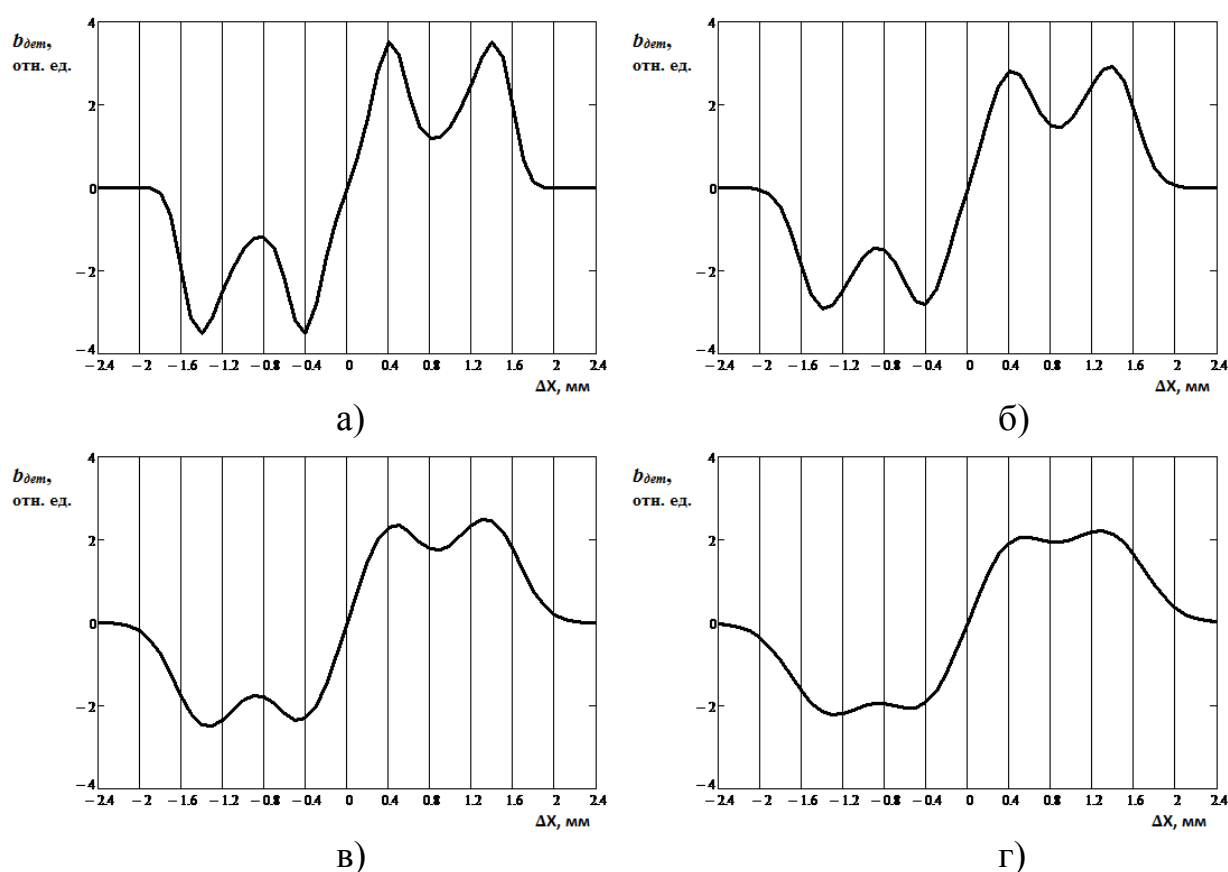


Рисунок 3.10. Результат обработки сигнала тормозного рентгеновского излучения методом синхронного детектирования для случая $A > \frac{D_{\text{пр}}}{2}$ для разных диаметров луча: а) $D_{\text{л}}=0,5$ мм; б) $D_{\text{л}}=0,8$ мм; в) $D_{\text{л}}=1,1$ мм; г) $D_{\text{л}}=1,4$ мм.

Первая гармоника сигнала тормозного рентгеновского излучения содержит в себе составляющую, несущую информацию о положении присадочной проволоки относительно центра осцилляции электронного луча. Выделение этой информационной составляющей из спектра сигнала было выполнено посредством метода синхронного детектирования. Из рисунков 3.10 видно, что зависимость значения сигнала, обработанного методом синхронного детектирования $b_{\text{дет}}$, от значения отклонения проволоки относительно центра осцилляции электронного луча Δ_x имеет характер близкий к линейному в пределах от -0,4 мм до 0,4 мм. Обозначенные пределы могут быть вычислены по выражению:

$$\left(-A + \frac{D_{\text{пр}}}{2}\right) < \Delta_x < \left(A - \frac{D_{\text{пр}}}{2}\right), \quad (3.24)$$

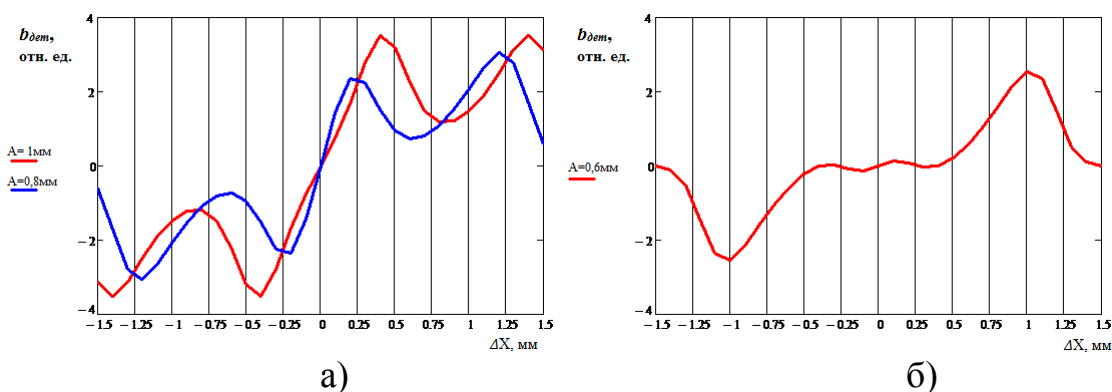
Зависимость информационной составляющей в спектре сигнала тормозного рентгеновского излучения от смещения присадочной проволоки $b_{\text{дет}}$ не меняется принципиально при изменении фокусировки электронного луча в пределах диаметра луча от 0,5 до 1,4 мм. Однако, несколько меняется угол наклона прямой в районе нуля при изменении фокусировки электронного луча. Экстремальное значение, соответствующее смещениям присадочной проволоки -0,8 и +0,8 мм уменьшается по мере снижения уровня фокусировки электронного луча, и практически пропадает при фокусировке, обеспечивающей диаметр луча на поверхности проволоки 1,4 мм.

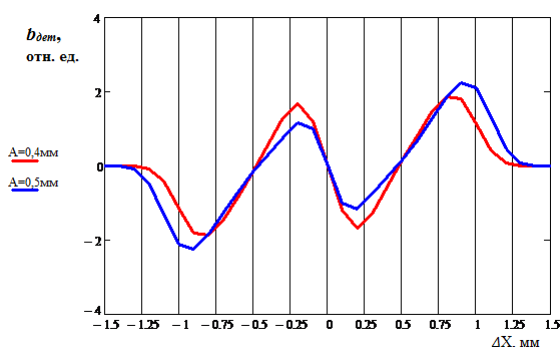
3.3 Влияние амплитуды осцилляции электронного луча на информационную составляющую в спектре сигнала тормозного рентгеновского излучения

Следующим шагом стало исследование влияния амплитуды осцилляции электронного луча на параметры тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны в процессе электронно-лучевой наплавки проволокой.

Исследование зависимости информационной составляющей от амплитуды осцилляции электронного луча (рисунок 3.11) показало, что при амплитудах осцилляции, значительно превышающих диаметр присадочной проволоки, в области относительно малых смещений проволоки наблюдается однозначная близкая к линейной зависимость информационной составляющей от величины смещения присадочной проволоки (рисунок 3.11а). По мере уменьшения амплитуды осцилляции и приближения её значения к значению диаметра присадочной проволоки происходит уменьшение промежутка значений величины информационной составляющей однозначно соответствующих величинам отклонения присадочной проволоки (рисунок 3.11а). Кроме того, уменьшение амплитуды осцилляции делает зависимость $b_{\text{дет}}$ всё более нелинейной (рисунок 3.11а). При амплитуде осцилляции равной диаметру присадочной проволоки, в значительной области вблизи малых значений Δx наблюдается горизонтальный участок графика $b_{\text{дет}}$ (рисунок 3.11б). При снижении амплитуды осцилляции до значений меньше диаметра присадочной проволоки происходит переход от прямой к обратной зависимости $b_{\text{дет}}$ в области вблизи нуля Δx (рисунок 3.11в).

Исследование зависимости $b_{\text{дет}}$ для амплитуд осцилляции, близких к диаметру присадочной проволоки (рисунок 3.12) показало изменение знака зависимости $b_{\text{дет}}$ в области вблизи малых значений Δx . Установлено, что смена знака происходит в пределах $A \in \left(\frac{D_{\text{пр}}}{2} - 0,1; \frac{D_{\text{пр}}}{2} + 0,1\right)$.

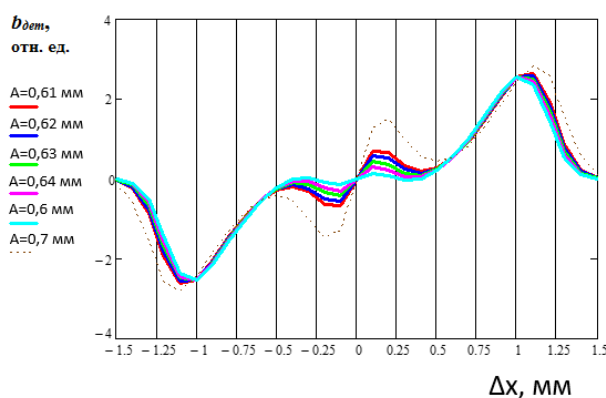




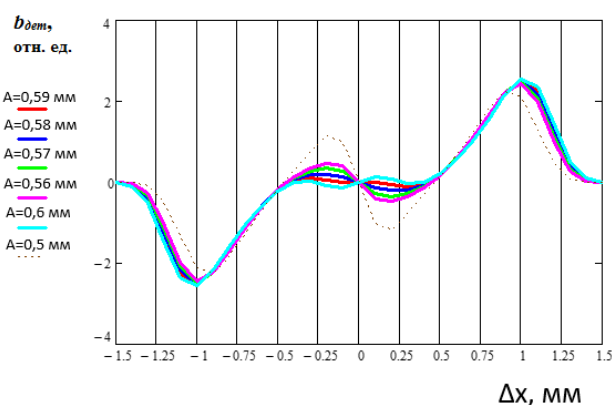
в)

Рисунок 3.11. Результат синхронного детектирования в зависимости от положения присадочной проволоки ($A \geq \frac{D}{2}$, $d_{\text{луча}} = 0,5 \text{ мм}$): а) $A \geq \frac{D_{\text{пр}}}{2}$; б);

$$A = \frac{D_{\text{пр}}}{2}; \text{ в) } A \leq \frac{D_{\text{пр}}}{2}.$$



а)



б)

Рисунок 3.12. Результат синхронного детектирования в зависимости от положения присадочной проволоки для амплитуд осцилляции, близких к диаметру присадочной проволоки ($A \geq \frac{D}{2}$, $d_{\text{луча}} = 0,5 \text{ мм}$): а) $A \geq \frac{D_{\text{пр}}}{2}$; б) $A \leq \frac{D_{\text{пр}}}{2}$.

Выводы

- Установлено что в процессе электронно-лучевой наплавки фокусировка электронного луча с незначительным превышением над поверхностью присадочной проволоки обеспечивает наиболее благоприятный режим плавления проволоки и активации поверхности подложки. А развертка электронного луча по кольцевой траектории позволяет уменьшить колебаний ширины наплавленного валика.

- Установлено что значительные отклонения присадочной проволоки относительно оси наплавки приводят к снижению отношения высота/ширина наплавляемого валика и увеличивают вероятность появления дефектов.

- Определены параметры режимов электронно-лучевой наплавки проволокой из стали 308L и сплава ХН60ВТ, обеспечивающие сплавление без дефектов слоев друг с другом и с подложкой, малую величину перемешивания наплавляемого металла и металла подложки, равномерное плавление присадочной проволоки без разбрызгивания.

- Построена и верифицирована модель процесса формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе взаимодействия электронного луча с проволокой. Модель устанавливает закономерность изменения сигнала тормозного рентгеновского излучения от технологических параметров, таких как: параметры осцилляции луча, ускоряющее напряжение, ток луча и диаметр луча в пятне взаимодействия, от диаметра проволоки, от материалов подложки и присадочной проволоки, от смещения проволоки от центра осцилляции луча, от времени.

- Установлено что зависимость значения сигнала тормозного рентгеновского излучения в процессе воздействия осциллирующим по кольцевой траектории электронным лучом на проволоку, обработанного методом синхронного детектирования $b_{\text{дет}}$, от значения отклонения проволоки относительно центра осцилляции электронного луча Δx имеет участок с характером близким к линейной зависимости. Этот участок не меняется принципиально при изменении фокусировки электронного луча в пределах $(-A + \frac{D_{\text{пр}}}{2}) < \Delta x < (A - \frac{D_{\text{пр}}}{2})$, однако, несколько меняется угол наклона прямой.

- Установлено что участок с зависимостью $b_{\text{дет}}$ от Δx близкой к линейной отчетливо наблюдается при амплитудах осцилляции электронного луча, значительно превышающих диаметр присадочной проволоки. При

изменении амплитуды осцилляции характер этой зависимости меняет знак при равенстве амплитуды осцилляции радиусу проволоки.

Глава 4. Разработка способа электронно-лучевой наплавки с оперативным контролем и управлением положением присадочной проволоки

4.1 Графическое представление информации о положении присадочной проволоки

При осуществлении способа электронно-лучевой наплавки с оперативным управлением положением присадочной проволоки возможно получение дополнительной информации о процессе. Например, визуальное отображение положения присадочной проволоки и визуализация процессов капельного переноса расплавленного металла.

На примере электронно-лучевой наплавки проволокой с применением осцилляции электронного луча по кольцевой траектории рассмотрим процесс визуального представления информации об отклонении присадочной проволоки от центра осцилляции электронного луча. Для части экспериментов наплавка осуществлялась по схеме и режиму натурного эксперимента, описанного в разделе 2.3. В данном случае ось X отклоняющей системы совпадала с осью присадочной проволоки, а ось Y была направлена перпендикулярно ей.

Для оценки применимости методики визуализации в условиях расфокусирования электронного луча, увеличения диаметра осцилляции, изменения скорости подачи присадочной проволоки был выполнен эксперимент по электронно-лучевой наплавке проволокой ER308L диаметром 0,8...1,2 мм на подложку из стали 12X18H10T. Присадочная проволока подавалась со скоростью от 5 до 25 мм/с под небольшим углом ($5-10^\circ$) к поверхности подложки на 1-2 мм выше нее и на расстоянии 400 мм от среза электронно-лучевой пушки. Подложка перемещалась со скоростью 5-6 мм/с. Электронный луч фокусировался на 3 мм выше поверхности подложки и осциллировал по кольцевой траектории диаметром 5 мм с частотой 800 Гц. Ток

электронного луча составлял 14-16 мА. Датчик рентгеновского излучения был установлен над зоной наплавки и был направлен на область взаимодействия электронного луча со стержнем. Угол между осью датчика и осью электронного луча составлял 45 градусов.

Одним из способов визуализации процесса электронно-лучевой наплавки проволокой может стать графическое представление положения присадочной проволоки по локальному максимуму функции $S(t)$. Для этого возьмем график функции $S(t)$, получаемой методом синхронного накопления по выражению (2.3), и представим его в пространственных координатах $X-Y$, соответствующих положению электронного луча на поверхности подложки в зависимости от времени t . Полученный график представлен на рисунке 4.1а.

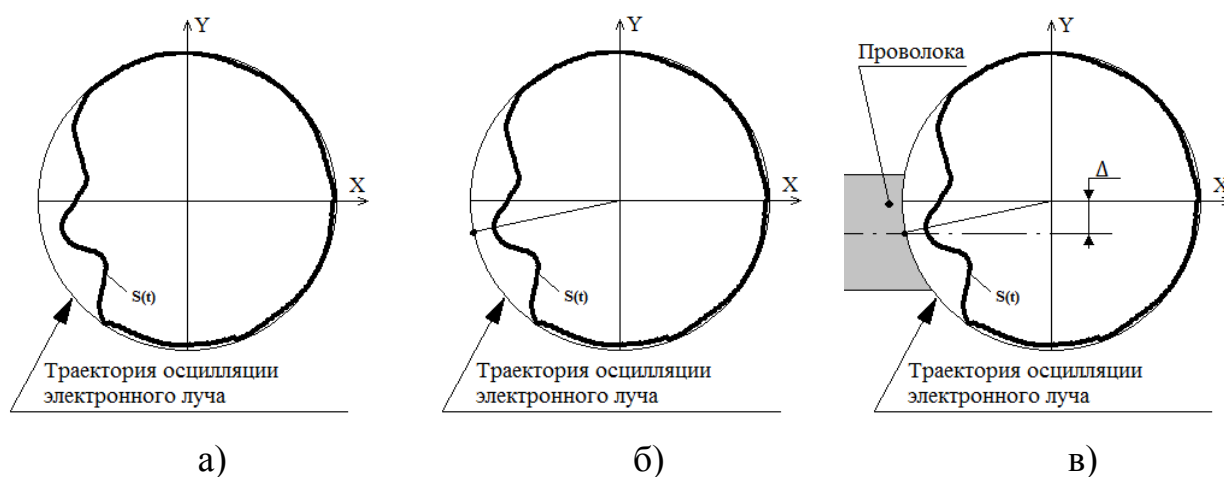


Рисунок 4.1. Визуализация положения присадочной проволоки по локальному максимуму функции $S(t)$. Диаметр кольцевой траектории осцилляции 2 мм, диаметр проволоки 0,8 мм, фокусировка луча на 1 мм выше поверхности подложки, скорость подачи проволоки 12 мм/с: а – построение графика функции $S(t)$ в пространственных координатах; б – нахождение оси присадочной проволоки; в – определение границ проволоки и величины отклонения проволоки Δ .

Из точки, соответствующей центру осцилляции электронного луча, проведем прямую линию через локальный максимум функции $S(t)$, расположенный между двумя минимумами (рисунок 4.1б). Тогда через точку пересечения этой прямой с траекторией осцилляции электронного луча будет проходить ось присадочной проволоки. Исходя из известных диаметров проволоки и кольцевой траектории осцилляции электронного луча построим границы присадочной проволоки и обозначим отклонение присадочной проволоки от центра осцилляции электронного луча Δ (рисунок 4.1в). Стоит отметить, что данный способ обладает погрешностями, связанными с плавлением присадочной проволоки, вследствие чего диаметр проволоки в области воздействия на нее электронным лучом может быть больше или меньше исходного диаметра проволоки.

Вторым вариантом визуализации может стать графическое представление положения присадочной проволоки по двум локальным минимумам функции $S(t)$. Для этого возьмем представленный на рисунке 4.1а график функции $S(t)$ в пространственных координатах X - Y .

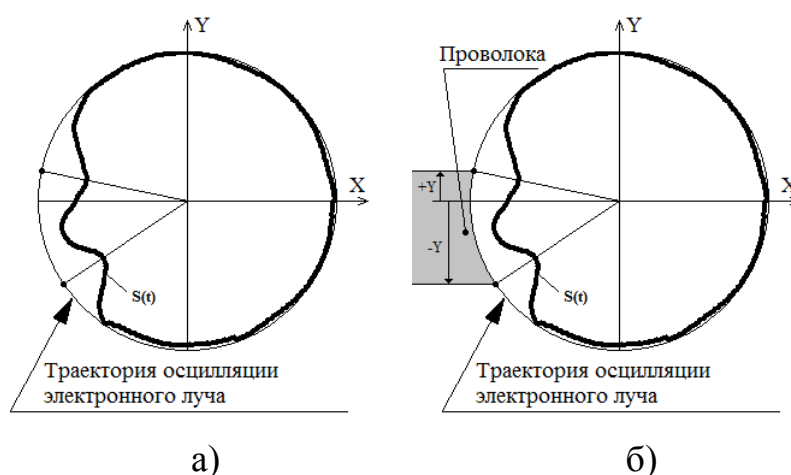


Рисунок 4.2. Визуализация положения присадочной проволоки по двум локальным минимумам функции $S(t)$. Диаметр кольцевой траектории осцилляции 2 мм, диаметр проволоки 0,8 мм, фокусировка луча на 1 мм выше поверхности подложки, скорость подачи проволоки 12 мм/с: а – нахождение

краев присадочной проволоки; Δ – определение величины отклонения проволоки $\Delta = Y_+ - Y_-$.

Из точки, соответствующей центру осцилляции электронного луча, проведем две прямые линии через локальные минимумы функции $S(t)$ (рисунок 4.2а). Тогда через точки пересечения этих прямых с траекторией осцилляции электронного луча будут проходить края присадочной проволоки. Следующим шагом отмерим расстояние от оси X до одного края проволоки Y_+ и до второго края проволоки Y_- (рисунок 4.2б). При этом значение Y_+ будет положительным при отсчете по направлению оси Y , а значение Y_- будет положительным при отсчете по обратному направлению оси Y . Тогда отклонение присадочной проволоки от центра осцилляции электронного луча Δ будет обозначаться разницей Y_+ и Y_- :

$$\Delta = Y_+ - Y_- \quad (4.1)$$

На рисунке 4.3а представлен график функции $S(t)$, получаемой методом синхронного накопления по выражению (2.3), в пространственных координатах X - Y для случая электронно-лучевой наплавки с расфокусированием луча и увеличенным диаметром осцилляции. В следствие расфокусирования электронного луча локальный максимум функции $S(t)$, соответствующий верхней точке кривизны присадочной проволоки, становится менее выраженным. Это соответствует результатам моделирования, представленным на рисунке 3.9. Также стоит отметить что величина снижения относительного уровня рентгеновского излучения больше, чем для результатов представленных на рисунках 4.1 и 4.2. Это объясняется наклоном присадочной проволоки относительно поверхности подложки, и, следовательно, ее наклоном относительно направления падения электронного луча. Такой наклон увеличивает угол между осью электронного луча и нормалью к поверхности проволоки φ .

На рисунке 4.3б представлен график функции $S(t)$ в пространственных координатах X - Y для случая электронно-лучевой наплавки со скоростью подачи присадочной проволоки, увеличенной до уровня, при котором происходит взаимодействие осциллирующего по кольцевой траектории электронного луча в области с проволокой и, во второй области – с расплавленной каплей на торце проволоки. Об справедливости этого суждения свидетельствует появление на графике функции $S(t)$ второй области с экстремумом. При этом вторая область экстремума не содержит локального максимума, что объясняется формой капли близкой к сферической. В этом случае положение капли расплавленного металла может быть представлено по единственному экстремуму в соответствующей области графика относительного рентгеновского излучения. Наличие на графике двух мест определенного положения присадочной проволоки позволяет визуализировать не только ее смещение относительно центра осцилляции электронного луча, но и угол между осью присадочной проволоки и осью X .

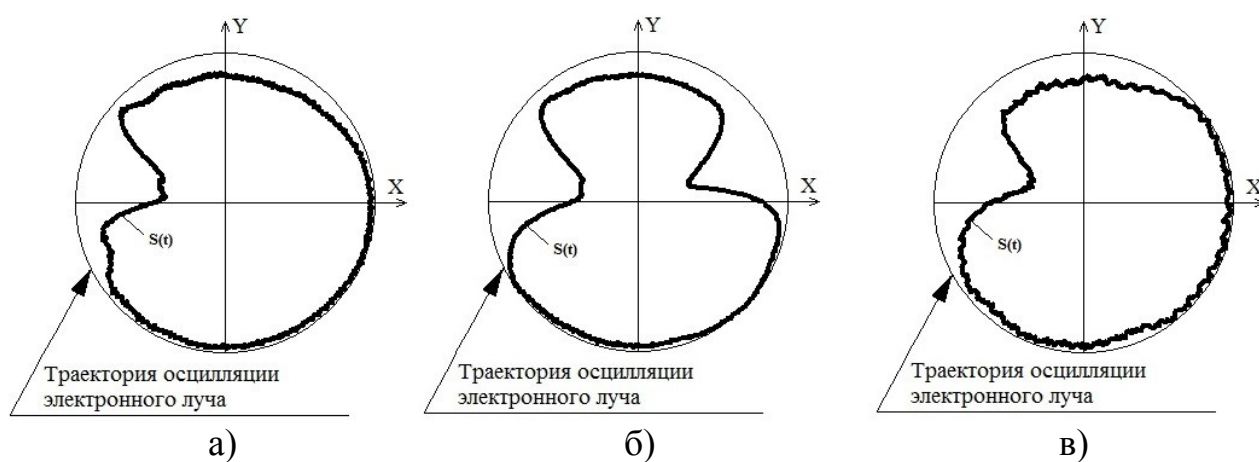


Рисунок 4.3. Визуализация положения присадочной проволоки по функции $S(t)$ при электронно-лучевой наплавке с расфокусированием луча и увеличенным диаметром осцилляции. Диаметр кольцевой траектории осцилляции 5 мм, диаметр проволоки 0,8 мм, фокусировка луча на 3 мм выше поверхности подложки: а – скорость подачи проволоки 12 мм/с; б – скорость подачи проволоки 25 мм/с; в – скорость подачи проволоки 5 мм/с.

На рисунке 4.3в представлен график функции $S(t)$ в пространственных координатах $X-Y$ для случая электронно-лучевой наплавки со скоростью подачи присадочной проволоки, уменьшенной до уровня, при котором взаимодействие осциллирующего по кольцевой траектории электронного луча происходит не с проволокой, а с расплавленной каплей на торце проволоки. В этом случае, на графике функции $S(t)$ присутствует один экстремум в виде локального минимума, что объясняется формой капли близкой к сферической. В этом случае, положение капли расплавленного металла также может быть представлено по единственному экстремуму в соответствующей области графика относительного рентгеновского излучения.

Используя результаты визуализации по двум локальным минимумам функции $S(t)$ может быть отображено мгновенное значение величины диаметра присадочной проволоки $D_{\text{пр}}(t)$ в зоне взаимодействия с ней электронного луча. Для этого требуется вычислить модуль суммы Y_+ и Y_- :

$$D_{\text{пр}}(t) = |Y_+ - Y_-| \quad (4.2)$$

По колебаниям $D_{\text{пр}}(t)$ может быть визуализирован процесс капельного переноса расплавленного металла присадочной проволоки в наплавляемый валик. Например, частота колебаний $D_{\text{пр}}(t)$ отражает частоту капельного переноса, а максимальный размер $D_{\text{пр}}(t)$ – максимальный размер капли.

Кроме того, возможно представление информации, характеризующей расстояние от присадочной проволоки до жидкой ванны расплавленного металла валика. Выполнить это можно, учитывая характер переноса капли расплавленного металла с торца присадочной проволоки в наплавляемый валик: обычно капля скапливается на торце проволоки до момента ее касания жидкой ванны расплавленного металла валика, после чего происходит перетекание практически всей жидкой фазы металла в направлении валика и, после отрыва капли от проволоки, процесс накопления капли на торце проволоки начинается заново. Соответственно, максимальный размер капли

расплавленной проволоки характеризует расстояние от присадочной проволоки до жидкой ванны расплавленного металла валика.

4.2 Разработка метода оперативного управления

Предлагаемый метод управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки, заключается в том, что электронно-лучевую наплавку ведут с непрерывной осцилляцией электронного луча, а управление положением проволоки осуществляют по вторичному излучению из технологической зоны [87]. Согласно первому варианту, непрерывную осцилляцию электронного луча ведут по траектории, имеющей пересечение с присадочной проволокой, путем подачи переменного тока определенной величины, формы и частоты в отклоняющей системе электронного луча. В процессе наплавки регистрируют сигнал вторичного излучения из зоны взаимодействия электронного луча с материалом изделия и присадочной проволокой. Сигнал вторичного излучения обрабатывают методом синхронного накопления и получают функцию, описывающую зависимость усредненных величин сигнала вторичного излучения от сдвига опорного сигнала, зависящего от тока в отклоняющей системе. Далее, по положению экстремума полученной функции определяют величину запаздывания функции относительно сигнала тока в отклоняющей системе электронного луча. Данная величина запаздывания функции характеризует положение присадочной проволоки относительно электронного луча. Для оперативного управления возможно оказывать воздействие на отклоняющую систему электронного луча и/или систему позиционирования присадочной проволоки и/или механизм перемещения изделия. При этом, величину, характеризующую запаздывание упомянутой функции, необходимо поддерживать на уровне, соответствующем требуемому положению присадочной проволоки относительно электронного луча.

В способе по первому варианту в процессе наплавки в качестве сигнала вторичного излучения можно использовать тормозное рентгеновское

излучение, или вторичные высокоэнергетичные электроны, или световую эмиссию из зоны взаимодействия электронного луча с материалом изделия и присадочной проволокой.

Согласно второму варианту осуществления оперативного управления, непрерывную осцилляцию электронного луча ведут по траектории, имеющей пересечение с присадочной проволокой, путем подачи переменного тока определенной величины, формы и частоты в отклоняющей системе электронного луча. В процессе наплавки регистрируют сигнал вторичного излучения из зоны взаимодействия электронного луча с материалом изделия и присадочной проволокой. Сигнал вторичного излучения обрабатывают методом синхронного детектирования, для этого перемножают значения сигналов вторичного излучения и сигнала переменной составляющей тока с отклоняющей системы, а результат умножения усредняют по времени. Получаемая величина характеризует отклонение присадочной проволоки от требуемого положения. Для оперативного управления возможно оказывать воздействие на отклоняющую систему электронного луча и/или систему позиционирования присадочной проволоки и/или механизм перемещения изделия. При этом, величину, определяющую отклонение присадочной проволоки, необходимо поддерживать на уровне, соответствующем требуемому положению присадочной проволоки относительно центра осцилляции электронного луча.

В способе, согласно второму варианту изобретения, в процессе наплавки в качестве сигнала вторичного излучения используют тормозное рентгеновское излучение, вторичные высокоэнергетичные электроны, или световую эмиссию из зоны взаимодействия электронного луча с материалом изделия и присадочной проволокой.

Результат оперативного управления обеспечивается за счет использования дополнительного информационного параметра в виде величины, определенной методом синхронного накопления, или величины, полученной

методом синхронного детектирования. Знак и значение указанных величин, зависят от отклонения присадочной проволоки в ту или иную сторону относительно центра осцилляции электронного луча. Благодаря использованию указанных дополнительных информационных параметров предлагаемый способ позволяет с высокой точностью осуществлять оперативный контроль и управление положением присадочной проволоки относительно электронного луча без прерываний процесса наплавки или использования дорогостоящей системы видеонаблюдения. Применяемая при этом непрерывная осцилляция электронного луча может дополнительно улучшать качество формирования наплавляемого слоя.

Для проверки разработанных методов контроля и управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки проволокой и для составления рекомендаций по конструированию системы, реализующей разработанные методы был проведен ряд натурных экспериментов, описанных в разделе 2.3.

На рисунке 4.4 показан внешний вид технологической зоны установки для осуществления натурных экспериментов. Схема системы, осуществляющей предлагаемый способ электронно-лучевой наплавки с оперативным контролем и управлением положением присадочной проволоки представлен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.4. Фотография технологической зоны экспериментальной установки для проведения натурных экспериментов.

В установке для электронно-лучевой наплавки в процессе наплавки проволоки 4 на изделие 3 осуществляют непрерывную осцилляцию электронного луча 2 по кольцевой траектории, путем введения в ток отклоняющих катушек 5 синусоидальных колебаний посредством блока управления 9 токами $I_{\text{откл}}$ отклоняющих катушек 5. Рекомендуемая частота осцилляции от 50 Гц и более. Осцилляция электронного луча 2 с меньшей частотой оказывает сильное гидродинамическое воздействие на расплавленный металл, что может снизить качество наплавки. В процессе наплавки регистрируют вторичное излучение из технологической зоны, посредством датчика вторичного сигнала 6, и ток отклоняющих катушек 5.

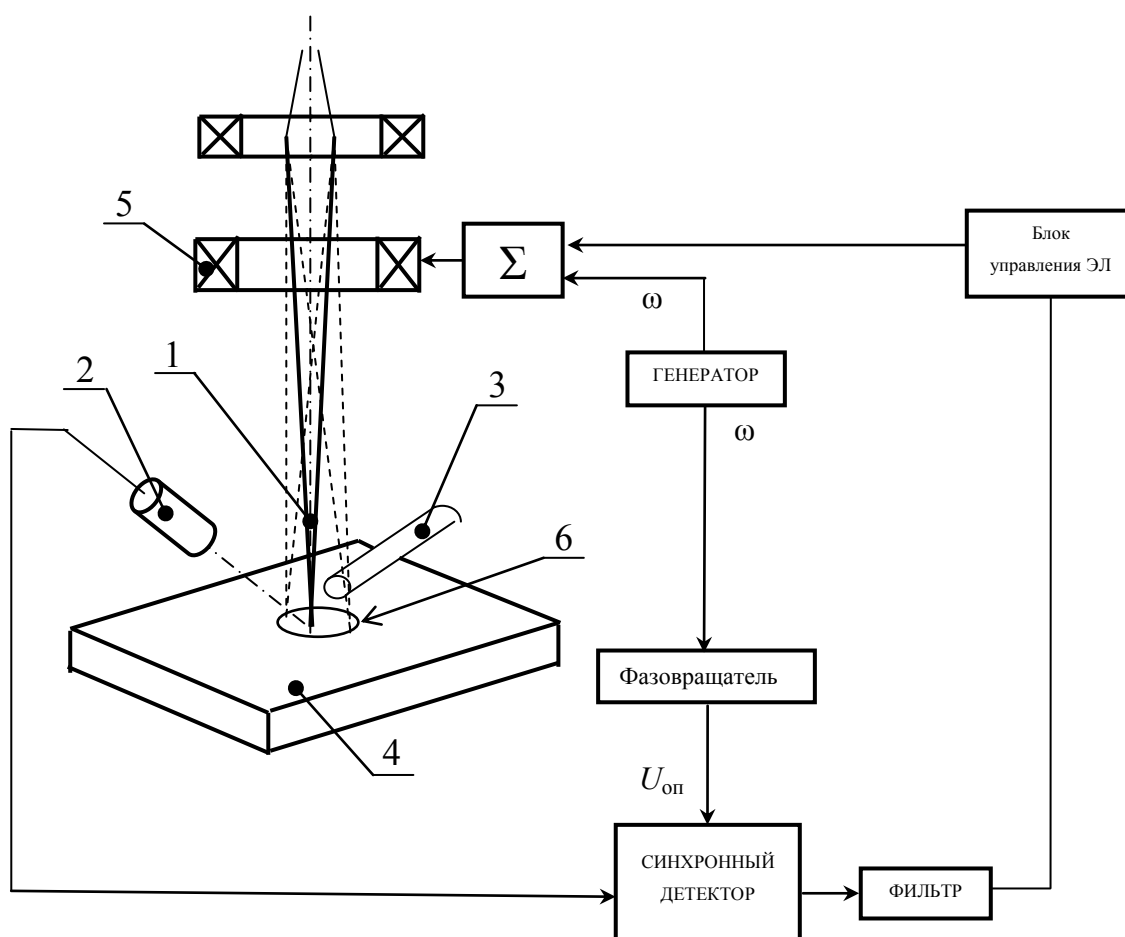


Рисунок 4.5. Схема экспериментальной установки для осуществления оперативного контроля: 1 – электронный луч; 2 – датчик рентгена; 3 – присадочная проволока; 4 – подложка; 5 – отклоняющие катушки; 6 – траектория осцилляции электронного луча.

В настоящем примере в качестве вторичного излучения использовалось тормозное рентгеновское излучение. Однако, это могут быть вторичные высокоэнергетичные электроны, или световая эмиссия, или другие вторичные сигналы из зоны взаимодействия электронного луча с материалом изделия и присадочной проволокой.

В качестве датчика тормозного рентгеновского излучения 6 был применен сцинтилляционный детектор на основе монокристалла активированного йодистого цезия и кремниевый фотоэлектронный умножитель. Описание датчика приведено в разделе 2.4.

В качестве датчика вторичных высокоэнергетичных электронов может быть использован электрод-коллектор, устанавливаемый над технологической зоной.

В качестве датчика световой эмиссии может быть использован фотодиодный датчик, устанавливаемый над технологической зоной.

Сигнал с датчика тормозного рентгеновского излучения 6 подвергают фильтрации и выпрямлению в блоке обработки 7. В этом же блоке 7, совместно с сигналами токов отклоняющих катушек $I_{\text{откл}}$, отфильтрованный и выпрямленный сигнал тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны обрабатывают методом синхронного накопления по первому варианту способа, или методом синхронного детектирования по второму варианту способа. Для удобства определения отклонения присадочной проволоки от требуемого положения систему отклонения электронного луча настраивают так, что одна из осей отклоняющей системы должна совпадать с осью присадочной проволоки. Или перед выполнением наплавки проводят тарировку системы для учета угла подачи присадочной проволоки.

В результате обработки сигнала рентгеновского излучения из технологической зоны методом синхронного накопления по первому варианту способа получают функцию $S(\tau)$ и величину $\Delta\tau_0$, определяющую отклонение экстремума функции $S(\tau)$ от сигнала тока $\text{Osc}(\tau)$ в отклоняющих катушках 5, то есть величину, характеризующую запаздывание функции $S(\tau)$ относительно сигнала тока в отклоняющих катушках 5 (рисунок 4.6).

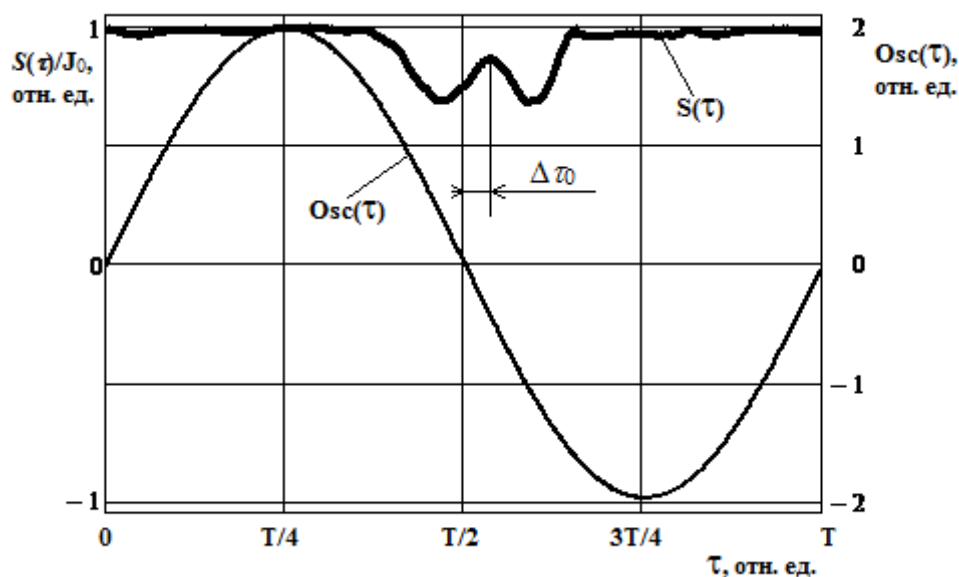


Рисунок 4.6. Результат обработки сигнала тормозного излучения методом синхронного накопления: $S(\tau)$ – обработанный сигнал; $Osc(\tau)$ – сигнал тока в отклоняющих катушках.

Величина $\Delta\tau_0$ зависит от положения присадочной проволоки 4 относительно центра осцилляции электронного луча 2 и принимает значения, равные нулю, при прохождении присадочной проволоки через центр осцилляции электронного луча (рисунок 4.7). На рисунке 4.6 представлен пример отклонения присадочной проволоки от требуемого положения на величину $\Delta\tau_0$. В месте пересечения электронного луча 2 с присадочной проволокой 4 присутствует экстремум функции $S(\tau)$, который указывает на реальное положение проволоки 4. Величину $\Delta\tau_0$ определяют по положению экстремума функции $S(\tau)$ относительно сигнала тока $Osc(\tau)$ в отклоняющей системе 5 электронного луча 2.

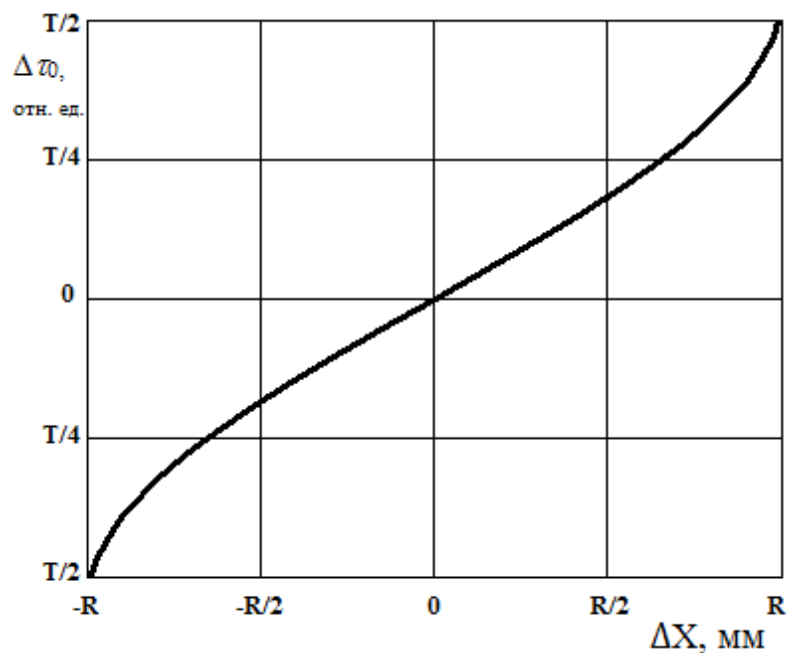


Рисунок 4.7. Зависимость величины $\Delta \tau_0$, характеризующей запаздывание функции $S(\tau)$, от положения присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки.

В результате обработки сигнала рентгеновского излучения из технологической зоны методом синхронного детектирования по второму варианту способа измеряют величину $b_{\text{дет}}$, характеризующую отклонение присадочной проволоки от требуемого положения. Данная величина зависит от положения присадочной проволоки 4 относительно центра осцилляции электронного луча 2 и принимает значения, равные нулю, при прохождении присадочной проволоки через центр осцилляции электронного луча (рисунок 4.8).

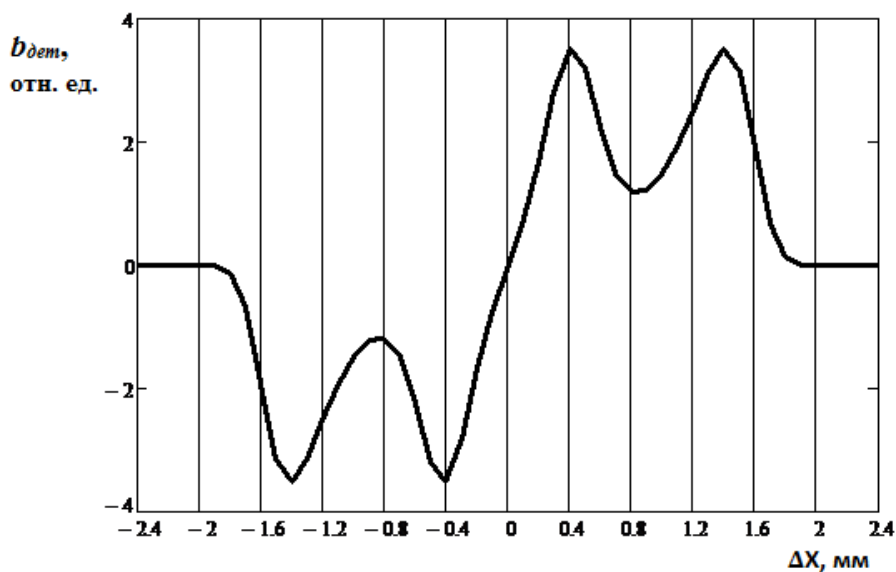


Рисунок 4.8. Зависимость результата синхронного детектирования от положения присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки.

Далее устройство управления 8 совместно с блоком управления 9 током отклоняющих катушек 5 осуществляет регулирование постоянной составляющей тока отклонения электронного луча 2, поддерживая величину $\Delta\tau_0$, или величину b на постоянном уровне, соответствующем требуемому положению присадочной проволоки относительно центра осцилляции электронного луча. В частности, поддержание указанных величин равными нулю обеспечивает прохождение подаваемой присадочной проволоки через центр осцилляции электронного луча. Для оперативного управления так же возможно оказывать воздействие на отклоняющую систему электронного луча одновременно или отдельно с системой позиционирования присадочной проволоки и механизмом перемещения изделия. Функция $S(\tau)$ и величина $\Delta\tau_0$, характеризующая запаздывание функции, и/или величина b_{det} , характеризующая отклонение присадочной проволоки от требуемого положения отображаются на устройстве визуализации 10.

Осцилляция электронного луча 2, согласно обоим вариантам способа, предпочтительно осуществлять по кольцевой траектории. Однако также могут

использоваться другие типы осцилляции: по двумерной и даже одномерной траекториям, имеющим пересечение с присадочной проволокой.

4.4 Разработка системы, обеспечивающей оперативный контроль и управление положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки

На рисунке 4.9 представлена структурная схема экспериментальной установки для осуществления оперативного управления с применением рентгеновского датчика и слежением за проволокой путем внесения постоянной составляющей в ток отклоняющей катушки.

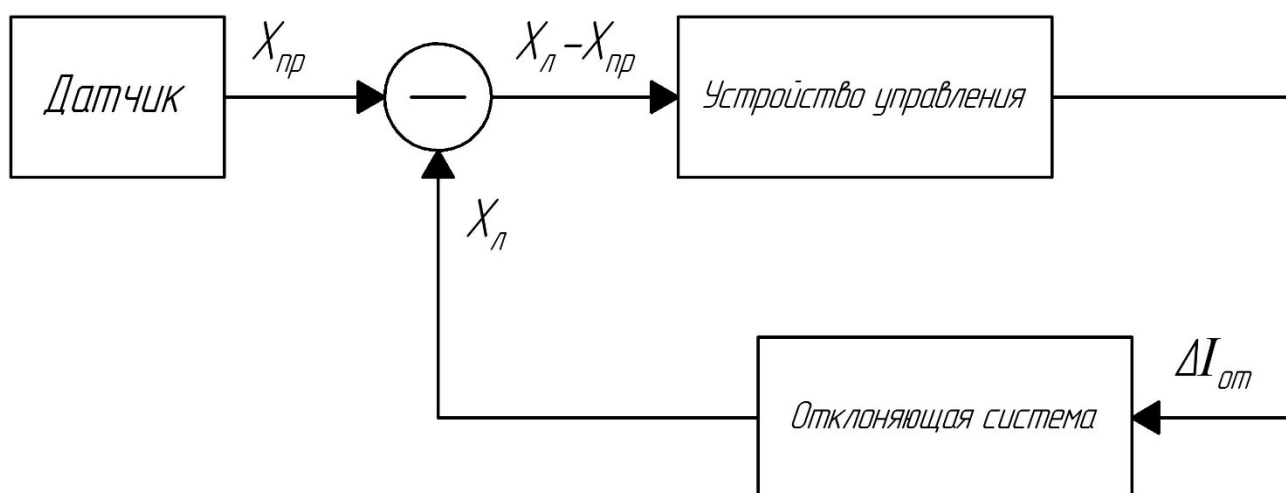


Рисунок 4.9. Структурная схема системы для осуществления оперативного управления положением присадочной проволоки относительно электронного луча: $X_{пр}$ – положение проволоки по оси X; $X_{л}$ – положение центра осцилляции электронного луча по оси X; $\Delta I_{от}$ – смещение тока отклоняющей катушки по оси X при котором присадочная проволока проходит через центр осцилляции электронного луча.

Для проверки работоспособности разработанного способа электронно-лучевой наплавки с оперативным контролем и управлением положением

присадочной проволоки были выполнены экспериментальные исследования по схеме проведения и режимам натурального эксперимента.

В процессе контроля положения присадочной проволоки измеряемый сигнал рентгеновского излучения из технологической зоны был подвергнут обработке в результате которой определялось мгновенное значение величины отклонения проволоки Δ по локальному максимуму функции $S(t)$. График изменения положения присадочной проволоки во времени представлен на рисунке 4.11. Из множества колебаний графика отклонения присадочной проволоки выбран участок с наибольшей скоростью изменения отклонения присадочной проволоки и представлен на рисунке 4.12.

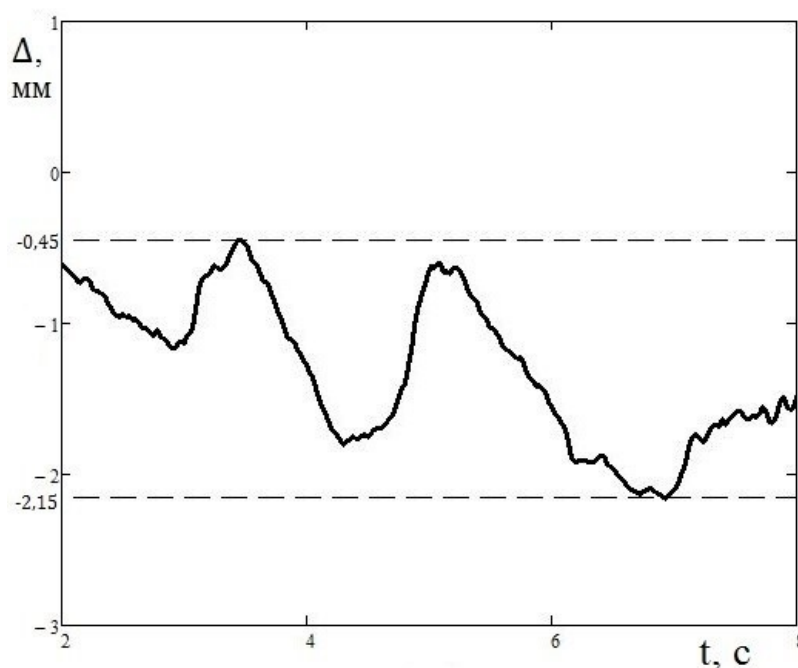


Рисунок 4.11. График изменения положения присадочной проволоки во времени.

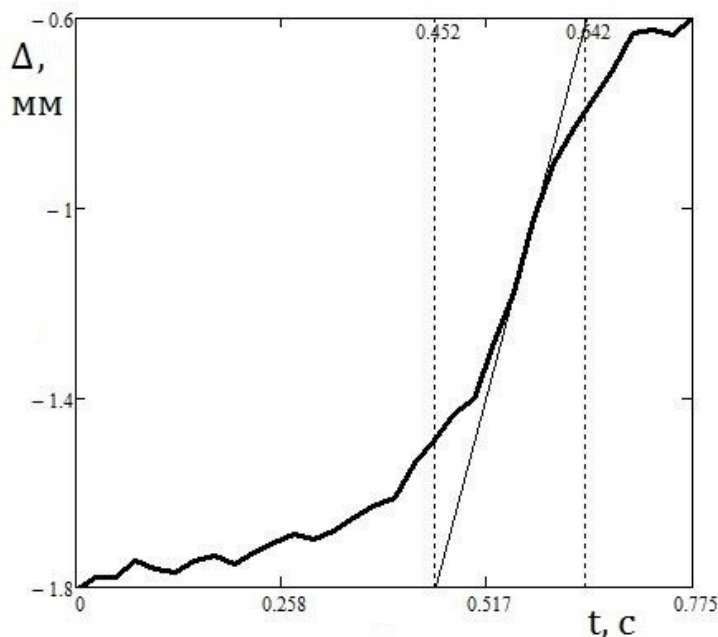


Рисунок 4.12. Фрагмент графика изменения положения присадочной проволоки во времени с максимальной зафиксированной скоростью изменения положения присадочной проволоки.

Параметры ПИД-регулятора были определены практически для обеспечения работы системы без перерегулирования: коэффициент пропорциональности $K_p=0,33$; постоянная интегрирования $T_I=1,08$; постоянная дифференцирования $T_D=0,19$.

На рисунке 4.13 представлен образец электронно-лучевой наплавки проволокой диаметром 1,2 мм из технического титана ВТ1-0 на подложку толщиной 6 мм из титанового сплава ВТ20. Наплавленный образец имеет форму цилиндра, при этом сначала была выполнена многослойная наплавка общей высотой 40 мм с оперативным контролем положения присадочной проволоки на основе разработанного способа. Далее система переводилась в режим оперативного управления и поверх существующих наплавленных слоев производилась многослойная наплавка до достижения общей высоты наплавки 80 мм.

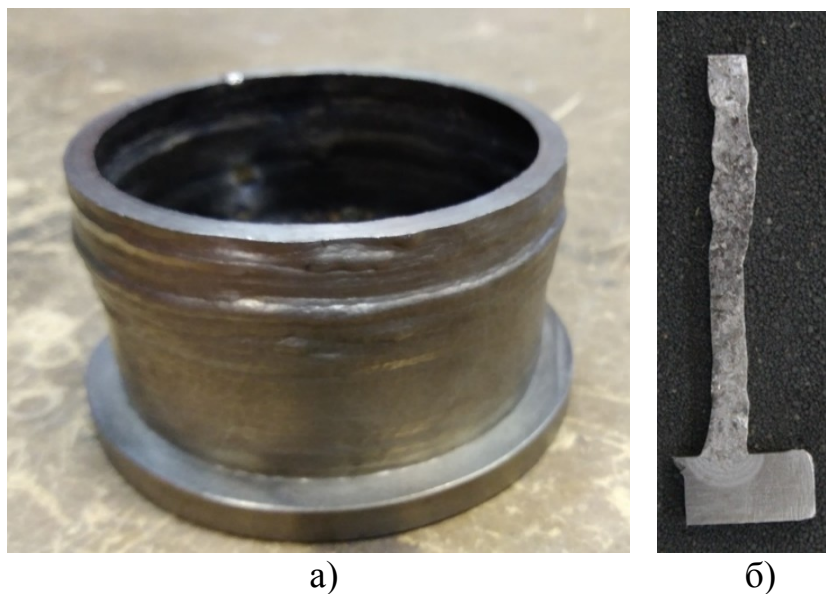


Рисунок 4.13. Результат электронно-лучевой наплавки проволокой ВТ1-0 на подложку из ВТ20: а – внешний вид; б – поперечный шлиф.

На рисунке 4.14 представлены отдельно друг от друга части наплавки с оперативным контролем положения присадочной проволоки и с оперативным управлением положением присадочной проволоки.

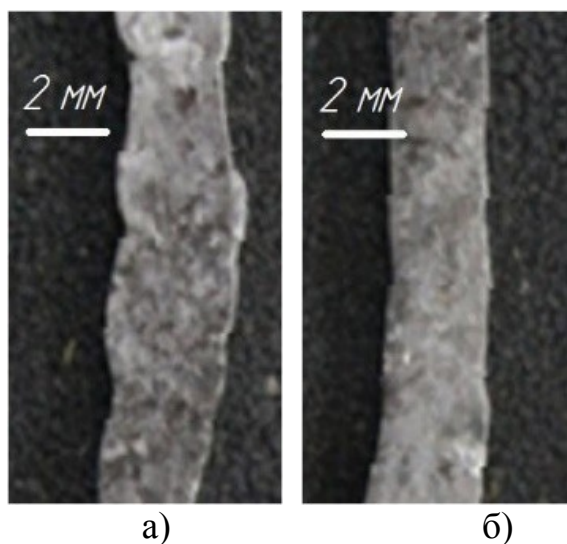


Рисунок 4.14. Поперечное сечение участков наплавленного образца из технического титана: а – наплавка с оперативным контролем положения присадочной проволоки. б – наплавка с оперативным управлением положением присадочной проволоки.

Анализ фрагмента поперечного шлифа (рисунок 4.14а) наплавленного образца с участка, выполненного с оперативным контролем положения присадочной проволоки, показал следующее:

- Минимальная ширина наплавки 3,0 мм;
- Максимальная ширина наплавки 4,3 мм;
- Средняя арифметическая ширина наплавки 3,7 мм;
- Максимальное отклонение ширины наплавки от среднего значения 19%;
- Максимальное смещение наплавленных слоев от их среднего положения 0,43 мм в одну сторону и 0,85 мм в другую сторону;

По результатам измерений по фрагменту поперечного шлифа (рисунок 4.14б) наплавленного образца с участка, выполненного с оперативным управлением положением присадочной проволоки, получены следующие данные:

- Минимальная ширина наплавки 3,2 мм;
- Максимальная ширина наплавки 3,9 мм;
- Средняя арифметическая ширина наплавки 3,4 мм;
- Максимальное отклонение ширины наплавленных слоев от среднего значения 15%;
- Максимальное смещение наплавленных слоев от их среднего положения 0,16 мм в одну сторону и 0,43 мм в другую сторону;

Сравнение данных измерения геометрических характеристик поперечных сечений участков, представленных на рисунке 4.14 показало, что, на участке с оперативным управлением положением присадочной проволоки колебания ширины валика меньше на величину порядка 45%, а смещения наплавляемых валиков относительно друг друга меньше на величину порядка 55% по сравнению с участком с оперативным контролем положения присадочной проволоки.

На рисунке 4.15 представлены поперечные сечения участков выполненных электронно-лучевой наплавкой проволокой из аустенитной

хромо-никелевой стали 308L с оперативным контролем положения присадочной проволоки и с оперативным управлением положением присадочной проволоки.

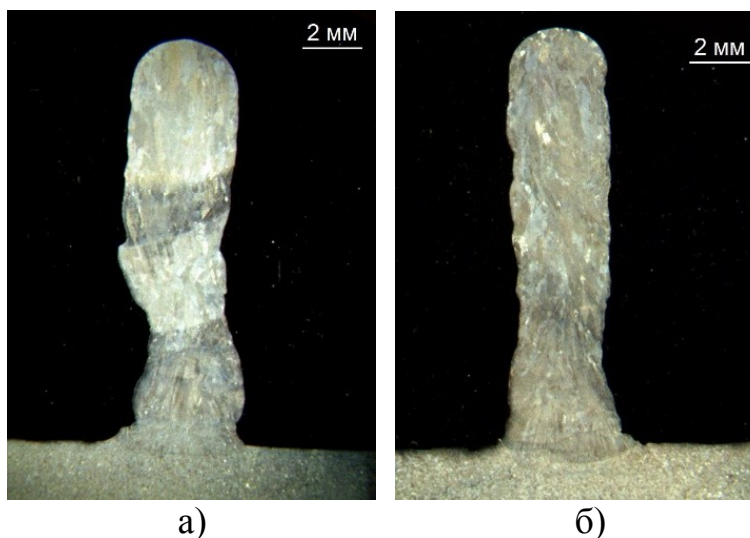


Рисунок 4.15. Поперечные сечения наплавленных образцов из аустенитной хромо-никелевой стали: а – наплавка с оперативным контролем положения присадочной проволоки. б – наплавка с оперативным управлением положением присадочной проволоки.

Анализ фрагмента поперечного шлифа (рисунок 4.15а) наплавленного образца с участка, выполненного с оперативным контролем положения присадочной проволоки, показал следующее:

- Минимальная ширина наплавки 2,7 мм;
- Максимальная ширина наплавки 3,8 мм;
- Средняя арифметическая ширина наплавки 3,4 мм;
- Максимальное отклонение ширины наплавки от среднего значения 21%;
- Максимальное смещение наплавленных слоев от их среднего положения 0,52 мм в одну сторону и 0,37 мм в другую сторону;

По результатам измерений по фрагменту поперечного шлифа (рисунок 4.15б) наплавленного образца с участка, выполненного с оперативным

управлением положением присадочной проволоки, получены следующие данные:

- Минимальная ширина наплавки 2,8 мм;
- Максимальная ширина наплавки 3,9 мм;
- Средняя арифметическая ширина наплавки 3,3 мм;
- Максимальное отклонение ширины наплавленных слоев от среднего значения 18%;
- Максимальное смещение наплавленных слоев от их среднего положения 0,14 мм в одну сторону и 0,21 мм в другую сторону;

Сравнение данных измерения геометрических характеристик поперечных сечений участков, представленных на рисунке 4.15 показало, что, на участке с оперативным управлением положением присадочной проволоки колебания ширины валика меньше на величину порядка 15%, а смещения наплавливаемых валиков относительно друг друга меньше на величину порядка 40% по сравнению с участком с оперативным контролем положения присадочной проволоки.

Выполненный анализ геометрических характеристик поперечных сечений, приведенных на рисунках 4.14 и 4.15, участков наплавленных стенок показал, что применение разработанного способа оперативного управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки позволяет повысить стабильность качества наплавливаемых участков на величину до 50% за счет уменьшения колебания ширины наплавливаемых слоев и смещения их относительно друг друга.

Выводы

- Представлен метод определения положения присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки и его визуального отображения.

- Разработан способ электронно-лучевой наплавки с оперативным контролем и управлением положением присадочной проволоки.
- Разработана экспериментальная установка электронно-лучевой наплавки с осуществлением оперативного управления положением присадочной проволоки по параметрам рентгеновского излучения из технологической зоны.
- Выполнено исследование и настройка работы системы, выполняющей оперативное управление положением присадочной проволоки в процессе многослойной электронно-лучевой наплавки.
- Выполнен анализ результатов работы системы, выполняющей оперативное управление положением присадочной проволокой в процессе электронно-лучевой наплавки. Показано, что применение разработанного способа оперативного управления позволяет повысить стабильность качества наплавляемых участков на величину до 50% за счет уменьшения колебания ширины наплавляемых слоев и смещения их относительно друг друга.

Основные результаты и выводы работы

1. Показана целесообразность использования тормозного рентгеновского излучения в качестве сигнала обратной связи и применения непрерывной осцилляции электронного луча в процессе оперативного управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки.

2. Построена математическая модель формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе взаимодействия электронного луча с присадочной проволокой и подложкой при электронно-лучевой наплавке. Математическая модель устанавливает закономерность изменения сигнала тормозного рентгеновского излучения от технологических параметров, таких как: параметры осцилляции луча; ускоряющее напряжение; тока луча; диаметра луча в пятне взаимодействия; диаметра проволоки; материалы подложки и проволоки, смещение проволоки от центра осцилляции луча.

3. Исследованы закономерности сигнала тормозного рентгеновского в зависимости от параметров осцилляции электронного луча и диаметра присадочной проволоки, режима фокусировки электронного луча, положения присадочной проволоки относительно электронного луча. Показано, что зависимость значения сигнала, обработанного методом синхронного детектирования, от значения отклонения проволоки относительно центра осцилляции электронного луча имеет линейный характер на участке, границы которого были определены. Установлено, что при изменении амплитуды осцилляции характер этой зависимости меняет знак при равенстве амплитуды осцилляции радиусу проволоки.

4. Разработан способ электронно-лучевой наплавки с оперативным управлением положением присадочной проволоки по сигналу тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны. Способ исключает вынужденные прерывания процесса вследствие выхода присадочной проволоки из-под воздействия электронного луча. И повышает воспроизводимость

качества наплавки на величину до 50% за счёт уменьшения колебания ширины наплавленных слоев и их смещения относительно друг друга.

Литература

1. А. с. 1061345 СССР, МКИ В 23 К 15/00. Устройство для измерения диаметра электронного луча при ЭЛС / М. Н. Баранов, В. Н. Иосилович, А. А. Каплан, В. М. Кордун.
2. А. с. 1091439 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ измерения диаметра сварочного луча / А. А. Каплан, М. Н. Баранов, В. М. Кордун.
3. А. с. 1091440 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ измерения диаметра сварочного электронного луча / А. А. Каплан и др.
4. А. с. 1272593 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ контроля степени фокусировки при ЭЛС / К. С. Акопьянц и др.
5. А. с. 1349122 СССР, МКИ В 23К 15/00. Способ контроля степени фокусировки электронного луча / К. С. Акопьянц и др.
6. А. с. 1383633 СССР, МКИ В 23К 15/00. Устройство для контроля симметричности распределения тока в электронном луче / В. П. Разин, Н. С. Левик, В. В. Соколов, В. С. Павменов.
7. А.с. 1004047 СССР, МПК7 В 23К 15/00. Устройство для слежения за линией стыка при ЭЛС / Пастушенко Ю.Н., Коваль А.Б., Куцан Ю.Г. Оpubл. 15.03.1983, Бюл. № 10. 2 с.
8. А.с. 1052355 СССР, МПК7 В 23К 15/00. Способ слежения за линией стыка при ЭЛС / Пастушенко Ю.Н., Назаренко О.К., Локшин В.Е., Шоповал В.И. Оpubл. 07.11.1983, Бюл. № 41. 2 с.
9. А.с. 1103431 СССР, МПК7 В 23К 15/00. Установка для ЭЛС с устройством для видеоконтроля / Пахомов Ю.Г. Оpubл. 23.07.1984, Бюл. № 27. 4 с.
10. Автоматизированная система для задания координат шва в установках электронно-лучевой сварки / Купер Э.А., Логачев П.В., Репков В.В., Селиванов А.Н., Селиванов П.А., Семенов Ю.И., Трибендис А.Г., Федотов М.Г., Чертовских А.Г. // Автометрия. 2015. Т. 51, № 1. С. 55-61.
11. Автоматическое позиционирование по стыку соединения при электронно-лучевой сварке в условиях действия магнитных помех / Дружинина А.А.,

Лаптенко В.Д., Лаптенко П.В., Мурыгин А.В. // Сибирский журнал науки и технологий. 2016. № 2. С 475-483.

12. Агафонов, К.А. Электронно-лучевая сварка в узкощелевую разделку с присадкой проволочного материала / К.А. Агафонов, С.В. Варушкин // Химия. Экология. Урбанистика. – 2019. – Т. 2. – С. 479-482.

13. Акцепт. заявка 2937646 ФРГ, МПК7 В 23К 15/00. Способ и устройство слежения электронного луча при электронно-лучевой сварке / П. Ритц, Б. Шпис. Заявл. 18.09.79.

14. Андреев А.Н., Папуша А.Г. Система слежения за стыком при ЭЛС с использованием отраженных (вторичных) электронов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. Т. 1, № 13. С. 384-386.

15. Балакирев Е.Н., Майоров Л.Н., Лившиц М.Л. Устройство для получения изображения с помощью вторичных электронов из зоны электронно-лучевой сварки // Сварочное производство. 1979. № 6. С. 73-78.

16. Бая Е.Н., Киселевский Ф.Н., Назаренко О.К. Анализ сигналов датчиков вторичной эмиссии, применяемых в системах автоматического направления электронного пучка по стыку // Автоматическая сварка. 1973. №3.

17. Башенко В.В., Мауер К.О., Миткевич Е.А. Использование отраженных электронов для контроля установки луча на стук и параметров стыка при электронно-лучевой сварке // Труды ЛПИ. 1974. № 336. С. 97-100.

18. Браверман В.Я., Белозерцев В.С. Анализ зависимости рентгеновского излучения от положения канала проплавления относительно стыка при электронно-лучевой сварке // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2010. № 1 (27). С. 131-134.

19. Браверман В.Я., Белозерцев В.С. Устройство для слежения за стыком свариваемых деталей с датчиком магнитного поля // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2008. № 3 (20). С. 106-108.

20. Браверман В.Я., Белозерцев В.С., Розанов О.В. Экспериментальные исследования зависимости рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка при электронно-лучевой сварке // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2009. № 1-2. С. 97-99.
21. Браверман В.Я., Белозерцев В.С., Успенский А.Н. Экспериментальные исследования рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке // Вестник Сибирского аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2005. №.2 С. 196-200.
22. Браверман В.Я., Вейсвер Т.Г., Белозерцев В.С. Слежение за стыком при электронно-лучевой сварке в атмосфере // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2014. № 1 (53). С. 142-147.
23. Браверман В.Я., Кучаева Д.Г. Наблюдение канала проплавления в рентгеновском спектре при электронно-лучевой сварке // Решетневские чтения. 2016. Т. 1, № 20. С. 18-20.
24. Браверман, В.Я. Анализ зависимости вторично-эмиссионного тока и рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка при электронно-лучевой сварке // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 2-3. С. 853-857.
25. Браверман, В.Я. Наблюдение канала проплавления в рентгеновском спектре при электронно-лучевой сварке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2016. Т. 18, № 4. С. 147-156.
26. Браверман, В.Я. Тормозное рентгеновское излучение при электронно-лучевой сварке и его взаимосвязь с параметрами процесса // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2008. № 3 (20). С. 117-121.

27. Браверман, В.Я. Управление формированием сварного шва при ЭЛС по рентгеновскому излучению из зоны сварки. Диссертация доктора технических наук. 05.03.06 – Технологии и машины сварочного производства. Красноярск, 2002. – 318 с.
28. Варушкин С.В., Беленький В.Я., Трушников Д.Н. Применение экранированного коллектора для контроля режима сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 158.
29. Варушкин С.В., Трушников Д.Н., Беленький В.Я. Модель формирования сигнала для контроля сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 6-2. С. 244-252.
30. Варушкин С.В., Трушников Д.Н., Беленький В.Я. Тормозное рентгеновское излучение при электронно-лучевой наплавке цельнометаллической проволокой // Сварка и диагностика на транспорте: сборник материалов докладов форума (14-16 ноября 2017, г. Екатеринбург). Екатеринбург, 2017. С. 74-75.
31. Варушкин С.В., Трушников Д.Н., Шамов Д.С. Использование тормозного рентгеновского излучения для наблюдения капельного переноса металла в процессе электронно-лучевой наплавки сплошной проволокой // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2018). Сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Под редакцией А.Н. Яковлева. 2018. С. 181-182.
32. Взаимосвязь параметров вторичного тока разряда в плазме с фокусировкой пучка при ЭЛС / Портнов Н.С., Косьянов А.В., Варушкин С.В., Абдуллин А.А. // Master's Journal. 2013. № 1. С. 29-36.
33. Гуденко А.В., Драгунов В.К., Слива А.П. Методика определения режимов послойной электронно-лучевой наплавки проволоки для аддитивных

- технологий // Вестник Московского энергетического института. 2017. № 5. С. 8-14.
34. Датчик технического зрения FQ. Проще, чем можно представить / Omron [Электронный документ]. – Режим доступа: http://www.proenergo.ru/doc_pdf/vision/FQ+Brochure+rus.pdf.
35. Датчик технического зрения FQ. Руководство по эксплуатации/ Omron [Электронный документ]. – Режим доступа: http://www.proenergo.ru/doc_pdf/vision/FQ+ShortManual.pdf.
36. Децик В. Н., Децик Н. Н., Нестеренко В. М. Проблемы борьбы с остаточной намагниченностью при ЭЛС ротора газового нагревателя // Электронно-лучевая сварка. М. : МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1986. С. 107–110.
37. Драгунов В. К., Гончаров А. Л., Слива А. П. Пространственные параметры электронного пучка при взаимодействии с намагниченной мишенью // Сварочное производство. 2008. № 12. С. 20–24.
38. Дружинина А.А., Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В. Повышение точности позиционирования по стыку соединения деталей с остаточной намагниченностью при электронно-лучевой сварке // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2014. № 5 (57). С. 168-173.
39. Евтифеева Е. С., Кабардина Х. А. Методы экспериментального исследования электронных пучков // Вопросы электротехники. Сер. I. Электроника. 1961. Вып. 8.
40. Зависимость вторично-эмиссионного сигнала от удельной мощности при ЭЛС с большой мощностью с осцилляцией луча / Портнов Н.С., Зыков В.В., Варушкин С.В., Трушников Д.Н. // Master's Journal. 2012. № 1. С. 30-39.
41. Зуев И. В., Углов А. А. Об измерении диаметра электронного луча методом вращающегося зонда // Физика и химия обработки материалов. 1967. № 5. С. 110 -112.

42. Использование тормозного рентгеновского излучения для позиционирования присадочной проволоки при электронно-лучевой наплавке / Д.С. Шамов, С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, Е.Г. Колева // Химия. Экология. Урбанистика. – 2019. – Т. 2. – С. 567-571.
43. Исследование влияния формы сигнала в отклоняющей системе электронной пушки при сварке с продольной осцилляцией электронного пучка на геометрию сварного шва / А.А. Кылосов, В.Я. Беленький, С.В. Варушкин, Н.А. Зырянов // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2016). Сборник трудов 3-ей Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении –ИТММ-2016» – 2016. – С. 83-87.
44. Комбинированный датчик: а. с. 478698 СССР № 1903209/25-27 / Лаптенко В.Д., Сорокин В.А.; заявл. 02.04.73; опубл. 30.07.75, Бюл. 28. 3 с.
45. Комбинированный датчик: а. с. 499069 СССР № 1990481/25-27 / Лаптенко В.Д., Сорокин В.А.; заявл. 28.01.74; опубл. 15.01.76, Бюл. 2. 3 с.
46. Комбинированный датчик: а. с. 499070 СССР № 1993310/25-27 / Лаптенко В.Д., Сорокин В.А., Белозерцев В.С.; заявл. 04.02.74; опубл. 15.01.76, Бюл. 2. 3 с.
47. Комбинированный датчик: а. с. 607680 СССР № 2359097/25-27 / Лаптенко В.Д., Белозерцев В.С., Сорокин В.А., Браверман В.Я.; заявл. 12.05.76; опубл. 25.05.78, Бюл. 19. 2 с.
48. Комбинированный датчик: а. с. 715250 СССР № 2551611/25-27 / Лаптенко В.Д., Сорокин В.А., Сохань Ю.А.; заявл. 08.12.77; опубл. 15.02.80, Бюл. 6. 3 с.
49. Комбинированный датчик: а. с. 774847 СССР № 2719700/25-27 / Лаптенко В.Д., Белозерцев В.С., Сорокин В.А., Сохань Ю.А., Браверман В.Я.; заявл. 31.01.79; опубл. 30.10.80, Бюл. 40. 2 с.
50. Контроль параметров процесса электронно-лучевой наплавки с использованием сигналов токов проволоки и изделия / Щербаков А.В.,

Мартынов В.Н., Харитонов И.А., Гапонова Д.А., Родякина Р.В., Драгунов В.К.
// Электротехника. 2018. № 4. С. 37-42.

51. Кривенков В.А., Кроз А.Г., Рыжков Ф.Н. Помехи в выходном сигнале датчика сканирующих вторично-электронных измерителей отклонения луча от стыка // Сварка электронным лучом: материалы конф. М.: МДНТП. 1974. С. 92-98.

52. Кроз А.Г. Влияние полосы пропускания входных устройств следящей системы на точность слежения при ЭЛС // Прогрессивная технология в сварочном производстве: сборник трудов кафедры Технологий металлов (выпуск 4). Воронеж. 1972. С. 32-35.

53. Лившиц М.Л., Виноградов В.А. Использование автоматической телевизионной системы слежения при ЭЛС в серийном производстве // Вопросы атомной науки и техники, сварочное производство. 1981. Вып. 2. С. 86-89.

54. Литвинов В.В., Ярмилко А.В. Многопараметрическое адаптивное управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки // Математические машины и системы. 2013. № 2. С. 130-138.

55. Локшин Ю. Н. Точность экспериментальной оценки распределения плотности тока по сечению электронного луча // Автоматическая сварка. 1984. № 4. С. 69-70.

56. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2 томах, т. 1. Основные принципы и классические методы / Ж. Макс, Ж.-К. Карре, Ф. Пельтье. Пер. с франц. А.Ф. Горюнова и А.В. Крянева; под ред. Н.Г. Волкова. – М.: Мир, 1983. – 312 с.

57. Метод контроля влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке по рентгеновскому излучению из зоны обработки / Дружинина А.А., Лаптенков В.Д., Мурыгин А.В., Серегин Ю.Н. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2012. № 5 (45). С. 158-163.

58. Многослойная электронно-лучевая наплавка проволочным материалом / С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, Е.С. Саломатова, В.Я. Беленький, Г.Л. Пермяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2019. Т. 21, № 4. С. 89-94.
59. Москалев В. А., Шустаков В. Г. Контроль и измерение параметров пучков зараженных частиц. М.: Атомиздат, 1973.
60. Назаренко О. К., Локшин В. Е., Акопянц К. С. Измерение параметров мощных электронных пучков методом вращающегося зонда // Электронная обработка материалов. 1970. № 1. С. 87-90.
61. Орешенко Т.Г., Морозов М.Ю. Автоматизация управления электронно-лучевой сваркой разнородных металлов // Решетневские чтения. 2014. Т. 1, № 18. С. 424-425.
62. Орлова И.В., Григорович Д.Б., Галкина Л.А. Эконометрика: обучающий компьютерный практикум. – М.: Прометей, 2018. – 94 с.
63. Особенности сигнала тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного луча / Варушкин С.В., Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Пермяков Г.Л. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2016. Т. 18, № 3. С. 93-106.
64. Осцилляция луча при электронно-лучевой сварке как инструмент снижения пикообразования в корне шва / Н.А. Зырянов, В.Я. Беленький, С.В. Варушкин, А.А. Кылосов // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2016). Сборник трудов 3-ей Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении –ИТММ-2016» – 2016. – С. 69-71.
65. Осцилляция электронного луча как средство улучшения формирования корня сварного шва и облегчения контроля сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке / Варушкин С.В., Беленький В.Я., Зырянов Н.А.,

Кылосов А.А. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2017. Т. 19, № 2. С. 151-159.

66. Оценка температуры в канале проплавления при электронно-лучевой сварке разнородных материалов / Саломатова Е.С., Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Варушкин С.В. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С. 81.

67. Пат. 2139191 Франции, МПК7 В 23К 15/00. Способ и устройство для телевизионного наблюдения свариваемой заготовки при операции электронно-лучевой сварки. Оpubл. 05.01.73.

68. Пат. 2360829 ФРГ, МКИ В 23К 15/00. Способ и устройство для измерения диаметра фокального пятна на обрабатываемой детали при использовании электронно-лучевой сварочной установки / Н. В. Подола, А. П. Облонский, Е. Л. Цоколь. Оpubл. 27.04.78.

69. Пат. 4243866 США, МКИ В 23К 15/00. Способ получения электронного луча изменяемого диаметра и устройство для его осуществления/ Н. Армонт.

70. Полянский П. В. «Электроника БК-0010» в системах исследования объектов с распределенными параметрами // Микропроцессорные средства и системы. 1989. № 3. С. 58-60.

71. Попельнюхова Е.С., Лаптенко В.Д. Метод синхронного детектирования для получения информации о положении стыка в системе слежения при электронно-лучевой сварке // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 1, № 10. С. 341-342.

72. Рентгеновские лучи / Пер. с нем. и англ.; Под ред. М. А. Блохина. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.

73. Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А. Основы электроннолучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. С. 17-25.

74. Рылов А.Е. Способы устранения влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке // Аллея науки. 2018. Т. 6, № 6 (22). С. 563-568.

75. Семейкина Е.В., Юрин Д.В. Многомасштабная оценка локальной кривизны границ на цветных изображениях // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2011. Т. 1, № 4. С. 183-187.
76. Сивков А.А., Варушкин С.В., Метелев А.В. Контроль процесса лазерной сварки со сквозным проплавлением металла // Master's Journal. 2015. № 1. С. 13-15.
77. Система автоматической ориентации сварочной головки относительно стыка / В.Д. Лаптенко, В.А. Сорокин, В.С. Белозерцев, В.М. Щербаков // Сварочное производство. 1976. № 3. С. 31-33.
78. Система видеонаблюдения за процессом электронно-лучевой сварки / Бочаров А.Н., Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Серегин Ю.Н., Тынченко В.С. // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6, № 4. С. 870-872.
79. Система видеонаблюдения за процессом электронно-лучевой сварки / А.Н. Бочаров, С.В. Котельникова, Ю.Н. Серегин, В.Д. Лаптенко, В.А. Колмыков, Н.В. Успенский // Технологии и оборудование ЭЛС-2008: материалы первой Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции (19-22 мая 2008, г. Санкт-Петербург). С-Пб., 2008. С. 16-138.
80. Система видеонаблюдения за процессом электронно-лучевой сварки / Бочаров А.Н., Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Серегин Ю.Н., Тынченко В.С. // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2016. Т. 6, № 4. С. 870-872.
81. Ситников, И.В. Исследование влияния фокусировки и осцилляции электронного луча на структуру и свойства сварных швов / И.В. Ситников, В.Я. Беленький, С.В. Варушкин // наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 9 частях. Под редакцией Гадюкиной А.В.. – 2018. – С. 408-414.
82. Сканирующая система телевизионного наблюдения для сварочных электронно-лучевых установок / Георгиев Ч., Праматоров Т., Иванов Д.,

Гаранчева С. // Труды международной конференции по электронно-лучевым технологиям. Варна. 1985. С. 306

83. Способ автоматического слежения за стыком при электронно-лучевой сварке: а. с. 804291 СССР № 2726396/25-27 / Гольдфарб Л.Н., Куцаев Н.А.; заявл. 26.12.78; опубл. 15.02.81, Бюл. 6. 2 с.

84. Способ защиты элементов оптических систем от напыления при электронно-лучевой сварке: пат. 2391190 Рос. Федерация № 2008109684/02 / Колмыков В.А., Успенский Н.В., Лаптенков В.Д., Серегин Ю.Н., Бочаров А.Н., Котельникова С.В.; заявл. 11.03.08; опубл. 20.06.10, Бюл. № 26. 5 с.

85. Способ измерения геометрических параметров технологического электронного луча: а. с. 534326 СССР № 2158263/27 / Резниченко В.Ф., Углов А.А., Чесанов Д.М.; заявл. 18.07.75; опубл. 05.11.76, Бюл. 41. 3 с.

86. Способ контроля отклонения стыка при электронно-лучевой сварке: а. с. 1326414 СССР № 3809544/25-27 / Кроз А.Г., Фатеева А.П., Кривенков В.А., Бдуленко А.П., Куцаев И.А.; заявл. 11.11.84; опубл. 30.07.87, Бюл. 28. 4 с.

87. Способ электронно-лучевой наплавки с контролем положения присадочной проволоки относительно электронного луча (варианты): пат. 2704682 Рос. Федерация. № 2018145458 / Трушников Д.Н., Варушкин С.В.; заявл. 20.12.18; опубл. 30.10.19, Бюл. 31. 17 с.

88. Способ электронно-лучевой сварки: пат. 2494846 Рос. Федерация. № 2012101077/02 / Трушников Д.Н., Кротова Е.Л., Беленький В.Я., Варушкин С.В.; заявл. 11.01.12; опубл. 10.10.13, Бюл. 28. 12 с.

89. Трушников Д.Н. Модели, методы и алгоритмы для автоматизации процесса электронно-лучевой сварки по параметрам сигналов вторичных токов в плазме. Диссертация доктора технических наук. 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности). Пермь, 2015. – 364 с.

90. Управление электронно-лучевой сваркой / Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Серегин Ю.Н., Браверман В.Я. // Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 2000. 234 с.
91. Установка для электронно-лучевой сварки: пат. 2510744 Рос. Федерация. № 2012147969/02 / Бойко П.И., Исаев А.А., Степушина В.И., Ермаков В.А.; заявл. 12.11.12; опубл. 10.11.14, Бюл. 10. 8 с.
92. Установка электронно-лучевого выращивания металлических изделий / Бакеев И.Ю., Бурачевский Ю.А., Бурдовицин В.А., Осипов И.В., Рау А.Г., Семенов Г.В. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 3. С. 76-78.
93. Устройство слежения за стыком свариваемых деталей: а. с. 810408 СССР № 2713224/25-27 / Лаптенко В.Д., Белозерцев В.С., Сорокин В.А., Фомин В.М., Сохань Ю.А., Браверман В.Я.; заявл. 15.01.79; опубл. 07.03.81, Бюл. 9. 4 с.
94. Феррозондовый датчик положения сварочной головки относительно стыка: а. с. 941056 СССР № 2945346/25-27 / Лаптенко В.Д., Белозерцев В.С., Сорокин В.А., Сохань Ю.А., Браверман В.Я., Щербаков В.М., Дьяков В.В.; заявл. 25.06.80; опубл. 07.07.82, Бюл. 25. 4 с.
95. Фролов И.С. Погрешность позиционирования луча по стыку при электронно-лучевой сварке разнородных материалов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 1, № 12. С. 466-468.
96. Хараджа Ф. Н. Общий курс рентгенотехники. / Ф.Н. Хараджа. – М.: Энергия, 1966. 368 с.
97. Шаповалов Є.В. Засоби технічного зору як елемент зворотного зв'язку в системах стеження дугового зварювання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.07 «Автоматизація технологічних процесів» / Є.В. Шаповалов. – К., 2006. 22 с.
98. Электричество и магнетизм. Методика решения задач / А. С. Жукарев [и др.] // М. : МГУ, 2010. 436 с.

99. Электронно-лучевое оборудование ТЭТА [Электронный ресурс] / Официальный сайт производителя. URL: <http://www.tetacom.ru>
100. AD711. Datasheet / Analog Devices, Inc. – 2002. – 16 с.
101. Additive manufacturing of metals / D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann // *Acta Materialia*. 2016. Т. 117. С. 371-392.
102. Automatic Weld line sensing and work positioning for electron beam welding / Sasaki S., Murakami H., Iwami T., Yasunaga S. // *IIW DOC 4-368-84*(1984).
103. Bourell D.L. Perspectives on Additive Manufacturing // *Annual Review of Materials Research*. 2016. Т. 46. С. 1-18.
104. B-Series Fast, Blue-Sensitive Silicon Photomultiplier Sensors. Datasheet / SensL. – 2015. – 17 с.
105. Compensation of the effect of magnetic fields on the electron beam position in the process of electron beam welding / Laptinok V., и др. // *Elektrotechnika&Elektronika E+E*. 2014. Vol. 49, № 5-6. С. 62-67.
106. CsI(Tl) Thallium activated Cesium Iodide [Электронный ресурс] / Официальный сайт производителя. URL: <https://www.crystals.saint-gobain.com/products/csitl-cesium-iodide-thallium>
107. Current-driven ion-acoustic and potential-relaxation instabilities excited in plasma plume during electron beam welding / Trushnikov D.N., Mladenov G.M., Belenkiy V.Y., Koleva E.G., Varushkin S.V. // *AIP Advances*. 2014. Vol. 4, Iss. 4. С. 047105.
108. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition / J.O. Milewski, G.K. Lewis, D.J. Thoma, G.I. Keel, R.B. Nemec, R.A. Reinert // *Journal of Materials Processing Technology*. 1998. Т. 75, № 1-3. С. 165-172.
109. E14-140M – Недорогой внешний модуль АЦП/ЦАП на шину USB [Электронный ресурс] / Официальный сайт производителя. URL: <http://www.lcard.ru/products/external/e-140m#slideshow-0>

110. E20-10 – Быстродействующий внешний модуль ввода-вывода на шину USB 2.0 [Электронный ресурс] / Официальный сайт изготовителя. URL: <http://www.lcard.ru/products/external/e20-10#slideshow-1>
111. Eichhom F., Spies B., Rits P. Computer controlled sistem to measure EB geometry // IIV DOC № IV, 224-78. Aachen, 1978.
112. Electron beam additive manufacturing with wire – Analysis of the process / M.St. Węglowski, S. Błacha, J. Pilarczyk, J. Dutkiewicz, Ł. Rogal // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Т. 1960. – С. 140015.
113. Electron beam layer manufacturing using scanning electron monitored closed loop control : пат. 0061167 США / S. Stecker, P. Wollenhaupt; заявитель и патентообладатель SCIAKY Inc; опубл. 06.03.2014.
114. Electron beam layer manufacturing using scanning electron monitored closed loop control: пат. US8809780B2 США. / Phillip E. Wollenhaupt, Scott Stecker.; заявл. 13.11.13; опубл. 06.03.2014, Бюл. US20140061167A1. 19 с.
115. Frazier W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review // Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. Т. 23(6). С. 1917-1928.
116. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source // Welding in the World. 2018. Т. 62, № 2. С. 267-275.
117. Gokuldoss P.K., Kolla S., Eckert J. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines // Materials. 2017. Т. 10(672). С. 1-12.
118. Kerner F., Schuler A. High resalution method for determination of carrent density dictubution in electron beams of arbitrary shope // 3eme Collog. int. coudage etfision faisceau electrons et laser, Lion, 5-9 sept. 1983. Vol. I.S. I., 1983. P. 45-52.
119. LGraph2 - Многоканальный регистратор-самописец [Электронный ресурс] / Официальный сайт производителя. URL: <http://www.lcard.ru/products/software/lgraph>

120. Mauer K.O. Systems for beam positioning in electron beam welding // *Schweisstechnik*. 1982. Vol. 32, № 8. С. 368-373.
121. Mauer K., Noller F. Automatische Fokussierung des Elektronenstrahls beim Elektronenstrahl-schweißen // *DVS Ber.* 1980. № 63. P. 43-47.
122. Milewski J.O. *Additive Manufacturing of Metals*. Springer International Publishing, 2017, 343 с.
123. Morozov M.Y., Braverman V.Y., Mednikov D.M. Electron beam welding and beam positioning // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2015. Т. 2, № 11. С. 1020-1021.
124. Mumtaz K., Hopkinson N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting // *Rapid Prototyping Journal*. 2009. Т. 15, № 2. С. 96-103.
125. Norman L.J., Fred G.L. *Statistics and experimental design in engineering and physical sciences. Volume I. 2nd Edition* // John Wiley: New York, NY, USA, 1997. С. 70-74.
126. Norman, L.J.; Fred, G.L. *Statistics and Experimental Design in Engineering and Physical Sciences*, 2nd ed.; Volume I, John Wiley: NewYork, NY, USA, 1997; pp. 70–74.
127. Numerical Simulation of Electron Beam Welding of Dissimilar Materials Taking into Account Thermoelectric Phenomena / G. Permyakov, D. Trushnikov, S. Varushkin // *The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation*, in conjunction with *Symposium on the Research Activities of Joint Usage*, Osaka, Japan, Osaka Univ, Japan Welding Soc., 17-18 October, 2016. – P. 197-198.
128. Panten M., Eichhom F., Spies B. Diagnosis of high energy density electron beam on electron beam welding machines with a new compact measuring equipment // *4eme Collog. int. coudage etfision faisceau electrons et laser*, Cannes, 26-30 sept. 1988. Vol. 1. Saclay, 1988. P. 53-60.

129. Powder bed charging during electron-beam additive manufacturing / Z.C. Cordero, H.M. Meyer, P. Nandwana, R.R. Dehoff // *Acta Materialia*. 2018. T. 124. С. 437-445.
130. Process Control of Electron Beam Wire Additive Manufacturing : пат. 0297140 США / K.M. Taminger, R.A. Hafley, J.N. Zalameda, C.S. Domack, B.L. Taminger, E.R. Burke, R.E. Martin, W.J. Seufzer, T.A. Butler; заявитель и патентообладатель National Aeronautics and Space Administration (NASA); опубл. 19.10.2017.
131. Reconstruction of the Penetration Channel Shape in Electron Beam Welding Using Penetrating X-Rays / S. Varushkin, D. Trushnikov, E. Krotova, N. Musikhin, N. Bogdanov // *The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation, in conjunction with Symposium on the Research Activities of Joint Usage, Osaka, Japan, Osaka Univ, Japan Welding Soc., 17-18 October, 2016.* – P. 197-198.
132. Sayegh G. Considerations sur les différentes méthodes utilisées dans l'analyse des caractéristiques des faisceaux d'électron // *IIW Doc. № IV*, 276-79. S. I., 1980. 17 p.
133. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing / W.J. Sames, F.A. List, S. Pannala, R.R. Dehoff, S.S. Babu // *International Materials Reviews*. 2016. T. 61, № 5. С. 315-360.
134. TL431ACLPG, Программируемый источник опорного напряжения [Электронный ресурс] / Официальный сайт продавца. URL: <https://www.chipdip.ru/product/tl431aclpg>
135. TMA 2415D, DC/DC преобразователь [Электронный ресурс] / Официальный сайт продавца. URL: <https://www.chipdip.ru/product/tma2415d>
136. Trushnikov D., Belenkiy V, Mladenov G. Control of the electron beam focus regime and monitoring of the keyhole dynamic at electron beam welding // *Transaction of JWRI, Joining and Welding Research Institute. Osaka University. Japan*. 2012. С. 81-82.

137. Using bremsstrahlung X-Ray for positioning of the filler wire during electron beam surfacing / Varushkin S., Trushnikov D., Koleva E., Shamov D. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1089, Iss. 1. C. 012009.
138. Varushkin S., Belenkiy V., Trushnikov D. Researching signals from workpiece backside during electron beam welding in full penetration mode // Key Engineering Materials. 2017. № 743 KEM. C. 231-235.
139. Varushkin S., Trushnikov D., Permyakov G. Optimal Mode of Beam Oscillation for Melt-Through Mode in Electron Beam Welding and Its Influence on Penetration Control System // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. C. 1360-1364.
140. Wanjara P., Brochu M., Jahazi M. Electron beam freeforming of stainless steel using solid wire feed // Materials and Design. 2007. Vol. 28, Iss. 8. C. 2278–2286.
141. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests / D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. T. 81, № 1-4. C. 465-481.
142. Zhu H.H., Lu L., Fuh J.Y.H. Development and characterisation of direct laser sintering Cu-based metal powder // Journal of Materials Processing Technology. 2003. T. 140, № 1-3. C. 314-317.

Приложение 1

	Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» Военно-промышленная корпорация «НПО машиностроения» акционерное общество ПЕРМСКИЙ ЗАВОД «МАШИНОСТРОИТЕЛЬ»	
	Россия, 614014, г. Пермь, ул. Новозаягинская, 57 тел. (342) 263-17-32, факс (342) 263-17-24, телеграф «Овод» e-mail: pz mash@perm.ru http: //pz mash.ru ОКПО 07520139, ОГРН 1075906004217 ИНН/КПП 5906075029/590601001	
	№ _____ на № _____ от _____	
	АКТ использования результатов диссертационной работы С.В. Варушкина на соискание ученой степени кандидата технических наук	
Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационного исследования С.В. Варушкина по теме управления электронно-лучевой наплавкой проволочным материалом использованы предприятием АО «Пермский завод «Машиностроитель» в процессе разработки технологии изготовления деталей ответственного назначения. Использование результатов исследований позволило повысить стабильность качества наплавки и сварных соединений.		
Главный сварщик  К.А. Рожков		

Приложение 2



Госкорпорация «Роскосмос»
Публичное акционерное общество
«Протон-Пермские моторы»
(ПАО «Протон-ПМ»)

Комсомольский проспект, д. 93, г. Пермь, 614010
Тел.: (342) 244-02-94; факс: (342) 241-34-10;
E-mail: gd_secret@protonpm.ru; http://www.protonpm.ru
ОКПО 24050764; ОГРН 1025900893622
ИНН/КПП 5904006044/590401001

АКТ

использования результатов диссертационной работы С.В. Варушкина на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационного исследования С.В. Варушкина по теме «Управление электронно-лучевой наплавкой проволоочным материалом по параметрам тормозного рентгеновского излучения» использованы предприятием ПАО «Протон-ПМ» при исследовании возможностей технологии электронно-лучевой многослойной наплавки экспериментальных образцов для повышения стабильности и качества наплавки.

Заместитель исполнительного директора
по коммерческой деятельности



В.А. Голдобин