

СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА

На правах рукописи

Дружинина Александра Алексеевна

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ
ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТОЧНОСТЬ
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПО СТЫКУ СОЕДИНЕНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор Лаптенко В.Д.

Красноярск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПО СТЫКУ СОЕДИНЕНИЯ	9
1.1 Системы для совмещения электронного пучка со стыком свариваемого изделия	13
1.1.1 Автоматическое наведение на стык с помощью механических и электромеханических датчиков стыка	16
1.1.2 Автоматическое наведение на стык с помощью электромагнитных датчиков стыка	17
1.1.3 Автоматическое наведение на стык с помощью оптических датчиков стыка	20
1.1.4 Системы контроля и позиционирования электронного пучка с вторично- эмиссионными датчиками стыка	24
1.1.5 Системы контроля и позиционирования электронного пучка с рентгеновским датчиком стыка	28
1.2 Анализ влияния магнитных полей на положение электронного пучка в процессе ЭЛС	33
1.3 Способы устранения влияния магнитных полей при ЭЛС	41
1.4 Выводы и постановка задачи	47
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ ПУШКА – СВАРИВАЕМОЕ ИЗДЕЛИЕ	49
2.1 Математическая модель распределения магнитной индукции поля термоэлектрических токов	49
2.2 Математическая модель распределения магнитной индукции поля остаточной намагниченности	56
2.3 Выводы	62
ГЛАВА 3 МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОТКЛОНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА	65
3.1 Особенности формирования рентгеновского излучения от поверхности свариваемого изделия	66
3.2 Математическая модель метода контроля влияния магнитных полей на отклонение электронного пучка	69

3.3 Статические характеристики рентгеновского датчика	77
3.4 Спектральные характеристики датчика.....	79
3.5 Выводы	82
ГЛАВА 4 МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА.....	85
4.1 Метод автоматической компенсации влияния на электронный пучок магнитных полей термоэлектрических токов.....	85
4.2 Метод автоматической компенсации влияния на электронный пучок полей остаточной намагниченности	89
4.3 Анализ автоматической системы компенсации влияния магнитных полей на точность позиционирования электронного пучка	91
4.3.1 Структурная схема автоматической системы компенсации влияния магнитных полей.....	91
4.3.2 Анализ динамических свойств автоматической системы компенсации влияния магнитных полей.....	92
4.3.3 Анализ точности позиционирования электронного пучка по стыку	98
4.4 Выводы	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	103

ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) широко применяется для получения высококачественных неразъемных соединений в аэрокосмической отрасли, судостроении и энергетике. Это обусловлено широкими технологическими возможностями данного вида сварки, к которым, в том числе, относится способность электронного пучка перемещаться по обрабатываемой поверхности при практически любой форме траектории под действием магнитных полей быстродействующей отклоняющей системы.

Вместе с тем, электронный пучок, благодаря своей высокой чувствительности к магнитным полям, отклоняется от оптической оси электронно-лучевой пушки как в промежутке от пушки до свариваемого изделия, так и по глубине канала проплавления в свариваемом изделии под действием поля помехи, действующей на пучок в процессе ЭЛС. Причем отклонения электронного пучка от стыка соединения намного превышают допустимые значения. Это приводит к образованию непроваров по глубине соединения, особенно при сварке изделий больших толщин.

Таким образом, влияние магнитных полей, наводимых в свариваемых деталях, на точность позиционирования электронного пучка по стыку соединения является сложной научно-технической проблемой, препятствующей достижению высокого качества сварных соединений.

Вопросам исследования влияния на электронный пучок магнитных полей и разработки методов уменьшения этого влияния посвящены работы Назаренко О.К., Непорожного В.Ю., Лаптенка В.Д., Мурыгина А.В., Драгунова В.К., Бравермана В.Я., Watanabe K., Blakeley P.J., Sanderson A., Wei P.S. и др.

Следует отметить, что существующие методы уменьшения влияния магнитных полей имеют ряд недостатков и не могут в полной мере обеспечить получение высокого качества сварных соединений. В ряде случаев их применение приводит к необходимости проведения предварительных дорогостоящих и трудоемких операций по размагничиванию деталей.

Таким образом, исследование магнитных полей, наводимых в свариваемом изделии и отклоняющих электронный пучок от стыка соединения, а также разработка методов и средств автоматического контроля и компенсации влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является повышение качества сварного соединения при ЭЛС в условиях действия магнитных помех за счет повышения точности позиционирования электронного пучка по стыку.

В процессе работы решались следующие **задачи**:

- анализ автоматических устройств позиционирования электронного пучка по стыку, методов контроля влияния магнитных полей на электронный пучок и способов уменьшения этого влияния;

- разработка математической модели влияния магнитного поля термоэлектрических токов на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке разнородных материалов;

- разработка математической модели распределения индукции магнитного поля остаточной намагниченности в пространстве электронно-лучевой пушки – свариваемое изделие;

- разработка метода контроля отклонения сканирующего электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванного действием магнитных полей;

- разработка математической модели метода контроля отклонения сканирующего электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванного действием магнитных полей;

- разработка системы автоматической компенсации влияния магнитных полей, вызванных токами термо-ЭДС, на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке разнородных материалов;

- разработка системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке изделий с остаточной намагниченностью.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработаны новые математические модели распределения магнитной индукции в пространстве электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие от полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности деталей, основанные на представлении намагниченности в виде эквивалентных проводников с током, позволяющие рассчитать отклонение электронного пучка от оптической оси пушки;

- впервые разработаны метод контроля отклонения электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, основанный на сканировании электронного пучка поперек стыка и обработке сигнала коллимированного рентгеновского датчика по методу синхронного детектирования, и его математическая модель, позволяющие сформировать сигнал управления системы автоматической компенсации;

- впервые предложен метод автоматической компенсации влияния магнитных полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности деталей при электронно-лучевой сварке, в котором контролируется отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки и путем введения компенсирующих магнитных полей, создаваемых с помощью управляемых источников тока или электромагнита, это отклонение устраняется.

Теоретическая значимость:

- разработаны математические модели распределения магнитной индукции полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности в пространстве между пушкой и свариваемым изделием;

- разработана математическая модель коллимированного рентгеновского датчика отклонения электронного пучка от стыка.

Практическая значимость:

- разработаны методики расчета отклонений электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки под действием полей остаточной намагниченности свариваемого изделия и токов термо-ЭДС, позволяющие оценить возможность получения качественных сварных соединений;

- получены расчетные характеристики устройства контроля отклонения пучка электронов от оптической оси пушки по рентгеновскому излучению из зоны обработки, позволяющие спроектировать систему автоматической компенсации влияния магнитных полей;

- разработана система автоматической компенсации влияния магнитных полей. Испытания системы подтвердили ее работоспособность. Погрешность совмещения электронного пучка с плоскостью стыка от влияния магнитных полей уменьшилась в 30-50 раз. Использование разработанной системы в промышленности позволяет производить качественную сварку изделий из разнородных и магнитных материалов без предварительного размагничивания.

Методология и методы диссертационного исследования. Методологическая основа диссертационного исследования базируется на использовании методов теории функций, теории поля, теории вероятностей и математической статистики, аппарата дифференциального и интегрального исчисления, аналитической геометрии, теории рядов, методов математического моделирования, теории автоматического управления, экспериментальных исследованиях.

Все расчеты производились с применением системы MatLAB.

На защиту выносятся:

- математическая модель влияния магнитного поля термоэлектрических токов на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке разнородных материалов;

- математическая модель распределения магнитного поля остаточной намагниченности в пространстве электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие;

- метод контроля отклонения сканирующего электронного пучка, вызванного действием магнитных полей, и его математическая модель, основанная на обработке сигнала коллимированного рентгеновского датчика, наведенного на оптическую ось пушки, по методу синхронного детектирования;

- метод и функциональная схема системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка, вызванных токами термо-ЭДС, при сварке разнородных материалов;

- метод и функциональная схема системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке изделий с остаточной намагниченностью.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата, отсутствием противоречий исследованиям отечественных и зарубежных авторов, а также хорошей сходимостью экспериментальных и рассчитанных по моделям данных.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования были представлены на:

1. XI Международной научной конференции «Electron Beam Technologies EBT 2014» (Болгария, г. Варна, 2014 г.);

2. III Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции «Технологии и оборудование ЭЛС-2014» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.);

3. XII Международной научной конференции бакалавров, магистрантов и аспирантов «Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации» (г. Красноярск, 2013 г.);

4. XV Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, «Решетневские чтения» (Красноярск, 2011 г.)

5. VII Всероссийской конференции творческой молодежи «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (г. Красноярск, 2011 г.).

6. научно-практическом семинаре кафедры автоматизации производственных процессов и теплотехники в металлургии Института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета (г. Красноярск, 2012 г.)

По теме диссертации опубликованы 8 статей, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в действующий перечень ВАК. Получено решение о выдаче патента по заявке на изобретение.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 136 источников.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПО СТЫКУ СОЕДИНЕНИЯ

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) используется в 30 странах мира в основных отраслях промышленности. Наиболее широкое применение этот вид сварки получил в автомобильной, авиационной, космической отраслях, судостроении, ядерной энергетике, где к качеству сварных соединений предъявляют высокие требования. ЭЛС относится к методам сварки высококонцентрированными источниками энергии и обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 мм до 400 мм. ЭЛС применяют в тех случаях, когда другие виды сварки не могут обеспечить требуемого качества сварных соединений. ЭЛС в вакуумных камерах выполняется преимущественно при давлении остаточных газов порядка 10^{-2} Па. Благодаря этому ЭЛС оказалась эффективной для соединения деталей из любых металлических материалов, особенно сплавов на основе химически активных металлов, таких как алюминий, титан и тугоплавкие элементы. Наиболее перспективным является соединение изделий из тугоплавких металлов; из термически упрочненных материалов (например, после закалки), когда нежелательна, затруднена или невозможна последующая термообработка; изделий после завершающей механической обработки при обеспечении минимальных сварочных деформаций; ряда ответственных крупногабаритных толстостенных конструкций из сталей и легких сплавов [60]. При этом обеспечиваются максимальная пластичность и вязкость сварных соединений.

Электронно-лучевая сварка выполняется в специальной установке, состоящей из двух основных комплексов – энергетического и электромеханического. Энергетический комплекс предназначен для формирования пучка электронов с заданными параметрами, управления его мощностью и положением относительно свариваемого стыка. Выбор параметров энергетического комплекса определяется толщиной, теплофизическими характеристиками свариваемых

материалов и требованиями к коэффициенту формы проплавления. Электромеханический комплекс предназначен для герметизации рабочего пространства, создания вакуума, обеспечения взаимного перемещения свариваемого изделия и электронно-лучевой пушки, выполнения вспомогательных операций и управления всеми этими процессами.

Сварка электронным пучком основана на использовании для нагрева и расплавления металла энергии электронов, движущихся с большой скоростью в вакууме. При попадании на поверхность свариваемых деталей электроны тормозятся и их кинетическая энергия, равная $E = U \cdot I$, где U – ускоряющее напряжение; I – ток пучка, преобразуется в тепловую, вследствие чего образуется сварочная ванна. Этот процесс характеризуется высоким КПД, достигающим 90 %. Пучок электронов, эмитированный раскаленным катодом, ускоряется в вакууме напряжением U до 100 кВ и более. При изменении U от 30 до 200 кВ скорость электронов изменяется от 0,33 до 0,67 скорости света.

Применение фокусировки электронного пучка позволяет, изменять ширину сварочной ванны. При воздействии пучка электронов сравнительно невысокой плотности мощности (до 10^8 Вт/м²) процесс ЭЛС подобен процессу электродуговой сварки. Поверхность сварочной ванны при этом мало деформируется и гидравлические процессы в объеме жидкого металла проявляются относительно слабо. Глубина проплавления в этом случае существенно ограничена.

По мере увеличения плотности мощности электронного пучка до $10^9 - 10^{10}$ Вт/м² наряду с процессами плавления развивается интенсивное испарение металла, поверхность ванны прогибается под действием реактивных сил давления паров, и в жидком металле формируется парогазовый канал на всю глубину проплавления. По форме канала такое проплавление часто называют кинжальным. Швы с кинжальным проплавлением имеют ряд преимуществ по сравнению со сварными швами традиционной формы (полусферической). Формируемый при ЭЛС узкий шов имеет границы, близкие к параллельным. Небольшая зона термического воздействия и возможность получения ванны расплавленного металла малого объема позволяют резко снизить линейные и угловые деформации свариваемых деталей.

ваемых изделий. Глубокое проплавление металла при кратковременном тепловом воздействии приводит к повышенной скорости кристаллизации малой по объему сварочной ванны, благодаря чему измельчается структура сварного шва [93].

Малая инерционность электронов позволяет обеспечить широкий диапазон скоростей перемещения электронного пучка по обрабатываемой поверхности при практически любой форме траектории. Возможность тонкой регулировки мощности, фокусировки и положения пучка на поверхности изделия позволяет широко использовать системы управления электронным пучком и программирования режимов сварки. Сварку можно вести отдельными импульсами с различной скважностью, а также сканируя луч вдоль и (или) поперек стыка, что позволяет сваривать с наименьшими производственными затратами крупные серии однотипных деталей. При этом многие сварочные задачи могут решаться без перемещения электронно-лучевой пушки или свариваемого изделия.

В связи с тем, что электроны тормозятся непосредственно в обрабатываемом материале, такие факторы как образование плазмы, коэффициенты отражения и поглощающая способность материала практически не играют никакой роли при регулировании сварочных параметров. Больше всего значение имеет высокая теплопроводность свариваемого материала. Исключительно поэтому ЭЛС преимущественно используется для металлических материалов [121].

В целом ЭЛС обладает следующими преимуществами по сравнению с другими способами сварки плавлением:

- широкий диапазон толщин свариваемых деталей – от долей миллиметра до 100 мм и более;
- возможность получения узких швов с глубоким проплавлением;
- возможность регулирования отношения глубины проплавления к ширине шва;
- небольшие линейные размеры зоны термического воздействия;
- уменьшение роста зерна в шве и зоне термического воздействия сварки;

- большие скорости нагрева и охлаждения металла в вакууме, что позволяет получать максимальную степень чистоты и высокие физико-механические свойства соединения;

- резкое снижение величины деформаций сварных конструкций;

- возможность сварки соединений различных типов, в том числе принципиально новых, не выполнимых известными способами сварки плавлением;

- высокая производительность и экономичность;

- универсальность аппаратуры, позволяющая сваривать детали разных толщин;

- наличие предпосылок для комплексной автоматизации процесса.

Внедрение электронно-лучевой сварки в высокотехнологичные производства затрудняется ее экономическими и техническими особенностями, такими как:

- высокие капиталовложения;

- необходимость весьма точной подгонки свариваемых элементов;

- ограниченный размер конструкций, поскольку сварку приходится выполнять в камерах;

- необходимость принятия специальных мер для обеспечения направления электронного пучка по стыку;

- генерирование рентгеновского излучения, особенно при ускоряющем напряжении выше 60 кВ [63].

Несмотря на имеющиеся недостатки, применение ЭЛС постоянно расширяется. В начале 80-х годов прошлого века мировой парк эксплуатируемых установок составлял около 4000 шт., и ежегодно их изготавливается 150-200 шт., создаются крупногабаритные вакуумные камеры объемом до 500 м³ [109] (в авиационной промышленности по имеющимся сведениям – до 1500 м³). В 2000 г. количество электронно-лучевых установок в мире достигло 7000 [121], а в настоящее время составляет не менее 8000.

Технологические возможности ЭЛС значительно расширяются по мере совершенствования средств управления процессом. Установка ЭЛС как объект

управления представляет собой сложный комплекс электромеханического, вакуумного и мощного энергетического оборудования. Высокая скорость сварки, ограниченные возможности визуального наблюдения создают большие трудности оператору в управлении процессом сварки, поэтому вполне закономерно стремление к максимальной автоматизации процесса ЭЛС.

Основными задачами автоматизации процесса ЭЛС являются:

- автоматическое наведение электронного пучка на стык свариваемого изделия;
- стабилизация параметров сварного шва (глубины проплавления; ширины шва, как на поверхности изделия, так и в корне шва);
- управление скоростью сварки и взаимным перемещением электронно-лучевой пушки и свариваемого изделия;
- управлением началом и окончанием процесса сварки;
- автоматический контроль и регистрация параметров процесса.

Автоматическое управление сварочными электронно-лучевыми установками имеет свою специфику. Значительные достижения по использованию сопутствующих электронно-лучевому процессу явлений вторично-электронной эмиссии и рентгеновского излучения позволили создать качественно новые устройства автоматического контроля и управления повышенной чувствительности с достаточной помехоустойчивостью. Возможно использование и других физических явлений, имеющих место при взаимодействии электронного пучка с веществом.

1.1 Системы для совмещения электронного пучка со стыком свариваемого изделия

Малая ширина сварного шва и большое отношение глубины и ширины шва требуют точного совмещения пучка электронов с плоскостью стыка свариваемых изделий. Погрешность позиционирования зависит от ширины зазора, толщины деталей, ширины шва в его корне и обычно не должна превышать 0,1...0,3 мм. В тех случаях, когда идет обработка деталей малых размеров или когда координа-

та стыка строго фиксирована, можно наводить электронный пучок на стык вручную с наблюдением с помощью оптической системы. Такой способ применяется при сварке больших партий одинаковых деталей или когда изготовление деталей ведется с высокой точностью по другим соображениям. Во всех остальных случаях требуется автоматическое позиционирование по стыку [100].

Автоматическое слежение за стыком при ЭЛС было введено в промышленную эксплуатацию после двадцатилетних исследований. Значительный вклад в развитии теории и практики автоматического слежения за стыком при ЭЛС внесли Институт электросварки (ИЭС) имени Е.О. Патона (Украина), Сумское производственное объединение «Электрон», НПО «Техномаш», Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, Воронежский политехнический институт, фирмы «Сиаки» (Франция), «Гамильтон стандарт» (США), «Геркулес», «Штайгервальд» (ФРГ), «Мицубиси денки», «Итами сейсакусе» (Япония). Для наведения и позиционирования электронного пучка относительно стыка были использованы различные методы.

По типу датчика положения стыка автоматические системы позиционирования электронного пучка можно разделить на системы с механическими, электромагнитными, оптическими, вторично-эмиссионными и рентгеновскими датчиками.

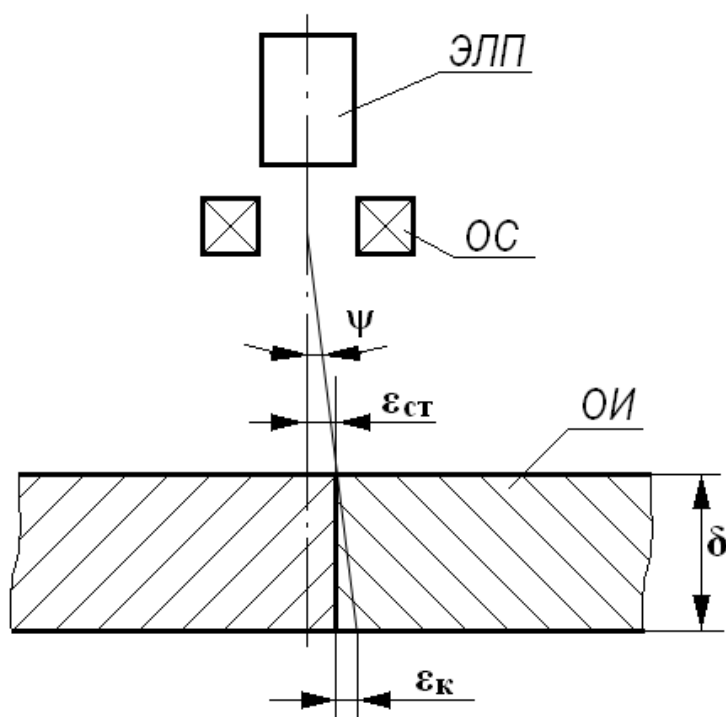
Для перемещения электронного пучка по обрабатываемой поверхности системы слежения по стыку используют либо перемещение электронно-лучевой пушки, либо отклонение электронного пучка с помощью отклоняющей системы. При наведении на стык с помощью отклоняющей системы пучок совмещается со стыком лишь на поверхности изделия (рисунок 1.1), а в корне шва возникает погрешность, равная

$$\varepsilon_k = \psi \cdot \delta, \quad (1.1)$$

где ψ – угол наклона электронного пучка;

δ – толщина изделия.

При наведении электронного пучка на стык с помощью перемещения пушки угол наклона пучка не создается, так как при отсутствии возмущающих воздействий ось пучка совпадает с оптической осью пушки, поэтому такие системы более предпочтительны.



ЭЛП – электронно-лучевая пушка; ОС – отклоняющая система; ОИ – обрабатываемое изделие; ψ – угол наклона электронного пучка; $\epsilon_{ст}$ – погрешность совмещения оси пушки со стыком; $\epsilon_{к}$ – погрешность в корне шва; δ – толщина изделия

Рисунок 1.1 – Отклонение электронного пучка с помощью отклоняющей системы

Системы слежения по стыку бывают двух типов:

- с записью и воспроизведением программы;
- слежения на рабочем токе.

Системы слежения с записью программы являются более надежными, поскольку запись производится на малом токе без оплавления стыка. При этом электронный пучок имеет минимальный диаметр. Помехи в этом случае также минимальны. При воспроизведении программы возможны следующие дополнительные погрешности:

- погрешность тепловой деформации изделия;

- погрешность, связанная с изменением магнитных полей.

В случае устранения влияния на электронный пучок магнитных полей остается только погрешность от тепловой деформации, которая незначительна.

Наиболее перспективными являются системы автоматического наведения электронного пучка на стык соединения с цифровым управлением. Такие системы должны обеспечивать:

- слежение за стыком, независимое от типа сварочной установки и режимов ее работы, материала свариваемых деталей, типа изделия и его габаритов;

- высокую точность совмещения электронного пучка с плоскостью стыка независимо от скорости сварки;

- высокое быстродействие;

- гибкую обратную связь между датчиком, электронным пучком и стыком;

- отработку рассогласований посредством отклонения пучка с помощью отклоняющей системы в пределах нескольких миллиметров и за счет перемещения свариваемого изделия или электронно-лучевой пушки при больших результирующих отклонениях стыка от оптической оси пушки;

- визуальный контроль положения стыка и ручное дистанционное управление наведением электронного пучка на стык.

Датчики положения стыка должны быть бесконтактными и иметь малые габаритные размеры.

1.1.1 Автоматическое наведение на стык с помощью механических и электромеханических датчиков стыка

Положение стыка непосредственно перед зоной сварки можно определять с помощью механических и электромеханических датчиков стыка [26; 90; 106].

Механические датчики представляют собой устройства в виде ролика или скользящего шупа, движущегося по разделке свариваемых деталей перед электронным пучком. Чувствительный элемент постоянно прижат к поверхностям разделки кромок стыка или другим поверхностям свариваемых деталей под дей-

ствием пружин или силы тяжести. Принцип работы механических датчиков предполагает сварку прямолинейных швов с разделкой кромок, а если разделки нет, то необходим специальный технологический выступ. Низкая чувствительность, дрейбег контактов, вибрации затрудняют применение подобных датчиков. Поэтому механические датчики стыка промышленного применения при ЭЛС не нашли.

В основе работы электромеханических датчиков стыка лежит преобразование механического перемещения чувствительного элемента – щупа в электрический сигнал. При отклонении щупа, укрепленного на пушке и расположенного по стыку перед электронным пучком, датчик преобразует величину этого отклонения в электрический сигнал рассогласования, управляющий электродвигателем привода корректировки положения электронно-лучевой пушки.

Системы слежения за стыком с использованием электромеханического датчика применяются, как правило, для выполнения круговых и прямолинейных швов в одной плоскости. Удовлетворительного качества совмещения электронного пучка со стыком удается добиться благодаря выполнению нескольких контрольных проходов.

При сварке с использованием электромеханических датчиков также требуется либо разделка кромок, либо наличие специальной направляющей, параллельной свариваемому стыку.

1.1.2 Автоматическое наведение на стык с помощью электромагнитных датчиков стыка

Электромагнитные датчики получают информацию о положении стыка в результате изменения параметров магнитного поля, создаваемого самим датчиком, и основаны на зависимости соотношения магнитных потоков отдельных участков магнитопровода от их магнитного сопротивления. Достоинствами таких датчиков являются простота и дешевизна конструкции, механическая прочность, высокая надежность за счет возможности съема выходного сигнала без скольз-

щих контактов, возможность питания от промышленной сети, возможность получения достаточно высокой мощности выходного сигнала [47].

Схема простейшего электромагнитного датчика положения стыка приведена на рисунке 1.2. Принцип действия датчика основан на сравнении ЭДС, наводимых во вторичных обмотках W_{21} и W_{22} . Когда датчик расположен симметрично стыку свариваемых деталей, магнитные потоки, замыкающиеся через каждую из обмоток, равны, и ЭДС во вторичных обмотках W_{21} и W_{22} также равны между собой. Напряжение на выходе датчика, равное алгебраической сумме ЭДС обмоток W_{21} и W_{22} , $U_{\text{вых}} = 0$. Если поток обмотки W_{21} замыкается через свариваемый стык, то ее ЭДС меньше ЭДС обмотки W_{22} . Величина напряжения на выходе датчика будет характеризовать отклонение стыка от оси электронно-лучевой пушки, а знак будет указывать на направление отклонения. Выходное напряжение является управляющим сигналом для системы направления электронного пучка по стыку.

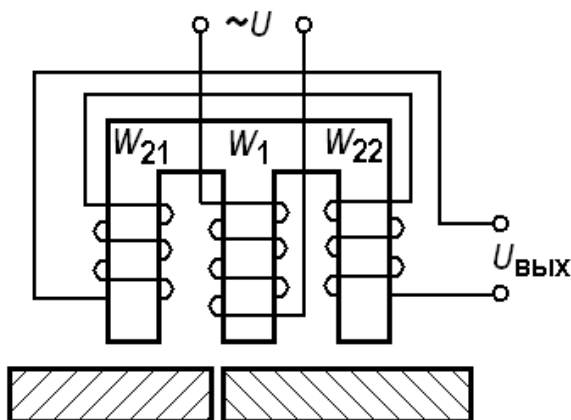


Рисунок 1.2 – Схема электромагнитного датчика положения стыка

Бесконтактный способ определения положения стыка с помощью электромагнитного датчика на базе дифференциального феррозонда [17-25; 56; 87] обеспечивает удовлетворительную точность позиционирования электронного пучка. Автоматическая система слежения с феррозондовым датчиком стыка осуществляет наведение магнитного поля высокой частоты в свариваемое изделие, выделение с помощью датчика информации о положении стыка, преобразование ее и передачу на электропривод исполнительного механизма, коррек-

тирующего положение электронно-лучевой пушки. Точность автоматического наведения электронного пучка на стык свариваемого изделия составляет $\pm 0,2$ мм при скорости ухода стыка $0,72$ мм/с. С целью ограничения теплового воздействия со стороны сварочной ванны датчик устанавливается на расстоянии 50 мм от места сварки. Испытания, проведенные при электронно-лучевой сварке [46], показали пригодность использования феррозондовых электромагнитных датчиков для наведения электронного пучка на стык. Были выявлены недостатки, ограничивающие применение указанных датчиков. К ним относятся влияние электромагнитного поля датчика на электронный пучок; наличие методической погрешности, возникающей в связи с опережающим положением датчика относительно пучка электронов; необходимость стабилизации расстояния между датчиком и свариваемым изделием.

Влияние электромагнитного поля, при котором пучок получает колебания с амплитудой до 5 мм вдоль стыка на частоте возбуждения электромагнита датчика, удалось компенсировать за счет введения аналогичных колебаний противоположной полярности с помощью электромагнитной отклоняющей системы электронно-лучевой пушки.

Одним из возможных способов устранения методической погрешности, вызванной опережающим положением электромагнитного датчика относительно электронного пучка, является введение в закон регулирования коррекции по скорости ухода стыка [55].

С целью стабилизации расстояния между датчиком и свариваемым изделием разработан способ контроля расстояния датчика, позволяющий контролировать и стабилизировать это расстояние с погрешностью ± 3 мм.

Самый существенный недостаток всех датчиков, жестко связанных с электронно-лучевой пушкой, заключается в том, что такие датчики контролируют положение электронно-оптической оси пушки относительно стыка сварного соединения. Но при этом положение электронного пучка не обязательно должно совпадать с электронно-оптической осью пушки в силу влияния различных электромагнитных полей и неточности юстировки пушки. Поэтому при использовании

таких датчиков приходится решать еще и задачу стабилизации электронного пучка по электронно-оптической оси пушки [100].

1.1.3 Автоматическое наведение на стык с помощью оптических датчиков стыка

Принцип действия оптических датчиков наведения на стык основан на воздействии прямого или отраженного светового потока на чувствительный элемент, который преобразует это воздействие в электрический сигнал. В качестве преобразующих элементов могут выступать фотодиоды, фоторезисторы или приемная телевизионная камера.

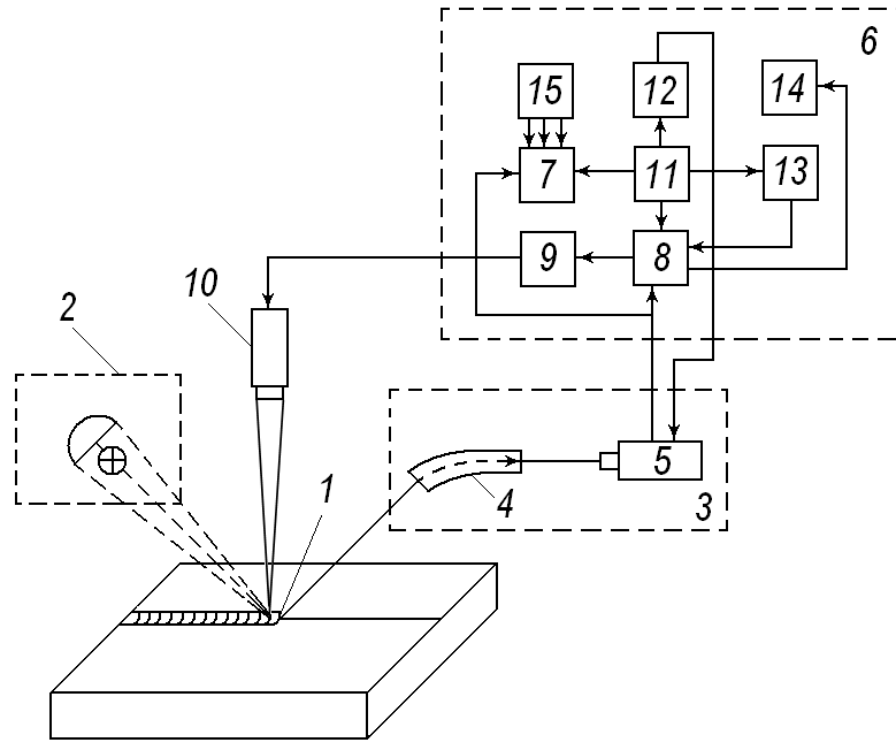
Для автоматического слежения по стыку свариваемого соединения можно использовать оптическое изображение пучка и стыка [6; 7; 13; 44; 129]. В устройстве [129] для определения положения стыка применяют оптические преобразователи, состоящие из матрицы фоторезисторов, соединенных в мостовую схему. В качестве источника света используется сварочная ванна, интенсивность свечения которой зависит от отклонения стыка. Для коррекции положения электронного пучка относительно стыка используется выходной сигнал оптического преобразователя.

Перспективным направлением является использование телевизионных методов определения положения стыка, позволяющих не только позиционировать электронный пучок по стыку соединения, но и визуально наблюдать за процессом и сравнительно просто производить подготовительные операции и настройку оборудования. В настоящее время с целью наблюдения за процессом сварки крупногабаритные электронно-лучевые установки, как правило, снабжаются промышленными телевизионными установками.

Рядом исследователей проводились интенсивные работы по использованию промышленных телевизионных установок для наблюдения за процессом сварки и слежения за стыком сварного соединения [6; 7; 44]. В этих системах видикон с объективом размещался в вакуумной камере и жестко устанавливался на элек-

тронно-лучевой пушке. Для получения более контрастного изображения стыка свариваемое изделие освещается дополнительным источником света.

Принцип построения телевизионных следящих систем поясняется функциональной схемой (рисунок 1.3) [27].



1 – зона сварки; 2 – источник света; 3 – телевизионный датчик; 4 – прибор визуального контроля; 5 – телевизионная камера; 6 – приемно-усилительное устройство; 7 – видеоконтрольный блок; 8 – управляющий блок; 9 – исполнительный блок; 10 – электронно-лучевая пушка; 11 – блок синхронизации; 12 – блок развертки; 13 – блок имитации стыка; 14 – блок контроля; 15 – блок питания

Рисунок 1.3 – Функциональная схема телевизионной следящей системы

Зону сварки 1 освещает источник света 2. Отраженная и излучаемая поверхностью зоны сварки световая энергия воспринимается телевизионным датчиком 3, состоящим из прибора визуального контроля 4 и передающей телекамеры 5. Снижают контрастность и яркость излучения между слоями холодного металла зоны стыка и сварочной ванны до допустимых пределов, соответствующих возможностям передающей трубки, с помощью уравнивающего подсвета лампой

накаливания. В телевизионной камере 5 установлен видикон с фокусирующе-отклоняющей системой и предварительный усилитель на транзисторах.

В приемно-усилительном устройстве 6 видеосигнал с телевизионного датчика 3 поступает на видеоконтрольный блок 7 и управляющий блок 8, в котором из видеосигнала выделяются электрические импульсы, несущие информацию о положении сварочной ванны и стыка, и вырабатывается импульсный сигнал рассогласования, характеризующий их взаимное расположение.

Блоки синхронизации 11 и развертки 12 обеспечивают получение изображения зоны сварки путем ее построчного разложения на экране видеоконтрольного блока 7. Построчное разложение прерывается в двух местах кадра так называемыми информационными строками. В это время скорость движения считывающего луча на мишени видикона замедляется в 15–20 раз по сравнению со скоростью стандартного построчного телевизионного разложения. Информационные строки размещены в растре так, что первая строка передает изображение стыка в непосредственной близости от фронта сварочной ванны, а вторая – изображение середины ванны. Управляющий блок 8 воспринимает видеосигнал только от информационных строк. Видеосигнал от стыка и сварочной ванны в управляющем блоке 8 обрабатывается по методу вычитания. На выходе блока 8 образуется импульс рассогласования, длительность которого пропорциональна смещению между серединой стыка и центром сварочной ванны, а полярность этого импульса показывает направление смещения. Импульс рассогласования поступает на вход блока 9, который состоит из усилителя и интегратора. Интегратор преобразует импульсы рассогласования в постоянный ток, протекающий в катушках отклоняющей системы электронно-лучевой пушки 10. В структуру системы входят также блоки имитации стыка 13 и контроля 14. Блок 13 предназначен для моделирования видеосигнала от зоны сварки, он используется при настройке системы слежения до сварки. Блок 14 служит для выявления нарушений работы следящей системы и сигнализации об этом оператору в режимах автоматического слежения при сварке, ручного наведения и проверки системы с блоком имитации. Питание системы обеспечивается от блока 15. Система слежения допускает превышение

кромки стыка до 5 мм. Допустимое отклонение стыка от среднего положения составляет 12 мм на 1 м длины линии стыка. Продолжительность непрерывной работы системы ограничивается сроком службы видикона и видеоконтрольного блока.

В некоторых случаях удавалось получить довольно четкое изображение сварочной ванны и стыка свариваемого изделия, но реализовать надежное слежение за стыком в процессе ЭЛС не удалось. К числу недостатков, присущих данному методу, относятся необходимость защиты оптической системы от напыления парами металла и теплового излучения, засветка видикона излучением сварочной ванны, невысокая точность определения положения стыка. При этом обслуживание телевизионных систем в промышленных условиях сложно и затратно.

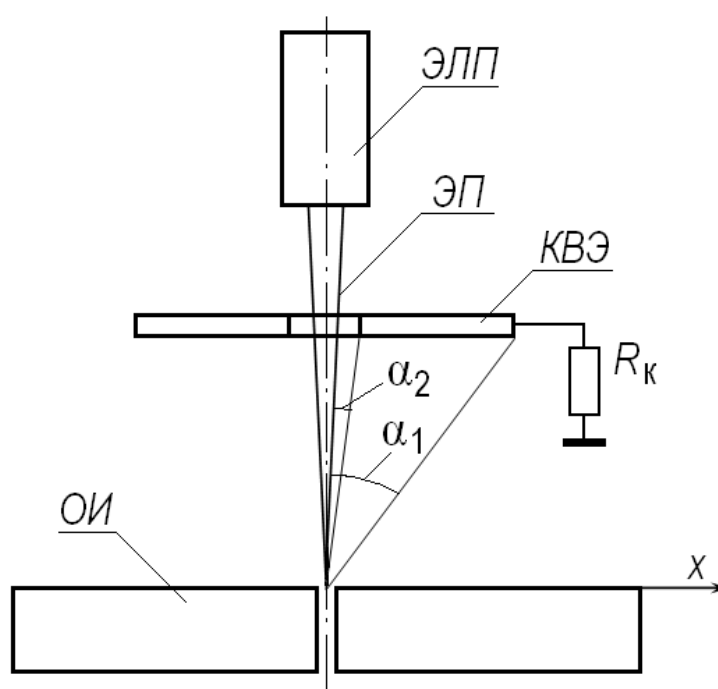
Проблема напыления паров металла на оптическую систему решается введением в состав установки механизма перемотки защитной прозрачной пленки, либо направлением объектива видеокамеры не на зону сварки, а на ее зеркальное отражение, получаемое с помощью зеркал, отражающий слой которых выполнен из того же материала, что и свариваемое изделие [88]. Для защиты от теплового излучения видеокамеру помещают в теплоизолирующий кожух.

Засветка видикона излучением сварочной ванны снижает его разрешающую способность. Для определения относительного отклонения электронного пучка и стыка в этом случае приходится находить координаты стыка и сварочной ванны. Точность метода оказывается недостаточной, так как размеры сварочной ванны оказываются большими и точно определить координаты середины ванны не удастся из-за различных помех, бликов и т.п. Поэтому телевизионные системы слежения за стыком не получили широкого применения. Телевизионная техника может быть использована для целей наведения на стык, если применять методы цифровой обработки информации, которые увеличивают помехоустойчивость, повышают точность и скорость определения и отработки сигнала ошибки.

1.1.4 Системы контроля и позиционирования электронного пучка с вторично-эмиссионными датчиками стыка

Большое распространение в практике ЭЛС получили вторично-эмиссионные системы слежения за стыком, в которых используются отраженные (вторичные) электроны, улавливаемые специальным коллектором. Датчик вторичной эмиссии (коллектор) отличается простотой и высокой надежностью при интенсивной металлизации, возникающей в процессе сварки.

В простейшем случае коллектор вторичных электронов представляет собой металлическое кольцо с отверстием в центре. Коллектор устанавливают на торце электронно-лучевой пушки на изоляторах (рисунок 1.4).



ЭЛП – электронно-лучевая пушка; ЭП – электронный пучок; КВЭ – коллектор вторичных электронов; ОИ – обрабатываемое изделие; R_k – нагрузочный резистор

Рисунок 1.4 – Функциональная схема вторично-эмиссионного датчика стыка

При облучении поверхности изделия острорасфокусированным пучком электронов часть из них отражается. Это дает возможность получать информацию о состоянии обрабатываемой поверхности путем измерения сигнала вторично-

эмиссионного тока, протекающего через нагрузочный резистор R_k . При попадании электронного пучка на различные неоднородности поверхности (зазор в стыке, разделка кромок, разнородные материалы и т.п.) происходит изменение вторично-эмиссионного тока. При пересечении электронным пучком стыка свариваемых деталей происходит уменьшение тока вторичной эмиссии. Минимальное значение вторично-эмиссионного тока соответствует совмещению оси электронного пучка с серединой зазора в стыке. Ток вторичной эмиссии определяется первичным током пучка электронов, коэффициентом вторичной эмиссии свариваемого изделия и геометрическими характеристиками коллектора вторичных электронов, которые определяются углами α_1 и α_2 . Ток коллектора вторичных электронов можно описать выражением [49; 53]

$$I_c = I_b \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x, y) j_b(x, y) dx dy,$$

где I_b – ток пучка электронов;

$\varphi(x, y)$ – эффективный коэффициент вторичной эмиссии;

$j_b(x, y)$ – нормированная плотность распределения тока пучка в координатах x и y , причем

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} j_b(x, y) dx dy = 1.$$

С целью получения информационного сигнала стык свариваемых деталей сканируют электронным пучком. Для надежного функционирования вторично-эмиссионного датчика необходимо, чтобы диаметр электронного пучка был соизмерим с шириной стыка и пучок хотя бы частично проникал в стык. При сканировании стыка пучком на рабочем тока устройство работает неустойчиво в связи с увеличением диаметра пучка и оплавлением кромок, поэтому в большинстве си-

стем с вторично-эмиссионным датчиком слежения за стыком процессы сварки и зондирования разделяют во времени. Для получения сигнала о положении стыка электронный пучок периодически выводят из сварочной ванны в направлении стыка и переводят в режим сканирования в непосредственной близости от места нагрева. Чтобы исключить оплавление кромок, скорость сканирования должна быть достаточно высокой и составлять $V_{ск} > 10P$, где $V_{ск}$ – скорость сканирования, м/с; P – мощность пучка, кВт [106].

Управляющий сигнал в системах с вторично-эмиссионным датчиком положения стыка получают с помощью определения временного положения импульсов тока отраженных электронов. В настоящее время достаточно широко представлены устройства, использующие такой способ получения сигнала [1; 9; 15; 16; 45; 61; 62; 78; 81; 86; 89; 92; 111; 116; 118; 124; 126]. Данные системы содержат генератор сканирования пучка, блок формирования импульса стыка и блок коррекции положения пучка, которые присутствуют во всех системах и отличаются способами реализации. Генератор сканирования пучка обеспечивает его выброс из зоны сварки и линейное перемещение поперек стыка свариваемых деталей. Время зондирования стыка пучком выбирается из соображений минимального влияния на сварочный процесс и обычно не превышает 500 мс. Блок формирования импульса стыка преобразует сигнал датчика вторичных электронов в напряжение, соответствующее изменению тока вторичной эмиссии в момент пересечения стыка электронным пучком. Блок коррекции положения пучка контролирует положение импульса стыка относительно развертки электронного пучка и формирует управляющий сигнал, корректирующий положение пучка относительно стыка свариваемого изделия. С целью повышения точности системы слежения за стыком, а также повышения помехозащищенности датчика при пропадании сигнала от стыка над прихватками управляющий сигнал формируют по интегрирующему закону, вводя в систему астатизм первого порядка.

Одной из главных проблем, возникающих при создании систем слежения за стыком, является помехозащищенность вторично-эмиссионного датчика. Различного рода помехи, действующие на датчик вторичных электронов в процессе

ЭЛС, вызывают флуктуации выходного сигнала. Источниками помех могут быть нестабильность ускоряющего напряжения, тока пучка, неоднородность свариваемого материала, наличие поверхностных неровностей, изменение зазора в стыке. Влияние помех на вторично-эмиссионный сигнал от стыка свариваемых деталей было рассмотрено в работах [2; 51; 66]. Существенная помеха возникает в результате влияния парогазового облака, возникающего при ЭЛС мощным пучком, приводящее к рассеянию электронного пучка и увеличению его эффективного диаметра. Кроме того, как указывается в работах [50; 52], вывод пучка из зоны сварки в направлении стыка сопровождается спадом сигнала вторичной эмиссии. Испарение металла при перемещении пучка по контуру сканирования также вызывает появление флуктуаций сигнала вторично-эмиссионного датчика. Снизить влияние пульсаций тока пучка на помехозащищенность вторично-эмиссионного датчика можно за счет синхронизации начала поискового движения с фазой промышленной сети при максимальном значении напряжения на выпрямителе [19].

Повышению помехозащищенности систем слежения способствует снижение мощности пучка в период обнаружения стыка [23; 31; 80]. В институте электросварки имени Е. О. Патона разработана система слежения за стыком при ЭЛС «Прицел-4», работающая с модулированным источником питания мощностью 15, 60 и 120 кВт [31]. В этих источниках питания на короткое время (2 мс) номинальная мощность пучка снижается до 100 Вт. В момент сканирования стыка пучком пониженной мощности производится его динамическая фокусировка. Широкое применение систем с модуляцией тока пучка затруднено из-за необходимости переработки существующих источников питания, высоких требований к стабильности и быстродействию устройств модуляции.

В работах [3; 4; 71; 81; 133] предлагается использовать дифференциальный вторично-эмиссионный датчик положения стыка, содержащий два симметрично расположенных коллектора вторичных электронов, включенных дифференциально в измерительное устройство. В этом случае сканирующее устройство обеспечивает только вынос электронного пучка из сварочной ванны в зону стыка, сканирование поперек стыка при этом не требуется. Дифференциальный датчик реаги-

рует на асимметрию распределения плотности вторичной эмиссии при смещении пучка от оси стыка. Как правило, для работы дифференциального датчика требуется V-образная разделка кромок, которая имеется только в специальных случаях.

Особое место среди вторично-эмиссионных систем занимают телевизионные системы наблюдения и слежения за стыком. В таких системах вместо видикона используется вторично-эмиссионный датчик [5; 72; 91; 102; 126; 132]. Сканирование стыка электронным пучком осуществляется от генераторов кадровой и строчной развертки телевизионного приемника. Сигнал датчика вторичной эмиссии используют для модуляции яркости. При этом на телевизионном приемнике получают изображение сварочной ванны и поверхности изделия в окрестностях зоны сварки. Достоинством таких систем является совмещение функций наблюдения за ЭЛС и слежения за стыком. Недостатками телевизионных систем являются высокая длительность кадровой развертки (20 мс), приводящая к дефектам типа непровара; наличие помех, связанных с модуляцией яркости изображения за счет пульсаций тока электронного пучка. Сложность совмещения процесса наблюдения с процессом сварки заключается еще и в том, что для хранения изображения кадра требуются ОЗУ емкостью несколько сот килобайт и система записи и считывания информации, то есть в состав телевизионной системы наблюдения должна входить микроЭВМ с необходимым объемом оперативной памяти [100].

1.1.5 Системы контроля и позиционирования электронного пучка с рентгеновским датчиком стыка

В результате взаимодействия пучка электронов с обрабатываемым материалом возникает тормозное рентгеновское излучение, локализованное в месте взаимодействия электронного пучка с материалом, которое можно использовать для определения положения стыка свариваемых деталей. Мощность (интенсивность) рентгеновского излучения определяется выражением [85; 104]

$$P = \oint_S J ds = k_0 I Z U_0^2,$$

где S – поверхность, через которую проходит поток;

J – интенсивность тормозного излучения;

k_0 – коэффициент пропорциональности;

I – ток электронного пучка;

Z – атомный номер обрабатываемого материала;

U_0 – ускоряющее напряжение.

Возможность контролировать положение стыка свариваемого изделия по рентгеновскому излучению из зоны торможения электронов основана на том, что пересечение электронным пучком стыка соединения приводит к изменению интенсивности рентгеновского излучения с поверхности обрабатываемого материала в направлении рентгеновского датчика. При отсутствии плавления точное совмещение электронного пучка со стыком будет соответствовать минимуму рентгеновского излучения, а нахождение пучка на поверхности детали – максимуму.

Рентгеновские лучи распространяются прямолинейно, проходят сквозь пары металлов с незначительным ослаблением и, кроме того, нечувствительны к действию электрических и магнитных полей, имеющих место при ЭЛС. Испытания рентгеновских датчиков различного типа показали, что они обладают более высокой помехозащищенностью по сравнению с вторично-эмиссионными датчиками, что свидетельствует о перспективности их применения [68; 99]. Высокая помехозащищенность рентгеновских датчиков связана еще и с тем, что они гальванически развязаны от сварочного оборудования и легко экранируются.

В качестве рентгеновского датчика для определения интенсивности рентгеновского излучения используются сцинтилляционные детекторы, состоящие из комбинации сцинтиллятора с фотоэлектрическим умножителем.

Интенсивность рентгеновского излучения, попадающего на рентгеновский датчик, может быть представлена выражением [100]

$$J_d = K_0 K_1 Z U_0^2 I \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K_2(x, y) j_b(x, y) dx dy,$$

где K_0 – коэффициент пропорциональности;

K_1 – коэффициент, учитывающий пространственное положение датчика (φ , α , R) в сферических координатах;

K_2 – коэффициент, учитывающий неоднородность материала свариваемого изделия (наличие стыка);

j_b – нормированная плотность распределения тока пучка на поверхности детали в координатах x и y .

Уровень выходного сигнала такого датчика зависит от отношения толщины изделия к ширине зазора в стыке. Уменьшение величины зазора приводит к снижению сигнала от стыка, чувствительность датчика падает, поэтому трудно добиться требуемой помехозащищенности измерительного устройства. Увеличение ширины зазора в стыке, позволяющее повысить чувствительность датчика, на практике применяется редко, так как это приводит к такому дефекту, как занижение верхней поверхности шва. Поэтому был разработан специальный коллимированный рентгеновский датчик, содержащий коллиматор – щелевую бленду из свинца, которая ограничивает зону обзора датчика.

Коллимированные рентгеновские датчики положения стыка используются как в системах слежения с предварительной записью траектории стыка [105; 126; 127], так и в системах слежения на рабочем токе. В настоящее время рентгеновские датчики положения стыка применяются достаточно широко. С начала 80-х годов прошлого века такими датчиками комплектуются системы слежения за стыком в машинах для ЭЛС японских фирм «Мицубиси Дэнки» и «Итами Сэйсакусе» [101; 105; 113] и фирмы «Steigerwald Straltechnik» (ФРГ).

При сварке металлов больших толщин существует возможность контролировать положение стыка по рентгеновскому излучению из канала проплавления. Для получения сигнала от стыка используют коллимированные датчики

рентгеновского излучения, ориентированные на канал проплавления [10; 12; 14; 117; 126; 128].

В устройстве [10] для совмещения электронного пучка со стыком используют рентгеновское излучение из корневой части канала проплавления. Для этого рентгеновское излучение преобразуется в электрический сигнал в виде двугорбого импульса, а совмещение пучка со стыком осуществляется по временному интервалу между максимальными значениями амплитуды этого импульса. В качестве датчика рентгеновского излучения, располагаемого со стороны электронно-лучевой пушки в плоскости стыка, используют рентгентелевизионный видикон или рентгеновский детектор на основе микроканальных пластин.

В устройстве [126] для получения сигнала от стыка электронный пучок во время сварки периодически сканируют поперек стыка. Возникающее при этом рентгеновское излучение регистрируют коллимированным рентгеновским датчиком, ориентированным на канал проплавления через стык соединения. При пересечении электронным пучком стыка возникает импульс измерительного сигнала, так как рентгеновское излучение в направлении датчика в этот момент не экранируется стыком. Полученный импульс от стыка сравнивается с импульсом, образуемым устройством при прохождении отклоняющего тока через ноль. По взаимному положению обоих импульсов устройством формируется управляющий сигнал, корректирующий положение электронного пучка относительно стыка. Работа устройства осложняется высоким уровнем помех, связанных с колебаниями канала проплавления. Эти колебания носят случайный характер и приводят к нестабильности рентгеновское излучение из канала проплавления, что вызывает сбои в системе слежения по стыку.

Повысить помехозащищенность рентгеновских датчиков положения стыка можно, используя методы частотной селекции. В устройстве [14] сигнал датчика стыка подвергается частотной селекции в избирательном усилителе. Для этого электронный пучок сканируют поперек стыка с частотой генератора сканирования, деленной на два. При пересечении пучком электронов стыка свариваемых деталей во время сканирования на выходе рентгеновского датчика возникает сиг-

нал, содержащий гармонические составляющие. С помощью избирательного усилителя выделяется вторая гармоника сигнала датчика стыка. Далее сигнал, пройдя через фазовый дискриминатор и фильтр, преобразуется усилителем-формирователем в нормированный импульс стыка. Этот импульс пропускается блоком временной импульсной селекции в момент движения электронного пучка поперек стыка. Время появления импульса стыка относительно импульса симметрии определяет направление отклонения пучка электронов от стыка и преобразуется интегратором в аналоговую форму для коррекции положения пучка. Высокая помехозащищенность измерительного устройства появляется при сообщении сигналу от стыка свойства периодичности, за счет чего спектр сигнала смещается в ту область частот, где уровень помех минимален. Схема выделения сигнала от стыка позволяет эффективно подавлять помехи. При прохождении сигнала через избирательный усилитель, имеющий узкую полосу пропускания, уничтожаются импульсные и флуктуационные помехи, имеющиеся в спектре сигнала от стыка. Оставшиеся помехи, частотный спектр которых попадает в полосу пропускания избирательного усилителя, но отличен от спектра сигнала от стыка, подавляются фазовым дискриминатором.

Другим способом повышения помехозащищенности систем слежения за стыком по рентгеновскому излучению из канала проплавления является применения дифференциального рентгеновского датчика [98]. Измерительное устройство содержит два рентгеновских детектора: один с широкой зоной обзора, другой с узкой зоной обзора. Детектор с широкой зоной обзора установлен в плоскости, перпендикулярной стыку свариваемых деталей. Детектор с узкой зоной обзора, ширина которой меньше диаметра электронного пучка, ориентируется таким образом, чтобы проекция коллимационной щели пересекала стык под острым углом. В результате сканирования рентгеновский детектор и коллимированный рентгеновский детектор будут фиксировать изменения интенсивности рентгеновского излучения в зависимости от положения электронного пучка относительно стыка. По полученным сигналам детекторов определяется величина отклонения пучка, по которой формируется управляющее воздействие, корректирующее положение

электронного пучка относительно стыка свариваемых деталей. Совместное применение детектора с широкой зоной обзора и детектора с узкой зоной обзора в составе комбинированного датчика положения стыка позволяет повысить точность наведения пучка на стык соединения свариваемых деталей, а также устранить ошибки позиционирования электронного пучка.

Следует отметить, что работы в направлении создания систем автоматического позиционирования электронного пучка по стыку соединения свариваемых деталей будут активно проводиться и в дальнейшем, так как количество используемых в промышленности систем все еще исчисляется единицами.

1.2 Анализ влияния магнитных полей на положение электронного пучка в процессе ЭЛС

Одной из главных причин отклонения электронного пучка от стыка свариваемых деталей при ЭЛС является влияние магнитных полей, искривляющих траекторию движения электронов.

На движущийся в магнитном поле электрон действует сила Лоренца [110]

$$F = BV \sin \alpha,$$

где B – магнитная индукция;

α – угол между направлением движения электрона и магнитной силовой линией поля;

V (м/с) – скорость электрона, которая может быть рассчитана по известному ускоряющему напряжению U (В) по формуле [28]

$$V = \frac{5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U(1 + 0,983 \cdot 10^{-6}U)}}{1 + 1,967 \cdot 10^{-6}U}.$$

Сила Лоренца, действующая на электрон, движущийся вдоль направления силовых линий магнитного поля, не изменяет характер движения электрона, так как при $\alpha = 0$ $F = 0$. Если направление движения электрона не совпадает с направлением магнитных силовых линий поля, то сила Лоренца изменяет направление составляющей скорости электрона, перпендикулярной силовым линиям поля, заставляя электрон двигаться в магнитном поле по окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной силовым линиям поля. При $\alpha \neq 0$ и $\alpha \neq 90^\circ$ суммарная траектория движения электрона представляет собой пространственную спираль, ось которой параллельна вектору магнитной индукции, радиус зависит от скорости электрона и напряженности магнитного поля [110]:

$$R = \frac{mV}{eB},$$

а шаг спирали равен

$$h = \frac{2\pi mV \cos \alpha}{eB},$$

где $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ – заряд электрона, Кл;

m – масса электрона, определяемая по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}},$$

где $m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}$ – масса покоя электрона, кг;

$c = 2,977 \cdot 10^8$ – скорость света, м/с.

Отклонение электронного пучка в общем случае зависит от всех трех составляющих магнитного поля, направленных вдоль каждой из осей X , Y , Z (рису-

нок 1.5), где ось Z совпадает с оптической осью электронно-лучевой пушки, а ось Y параллельна стыку свариваемых деталей. Однако, основной вклад в отклонение пучка электронов от стыка вносит продольная к стыку составляющая индукции магнитного поля B_y .

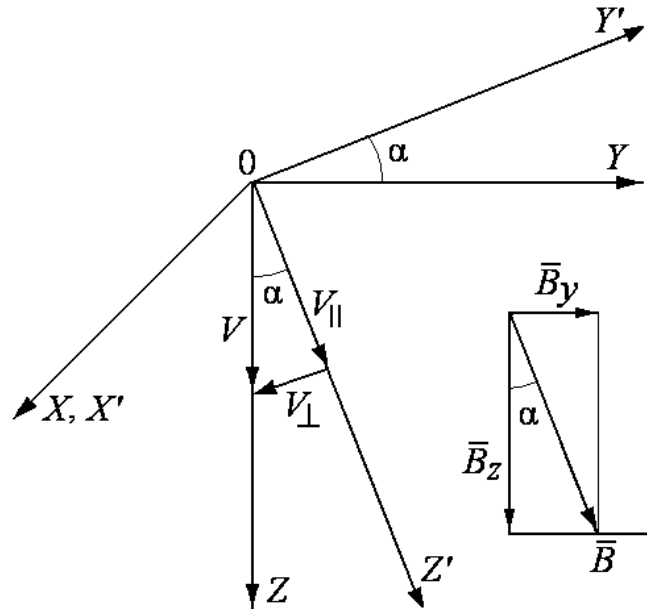


Рисунок 1.5 – К определению отклонения электронного луча в магнитном поле

Для оценки влияния магнитного поля на траекторию пучка электронов необходимо иметь формулы для расчета отклонения пучка от оси электронно-лучевой пушки, пригодные для расчетов на микроЭВМ в реальном масштабе времени. Интерес также представляет определение угла наклона траектории пучка, поскольку он характеризует отклонение сварного шва от плоскости стыка.

В работе [54] получены простые приближенные формулы, позволяющие определить угол ψ наклона траектории пучка и смещение x электронного пучка от оптической оси пушки, вызванных действием неоднородного магнитного поля, направленного перпендикулярно траектории электронного пучка:

$$\psi = \frac{e}{mV} \int_0^z B(z) dz, \quad x = \frac{e}{mV} \iint_0^z B(z) dz, \quad (1.2)$$

где $B(z)$ – закон распределения продольной составляющей индукции магнитного поля в пространстве между пушкой и свариваемым изделием.

Погрешность расчетов по формулам (1.2) для большинства случаев, имеющих место на практике, не превышает 2,5 % [100]. Однако, применение этих формул возможно только при известном законе распределения продольной составляющей индукции магнитного поля $B(z)$.

Искажение траектории электронного пучка и отклонение его от стыка может быть вызвано влиянием однородного магнитного поля Земли, намагниченностью оснастки, воздействием различных электромагнитных устройств, остаточной намагниченностью свариваемых изделий, действием тока термоЭДС [38; 65; 115]. Поля остаточной намагниченности могут быть индуцированы в ферромагнитных материалах при контакте с электромагнитными устройствами в процессе обработки или сварки. Кроме того, электронный пучок может быть отклонен магнитными полями, индуцированными токами, протекающими в цепях питания и заземления установки ЭЛС, а также спонтанными магнитными полями, вызванными токами термо-ЭДС, возникающей на возможных неоднородностях материала свариваемых деталей при сильных температурных градиентах, имеющих место при ЭЛС [94].

Величина индукции однородного магнитного поля Земли меняется по земной поверхности от 35 мкТл на экваторе до 65 мкТл вблизи полюсов. Пульсации геомагнитного поля часто наблюдаются главным образом в частотной области 0,001-5 Гц с амплитудами 0,0001-100 мкТл [32]. Напряженность магнитного поля Земли даже при максимально возможных колебаниях не превышает 80 А/м. Однако, как показывают расчеты [100], однородное магнитное поле с напряженностью 40 А/м при расстоянии от электронно-лучевой пушки до свариваемого изделия 250 мм и ускоряющем напряжении 100 кВ приводит к отклонению электронного пучка от стыка на 1,4 мм. Таким образом, магнитное поле Земли способно приводить к заметному отклонению электронного пучка и его влияние необходимо учитывать. Поэтому целесообразно ориентировать сварочные установки так, чтобы силовые линии геомагнитного поля были перпендикулярны плоскости

стыка. В этом случае возникающие отклонения пучка будут находиться в плоскости стыка.

Значительные отклонения электронного пучка от стыка возникают при электронно-лучевой сварке, если одна или обе свариваемые детали выполнены из ферромагнитных материалов. Причины этих отклонений связаны с наличием магнитных полей, которые взаимодействуют с электронным пучком и отклоняют его от стыка [35; 57; 65]. Это приводит к возникновению дефектов сварного соединения в виде непроваров. Магнитные поля в большинстве случаев обусловлены остаточной намагниченностью свариваемых деталей, которая формируется в ферромагнитных материалах при обработке и подготовке к сварке. Величина остаточной намагниченности свариваемых изделий зависит от многих факторов: магнитных свойств материала, его химического состава и структуры, магнитной предыстории (характера предыдущих воздействий на него магнитного поля), температуры, формы изделия.

Высокими магнитными качествами обладают сплавы железа с никелем, чистое железо, кремнистое железо, многие виды сталей и другие специальные сплавы. Величина магнитной индукции поля остаточной намагниченности этих материалов может достигать 1 мТл и выше. Такие поля способны отклонять электронный пучок от стыка соединения свариваемых деталей на величину порядка 15 мм [83]. Кроме того, отклонение пучка может иметь разное направление и величину по длине сварного шва, что определяется результирующим вектором индукции магнитного поля в конкретной точке.

В случае, когда изделие состоит из отдельных деталей, имеющих разное направление намагниченности, трудно предсказать направление результирующего магнитного потока и величину отклонения пучка электронов. Кроме того, магнитное поле при ЭЛС распределено неравномерно, и отклонение пучка изменяется в зависимости от значения индукции в канале проплавления и над ним [35]. Отклонение луча, в основном, происходит над поверхностью изделия, то есть за счет магнитных полей между изделием и электронно-лучевой пушкой. С увеличе-

нием толщины свариваемого металла, а также при снижении ускоряющего напряжения отклонение электронного пучка увеличивается [57].

При нагревании до температуры, превышающей точку Кюри, материалы теряют свои магнитные свойства, а вместе с тем и остаточную намагниченность. К уменьшению остаточной намагниченности приводят также механические сотрясения и вибрации.

Как правило, при разработке технологии ЭЛС ферромагнитных материалов необходимо оценить возможные отклонения пучка вследствие воздействия магнитных полей. Методика определения параметров отклонения электронного пучка приведена в работе [65]. В работе [35] также предложены зависимости отклонения электронного луча от режимов сварки деталей и расчетно-экспериментальная методика определения отклонения луча при ЭЛС по значениям остаточной магнитной индукции, измеренной прибором МХ-10.

Расчеты, проведенные с помощью соотношений (1.2), показывают, что расчетные и экспериментальные значения отклонения электронного пучка от заданной траектории могут отличаться практически в 2 раза [35; 36]. Возможными причинами несовпадения значений могут быть несовершенство расчетной методики, неверное определение топографии магнитного поля, а также изменение параметров пучка в процессе взаимодействия с материалом.

В работе [36] установлено, что на поле остаточной намагниченности свариваемых деталей может оказывать влияние плазма, быстро движущаяся поперек силовых линий поля и создающая собственное магнитное поле, вследствие чего начальное распределение индукции магнитного поля изменяется. Предложена формула для расчета изменения индукции магнитного поля в плазменном потоке

$$B(z) = B(0)e^{\alpha z},$$

где $B(0)$ – магнитная индукция на поверхности изделия;

α – коэффициент, зависящий от условий сварки.

Коэффициент α определяется экспериментальным путем для конкретных условий сварки, что затрудняет использование данной формулы.

При электронно-лучевой сварке разнородных материалов пучок электронов может быть отклонен от стыка в результате действия магнитных полей, индуцированных термоэлектрическими токами. Возбуждение термоэлектрического тока в свариваемом изделии связано с градиентом температур вдоль сварного шва, приводящим к возникновению термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС). Величина возникающей термоЭДС зависит от материала свариваемых деталей и температур горячего (T_2) и холодного (T_1) контактов [110]

$$E_T = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12}(T) dT,$$

где α_{12} – термоэлектрическая способность пары (или коэффициент термоЭДС).

Если интервал температур $T_2 - T_1$ невелик, то в его пределах можно считать, что термоэлектрическая способность пары α_{12} – постоянная величина, и

$$E_T = \alpha_{12}(T_2 - T_1).$$

В простейшем случае коэффициент термоЭДС определяется только материалами свариваемых изделий, однако он зависит и от температуры, и в некоторых случаях с изменением температуры α_{12} меняет знак.

Величина термо-ЭДС весьма сильно зависит от наличия примесей в материале, которые могут настолько изменить величину термо-ЭДС, что это будет сказываться и на положении материала в ряду, определяющем направление тока [82]. Кроме того, значительное влияние на величину термо-ЭДС оказывает механическая и термическая обработка свариваемых деталей. Структурно-фазовые превращения в материале и образование равновесных твердых растворов также

оказывают влияние на величину термо-ЭДС и могут приводить к смене знака коэффициента α_{12} [70].

Исследованию термоэлектрических явлений при сварке разнородных материалов посвящены работы [29; 30; 34; 37; 40; 65; 77; 112; 115; 120; 125; 131; 134; 135]. Результаты измерений отклонения электронного пучка от стыка и термо-ЭДС при ЭЛС различных комбинаций разнородных металлов, представленные в работе [112], показали, что пучок электронов отклоняется в сторону металла, имеющего больший термоэлектрический коэффициент; угол отклонения электронного пучка приблизительно прямо пропорционален термо-ЭДС и обратно пропорционален корню квадратному из ускоряющего напряжения. Величина циркулирующих термоэлектрических токов может достигать 100 А и более [115], причем эти токи совершенно независимы от тока электронного пучка, который обычно составляет от 10 до 500 мА. Отклонение пучка электронов от оси пушки, вызванное действием магнитного поля термоэлектрических токов, происходит, главным образом, в пространстве между пушкой и свариваемым изделием. Авторами работы [115] было предложено простое уравнение для определения угла отклонения электронного пучка, в котором угол прямо пропорционален плотности магнитного потока и расстоянию между электронно-лучевой пушкой и свариваемым изделием, и обратно пропорционален квадратному корню из ускоряющего напряжения. Кроме того, результаты исследований показали, что при сварке металлов, имеющих меньшие электрические сопротивления, отклонение электронного пучка от стыка больше, чем при сварке металлов с более высокими электрическими сопротивлениями. Было установлено, что направление смещения электронного пучка от стыка обусловлено только знаком термоэлектрической способности пары свариваемых материалов и не зависит от их магнитной проницаемости. Методики определения коэффициентов термо-ЭДС материалов предложены в работах [29; 134]. Сложность процессов и явлений, имеющих место в кристаллической решетке материалов при нагреве, крайне затрудняет точный расчет коэффициентов термо-ЭДС металлов и сплавов. В работе [64] предложена расчетно-экспериментальная методика определения индукции магнитного поля в канале

проплавления при электронно-лучевой сварке, учитывающая распределение плотности токов вдоль линии сплавления и размеры немагнитной зоны, образующейся при сварке ферромагнитных материалов в области температур выше точки Кюри. Кроме того, установлено, что токи плотностью до 10^5 А/м², протекающие на расстоянии более 60 мм от стыка, незначительно влияют на магнитную индукцию в канале проплавления и на практике их можно не учитывать.

В работе [136] представлена пространственная модель распределения термоэлектрических токов, вызванных температурными градиентами при электронно-лучевой сварке разнородных материалов большой толщины, основанная на использовании метода конечных элементов.

Отклонение электронного луча существенно влияет на формирование шва при ЭЛС разнородных металлов, что необходимо учитывать при разработке технологии сварки. Так в работе [34] рекомендуется уменьшать глубину проплавления, осуществлять сварку в несколько проходов и т.д.

Электронно-лучевая сварка разнородных материалов осложняется еще и тем, что учесть влияние магнитных полей, вызванных действием термоэлектрических токов, на этапе предварительной записи траектории стыка не представляется возможным, так как непосредственно во время сварки на рабочем токе это влияние существенно изменится за счет значительного увеличения сварочных токов и резкого повышения температуры материала в зоне сварки.

1.3 Способы устранения влияния магнитных полей при ЭЛС

Обычно система слежения за стыком компенсирует отклонение пучка, вызванное действием магнитного поля, однако даже при точном совмещении пучка со стыком на поверхности свариваемых деталей возникает погрешность совмещения пучка со стыком в корне шва, определяемая выражением $\varepsilon = \psi \cdot \delta$, где ψ – угол наклона электронного пучка; δ – толщина изделия. Эта погрешность объясняется тем, что электронный пучок падает на свариваемую поверхность под углом.

Практика ЭЛС показала, что при толщине свариваемых деталей 40 мм смещение в корне шва может достигать 3...5 мм [115].

Величина магнитной индукции на поверхности свариваемого стыка не должна превышать ± 100 мкТл. При превышении указанных уровней магнитной индукции требуется принятие дополнительных мер, обеспечивающих предотвращение отклонения пучка полев от стыка более, чем на $\pm 0,10$ мм [84].

С целью защиты электронного пучка от воздействия магнитных полей применяют различные способы уменьшения их влияния [8; 33; 42; 67; 83; 95; 119; 122; 123; 130]. К ним относятся предварительное размагничивание изделия, экранирование электронного пучка, компенсация магнитного поля в зоне обработки.

Размагничивание можно осуществить тремя способами: нагреванием деталей выше температуры точки Кюри; размагничиванием постоянным магнитным полем; размагничиванием переменным магнитным полем [48]. Хотя все три способа могут обеспечить размагничивание до нулевого значения намагниченности, характер магнитной доменной структуры, создаваемой каждым из них, различен, что приводит к различию и некоторым свойствам вещества (например, начальной магнитной восприимчивости, магнитострикции и т.д.).

К наиболее полному размагничиванию приводит нагрев образца или детали выше температуры точки Кюри (при этом вещество полностью теряет свои ферромагнитные свойства) с последующим охлаждением в отсутствие внешнего магнитного поля. Однако в большинстве случаев такой способ размагничивания недопустим, так как в результате нагрева могут измениться механические и другие свойства материала. Кроме того, температура точки Кюри, например, сплавов на основе железа превышает 500 °С, поэтому нагрев крупногабаритных деталей является дорогостоящим процессом.

Размагничивание постоянным магнитным полем заключается в воздействии на образец или деталь постоянным магнитным полем обратной направленности относительно поля остаточной намагниченности. После выключения внешнего размагничивающего поля намагниченность детали частично восстанавливается,

поэтому необходимо подбирать такое размагничивающее внешнее поле, после выключения которого остаточная намагниченность была бы равна нулю.

Другой широко распространенный способ размагничивания заключается в циклическом перемагничивании размагничиваемой детали переменным магнитным полем с плавно убывающей до нуля амплитудой. При этом максимальная величина амплитуды переменного размагничивающего поля, как правило, должна быть не меньше величины намагничивающего поля. В качестве источника переменного магнитного поля обычно используют электромагнит. Уменьшение амплитуды магнитного поля, действующего на объект размагничивания, можно обеспечить уменьшением амплитуды тока в электромагните, либо, в более простых случаях, увеличением расстояния между электромагнитом и размагничиваемым объектом. Эффективность размагничивания зависит от частоты размагничивающего поля, скорости его убывания, толщины детали и глубины проникновения поля. Чем толще образец, тем ниже должна быть частота размагничивающего поля. Скорость размагничивания должна быть тем меньше (число циклов размагничивания тем больше), чем выше магнитная проницаемость материала. Согласно техническим условиям, образец из пластин листовой электротехнической стали толщиной 0,35-0,5 мм размагничивают в течение 1 минуты плавным уменьшением магнитного поля частотой 50 Гц от максимальной напряженности поля 2000-2500 А/м до нуля. Как правило, для размагничивания достаточно 30–60 циклов перемагничивания [103].

Используют различные типы установок и устройств для размагничивания:

- туннельного типа;
- контейнерного типа;
- многополюсные постоянные магниты, приводимые во вращение;
- электромагниты переменного тока с разомкнутой (открытой) магнитной системой.

Установка туннельного типа представляют собой катушку с проходным отверстием (туннелем), которая подключается к сети переменного тока. Размагничиваемый предмет пропускается через туннель. Размагничивание производится

с помощью переменного магнитного поля с затухающей амплитудой. Уменьшение амплитуды магнитного поля происходит при перемещении размагничиваемого объекта через туннель и удалении от него.

При размагничивании деталей в установках контейнерного типа размагничиваемый объект помещают в контейнер, находящийся внутри электромагнита переменного тока. Обмотка электромагнита подключается через контроллер к сети переменного тока, и в контейнере создается переменное магнитное поле с затухающей амплитудой, частота и скорость затухания которого определяются контроллером.

Размагничивание с помощью многополюсных постоянных магнитов, приводимых во вращение, осуществляется переменным магнитным полем с затухающей амплитудой, которое создается при вращении постоянного магнита. Изменение амплитуды поля происходит за счет перемещения магнита вдоль размагничиваемого объекта и удаления от него. Скорость вращения постоянного магнита определяет частоту переменного магнитного поля.

Размагничивание с помощью электромагнита переменного тока с разомкнутой магнитной системой заключается в воздействии незамкнутого участка магнитной системы на размагничиваемый объект. При этом амплитуда индукции магнитного поля в зоне расположения объекта изменяется от максимума до нуля при движении электромагнита вдоль поверхности образца.

Для предотвращения негативного влияния остаточной намагниченности конструкции перед ЭЛС размагничивают путем установки на неподвижные конструкции электрических контуров с током, изменяемым по определенной программе; перемещения подвижных конструкций относительно электрического контура с переменным током постоянной амплитуды; пропускания через конструкцию электрического тока, изменяемого по заданной программе, и другое.

Для размагничивания крупногабаритных ферромагнитных изделий их подвергают воздействию переменным магнитным полем с амплитудой, уменьшающейся от некоторого максимального значения до нуля, и частотой, зависящей от магнитной проницаемости и толщины изделия. Переменное магнитное поле мо-

жет быть в виде последовательности знакопеременных уменьшающихся по амплитуде импульсов [79]. Импульсы генерируются специальной размагничивающей обмоткой. В размагничивающем устройстве [73] предлагается одновременно с низкочастотными импульсами воздействовать на изделие переменным магнитным полем с амплитудой, уменьшающейся от некоторого максимального значения до нуля, и частотой, которая совпадает с собственной частотой механического резонанса размагничиваемого изделия. Поле создается путем увеличения крутизны нарастающего и спадающего фронтов импульса за счет подключения обрабатывающей обмотки к аккумуляторной батарее.

Недостатками этих способов являются затраты значительного количества электроэнергии и времени, в течение которого напряженность размагничивающего поля уменьшается от некоторого максимального значения до нуля. Так, для большинства материалов число размагничивающих периодов должно быть порядка 40-50 при частоте 1-10 Гц.

Предварительное размагничивание позволяет значительно снизить уровень намагниченности свариваемых деталей, однако не исключает повторного случайного намагничивания. Кроме того, размагничивание крупногабаритных деталей представляет собой трудоемкий и дорогостоящий процесс.

Защиту от внешних полей оказывает экранирование электронного пучка магнитным экраном, выполненным в виде трубы из магнитомягкого материала с высокой относительной магнитной проницаемостью [75; 96; 115]. При наличии экрана линии магнитной индукции проходят в основном по его стенкам, которые обладают малым магнитным сопротивлением по сравнению с воздушным пространством внутри экрана. Качество экранирования зависит от магнитной проницаемости экрана и сопротивления магнитопровода. Чем толще экран и меньше стыков, идущих поперек направления линий магнитной индукции, тем выше эффективность экранирования. Однако такой экран оказывает защиту от внешних полей только в пространстве его размещения, значительно снижает возможность наблюдения за процессом ЭЛС, обладает минимальной эффективностью экранирования на низких частотах и его трудно внедрить в существующую систему.

Известен способ защиты пучка электронов от влияния магнитного поля путем его компенсации в зоне сварки. Для этого с помощью феррозондового датчика измеряется продольная составляющая магнитного поля в пространстве между пушкой и свариваемым изделием и с помощью электромагнитных катушек осуществляется его компенсация [11].

Для контроля влияния продольного магнитного поля на пучок электронов можно использовать коллимированный рентгеновский датчик, ориентированный вдоль стыка свариваемых деталей [114]. Пучок электронов на короткое время (2 мс) выводят из сварочной ванны и перемещают по поверхности изделия поперек стыка, по возникающему рентгеновскому излучению определяют время прохождения луча в зоне обзора рентгеновского датчика, по которому судят об отклонении электронного пучка, обусловленном магнитными помехами. Компенсацию влияния магнитных помех осуществляют с помощью компенсационных катушек магнитного поля, установленных вдоль оси пучка. Недостатком данного способа является необходимость периодического кратковременного прекращения сварки и вывода электронного пучка из сварочной ванны.

Компенсацию влияния продольной составляющей магнитного поля на электронный пучок можно осуществить приложением к стыку свариваемых деталей локального компенсирующего магнитного поля, параллельного плоскости стыка [74]. Компенсирующее магнитное поле генерируется электромагнитными катушками и устраняет отклонение электронного пучка от стыка. Величина индукции компенсирующего магнитного поля определяется экспериментально при сварке образцов из известных материалов с определенной глубиной проплавления, либо определяется методом численного моделирования. Это значительно снижает точность совмещения электронного пучка со стыком и затрудняет применение данного способа устранения влияния магнитных полей. Кроме того, рассмотренный способ неприменим при сварке деталей с остаточной намагниченностью, поскольку магнитное поле в этом случае носит случайный характер.

При сварке изделий из разнородных металлов и сплавов большой толщины с целью устранения влияния на электронный пучок магнитных полей

термоэлектрических токов и снижения вероятности образования непроваров по толщине свариваемого изделия можно использовать изменение угла наклона оси пучка относительно стыка [76]. Пучок отклоняют в сторону материала с отрицательным термоэлектрическим потенциалом под острым углом к стыку, для этого осуществляют поворот пушки или свариваемого изделия. Величину угла определяют из соотношения

$$\varphi(0) = \sqrt{\frac{e}{2mU}} B_x(0) \left[\frac{1}{k} + \frac{\delta}{6} \right],$$

где e – заряд электрона;

m – масса электрона;

U – ускоряющее напряжение;

$B_x(0)$ – магнитная индукция на поверхности стыка;

δ – толщина свариваемого изделия;

k – коэффициент, учитывающий для каждой пары разнородных материалов параметры стыка и температуру нагрева.

С обратной стороны свариваемой детали под воздействием магнитных полей термоэлектрических токов ось пучка будет отклонена на такой же угол в сторону материала с положительным термоэлектрическим потенциалом.

Недостатками данного способа является необходимость наличия механизма поворота электронно-лучевой пушки или свариваемого изделия, а также экспериментальное определение угла наклона пушки относительно изделия.

1.4 Выводы и постановка задачи

1. При ЭЛС широко используются различные системы для совмещения электронного пучка со стыком свариваемых деталей. Однако существующие автоматические устройства позиционирования луча по стыку не в полной мере удо-

влетворяют современным требованиям точности и надежности наведения пучка на стык соединения.

2. Основной причиной отклонения пучка электронов от стыка является наличие магнитных помех, действующих в процессе электронно-лучевой сварки. При этом возможны большие отклонения электронного пучка, во много раз превышающие допустимые значения.

3. Наиболее перспективным способом защиты пучка электронов от магнитного поля является его компенсация в зоне сварки.

Исходя из потребностей производства и учитывая достигнутый технический уровень систем контроля и компенсации магнитных полей, действующих на электронный пучок в процессе ЭЛС, в данной работе решались следующие научно-технические задачи:

- разработка математической модели влияния магнитного поля термоэлектрических токов на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке разнородных материалов;

- разработка математической модели распределения индукции магнитного поля остаточной намагниченности в пространстве электронно-лучевой пушки – свариваемое изделие;

- разработка метода контроля отклонения сканирующего электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванного действием магнитных полей;

- разработка математической модели метода контроля отклонения сканирующего электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванного действием магнитных полей;

- разработка системы автоматической компенсации влияния магнитных полей, вызванных токами термо-ЭДС, на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке разнородных материалов;

- разработка системы автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка при электронно-лучевой сварке изделий с остаточной намагниченностью.

ГЛАВА 2

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ ПУШКА – СВАРИВАЕМОЕ ИЗДЕЛИЕ

Как известно, при сварке разнородных металлов и сплавов возникает магнитное поле, наводимое токами термо-ЭДС, а при сварке ферромагнитных материалов имеет место остаточная намагниченность свариваемых деталей. Эти поля приводят к отклонению пучка электронов от оптической оси электронно-лучевой пушки как в промежутке между пушкой и свариваемым изделием, так и по глубине канала проплавления. Для оценки влияния таких магнитных полей на траекторию электронного пучка необходимо получить модели распределения индукции магнитных полей в пространстве пушка – свариваемое изделие.

2.1 Математическая модель распределения магнитной индукции поля термоэлектрических токов

Магнитное поле, наводимое токами термо-ЭДС, зависит от величины термоэлектрических токов, протекающих в свариваемом изделии. Согласно закону Ома сила тока I в замкнутой неразветвленной цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе E и обратно пропорциональна полному сопротивлению всей цепи R , то есть

$$I = \frac{E}{R}.$$

Полное сопротивление всей цепи равно сумме сопротивлений R_1 и R_2 свариваемых материалов. Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле

$$R = \frac{\rho l_R}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление вещества проводника;

l_R – длина проводника;

S – площадь сечения проводника.

Сопротивление цепи, составленной из двух проводников, равной длины и одинакового сечения, будет равно

$$R = R_1 + R_2 = \frac{(\rho_1 + \rho_2)l_R}{2S},$$

где ρ_1, ρ_2 – удельные сопротивления свариваемых материалов.

Величина термоэлектрических токов пропорциональна термо-ЭДС, которая зависит от материала свариваемых деталей и температур горячего (T_2) и холодного (T_1) контактов и в небольшом интервале температур может быть вычислена по формуле

$$E_T = \alpha_{12}(T_2 - T_1),$$

где α_{12} – термоэлектрическая способность пары свариваемых материалов.

Таким образом, термоэлектрический ток, протекающий в свариваемом изделии, описывается выражением

$$I = \frac{2\alpha_{12}S(T_2 - T_1)}{(\rho_1 + \rho_2)l_R}. \quad (2.1)$$

Здесь T_2 – температура плавления материала; T_1 – температура сварного шва в месте замыкания цепи термоэлектрического тока.

При электронно-лучевой сварке со сквозным проплавлением обрабатываемое изделие может рассматриваться как бесконечная пластина, ограниченная двумя плоскостями, с равномерным распределением температуры по толщине изделия, а электронный пучок – как линейный быстродвижущийся источник теплоты [97]. В этом случае количество теплоты, вводимой на единицу длины шва, зависит от скорости сварки. Погрешность в расчетах снижается при уменьшении коэффициента поверхностной теплоотдачи, а так как ЭЛС осуществляется в вакууме, то этот коэффициент может быть принят равным нулю. Для определения температуры сварного шва в местах замыкания цепи воспользуемся уравнением распределения температур в бесконечной пластине без теплоотдачи с поверхности, нагреваемой быстродвижущимся линейным источником,

$$T(x, y) = k_{12} T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y}} \exp\left(\frac{x^2 v}{4ay}\right), \quad (2.2)$$

где k_{12} – коэффициент, характеризующий теплофизические свойства свариваемых материалов;

T_{\max} – максимальная температура свариваемого материала (температура испарения свариваемого материала), К;

v – скорость сварки, м/с;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

x – координата поперек стыка, м;

y – координата вдоль стыка, м.

Выражение (2.2) описывает температуру области, находящейся позади электронного пучка.

Температура в центре шва ($x = 0$) определяется по формуле

$$T(y) = k_{12} T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y}}. \quad (2.3)$$

Точка с температурой T_2 находится на границе сварочной ванны позади электронного пучка и имеет координату y_w по оси y . Таким образом, температура горячего контакта равна

$$T_2 = k_{12} T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y_w}}. \quad (2.4)$$

Координату точки с температурой T_1 по оси y определим, исходя из соображений, что термоэлектрический ток в этой точке будет иметь максимальное значение. Для этого предположим, что проводник с термоэлектрическим током имеет форму эллипса (рисунок 2.1), длина которого рассчитывается по приближенной формуле

$$l_R = \pi(a_y + a_x), \quad (2.5)$$

где a_x – малая полуось эллипса;

a_y – большая полуось эллипса, определяемая как

$$a_y = \frac{-y + y_w}{2}.$$

Подставляя (2.3), (2.4) и (2.5) в (2.1), получим

$$I = \frac{2\alpha_{12} S k_{12} T_{\max} \left(\sqrt{\frac{v}{-y_w}} - \sqrt{\frac{v}{-y}} \right)}{(\rho_1 + \rho_2) \pi \left(\frac{-y + y_w}{2} + a_x \right)}.$$

Дифференцируя полученное выражение по переменной y и приравнявая производную к нулю, получим уравнение, решением которого будет являться координата y_{\max} точки замыкания цепи максимального термоэлектрического тока.

Температуру в этой точке можно определить по формуле

$$T_1 = k_{12} T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y_{\max}}}.$$

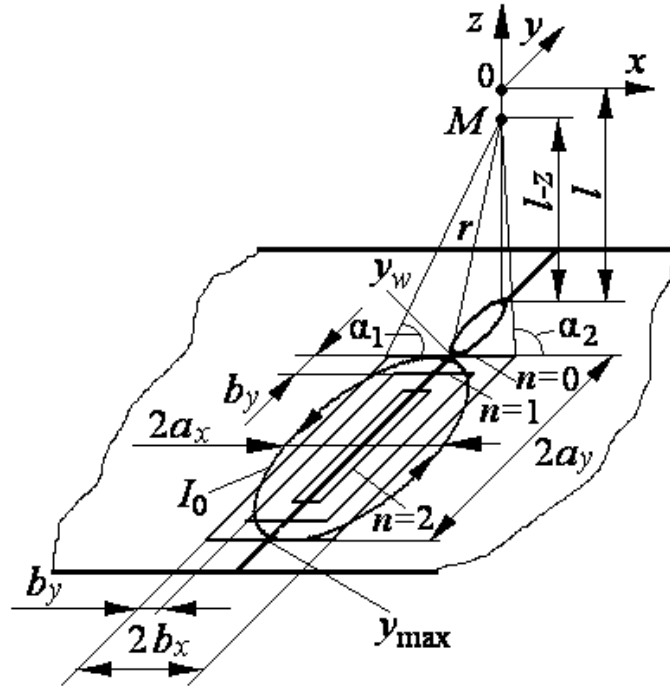


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение модели

Координаты y_w и y_{\max} ограничивают по оси y контур с максимальным термоэлектрическим током, внутри которого циркулируют термоэлектрические токи с меньшими значениями. Принимая во внимание то, что свариваемое изделие нагревается по глубине изделия равномерно, разобьем пространство внутри контура с максимальным током на отдельные проводники прямоугольного сечения одинаковой ширины, равной b_y , как показано на рисунке 2.1, и одинаковой глубины, равной толщине изделия δ .

Тогда величины циркулирующих в изделии термоэлектрических токов можно определить по формуле

$$I_n = \frac{2\alpha_{12}\delta b_y \left(k_{12}T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y_w + nb_y}} - k_{12}T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y_{\max} - nb_y}} \right)}{\pi(\rho_1 + \rho_2) \left(\frac{-y_{\max} + y_w}{2} + a_x - 2nb_y \right)}, \quad (2.6)$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Наибольшее влияние на отклонение электронного пучка от стыка свариваемого изделия оказывают составляющие магнитного поля, направленные вдоль линии сварки, которые образуются отрезками тока, перпендикулярными сварному шву. Аппроксимируем контуры с термоэлектрическими токами прямоугольниками длиной $(-y_{\max} + y_w - 2nb_y)$ и шириной $(2b_x - 2nb_y)$ и будем рассматривать только те участки тока, которые перпендикулярны направлению сварки.

По закону Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля отрезка прямого тока конечной длины описывается выражением [110]

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

r – расстояние от прямого тока до рассматриваемой точки, м.

В случае, когда $\alpha_2 = 180 - \alpha_1$, $\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 = 2\cos \alpha_1$ и для индукции магнитного поля отрезка прямого тока конечной длины получаем формулу

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cos \alpha_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot \frac{b_x}{\sqrt{b_x^2 + r^2}}, \quad (2.7)$$

где b_x – половина длины проводника с током.

В условиях сварки проводники с токами, имеющими противоположные направления, удалены от оптической оси электронно-лучевой пушки на расстояния $(-y_w + nb_y)$ и $(-y_{\max} - nb_y)$, а расстояние от рассматриваемой точки M до по-

верхности свариваемых деталей равно $(l - z)$, где l – расстояние от изделия до электронно-лучевой пушки, тогда

$$r_n^+ = \sqrt{(-y_w + nb_y)^2 + (l - z)^2},$$

$$r_n^- = \sqrt{(-y_{\max} - nb_y)^2 + (l - z)^2},$$

и выражение (2.7) можно записать в виде

$$B_n^+(z) = \frac{\mu_0 I_n}{2\pi \sqrt{(-y_w + nb_y)^2 + (l - z)^2}} \cdot \frac{b_x - nb_y}{\sqrt{(b_x - nb_y)^2 + (-y_w + nb_y)^2 + (l - z)^2}}, \quad (2.8)$$

$$B_n^-(z) = \frac{\mu_0 I_n}{2\pi \sqrt{(-y_{\max} - nb_y)^2 + (l - z)^2}} \cdot \frac{b_x - nb_y}{\sqrt{(b_x - nb_y)^2 + (-y_{\max} - nb_y)^2 + (l - z)^2}}. \quad (2.9)$$

Знаки «+» и «-» показывают, что вектора магнитной индукции направлены встречно друг другу.

Используя выражения (2.6), (2.8) и (2.9), результирующее отклонение электронного пучка от оптической оси пушки можно рассчитать по выражению (1.2).

Для сравнительной оценки рассчитанных по модели отклонений шва от стыка и отклонений, полученных экспериментальным путем в работе [134], использовались материалы и их характеристики, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Свойства свариваемых сплавов

Материал детали	Температура плавления, К	$a \times 10^5$, м ² /с	$\rho \times 10^{-7}$, Ом·м
Нержавеющая сталь SS 304	1700	0,45	6,667
Низкоуглеродистая сталь	1783	1,28	1,136

Результаты расчетов для сварки нержавеющей стали SS 304 и низкоуглеродистой стали показали, что при ускоряющем напряжении 60 кВ, скорости сварки 40 м/ч, толщине изделия 2,5 см смещение шва от стыка на глубине 6 мм составляет 0,6 мм, что согласуется с экспериментальными данными.

Угол касательной к траектории электронного пучка составил $\psi = 0,1$ рад. В корне шва такой угол вызовет отклонение $\epsilon_k = 0,1 \cdot 25 = 2,5$ мм, что для электронно-лучевой сварки является недопустимым значением.

2.2 Математическая модель распределения магнитной индукции поля остаточной намагниченности

Магнитное поле намагниченных тел может быть представлено как результат взаимодействия магнитных полей эквивалентных проводников с током.

Магнитное поле, создаваемое намагниченным веществом, можно описать введением макроскопических «молекулярных токов», отличных от тока проводимости [58]. Вектор объемной плотности молекулярных токов j' определяется соотношением [108]

$$j' = \text{rot}M, \quad (2.10)$$

где M – намагниченность вещества, А/м.

Сила молекулярного тока I' через произвольную поверхность S , опирающуюся на контур L , определяется интегральным соотношением, следующим из выражения (2.10),

$$I' = \int_S j' dS = \oint_L M dl.$$

В отличие от тока проводимости, молекулярный ток через полную площадь любого сечения намагниченного тела равен нулю.

Поле магнитной индукции $B'(r)$, создаваемое намагниченным веществом, эквивалентно полю, создаваемому молекулярными токами $j'(r)$ в вакууме. При этом полный вектор магнитной индукции B определяется эффективной плотностью тока j_Σ , равной сумме плотности токов проводимости и молекулярных токов $j_\Sigma = j + j'$.

С введением молекулярных токов дифференциальное и интегральное уравнения магнитостатики можно записать в виде

$$\operatorname{rot} B = \mu_0 j_\Sigma,$$

$$\oint_L B dl = \mu_0 \int_S j_\Sigma dS = \mu_0 I_\Sigma,$$

где $I_\Sigma = I + I'$ – величина эффективного тока через поверхность S , опирающуюся на контур L .

Магнитное поле, создаваемое намагниченным телом с фиксированным распределением намагниченности $M(r)$, можно найти, заменив намагниченное тело эквивалентным распределением молекулярных токов. Индукция магнитного поля рассчитывается по найденному распределению молекулярных токов аналогично методам нахождения индукции магнитного поля токов в вакууме.

Очевидно, что при отклонении электронного пучка от стыка в свариваемом изделии присутствуют эквивалентные токи, пересекающие стык под прямым углом, поскольку именно такие токи ответственны за возникновение намагниченности, направленной вдоль стыка свариваемого изделия. Такая намагниченность наблюдается в магнитном поле прямого тока, протекающего поперек стыка свариваемых деталей.

По закону Био-Савара-Лапласа индукция магнитного поля отрезка прямого тока конечной длины при равных расстояниях от рассматриваемой точки пространства до концов проводника описывается выражением

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cos \alpha_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

I – сила тока, А;

a – длина половины проводника с током, м;

r – расстояние от оси прямого проводника с током до заданной точки, м.

Индукция магнитного поля бесконечно длинного прямого проводника с током находится по формуле

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (2.11)$$

Если длина проводника (намагниченного изделия) $a \geq 2r$, то $\cos \alpha_1$ лежит в пределах от 0,9 до 1, в этом случае проводник с током может рассматриваться как бесконечный. С увеличением расстояния от проводника с током до рассматриваемой точки увеличивается влияние длины проводника на величину магнитной индукции. При этом магнитная индукция уменьшается. Однако это влияние становится существенным в отдалении от намагниченного тела, где магнитная индукция и так мала, поэтому влияние на суммарное отклонение электронного пучка от оптической оси пушки будет незначительным. В связи с этим будем рассматривать бесконечный проводник с током.

Если ток распределен равномерно по сечению прямого цилиндрического проводника, радиус сечения которого равен R , то индукция магнитного поля внутри проводника с током определяется выражением

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r.$$

Отсюда индукция магнитного поля на поверхности проводника ($r = R$)

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} R = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}.$$

Таким образом, выражение (2.11) можно переписать в следующем виде

$$B = \frac{B_0 \cdot R}{r}.$$

Такой же результат получается, если проводник имеет квадратное сечение.

Если началом координат является электронно-лучевая пушка, расстояние от которой до свариваемого изделия равно l , а $R = \delta/2$ то закон распределения магнитной индукции в рабочем пространстве по оси Z будет определяться выражением

$$B(z) = B_0 \frac{\frac{\delta}{2}}{\frac{\delta}{2} + (l - z)}, \quad (2.12)$$

где B_0 – величина магнитной индукции на поверхности свариваемого изделия вблизи стыка и в свариваемом изделии.

Выражение (2.12) описывает закон изменения магнитной индукции в пространстве электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие.

Для оценки адекватности полученной модели распределения магнитной индукции поля остаточной намагниченности в рабочем пространстве электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие произведено сравнение экспериментальных и рассчитанных по модели данных. В таблице 2.2 приведены значения $H_i(z)$ продольной к стыку составляющей напряженности магнитного поля, измеренные цифровым измерителем магнитных полей с феррозондовым датчиком на различных расстояниях от намагниченного изделия толщиной 50 мм, а также значения, рассчитанные по формуле [58]

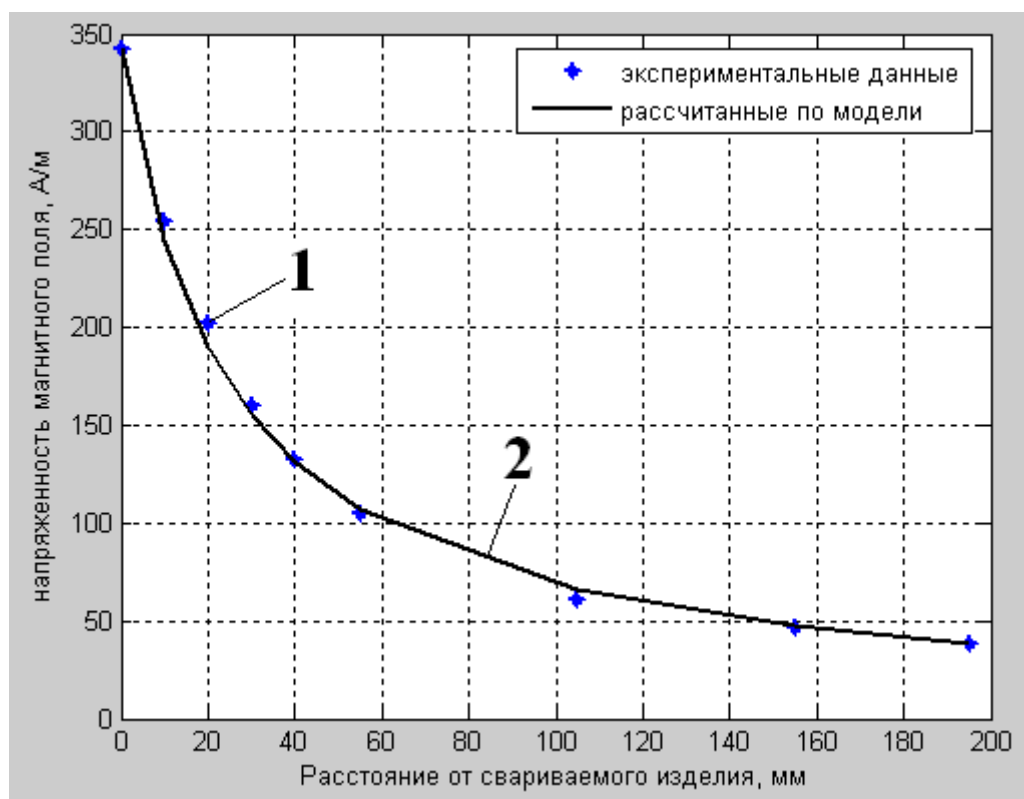
$$H_x(z) = \frac{B(z)}{\mu_0},$$

где $B(z)$ рассчитывается по формуле (2.12).

Таблица 2.2 – Экспериментальные и расчетные значения напряженности магнитного поля остаточной намагниченности

$l - z$, мм	0	10	20	30	40	55	105	155	195
$H_i(z)$, А/м	342	254	202	160	133	105	61	47	38
$H_{xi}(z)$, А/м	342	244,3	190	155,5	131,5	106,9	65,8	47,5	38,9

На рисунке 2.2 представлены экспериментальные данные изменения напряженности магнитного поля в пространстве между электронной пушкой и свариваемым изделием, а также кривая, рассчитанная по модели.



1 – экспериментальные данные; 2 – кривая, рассчитанная по модели

Рисунок 2.2 –Изменение напряженности магнитного поля в пространстве между изделием и электронно-лучевой пушкой

Рассчитаем среднюю относительную ошибку аппроксимации по формуле

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|H_i(z) - H_{xi}(z)|}{H_i(z)} \cdot 100\%,$$

где N – количество измерений.

Средняя относительная ошибка аппроксимации составляет

$$\bar{A} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \frac{|H_i(z) - H_{xi}(z)|}{H_i(z)} \cdot 100\% = 2,98\%.$$

Полученное значение средней ошибки аппроксимации, не превышающее 5 %, свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

Подставляя выражение (2.12) в формулы (1.2) и интегрируя по z , получим выражения для определения угла наклона ψ траектории луча и отклонения x пучка электронов от оси электронно-лучевой пушки:

$$\psi = \frac{e}{mV} \int_0^z B_0 \frac{R}{R + (l - z)} dz = \frac{e}{mV} B_0 R [\ln(R + l) - \ln(R + (l - z))], \quad (2.13)$$

$$x = \frac{e}{mV} B_0 R [z + (R + l - z) \ln(R + l - z) + (z - R - l) \ln(R + l)]. \quad (2.14)$$

Зная величину отклонения луча от оси электронно-лучевой пушки, нетрудно рассчитать значение индукции поля намагниченности на поверхности изделия вблизи стыка.

Так в работе [83] рассмотрены поля остаточной намагниченности при электронно-лучевой сварке стали типа АБ толщиной 150 мм. Отклонение луча от оси шва в результате действия полей остаточной намагниченности достигало 15 мм.

Используя формулу (2.14) при $R = 75$ мм, $l = 250$ мм и ускоряющем напряжении $U = 60$ кВ, получим $B_0 = 1,2$ мТл.

В таблице 2.3 представлены расчеты углов наклона касательной к траектории пучка электронов и отклонений ϵ_k в корне шва при сварке деталей различной толщины в условиях действия полей остаточной намагниченности. Расчеты производились по формулам (2.13) и (1.1).

Таблица 2.3 – Отклонения электронного пучка при сварке изделий с остаточной намагниченностью

δ , мм	50		100		150	
B_0 , мТл	ψ , рад	ϵ_k , мм	ψ , рад	ϵ_k , мм	ψ , рад	ϵ_k , мм
0,94	0,0662	3,3	0,099	9,9	0,1215	18,2
0,5	0,0352	1,8	0,0526	5,3	0,0646	9,7
0,4	0,0282	1,4	0,0421	4,2	0,0517	7,8

Результаты расчетов показывают, что полученные отклонения в корне шва не позволяют производить электронно-лучевую сварку без принятия специальных мер по предотвращению влияния на электронный пучок полей остаточной намагниченности свариваемых деталей [43].

2.3 Выводы

1. Математическая модель распределения магнитной индукции поля термоэлектрических токов в пространстве электронно-лучевой пушки – свариваемое изделие выражается соотношениями

$$B_n^+(z) = \frac{\mu_0 I_n}{2\pi \sqrt{(-y_w + nb_y)^2 + (l - z)^2}} \cdot \frac{b_x - nb_y}{\sqrt{(b_x - nb_y)^2 + (-y_w + nb_y)^2 + (l - z)^2}},$$

$$B_n^-(z) = \frac{\mu_0 I_n}{2\pi \sqrt{(-y_{\max} - nb_y)^2 + (l - z)^2}} \cdot \frac{b_x - nb_y}{\sqrt{(b_x - nb_y)^2 + (-y_{\max} - nb_y)^2 + (l - z)^2}},$$

где $n = 0, 1, 2, 3 \dots$;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

l – расстояние от изделия до электронно-лучевой пушки, м;

y_w, y_{\max} – координаты точек замыкания цепи максимального термоэлектрического тока, горячий и холодный контакты соответственно;

b_x – половина длины проводника с максимальным термоэлектрическим током, м;

b_y – ширина проводников с током, м;

I_n – величины циркулирующих термоэлектрических токов, определяемые выражением

$$I_n = \frac{2\alpha_{12}\delta b_y \left(k_{12}T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y_w + nb_y}} - k_{12}T_{\max} \sqrt{\frac{v}{-y_{\max} - nb_y}} \right)}{\pi(\rho_1 + \rho_2) \left(\frac{-y_{\max} + y_w}{2} + a_x - 2nb_y \right)},$$

где α_{12} – термоэлектрическая способность пары свариваемых материалов, В/К;

δ – толщина свариваемого изделия, м;

k_{12} – коэффициент, характеризующий теплофизические свойства свариваемых материалов;

T_{\max} – максимальная температура свариваемого материала (температура испарения свариваемого материала), К;

v – скорость сварки, м/с;

ρ_1, ρ_2 – удельные сопротивления свариваемых материалов, Ом·м.

2. Математическая модель распределения магнитной индукции поля остаточной намагниченности в рабочем пространстве между пушкой и свариваемым изделием определяется выражением

$$B(z) = B_0 \frac{\frac{\delta}{2}}{\frac{\delta}{2} + (l - z)},$$

где B_0 – величина магнитной индукции на поверхности свариваемого изделия вблизи стыка и в свариваемом изделии.

3. Полученные законы распределения магнитной индукции полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности свариваемых деталей позволяют рассчитать угол касательной к траектории пучка электронов и отклонение пучка от стыка свариваемых деталей с удовлетворительной точностью.

4. Адекватность моделирования распределения магнитных полей в пространстве электронно-лучевой пушки – свариваемое изделие подтверждается экспериментальными данными, представленными в литературе, а также полученными автором.

ГЛАВА 3

МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОТКЛОНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

При взаимодействии электронного пучка с атомами вещества обрабатываемой поверхности электроны в результате торможения теряют свою энергию. Этот процесс сопровождается возбуждением рентгеновского излучения, локализованного в месте взаимодействия электронного пучка с обрабатываемым материалом.

Интенсивность рентгеновского излучения при ЭЛС зависит от конструктивных особенностей свариваемых деталей, параметров и условий сварки. Это дает возможность использовать рентгеновское излучение в качестве информационного сигнала о процессе сварки.

Для измерения интенсивности рентгеновского излучения с обрабатываемой поверхности применяют рентгеновский датчик, оснащенный измерительной диафрагмой. В процессе проведения измерения пучок электронов пересекает длинную и узкую проекцию диафрагмы на поверхности обрабатываемого изделия. При этом фиксируется интенсивность рентгеновского излучения, проходящего через диафрагму. Для получения измерительной диафрагмы датчик рентгеновского излучения закрывают коллиматором – щелевой блендой из рентгенопоглощающего материала.

Возможность контролировать влияние магнитных полей на электронный пучок при ЭЛС по рентгеновскому излучению из зоны торможения электронов основана на том, что интенсивность рентгеновского излучения зависит от площади поверхности, через которую проходит поток излучения. Отклонение пучка, обусловленное действием магнитных полей, от оси электронно-лучевой пушки вызывает уменьшение доли рентгеновского излучения, прошедшего через площадь кристалла датчика, а, следовательно, и интенсивности рентгеновского излучения, измеренной датчиком.

3.1 Особенности формирования рентгеновского излучения от поверхности свариваемого изделия

В результате торможения в материале изделия электроны проникают в глубину изделия, теряя свою энергию. Большая часть потерянной энергии преобразуется в тепло, и только 1,5 – 2 % энергии идет на возбуждение рентгеновского излучения, локализованного в месте взаимодействия электронного пучка с обрабатываемым материалом. Рентгеновские лучи распространяются точно по прямым линиям, их нельзя отклонить электрическими и магнитными полями. Они проходят через пары металла с минимальным ослаблением [100].

Интенсивность рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке складывается из тормозного и характеристического рентгеновского излучения. Тормозное рентгеновское излучение возникает при торможении электронов пучка в веществе детали и характеризуется непрерывным спектром, имеющим резкую границу со стороны коротких длин волн. Спектр тормозного рентгеновского излучения не зависит от природы вещества обрабатываемой детали. Характеристическое рентгеновское излучение также возникает в результате торможения электронов в материале детали, но появляется только тогда, когда скорость электронов, тормозящихся в детали, достигает некоторого значения, вполне определенного для данного материала. Характеристическое излучение характеризуется линейчатым спектром. Основная доля энергии рентгеновских лучей приходится на тормозное излучение, и лишь незначительная часть всей энергии затрачивается на характеристическое [85].

Интенсивность рентгеновского излучения от поверхности свариваемого изделия при отсутствии плавления можно определить из следующего выражения [99]

$$I_d = kk_1 I_b Z U_0^2, \quad (3.1)$$

где $k = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ В}^{-1}$ – коэффициент пропорциональности [85];

k_1 – коэффициент, учитывающий пространственную ориентацию датчика;

I_b – ток электронного пучка;

Z – атомный номер материала свариваемого изделия;

U_0 – ускоряющее напряжение.

Коэффициент k_1 зависит от пространственной ориентации датчика и его размеров (рисунок 3.1) и равен величине потока рентгеновского излучения через поверхность датчика с площадью S [104]

$$k_1 = \int_S I_\varphi ds. \quad (3.2)$$

Плотность потока рентгеновского излучения в каком-либо направлении можно выразить через формулу Умова-Пойтинга [104]

$$I_\varphi = \frac{e^2 a^2}{4\pi c^3 R^2} \sin \varphi, \quad (3.3)$$

где e – заряд электрона;

a – ускорение электрона;

c – скорость света;

R – радиус-вектор рентгеновского пучка;

φ – угол между направлением ускорения электрона и радиус-вектором.

Ускорение a можно определить, предполагая, что на отрезке, равном длине пробега электрона в материале детали, торможение электрона происходит равномерно за время τ . В этом случае ускорение электрона можно вычислить по формуле [104]

$$a = \frac{e\rho}{2,1mU_0} 10^{15}, \quad (3.4)$$

где e – заряд электрона;

ρ – плотность материала;

m – масса электрона;

U_0 – ускоряющее напряжение.

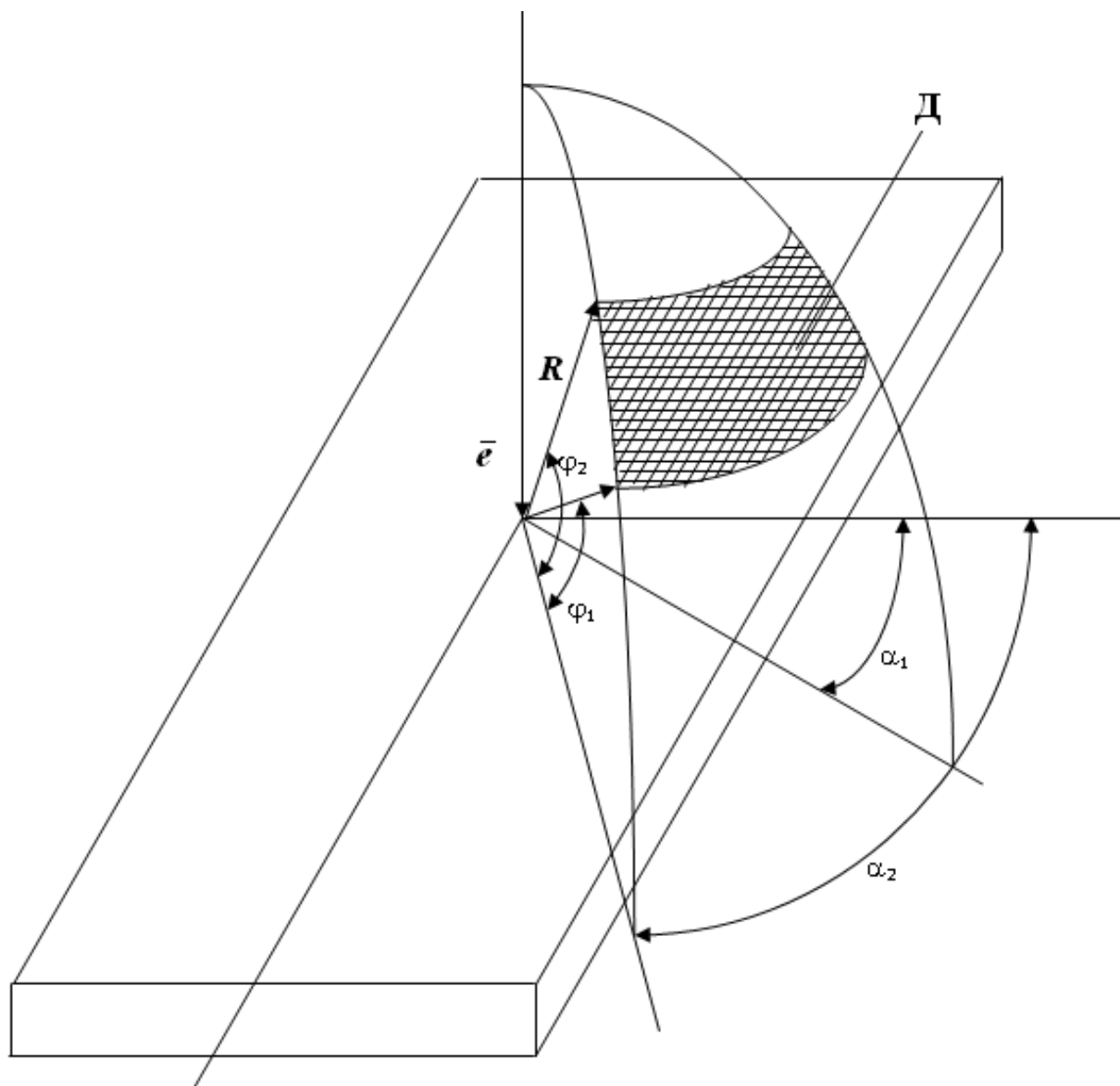


Рисунок 3.1 – Схема пространственной ориентации датчика (Д)

На рисунке 3.2 показана диаграмма пространственного распределения интенсивности рентгеновского излучения при угле падения пучка 90° [113].



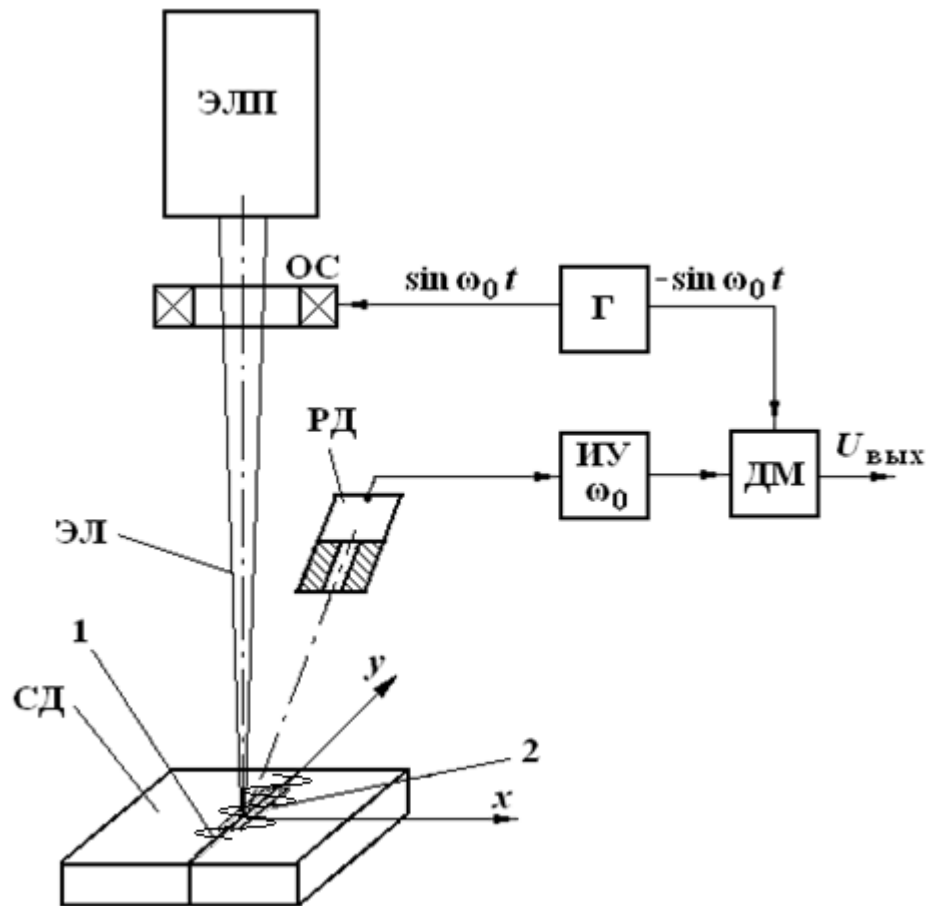
Рисунок 3.2 – Диаграмма пространственного распределения интенсивности рентгеновского излучения при угле падения пучка 90°

Из рисунка 3.2 видно, что диаграмма распределения интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне углов от 30° до 150° при угле падения пучка электронов на поверхность детали, равном 90° , имеет характер окружности. Отсюда следует, что значение коэффициента k_1 зависит только от геометрических размеров рентгеновского датчика.

3.2 Математическая модель метода контроля влияния магнитных полей на отклонение электронного пучка

Для контроля влияния магнитных полей на отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки используется коллимированный рентгеновский датчик, который содержит рентгеновский детектор и коллиматор, представляющий щелевую бленду, ограничивающую зону обзора датчика и выполненную из материала, поглощающего рентгеновское излучение.

Коллимированный датчик РД ориентируется таким образом, чтобы проекция 2 коллимационного отверстия, представляющего собой полосу, была направлена вдоль стыка 1 свариваемых деталей и его ось совпадала с оптической осью электронно-лучевой пушки ЭЛП (рисунок 3.3).



ЭЛП – электронно-лучевая пушка; ЭЛ – электронный пучок; СД – свариваемые детали;
 ОС – отклоняющая система; РД – коллимированный рентгеновский датчик; Г – генератор;
 ИУ – избирательный усилитель; ДМ – демодулятор; 1 – стык свариваемых деталей;
 2 – проекция коллиматора

Рисунок 3.3 – Схема метода измерения влияния магнитных полей на электронный пучок с помощью рентгеновского датчика

В результате взаимодействия пучка электронов с обрабатываемым материалом возникает тормозное рентгеновское излучение. Интенсивность рентгеновского излучения от поверхности свариваемого изделия при отсутствии плавления определяется из выражения (3.1).

Учитывая то, что плотность тока электронного пучка распределяется по поверхности детали неравномерно, выражение (3.1) можно записать в следующем виде

$$I_d = kk_1 U_0^2 Z I_b \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_d(x, y) j_b(x, y) dx dy, \quad (3.5)$$

где $f_d(x, y)$ – функция обзора рентгеновского датчика;

$j_b(x, y)$ – нормированное распределение плотности тока пучка на поверхности детали в координатах x, y , причем

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} j_b(x, y) dx dy = 1.$$

Ряд исследований показали, что нормированная плотность тока электронного пучка с достаточной мерой точности описывается нормальным законом распределения [2; 45; 102]

$$j_b(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y - \varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (3.6)$$

где σ_x, σ_y – среднеквадратические отклонения электронов от оси пучка по соответствующим осям;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – положение оси пучка в координатах x и y .

Так как щель коллиматора ориентирована вдоль оси y (рисунок 3.3), то функция обзора рентгеновского датчика не зависит от y , то есть

$$f_d(x, y) = f_d(x).$$

Предположим, что распределение плотности тока является независимым

$$j_b(x, y) = j_b(x) j_b(y).$$

В этом случае плотность тока пучка вдоль оси y равна

$$\int_{-\infty}^{\infty} j_b(y) dy = 1,$$

и выражение (3.5) примет следующий вид:

$$I_d = kk_1 U_0^2 Z I_b \int_{-\infty}^{\infty} f_d(x) j_b(x) dx \quad (3.7)$$

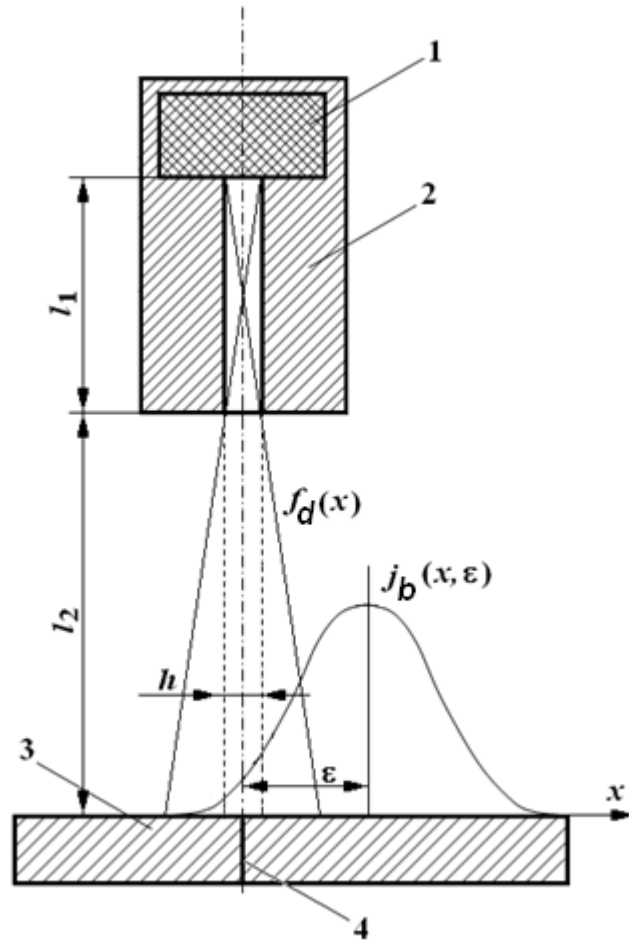
или

$$I_d = kk_1 U_0^2 Z I_b \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f_d(x) \exp\left(-\frac{(x - \epsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx. \quad (3.8)$$

Если обозначить l_1 – длина коллимационного канала; а l_2 – расстояние от коллиматора до поверхности детали (рисунок 3.4), то функция зоны обзора коллиматора рентгеновского датчика (рисунок 3.5) будет иметь следующий вид

$$f_d(x) = \begin{cases} 0, & x < -\frac{l_2}{l_1} h - \frac{h}{2}, \\ \frac{l_1}{l_2 h} x + \left(1 + \frac{l_1}{2l_2}\right), & -\frac{h}{2} - \frac{l_2}{l_1} h \leq x < -\frac{h}{2}, \\ 1, & -\frac{h}{2} \leq x \leq \frac{h}{2}, \\ -\frac{l_1}{l_2 h} x + \left(1 + \frac{l_1}{2l_2}\right), & \frac{h}{2} < x \leq \frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h, \\ 0, & x > \frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h, \end{cases} \quad (3.9)$$

где h – ширина щели коллиматора рентгеновского датчика.



1 – рентгеновский детектор; 2 – коллиматор;
3 – свариваемое изделие; 4 – стык свариваемых деталей

Рисунок 3.4 – Схема размещения рентгеновского датчика

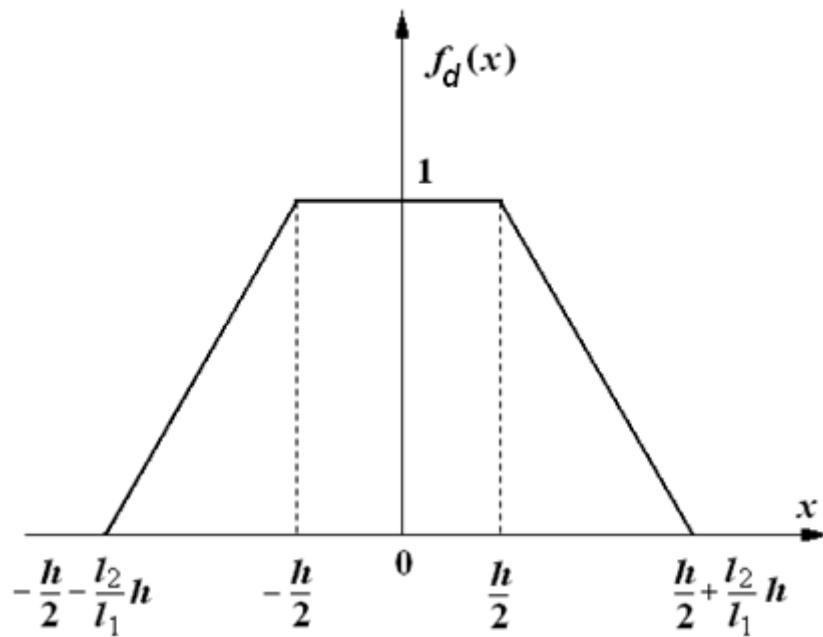


Рисунок 3.5 – Функция зоны обзора коллиматора рентгеновского датчика

Интенсивность рентгеновского излучения в этом случае определяется выражением

$$I_d = kk_1 U_0^2 Z I_b \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left(\int_{-\frac{h}{2} - \frac{l_2}{l_1} h}^{-\frac{h}{2}} \left(\frac{l_1}{l_2 h} x + 1 + \frac{l_1}{2l_2} \right) \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx + \right. \\ \left. + \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx + \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h} \left(-\frac{l_1}{l_2 h} x + 1 + \frac{l_1}{2l_2} \right) \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx \right). \quad (3.10)$$

По выражению (3.10) можно рассчитать статические характеристики зависимости рентгеновского излучения от смещения пучка электронов от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванного действием магнитных полей.

Для реализации метода синхронного детектирования придадим гармонические колебания параметру ε_x в соответствии с выражением

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 + \varepsilon_m \sin \omega t, \quad (3.11)$$

где ε_0 – рассогласование положений пучка и оптической оси электронно-лучевой пушки;

ε_m – амплитуда сканирования пучка поперек стыка;

$\omega = 2\pi/T$ – частота сканирования поперек стыка (T – период сканирования).

В этом выражении для простоты начальная фаза гармонической составляющей принята равной нулю, что не оказывает влияния на полученные результаты.

Выражение (3.8) с учетом (3.11) будет иметь вид

$$I_d = kk_1 U_0^2 Z I_b \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f_d(x) \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_0 - \varepsilon_m \sin \omega t)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx. \quad (3.12)$$

Изменение интенсивности рентгеновского излучения во времени можно представить в виде кратного ряда Фурье [59]:

$$I_d(\omega t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega t}, \quad (3.13)$$

где C_n – коэффициенты ряда Фурье.

Для упрощения расчетов примем период сканирования $T = 2\pi$, тогда с учетом того, что $\omega = 2\pi/T = 2\pi/2\pi = 1$, (3.13) примет вид

$$I_d(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jnt}, \quad (3.14)$$

где коэффициенты ряда Фурье определяются формулой

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_d(t) e^{-jnt} dt, \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (3.15)$$

С учетом (3.12) получим

$$C_n = \frac{1}{2\pi} kk_1 U_0^2 Z I_b \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \times \\ \times \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_d(x) \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_0 - \varepsilon_m \sin t)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx \cdot e^{-jnt} dt. \quad (3.16)$$

Соотношения (3.14) и (3.16) выражают математическую модель рентгеновского датчика как элемента, обладающего частотным спектром выходного сигнала при наличии периодического сигнала сканирования электронного пучка. Математическая модель позволяет выявить составляющие сигнала датчика с частотами $n\omega t$.

В тригонометрической форме ряд (3.14) будет иметь вид

$$I_d(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nt + b_n \sin nt), \quad (3.17)$$

где коэффициенты ряда определяются выражениями:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_d(t) dt, \quad (3.18)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_d(t) \cos ntdt, \quad (3.19)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_d(t) \sin ntdt. \quad (3.20)$$

В этом случае

$$C_n = \frac{a_n - jb_n}{2}.$$

Из выражений (3.18)...(3.20) видно, что интенсивность рентгеновского излучения можно представить суммой постоянной составляющей (3.18) и гармонических составляющих (3.19), (3.20).

Если сканирование электронного пучка отсутствует, то есть $\omega = 0$, ряды (3.14) и (3.17) вырождаются в соотношение (3.8).

3.3 Статические характеристики рентгеновского датчика

Полученная математическая модель позволяет исследовать характеристики рентгеновского датчика отклонения электронного пучка от оптической оси пушки, вызванного действием магнитных полей. Расчет характеристик датчика производился в системе MatLAB.

Нормированные статические характеристики датчика рассчитаны по формуле (3.10). Нормирование производилось делением полученных из (3.10) значений на $kk_1U_0^2ZI_d$. Расчеты проводились при длине коллимационного канала $l_1=10$ мм и расстоянии от коллиматора до поверхности детали $l_2 = 15$ мм. Величина σ_x определена из выражения эффективного диаметра для нормального нормированного распределения [100]

$$d = \sigma_x \sqrt{2\pi}. \quad (3.21)$$

Приняв $d = 0,8$ мм, получим

$$\sigma_x = \frac{d}{\sqrt{2\pi}} = 0,32.$$

На рисунке 3.6 приведены зависимости интенсивности рентгеновского излучения от положения электронного пучка относительно оптической оси электронно-лучевой пушки для различных значений ширины коллиматора рентгеновского датчика. Из этих характеристик видно, что интенсивность рентгеновского излучения максимальна при совмещении пучка с оптической осью пушки.

При увеличении ширины коллимационного отверстия датчика интенсивность рентгеновского излучения увеличивается до своего максимального значения, при достижении которого дальнейшее увеличение ширины коллиматора будет приводить к снижению чувствительности датчика. Пригодной для контроля отклонения электронного пучка от оптической оси пушки, вызванного действием магнитных полей, является ширина h коллимационного отверстия, обеспечивающая (60 ÷ 80) % максимальной интенсивности рентгеновского излучения. Этому условию удовлетворяет $h = 0,3$ мм.

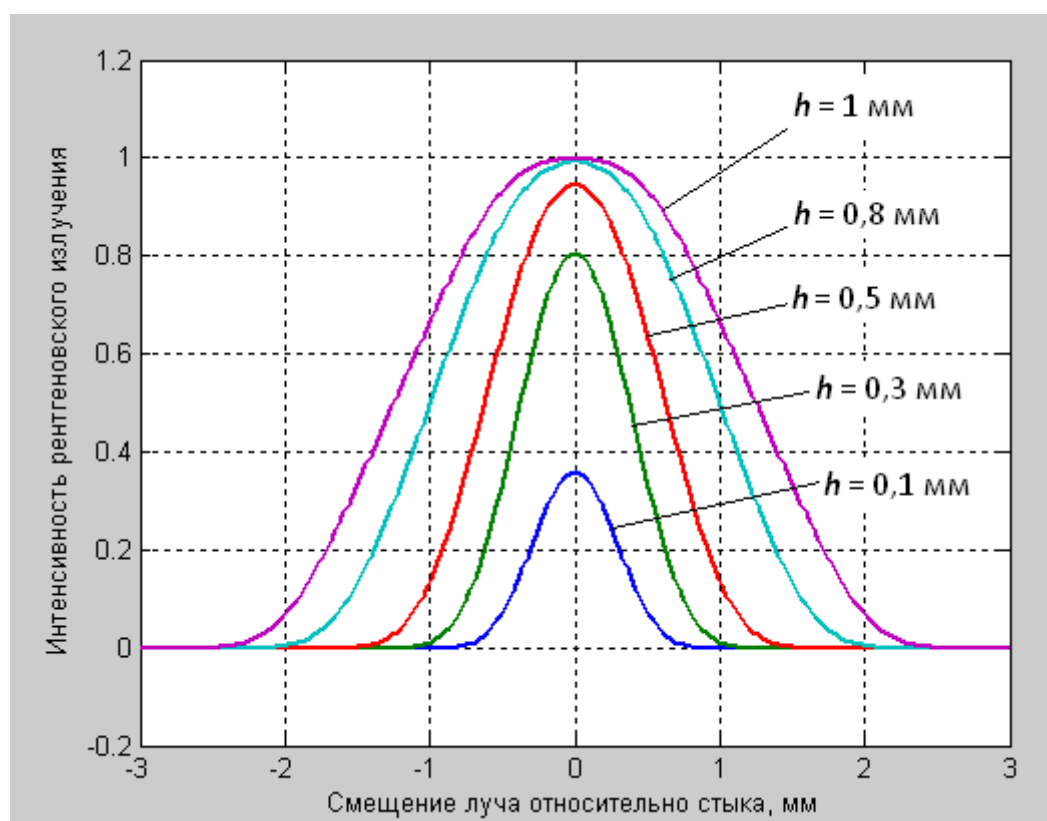


Рисунок 3.6 – Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от положения луча относительно оптической оси электронной пушки

Таким образом, использование рентгеновского датчика для контроля отклонения электронного пучка от оптической оси пушки, вызванного действием магнитных полей, обосновано наличием максимума статической характеристики при отсутствии магнитных помех и снижением интенсивности рентгеновского излу-

чения при отклонении электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванном действием магнитных полей [41].

3.4 Спектральные характеристики датчика

При сканировании электронного пучка в выходном сигнале рентгеновского датчика появляются гармонические составляющие с частотами, кратными частоте сканирования. Расчет соответствующих гармоник производился по формулам (3.19) и (3.20) с учетом (3.9) и (3.12).

На рисунках 3.7 и 3.8 изображены зависимости нечетных и четных гармоник от положения электронного пучка относительно оптической оси пушки.

Из указанных характеристик видно, что амплитуды нечетных гармоник b_n с частотами ω , 3ω и 5ω (рисунок 3.7) при малых отклонениях пучка от оптической оси пушки пропорциональны этим отклонениям.

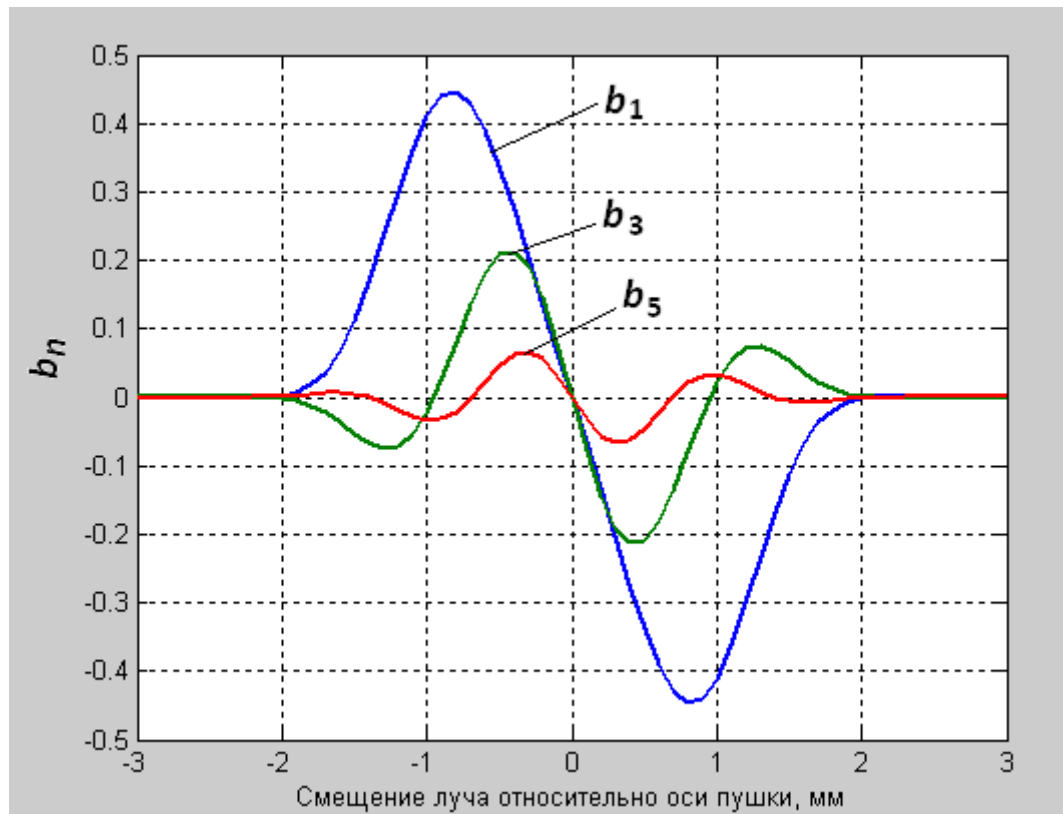


Рисунок 3.7 – Зависимость $b_n(\varepsilon_0)$ при $\varepsilon_m=1$

Наиболее подходящей для контроля отклонения электронного пучка от оптической оси пушки, вызванного действием магнитных полей, является первая гармоника b_1 , имеющая наибольшую амплитуду и однозначность фазы в зависимости от направления действия магнитных полей. Гармоники более высокого порядка (b_3 и b_5) такой однозначности фазы не имеют.

Амплитуды четных гармоник a_n (рисунок 3.8) с частотами, кратными 2ω , максимальны при $\varepsilon_0 = 0$. Амплитуды четных гармоник с частотами, кратными частоте сканирования ω , равны нулю. Наибольшую амплитуду и пригодность для контроля и управления процессом ЭЛС имеет вторая гармоника с частотой 2ω .

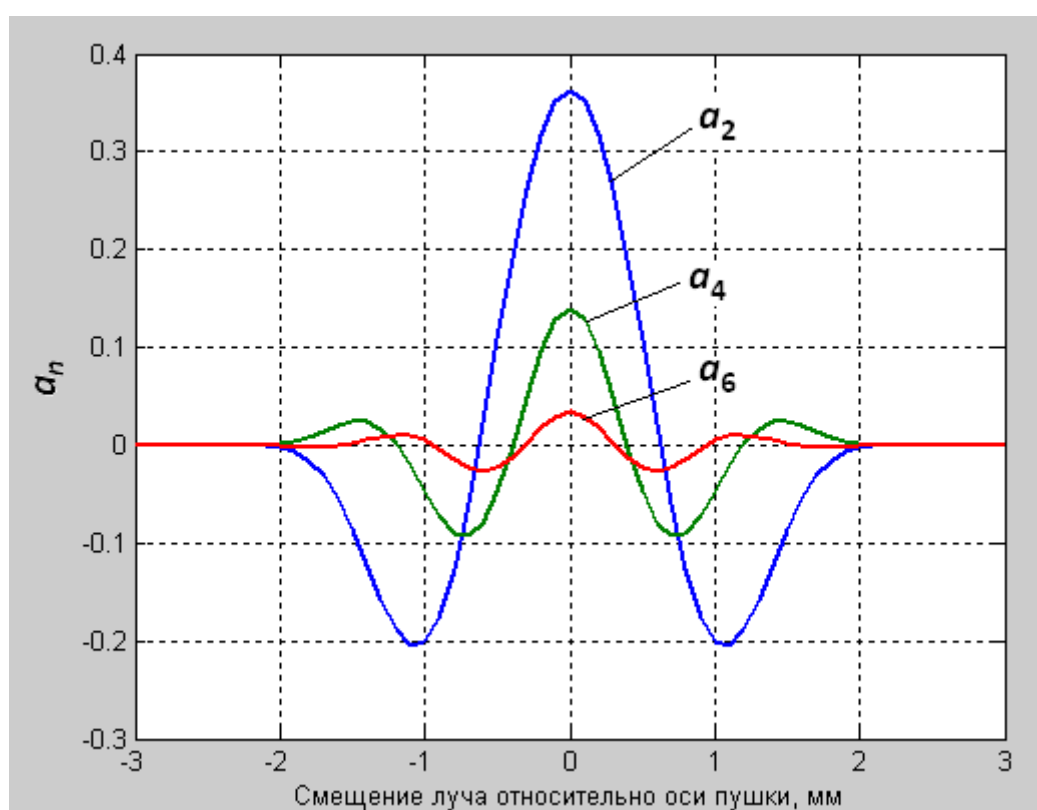


Рисунок 3.8 – Зависимость $a_n(\varepsilon_0)$ при $\varepsilon_m=1$

Амплитуда второй гармоники пропорциональна чувствительности измерительного преобразователя и может быть использована для стабилизации коэффициента усиления системы компенсации влияния магнитных полей.

Амплитуда выходного сигнала датчика зависит от амплитуды сканирования пучка ε_m . Для определения оптимального значения амплитуды ε_m , обеспечивающего максимальную амплитуду выходного сигнала, были получены зависимости амплитуды первой гармоники b_1 от смещения электронного пучка относительно оптической оси пушки, вызванного действием магнитных полей, при различных значениях амплитуды сканирования ε_m (рисунок 3.9).

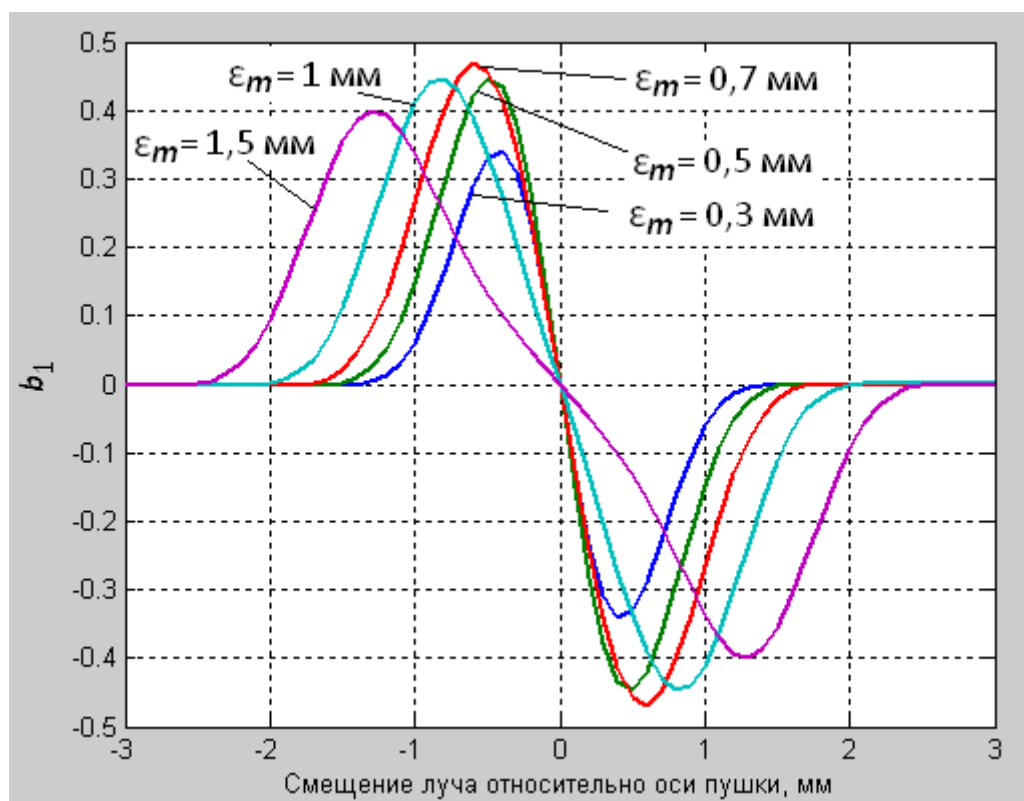


Рисунок 3.9 – Зависимости амплитуды первой гармоники от отклонения пучка относительно оптической оси электронной пушки при различных значениях амплитуды сканирования ε_m

Из графиков видно, что максимальная амплитуда первой гармоники выходного сигнала рентгеновского датчика соответствует амплитуде сканирования $\varepsilon_m = 0,7$ мм.

3.5 Выводы

1. Статическая характеристика рентгеновского датчика влияния магнитных полей на отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки описывается выражением

$$I_d = kk_1 U_0^2 Z I_b \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \left(\int_{-\frac{h}{2} - \frac{l_2}{l_1} h}^{-\frac{h}{2}} \left(\frac{l_1}{l_2 h} x + 1 + \frac{l_1}{2l_2} \right) \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx + \right. \\ \left. + \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx + \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1} h} \left(-\frac{l_1}{l_2 h} x + 1 + \frac{l_1}{2l_2} \right) \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx \right),$$

где $k = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ В}^{-1}$ – коэффициент пропорциональности;

k_1 – коэффициент, учитывающий пространственную ориентацию датчика;

I_b – ток электронного пучка;

Z – атомный номер материала свариваемого изделия;

U_0 – ускоряющее напряжение;

h – ширина щели коллиматора рентгеновского датчика;

l_1 – длина коллимационного канала;

l_2 – расстояние от коллиматора до поверхности детали;

σ_x – среднеквадратические отклонения электронов от оси пучка по оси x ;

ε_x – положение оси пучка по оси x .

2. Математическая модель рентгеновского датчика как элемента, обладающего частотным спектром выходного сигнала при наличии периодического сигнала сканирования электронного пучка, выражается соотношением

$$I_d(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jnt},$$

где коэффициенты ряда Фурье определяются формулой

$$C_n = \frac{1}{2\pi} k k_1 U_0^2 Z I_b \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \times$$

$$\times \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_d(x) \exp\left(-\frac{(x - \varepsilon_0 - \varepsilon_m \sin t)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx \cdot e^{-jnt} dt,$$

где $f_d(x)$ – функция зоны обзора коллиматора рентгеновского датчика, имеющая следующий вид

$$f_d(x) = \begin{cases} 0, & x < -\frac{l_2}{l_1}h - \frac{h}{2}, \\ \frac{l_1}{l_2 h}x + \left(1 + \frac{l_1}{2l_2}\right), & -\frac{h}{2} - \frac{l_2}{l_1}h \leq x < -\frac{h}{2}, \\ 1, & -\frac{h}{2} \leq x \leq \frac{h}{2}, \\ -\frac{l_1}{l_2 h}x + \left(1 + \frac{l_1}{2l_2}\right), & \frac{h}{2} < x \leq \frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1}h, \\ 0, & x > \frac{h}{2} + \frac{l_2}{l_1}h. \end{cases}$$

3. В соответствии с разработанной математической моделью рентгеновского датчика первая гармоника частоты сканирования позволяет определять отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванное действием магнитных полей.

4. Амплитуда второй гармоники пропорциональна чувствительности измерительного преобразователя и может быть использована для стабилизации коэффициента усиления системы компенсации влияния магнитных помех.

5. Изготовлен макетный образец, который прошел испытания в лабораторных условиях. Подтверждено соответствие его экспериментальных характеристик расчетным данным.

ГЛАВА 4

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Магнитные поля, имеющие место при электронно-лучевой сварке разнородных материалов и изделий с остаточной намагниченностью, приводят к отклонению электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки как в промежутке от пушки до свариваемого изделия, так и по глубине канала проплавления. Эти отклонения, как известно, могут приводить к непролавам, особенно при сварке изделий больших толщин.

Наиболее простым способом устранения влияния магнитных полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности на отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки является компенсация этих полей путем введения магнитных полей встречной направленности с помощью электромагнитных устройств.

4.1 Метод автоматической компенсации влияния на электронный пучок магнитных полей термоэлектрических токов

При сварке изделий из разнородных материалов магнитное поле $B(z)$ индуцируется токами термо-ЭДС, которые распределены в свариваемом изделии.

Метод компенсации влияния магнитных полей, вызванных токами термо-ЭДС, заключается в контроле отклонения электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки по рентгеновскому излучению из зоны обработки и введении в свариваемое изделие компенсирующих токов, встречно направленных токам термо-ЭДС. Компенсирующие токи устраняют отклонение пучка, причем величина компенсирующих токов изменяется в зависимости от отклонения электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки.

На рисунке 4.1 представлена функциональная схема системы автоматической компенсации влияния магнитного поля термоэлектрических токов.

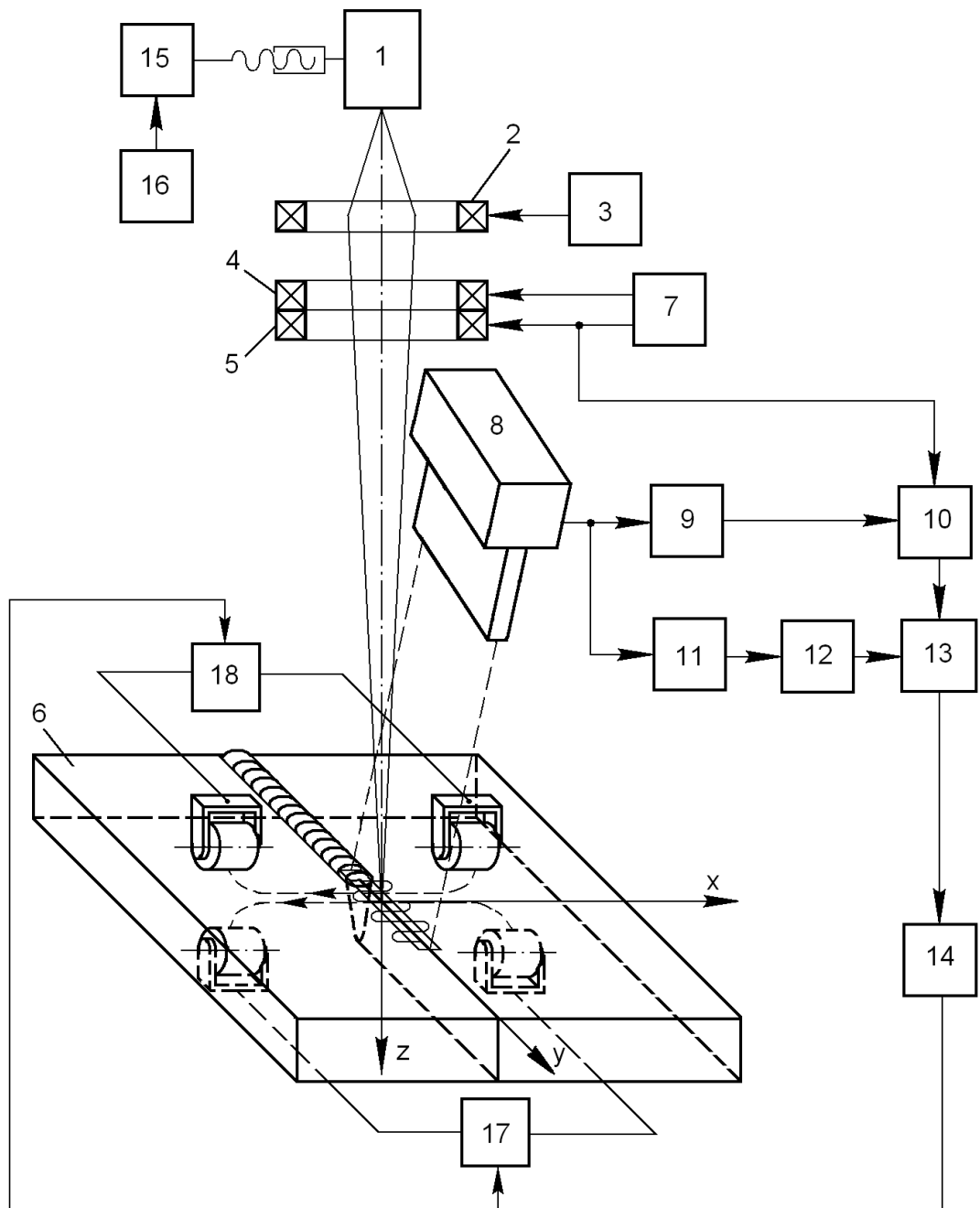


Рисунок 4.1 – Функциональная схема системы автоматической компенсации влияния магнитного поля термоэлектрических токов

Система содержит электронно-лучевую пушку 1, формирующую электронный пучок, фокусирующую систему 2 с источником тока фокусировки 3, отклоняющие катушки 4 и 5, служащие для отклонения электронного пучка по поверх-

ности свариваемого изделия 6 по координатам y и x , соответственно, генератор 7 сканирования пучка, рентгеновский датчик 8 с щелевым коллиматором, избирательный усилитель 9, настроенный на частоту сканирования по координате x , демодулятор 10, первый вход которого подключен к избирательному усилителю 9, а второй – к выходу генератора 7 сканирования электронного пучка поперек стыка; избирательный усилитель 11 второй гармоники частоты сканирования, выпрямитель 12, усилитель 13 с регулируемым коэффициентом усиления, интегратор 14, блок 16 наведения электронного пучка на стык сварного соединения, электропривод 15 перемещения электронно-лучевой пушки, источник компенсирующего магнитного поля, в качестве которого при сварке разнородных материалов применены регулируемые источники тока 17 и 18.

Система работает следующим образом. Электронно-лучевой пушкой 1 формируется сфокусированный электронный пучок. С помощью генератора сканирования 7 и отклоняющих катушек 4 и 5 осуществляется технологическое сканирование пучка, которое помимо обеспечения измерения отклонения электронного пучка от стыка позволяет расширить возможности повышения качества сварки за счет управления распределением энергии по пятну нагрева [107].

Рентгеновский датчик 8 с щелевым коллиматором закреплен на электронно-лучевой пушке, таким образом, что проекция коллимационной щели на поверхности свариваемого изделия параллельна стыку соединения и совпадает с оптической осью электронно-лучевой пушки.

В случае действия магнитных полей в промежутке электронно-лучевая пушка – свариваемое изделие в процессе сканирования электронного пучка поперек стыка (по оси x) электронный пучок отклоняется от оптической оси электронно-лучевой пушки, а в выходном сигнале рентгеновского датчика 8 появляется гармоническая составляющая частоты сканирования, амплитуда которой пропорциональна отклонению электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки, а фаза этой гармонической составляющей указывает на направление отклонения. Это действие с достаточной точностью может быть описано вы-

ражениями (1.2) с учетом разработанной математической модели распределения магнитных полей в пространстве между пушкой и изделием.

При сварке изделий из разнородных материалов магнитное поле $B(z)$ индуцируется токами термо-ЭДС, которые распределены в свариваемом изделии.

Гармоническая составляющая рентгеновского датчика 8 усиливается избирательным усилителем 9 и преобразуется в напряжение постоянного тока в демодуляторе 10, на опорный вход которого подается сигнал с генератора 7 с частотой сканирования электронного пучка поперек стыка.

Кроме того, в выходном сигнале рентгеновского датчика 8 присутствует составляющая с частотой второй гармоники частоты сканирования. Вторая гармоника максимальна при совмещении электронного пучка с оптической осью электронно-лучевой пушки. Она характеризует чувствительность рентгеновского датчика и увеличивается вместе с увеличением тока электронного пучка. Эта составляющая усиливается избирательным усилителем 11 второй гармоники и преобразуется в напряжение постоянного тока на выходе выпрямителя 12 и поступает на вход регулировки коэффициента усилителя 13. Регулировка коэффициента усиления производится с целью стабилизации коэффициента усиления контура управления во всем диапазоне сварочных токов. Усиленный сигнал через интегратор 14 поступает на источник компенсирующего магнитного поля, выполненный в виде двух регулируемых источников тока 18 и 19, позволяющих вводить ток в свариваемое изделие через токоподводы, размещенные на верхней и нижней поверхностях свариваемого изделия симметрично стыку соединения. Токи термо-ЭДС компенсируются встречными токами, формируемыми регулируемыми источниками тока. Токоподводы для введения компенсирующих токов в сварной шов размещены в зоне максимальной температуры, что связано с возникновением в этой зоне максимальной термо-ЭДС. Источники тока 18 и 19 в зависимости от сигнала с интегратора 14 подают компенсирующие токи, направленные встречно току термо-ЭДС. Соотношение компенсирующих токов в источниках тока выбирается таким, чтобы смещение корня шва от стыка соединения было устранено.

Интегратор 14 позволяет ввести в управление интегральный закон, т.е. управлять величиной и направлением магнитного поля и производить автоматическое совмещение электронного пучка с оптической осью электронно-лучевой пушки с нулевой погрешностью.

Совмещение электронного пучка со стыком свариваемого изделия осуществляется с помощью блока 16 наведения электронного пучка на стык сварного соединения и электропривода 15 перемещения электронно-лучевой пушки. При этом плоскость стыка сварного соединения должна быть параллельна оптической оси электронно-лучевой пушки. Это особенно важно при сварке деталей больших толщин.

4.2 Метод автоматической компенсации влияния на электронный пучок полей остаточной намагниченности

Для управления процессом сварки в условиях действия полей остаточной намагниченности разработана система автоматической компенсации влияния на электронный пучок поля остаточной намагниченности свариваемых деталей, функциональная схема которой представлена на рисунке 4.2.

Система содержит электронно-лучевую пушку 1, фокусирующую систему 2 с источником тока фокусировки 3, отклоняющие катушки 4 и 5, генератор 7 сканирования пучка, рентгеновский датчик 8 с щелевым коллиматором, избирательный усилитель 9, настроенный на частоту сканирования по координате x , демодулятор 10, первый вход которого подключен к избирательному усилителю 9, а второй – к выходу генератора 7 сканирования электронного пучка поперек стыка; избирательный усилитель 11 второй гармоники частоты сканирования, выпрямитель 12, усилитель 13 с регулируемым коэффициентом усиления, интегратор 14, блок 16 наведения электронного пучка на стык сварного соединения, электропривод 15 перемещения электронно-лучевой пушки, источник компенсирующего магнитного поля, в качестве которого при сварке изделий с остаточной намагниченностью применен электромагнит 19.

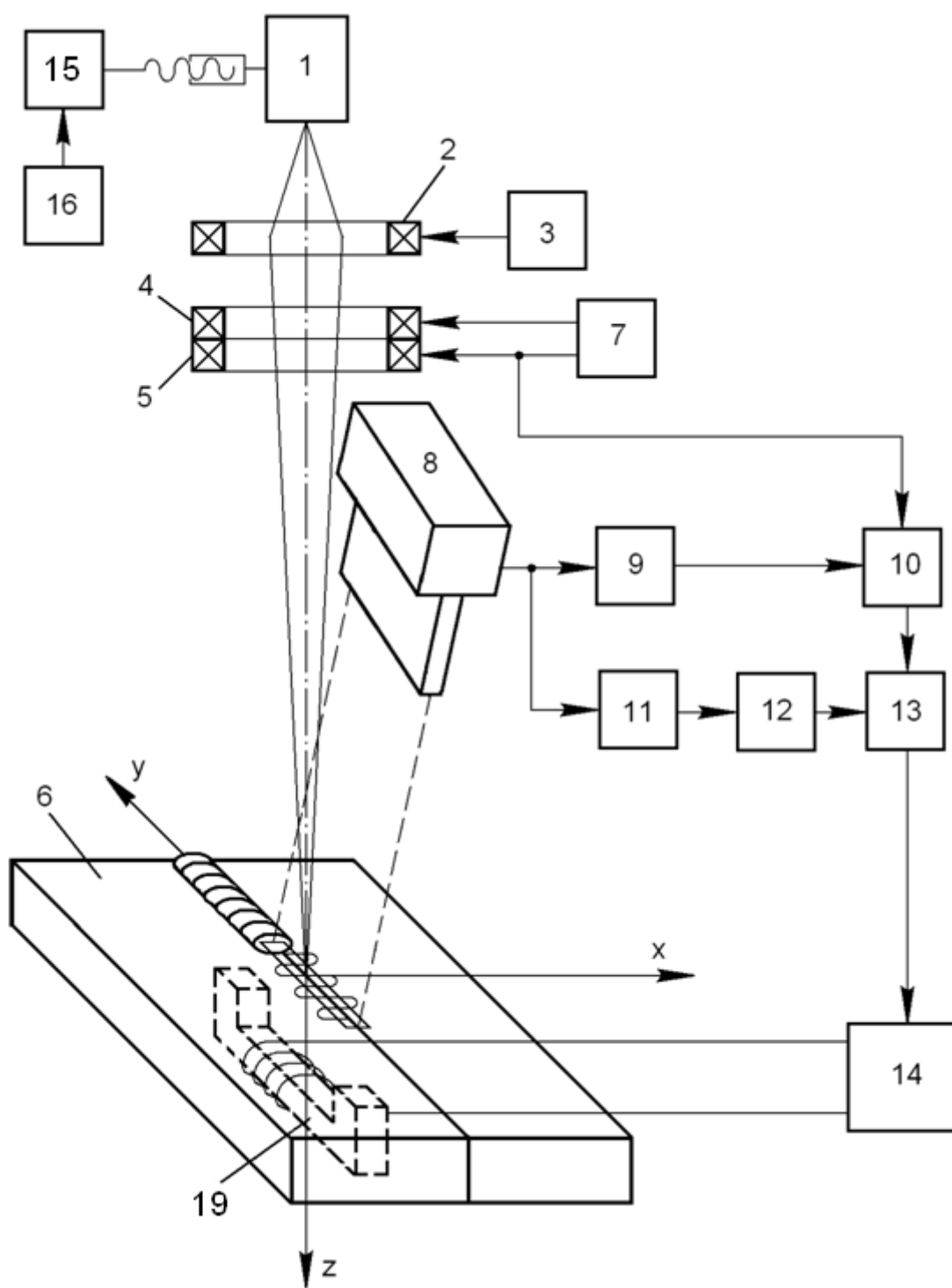


Рисунок 4.2 – Функциональная схема системы автоматической компенсации влияния поля остаточной намагниченности

При сварке изделий из ферромагнитных материалов индукция $B(z)$ магнитного поля обусловлена остаточной намагниченностью свариваемых деталей. В этом случае источник компенсирующего магнитного поля представляет

собой электромагнит 19. В зависимости от сигнала с интегратора 14 изменяется постоянный ток в обмотке электромагнита, создающего в свариваемом изделии компенсирующее магнитное поле, противоположное полю остаточной намагниченности деталей.

Полная компенсация влияния магнитного поля достигается, если компенсирующее магнитное поле имеет такой же закон изменения индукции, что и $B(z)$, только встречно направленное. Это достигается выбором конфигурации электромагнита.

Точное совмещение электронного пучка с оптической осью электронно-лучевой пушки достигается в точке, находящейся в середине глубины канала проплавления, в связи с тем, что интенсивность рентгеновского излучения усредняется по каналу проплавления.

4.3 Анализ автоматической системы компенсации влияния магнитных полей на точность позиционирования электронного пучка

Для анализа автоматической системы компенсации влияния магнитных полей на отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки необходимо составить структурную схему системы, получить математическое описание ее элементов, составить передаточные функции элементов и системы в целом, оценить устойчивость и качество системы.

4.3.1 Структурная схема автоматической системы компенсации влияния магнитных полей

На рисунке 4.3 представлена структурная схема автоматической системы компенсации влияния магнитных полей на отклонение электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки.

На схеме $W_D(p)$ – передаточная функция измерительного устройства, включающего модулятор, избирательный усилитель и демодулятор; $W_I(p)$ – передаточ-

ная функция интегратора, представляющего собой астатическое звено первого порядка и включенного в систему для обеспечения нулевой статической ошибки; $W_{EM}(p)$ – передаточная функция электромагнита; $B_{\Pi}(z)$ – магнитная индукция поля помехи, направленная вдоль стыка и отклоняющая электронный пучок от оси электронно-лучевой пушки; $B_{\kappa}(z)$ – магнитная индукция компенсирующего магнитного поля; x_{Π} – координата пучка по оси x ; x_{κ} – отклонение пучка, вызванное действием компенсирующего магнитного поля; ε_0 – отклонение пучка от оси электронно-лучевой пушки.

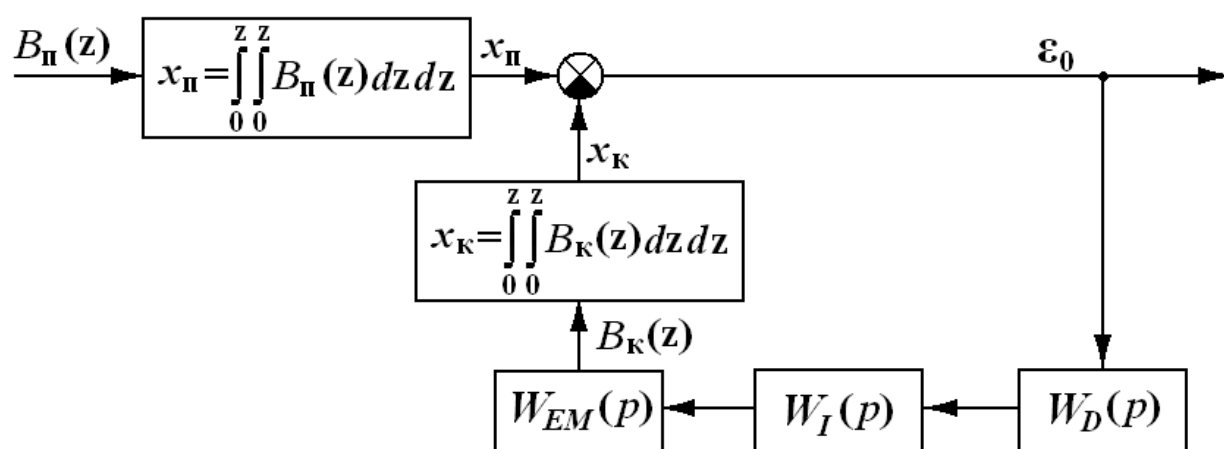


Рисунок 4.3 – Структурная схема системы автоматической компенсации влияния магнитных полей

Зная передаточные функции всех элементов, анализ и синтез автоматической системы компенсации влияния магнитных полей на отклонение электронного пучка от оптической оси пушки при ЭЛС можно произвести известными методами теории автоматического управления.

4.3.2 Анализ динамических свойств автоматической системы компенсации влияния магнитных полей

Определим передаточную функцию автоматической системы компенсации влияния магнитных полей на отклонение электронного пучка от оптической оси пушки, структурная схема которой представлена на рисунке 4.3.

Передаточная функция разомкнутой системы представляет собой последовательное соединение измерительного устройства, интегратора и электромагнита:

$$W_p(p) = W_D(p) \cdot W_I(p) \cdot W_{EM}(p). \quad (4.1)$$

Передаточная функция измерительного устройства, состоящего из рентгеновского датчика, избирательного усилителя, настроенного на частоту сканирования ω_s по координате x , и демодулятора, может быть представлена в виде [67]

$$W_D(p) = \frac{K_D}{2 \prod_{i=1}^n (T_i p + 1)}, \quad (4.2)$$

где $K_D(p)$ – общий коэффициент усиления измерительного устройства;

n – число резонансных каскадов избирательного усилителя;

T_i – постоянная времени i -го каскада избирательного усилителя

$$T_i = \frac{2Q_i}{\omega_s},$$

где Q_i – добротность i -го резонансного каскада усилителя.

Примем число избирательных каскадов усилителя $n = 2$ при $T_1 = T_2$. В этом случае передаточная функция измерительного устройства

$$W_D(p) = \frac{K_D}{2(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} = \frac{K_D}{2(T_1 p + 1)^2}. \quad (4.3)$$

Полоса пропускания избирательного усилителя, настроенного в резонанс на частоте сканирования ω_s , выбирается такой, чтобы все остальные составляющие, кратные частоте сканирования, подавлялись с коэффициентом ослабления не ме-

нее 40 дБ [100]. Принимая добротность каждого каскада $Q = 100$, найдем постоянные времени T_1 и T_2 при частоте технологического сканирования $f_s = 64$ кГц или $\omega_s = 2\pi \cdot f_s = 4,0212 \cdot 10^5$ рад/с

$$T_1 = T_2 = \frac{2Q}{\omega_s} = \frac{2 \cdot 100}{4,0212 \cdot 10^5} = 4,97364 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Передаточная функция электромагнита представляет собой инерционное звено первого порядка

$$W_{EM}(p) = \frac{K_{EM}}{T_{EM}p + 1}, \quad (4.4)$$

где K_{EM} – коэффициент передачи электромагнита;

T_{EM} – постоянная времени электромагнита, $T_{EM} = 0,1$ с.

Передаточная функция интегратора имеет вид:

$$W_I(p) = \frac{K_I}{p}. \quad (4.5)$$

Подставив (4.3), (4.4), (4.5) в (4.1), получим передаточную функцию разомкнутой системы

$$W_p(p) = \frac{K_D \cdot K_{EM} \cdot K_I}{2p(T_1p + 1)^2(T_{EM}p + 1)}. \quad (4.6)$$

Пусть $K_D \cdot K_{EM} \cdot K_I = K$ – общий коэффициент усиления системы. Коэффициент K определяется, исходя из требований к точности управления: максимальная ошибка системы (максимальное допустимое отклонение луча от оптической оси

пушки) $x_{\max} \leq 0,1$ мм; максимальная амплитуда входного сигнала $\varepsilon_{\max} = 15$ мм при максимальной частоте $\omega_{\max} = 0,1$ рад/с.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) $L(\omega)$ системы в области низких частот должна быть расположена не ниже контрольной точки A с координатами

$$\omega_A = \omega_{\max}, \quad L(\omega_A) = 20 \lg \frac{\varepsilon_{\max}}{x_{\max}}. \quad (4.7)$$

Координаты контрольной точки A согласно выражению (4.7)

$$\omega_A = 0,1 \text{ рад/с}, \quad L(\omega_A) = 20 \lg \frac{15}{0,1} \approx 43,5218 \text{ дБ}.$$

Построим низкочастотный участок логарифмической амплитудно-частотной характеристики (рисунок 4.4), проходящей выше контрольной точки A с наклоном -20 дБ/дек.

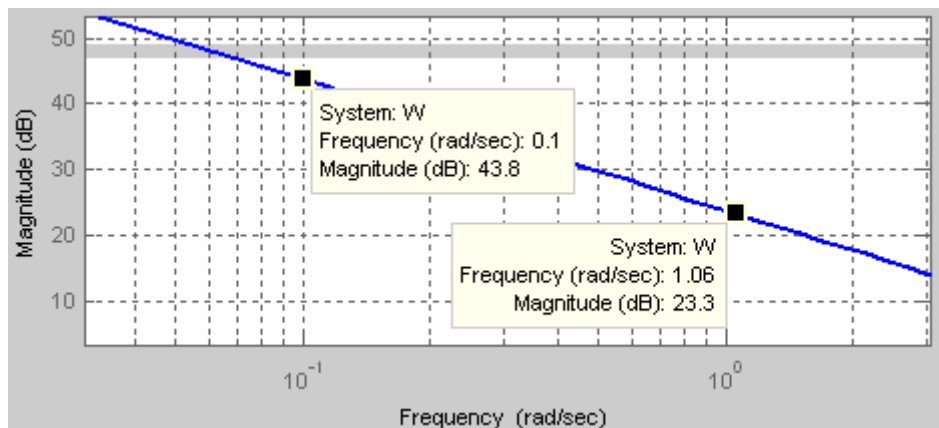


Рисунок 4.4 – К определению коэффициента усиления системы

Коэффициент усиления системы K определяется по формуле

$$K = 10^{\frac{L(1)}{20}}, \quad (4.8)$$

где $L(1)$ – значение ЛАЧХ при частоте $\omega = 1$ рад/с.

Значение ЛАЧХ при частоте $\omega = 1$ рад/с $L(1) \approx 23,8$ дБ. Подставляя $L(1)$ в (4.8), определим коэффициент усиления системы

$$K = 10^{\frac{23,8}{20}} = 15,49 \approx 15,5.$$

На рисунке 4.5 изображены логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики разомкнутой системы, построенные в системе MatLAB.

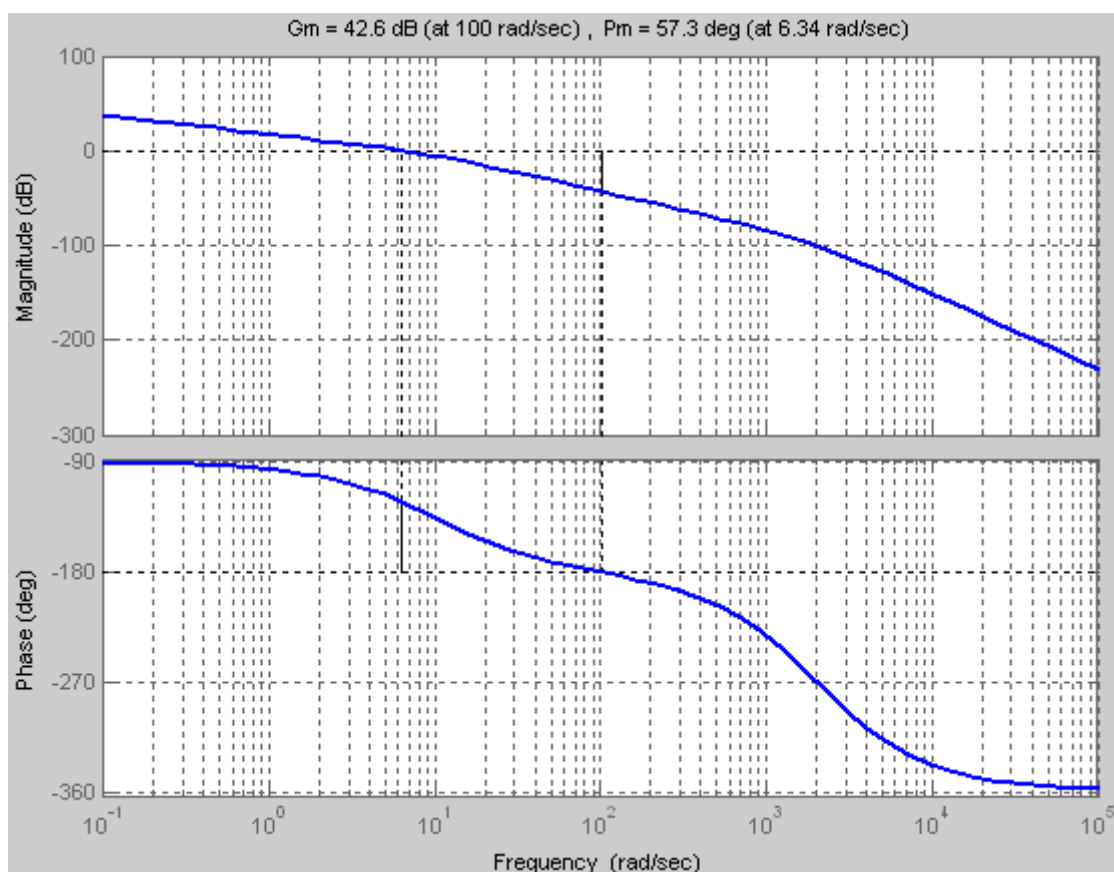


Рисунок 4.5 – Логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики разомкнутой системы

Из графиков следует, что система в замкнутом состоянии будет устойчивой, так как фазовая частотная характеристика разомкнутой системы пересекает ось $-\pi$ правее частоты среза амплитудной частотной характеристики. Запас устойчивости по фазе составляет $57,3^\circ$.

На рисунке 4.6 представлен переходной процесс в замкнутой системе.

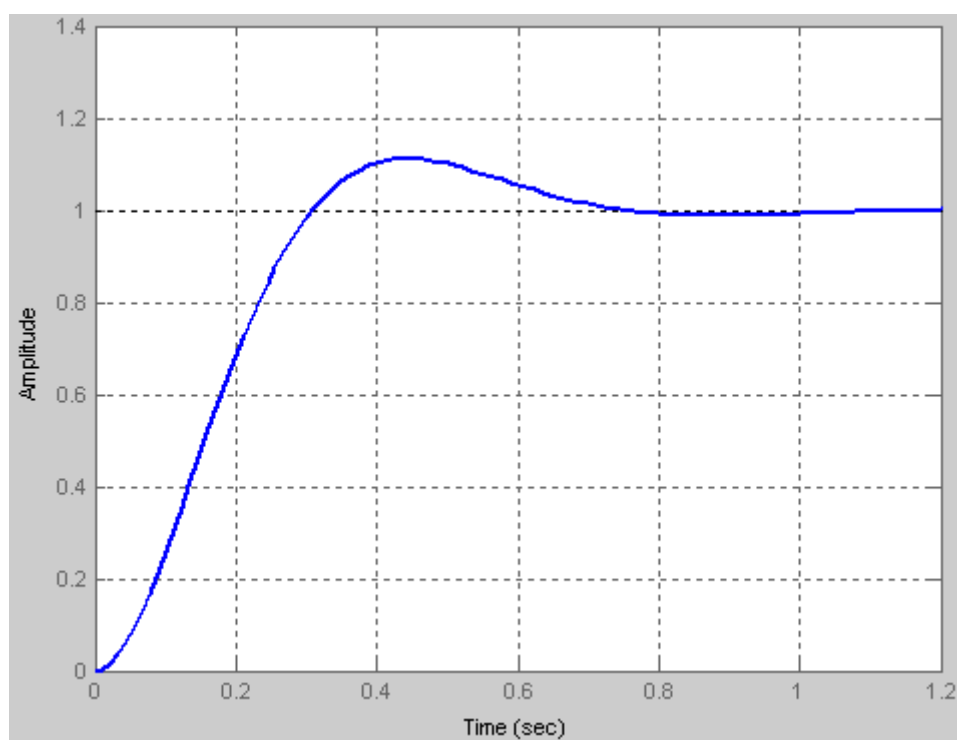


Рисунок 4.6 – Переходная характеристика замкнутой системы

Показатели качества переходного процесса:

- максимальное динамическое отклонение – $x_{\max} = 0,1$ мм;
- время регулирования – $t_p = 0,7$ с;
- статическая ошибка – $\Delta = 0$ мм.

Таким образом, автоматическая система компенсации влияния магнитных полей на электронный луч в процессе электронно-лучевой сварки является устойчивой и имеет удовлетворительные показатели качества регулирования.

4.3.3 Анализ точности позиционирования электронного пучка по стыку

Для оценки точности позиционирования электронного пучка по стыку соединения определим динамическую ошибку системы, которую можно рассчитать по формуле [69]

$$\varepsilon_v = \frac{v_{\max}}{K},$$

где v_{\max} – максимальная скорость изменения входного сигнала;

K – коэффициент усиления системы.

В условиях сварочного производства возможны критические магнитные поля, при которых отклонение пучка электронов от оптической оси пушки может достигать значений $\varepsilon_{\max} = 15$ мм [83]. При скорости сварки 30 м/ч и длине шва 500 мм частота изменения магнитного поля помехи равна $f_n = 0,0167$ с⁻¹ или $\omega_n = 2\pi \cdot f_n \approx 0,1$ рад/с.

Если на вход системы поступает воздействие $x_n(t) = \varepsilon_{\max} \sin \omega_n t$, то скорость можно определить как производную от $x_n(t)$ по времени

$$v = \frac{dx_n(t)}{dt} = \varepsilon_{\max} \omega_n \cos \omega_n t.$$

Отсюда максимальная скорость $v_{\max} = \varepsilon_{\max} \omega_n$.

Таким образом, динамическая ошибка составит

$$\varepsilon_v = \frac{\omega_n \varepsilon_{\max}}{K} = \frac{0,1 \cdot 15}{15,5} = 0,0968 \text{ мм.}$$

Такая ошибка возникает при полной компенсации магнитного поля помехи, то есть в центре канала проплавления (на глубине $\delta/2$). Учитывая форму и разме-

ры канала проплавления, в неблагоприятном случае полная компенсация возможна на глубине канала проплавления, равной $\delta/3$. Угол касательной к траектории пучка электронов, приводящий к такому смещению, равен

$$\psi = \varepsilon_v \frac{3}{\delta} = \frac{0,0968 \cdot 3}{\delta} = \frac{0,2904}{\delta}.$$

В корне шва такой угол вызовет ошибку, равную $\varepsilon = \psi \cdot \delta = 0,2904$ мм.

Таким образом, ошибка метода составляет $0,2904 \leq 0,3$ мм и не превышает допустимого отклонения электронного пучка от плоскости стыка.

Магнитное поле помехи, приводящее к отклонению электронного пучка от оптической оси пушки, будет уменьшено за счет компенсации в $15/0,2904 \approx 50$ раз.

В таблице 2 приведены углы наклона касательной к траектории пучка электронов и отклонения ε_k в корне шва при автоматической компенсации магнитных полей остаточной намагниченности свариваемых деталей различной толщины.

Таблица 4.1 – Отклонения в корне шва при компенсации магнитных полей

δ , мм	50		100		150	
	ψ , рад	ε_k , мм	ψ , рад	ε_k , мм	ψ , рад	ε_k , мм
0,94	0,0013	0,066	0,0020	0,198	0,0024	0,3645
0,5	0,0007	0,035	0,0011	0,105	0,0013	0,1939
0,4	0,0006	0,028	0,0008	0,084	0,0010	0,1551

Как видно из полученных результатов, для большинства случаев электроно-лучевой сварки деталей с остаточной намагниченностью применение системы автоматической компенсации магнитных полей позволяет получить качественные сварные соединения с погрешностью в корне шва, не превышающей 0,3 мм [39].

4.4 Выводы

1. Применение метода синхронного детектирования сигнала рентгеновского датчика отклонения электронного пучка от оптической оси пушки позволяет автоматизировать процесс компенсации влияния магнитных полей при ЭЛС.

2. Автоматическая компенсация влияния магнитных полей, индуцируемых токами термо-ЭДС, осуществляется путем введения в свариваемое изделие компенсирующих токов, направленных встречно токам термо-ЭДС.

3. Автоматическая компенсация влияния на отклонение пучка полей остаточной намагниченности осуществляется путем наведения в свариваемом изделии компенсирующего магнитного поля, противоположно направленного полю остаточной намагниченности.

4. Анализ динамических характеристик автоматической системы компенсации влияния магнитных полей показывает, что система устойчива, обладает достаточными запасами устойчивости по фазе и амплитуде, обеспечивает необходимое качество управления.

5. Автоматическая компенсация позволяет уменьшить отклонение пучка от стыка до величин, обеспечивающих высокое качество сварных соединений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленных задач, обусловленных целью работы, в диссертации были получены следующие основные результаты и выводы:

1. Анализ автоматических устройств позиционирования электронного пучка по стыку показал, что основной причиной отклонения электронного пучка от стыка соединения является наличие магнитных помех, действующих в процессе электронно-лучевой сварки. При этом возможны отклонения электронного пучка, во много раз превышающие допустимые значения.

2. Наиболее приемлемым способом защиты пучка электронов от магнитного поля является его компенсация в зоне сварки.

3. Разработанные математические модели распределения магнитной индукции полей термоэлектрических токов и остаточной намагниченности в пространстве между электронно-лучевой пушкой и свариваемым изделием позволяют количественно оценить отклонение электронного пучка от оптической оси пушки, вызванное этими полями. Адекватность моделирования подтверждена корректным использованием математического аппарата и экспериментальными исследованиями.

4. Разработанный метод контроля отклонения электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки по рентгеновскому излучению из зоны сварки, основанный на сканировании электронного пучка поперек стыка и обработке сигнала коллимированного рентгеновского датчика по методу синхронного детектирования, позволяет сформировать сигнал управления системы автоматической компенсации.

5. Разработанная математическая модель коллимированного рентгеновского датчика устанавливает связь между величиной отклонения электронного пучка от оптической оси электронно-лучевой пушки и амплитудой первой гармоники частоты сканирования, а также между направлением отклонения и фазой этой гармоники. Кроме того, в соответствии с разработанной математической моделью амплитуда второй гармоники частоты сканирования, пропорциональная чувстви-

тельности рентгеновского датчика, может быть использована для стабилизации коэффициента усиления системы компенсации.

6. Использование разработанной автоматической системы компенсации позволяет устранить влияние наведенных в свариваемом изделии магнитных полей и уменьшить погрешность позиционирования электронного пучка по стыку соединения от действия магнитных полей в 50 раз.

Таким образом, на основании выполненных в диссертации исследований достигнута поставленная цель работы – предложен и разработан новый метод автоматической компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка в процессе сварки, позволяющий повысить качество сварного соединения при ЭЛС в условиях действия магнитных помех за счет повышения точности позиционирования электронного пучка по стыку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Анализ сигналов датчиков вторичной эмиссии, применяемых в системах автоматического направления электронного пучка по стыку / Е.Н. Баня, Ф.Н. Киселевский, О.К. Назаренко // Автоматическая сварка. 1973. № 3.
3. 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.
4. 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. 7.11.1983, Бюл. № 41. 2 с.
5. А.с. 1103431 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Установка для ЭЛС с устройством для видеоконтроля / Пахомов Ю.Г. 23.07.1984, Бюл. № 27. 4 с.
6. А.с. 1197271 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ наведения электронного луча на стык при электронно-лучевой сварке и устройство для его осуществления / Ефимов Н.Н., Лившиц М.Л., Лобанов Н.Г. и др. 15.12.1985, Бюл. № 46. 2 с.
7. А.с. 1197277 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ наведения электронного луча на стык при ЭЛС и устройство для его осуществления / Ефимов Н.Н., Лившиц М.Л., Лобанов Н.Г., Виноградов В.А. 15.12.1985, Бюл. № 46. 2 с.
8. А.с. 1255342 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки / Лаптенко В.Д., Браверман В.Я., Баякин С.Г., Крячко Б.М., Угрюмов В.Г. Оpubл. 07.09.1986, Бюл. № 33. 2 с.
9. А.с. 1326414 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ контроля отклонения стыка при электронно-лучевой сварке / Кроз А.Г., Фатеева А.П., Кривенков В.А., Бдуленко А.П., Куцаев И.А. Оpubл. 30.07.1987, Бюл. № 28. 4 с.
10. А.с. 1391834 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ слежения за стыком при лучевой сварке / Солнцев А.А., Бесчетнов А.П.. Оpubл. 30.04.1988, Бюл. № 16. 4 с.

11. А.с. 1405977 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки и устройство для его осуществления / Лаптенко В.Д., Браверман В.Я., Помогаев В.Б., Баякин С.Г., Дрянных А.Д., Мурыгин А.В.. Оpubл. 30.06.1988, Бюл. № 24. 5 с.

12. А.с. 1433690 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ контроля канала проплавления при электронно-лучевой сварке / Лаптенко В.Д., Башенко В.В., Баякин С.Г., Дрянных А.Д., Угрюмов В.Г., Пономарев В.В. Оpubл. 30.10.1988, Бюл. № 40. 5 с.

13. А.с. 1450943 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ управления электронно-лучевой сваркой и устройство для его осуществления / Сукач К.А., Куцан Ю.Г., Ковбасенко С.Н., Жадкевич М.Л., Ланкин Ю.Н., Зубов В.В. Оpubл. 15.01.1989, Бюл. № 2. 7 с.

14. А.с. 1493422 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Устройство для слежения за стыком при электронно-лучевой сварке / Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Браверман В.Я., Генцелов А.Н. Оpubл. 15.07.1989, Бюл. № 26. 3 с.

15. А.с. 315542 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Устройство для автоматического слежения за стыком / Баня Е.Н., Киселевский Ф.Н., Пантелеенко Г.А. Оpubл. 1970.

16. А.с. 367987 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ автоматического слежения за стыком в процессе электронно-лучевой сварки / Баня Е.Н., Киселевский Ф.Н., Пантелеенко Г.А. Оpubл. 1970.

17. А.с. 478698 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Комбинированный датчик / Лаптенко В.Д., Сорокин В.А. Оpubл. 30.07.1975, Бюл. № 28. 3 с.

18. А.с. 499069 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Комбинированный датчик / Лаптенко В.Д., Сорокин В.А. Оpubл. 15.01.1976, Бюл. № 2. 3 с.

19. А.с. 499070 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Комбинированный датчик / Лаптенко В.Д., Сорокин В.А., Белозерцев В.С. Оpubл. 15.01.1976, Бюл. № 2. 3 с.

20. А.с. 534326 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ измерения геометрических параметров технологического электронного луча / Резниченко В.Ф., Углов А.А., Чесаков Д.М. Оpubл. 05.11.1976, Бюл. № 41. 3 с.

21. А.с. 607680 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Комбинированный датчик / Лаптенко В.Д., Белозерцев В.С., Сорокин В.А., Браверман В.Я. Оpubл. 25.05.1978, Бюл. № 19. 2 с.

22. А.с. 774847 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Комбинированный датчик / Лаптенко В.Д., Белозерцев В.С., Сорокин В.А., Браверман В.Я., Сохань Ю.А. Оpubл. 30.10.1980, Бюл. № 40. 2 с.

23. А.с. 804291 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ автоматического слежения за стыком при электронно-лучевой сварке / Гольдфарб Л.Н., Куцаев Н.А., Ключев В.А. и др. Оpubл. 15.02.1981, Бюл. № 6. 2 с.

24. А.с. 810408 СССР, ^{МПК7} В 23К 15/00. Устройство слежения за стыком свариваемых деталей / Лаптенко В.Д., Фомин В.М., Сорокин В.А. и др. Оpubл. 07.03.1981, Бюл. № 9. 4 с.

25. А.с. 899295 СССР, ^{МПК7} В 23К 9/10. Электромагнитный дифференциальный датчик положения свариваемого стыка/ Ластовирия В.Н. Оpubл. 23.01.1982, Бюл. № 3. 4 с.

26. Гладков Э. А., Толочков Ю. О., Демидов П. С. Профилометрия разделки стыка для решения задач геометрической и технологической адаптации сварочного оборудования при автоматических способах дуговой сварки труб // Наука и образование: электронный научно-технический журнал. 2013. № 9. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/618953.html> (дата обращения 09.09.2013).

27. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 432 с.

28. Глазер В. Основы электронной оптики. М.: Техтеориздат, 1957. 764 с.

29. Гончаров А.Л. Исследование термо-ЭДС сталей и сплавов различных структурных классов при ЭЛС // Сварочное производство. 2010. № 4. С. 12–17.

30. Гончаров А.Л., Овечников С А. Особенности формирования сварных соединений сталей разных структурных классов // МАТИ – Сварка XXI века: доклады Всероссийской научно-технической конференции; РГТУ им. К.Э. Циолковского. М.: МАТИ, 2003. С. 27–31.

31. Горбунов В.Н., Назаренко О.К., Шаповал В.Н. Система слежения за стыком при ЭЛС // Электронно-лучевая сварка: Сб. тр. конф.; М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1986. С. 133–136.
32. Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
33. Децик В.Н., Децик Н.Н., Нестеренко В.М. Проблемы борьбы с остаточной намагниченностью при ЭЛС ротора газового нагревателя // Электронно-лучевая сварка: Сб. тр. конф.; М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1986. С. 107–110.
34. Драгунов В.К. Влияние конструктивных особенностей соединения на формирование швов при ЭЛС разнородных сталей и сплавов // Сварочное производство. 2002. № 8. С. 17–22.
35. Драгунов В.К., Гончаров А.Л. Методы определения отклонения электронного пучка при сварке намагниченных деталей // Сварочное производство. 2002. № 9. С. 3–9.
36. Драгунов В.К., Гончаров А.Л. Пространственные параметры электронного пучка при взаимодействии с намагниченной мишенью // Сварочное производство. 2008. № 12. С. 20–24.
37. Драгунов В.К., Гончаров А.Л., Слива А.П. Исследование магнитных полей при ЭЛС разнородных ферро- и парамагнитных материалов // Славяновские чтения: материалы международной научно-технической конференции; ЛГТУ. Липецк, 2004. С. 282–288.
38. Дружинина А. А. Анализ влияния магнитных полей на электронный луч в процессе электронно-лучевой сварки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов; Красноярск: СибГАУ, 2011. С. 388–389.

39. Дружинина А.А. Анализ точности позиционирования по стыку соединения при электронно-лучевой сварке в условиях компенсации магнитных полей // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. 2015. № 1. URL: www.science-education.ru/121-18283 (дата обращения: 07.04.2015).

40. Дружинина А. А. Компенсация влияния магнитных полей на положение электронного пучка в процессе электронно-лучевой сварки / А. А. Дружинина, В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин // Технологии и оборудование ЭЛС-2014: материалы III Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции (24–26 июня 2014, г. Санкт-Петербург). С-Пб., 2014. С. 62–73.

41. Дружинина А. А. Метод контроля влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке по рентгеновскому излучению из зоны обработки / А. А. Дружинина, В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин // Вестник СибГАУ, 2012. № 5 (45). С. 158–163.

42. Дружинина А. А. О возможности контроля и компенсации влияния магнитных помех при ЭЛС / А. А. Дружинина, П. В. Лаптенко, А. В. Федоров // Решетневские чтения: материалы XV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М.Ф. Решетнева; Красноярск: СибГАУ, 2011. С. 567–568.

43. Дружинина А. А. Повышение точности позиционирования по стыку соединения деталей с остаточной намагниченностью при электронно-лучевой сварке / А. А. Дружинина, В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин // Вестник СибГАУ, 2014. № 5 (57). С. 168–173.

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

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

46. Исследование системы автоматического направления электронного луча по стыку / В.Д. Лаптенко, Н.В. Комолкин, В.С. Белозерцев и др. // Производственно-технологический опыт. 1979. № 6.
47. Келим Ю.М. Электромеханические и магнитные элементы систем автоматики. М.: Высшая школа, 2004. 352 с.
48. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М.: Энергия, 1969. 360 с.
49. Кривенков В. А., Кроз А. Г. Амплитуда и форма импульса тока вторично-эмиссионного датчика // Прогрессивная технология в сварочном производстве: Сб. тр. Воронеж. политехн. ин-та. Вып. 3. Воронеж, 1972. С. 17–19.
50. 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.
51. Кривенков В.А., Кроз А.Г. Систематическая погрешность определения координаты стыка разнородных металлов с помощью сканирующего электронного луча // Автоматика, автоматизация измерений: Сб. тр. Воронеж. политехн. ин-та. Вып. 3. Воронеж, 1971. С. 153–158.
52. Кроз А.Г. Влияние полосы пропускания входных устройств следящей системы на точность слежения при ЭЛС // Прогрессивная технология в сварочном производстве. Воронеж: Воронеж. политехн. ин-т, 1972. Вып. 4. С. 32.
53. Разработка средств автоматического управления процессом ЭЛС / В.Д.Лаптенко, С.Г. Баякин, В.А. Сорокин и др. // Отчет по НИР. № ГР 01850003061; Инв. № 02870065372.
54. Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Браверман В.Я. Расчет отклонения электронного пучка в магнитном поле при электронно-лучевой сварке // Деп. в ВИНТИ. 1986. № 5580В86. 9 с.
55. Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В. Способ направления электрода по криволинейному стыку // Автоматическая сварка. 1982. № 11. С. 60–63.

56. Лаптенко В.Д., Сорокин В.А. Феррозондовый датчик положения сварочной головки относительно стыка // Сварочное производство. 1975. № 5.
57. Лесков Г.И., Живага Л.И. Особенности электронно-лучевой сварки ферромагнитных материалов // Автоматическая сварка. 1981. № 11. С. 38–40.
58. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1983. 463 с.
59. Математические основы теории автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов. т. II. Изд. 2-е, доп. / Под ред. Б.К. Чемоданова. М.: Высш. школа, 1977. 455 с.
60. Машиностроение. Энциклопедия Оборудование для сварки: Т. IV-6 / В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, А.В. Четверо и др. Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1999. 496 с.
61. Мельник И.М., Сидоренко В.Н., Гуцин А.В. Оптимальное по качеству наведение электронного луча на стык свариваемых изделий // Адаптивные системы автоматического управления. Киев, 1986. № 14. С. 40–42.
62. Мельник И.М., Тычинский А.А., Иванов В.Т. Автоматизация электронно-лучевой сварки изделий // Технология и автоматизация машиностроения. Киев, 1983. № 31.
63. Metallurgy and technology of titanium and its alloys / С. М. Гуревич и др. Киев: Наук. Думка, 1979. 240 с.
64. Моделирование магнитных полей термоэлектрических токов в канале проплавления при ЭЛС ферро- и парамагнитных сталей / В.К. Драгунов, Ю.В. Мякишев, А.Л. Гончаров, А.П. Слива // Сварочное производство. 2006. № 5. С. 12–17.
65. Назаренко О.К. Отклонение пучка электронов при ЭЛС // Автоматическая сварка. 1982. № 1. С. 33–39.
66. Некоторые пути повышения точности и надежности сканирующих следящих систем для ЭЛС // В.А. Кривенков, А.Г. Кроз, Ф.Н. Рыжков, И.П. Щербинин // Автоматика, автоматизация измерений: Сб. тр. Воронеж. политехн. ин-та. Вып. 3. Воронеж, 1971. С. 141–148.

67. Непорожний В.Ю. Устройство для компенсации остаточного магнитного поля при электронно-лучевой сварке толстолистовых сталей // Автоматическая сварка. 1984. № 3. С. 68–70.

68. Об использовании рентгеновских датчиков в системах направления электронного пучка по стыку / Е.Н. Баня, Ф.Н. Киселевский, О.К. Назаренко // Материалы 5-й Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке. Киев: Наукова думка, 1977. С. 126–128.

69. Основы автоматического управления и регулирования / Г.Ф. Зайцев, В.И. Костюк, П.И. Чинаев. Киев: Изд-во «Техніка», 1975. 496 с.

70. Особенности применения электронно-лучевой сварки в производстве комбинированных конструкций из разнородных сталей / В.К. Драгунов, А.Л. Гончаров, А.П. Слива, С.А. Овечников // Тяжелое машиностроение. 2008. № 4. С. 15–21.

71. Пат. 2087114 Франции, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ и устройство для слежения за швом при ЭЛС / Карсель Ф., Анжели Ж., Делор Ж. Оpubл. 31.12.71.

72. Пат. 2139191 Франции, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ и устройство для телевизионного наблюдения свариваемой заготовки при операции электронно-лучевой сварки. Оpubл. 5.01.73.

73. Пат. 2157014 Российская Федерация, ^{МПК7} Н 01F 13/00. Способ размагничивания крупногабаритных изделий / Новожилов А.П., Быстров В.А., Карасев А.С., Усов Г.О. № 99115976/09; заявл. 21.07.1999; опубл. 27.09.2000. 5 с.

74. Пат. 2346795 Российская Федерация, ^{МПК7} В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки и сварные узлы, изготовленные этим способом / Мерфи Д. Т. № 2004100524/02 ; заявл. 06.01.2004 ; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. 8 с.

75. Пат. 2442174 Российская Федерация, ^{МПК7} G 01R 1/18, G 12B 17/02, H 05K 9/00. Магнитоэлектрический экран / Силаев Ю.М. № 2010138518/28; заявл. 20.09.2010; опубл. 10.02.2012. Бюл. № 4. 8 с.

76. Пат. 2534183 Российская Федерация, МПК⁷ В 23К 15/00, В 23К 103/18. Способ электронно-лучевой сварки разнородных металлических материалов / Драгунов В.К., Слива А.П., Гончаров А.Л., Чепурин М.В. № 2013125682/02 ; заявл. 04.06.2013 ; опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33. 9 с.

77. Пат. 2547367 Российская Федерация, МПК⁷ В 23К 15/00. Способ электронно-лучевой сварки и устройство для его осуществления / Бочаров А. Н., Дружинина А. А., Лаптенко В. Д., Лаптенко П. В., Мурыгин А. В., Серегин Ю. Н. № 2013133698/02; заявл. 18.07.2013; решение о выдаче патента от 26.01.2015.

78. Пат. 4219719 США / Ю. Фрозьен, Х. Решне. Опубл. 26.08.80. (Патенто-владелец – фирма «Сименс Акиенгезельшафт», ФРГ).

79. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник в 2-х книгах. кн. 2. / под ред. В.В.Клюева. М.: Машиностроение, 1986. 488 с.

80. Прозоровский А.Н., Живага Л.Н. Устройство слежения электронного пучка за стыком с V-образной разделкой кромок // Сварочное производство. 1985. № 3.

81. Прозоровский А.Н., Живага Л.Н. Устройство слежения электронного пучка за стыком // Сварочное производство. 1984. № 2. С. 29–30.

82. Путилов К.А. Курс физики. Том II. М.: Гос. изд-во тех.-теор. лит., 1954. 592 с.

83. Разработка технологии электронно-лучевой сварки сталей с остаточной намагниченностью / Н. В. Александров, Е. Д. Бланк, Н. В. Вовченко и др. // Технологии и оборудование ЭЛС-2014: материалы III Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции (24–26 июня 2014, г. Санкт-Петербург). С-Пб., 2014. С. 141–149.

84. РД 24.949.04-90 Сварка электронно-лучевая изделий тяжелого машиностроения. Технические требования. 1990. 23 с.

85. Рентгеновские лучи / Пер. с нем. и англ. Л. Н. Бронштейн. Под ред. М. А. Блохина. М.: Изд. иностр. лит., 1960. 468 с.

86. Рыжков Ф.И., Щербинин И.П., Кривенков В.А. Следящая система с периодическим контурным сканированием для электронно-лучевой сварки // Автоматическая сварка. 1972. № 1. С. 40–42.

87. Система автоматической ориентации сварочной головки относительно стыка // Лаптенко В.Д., Сорокин В.А., Белозерцев В.С., Щербаков В.М. / Сварочное производство. – 1976. – № 3.

88. 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. 136-138.

89. Система отслеживания положения сварного шва при электронно-лучевой сварке, работающая в реальном масштабе времени / С. Хиромато, Е. Ямане, М. Мориясу и др.: Пер. с яп. КР ВЦП № КН-01207 от 29.03.1987.

90. Системы ориентации сварочного инструмента на линию стыка при дуговой сварке: учеб. пособие / Э.А. Гладков, О.Н. Киселев, Р.А. Перковский, Г.П. Трегубов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 132 с.

91. Сканирующая система телевизионного наблюдения для сварочных электронно-лучевых установок / Ч. Георгиев, Т. Праматоров, Д. Иванов, С. Гаранчева // Тр. междунар. конф. по электронно-лучевым технологиям. Варна, 1985. С. 306.

92. Современные вторично-эмиссионные системы автоматического направления пучка электронов по стыку при сварке / Г.А. Спыну, Ю.Н. Пастушенко, В.Е. Локшин, Ю.М. Коротун // Автоматическая сварка. 1978. № 10. С. 18–22.

93. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки / В.В. Башенко, В.Б. Вихман, А.Н. Козлов, И.С. Гайдукова, // Технологии и оборудование ЭЛС-2008: материалы первой Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции (19-22 мая 2008, г. Санкт-Петербург). С-Пб., 2008. С. 5–21.

94. Спонтанные магнитные поля, возникающие при электронно-лучевой сварке / К.С. Акопьянц, С.М. Левитский, О.К. Назаренко, В.Ю. Непорожний, Г.А. Шилов // Письма в ЖТФ. 1989. Том 15, Вып. 22. С. 20–23.
95. Стенд для размагничивания конструкций перед сваркой / Ф.Б. Черепнин, В.Н. Крепышев, В.Г. Дроздов, М.С. Меркель // Автоматическая сварка. 1981. № 3. С. 58–61.
96. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 3. 4-е изд. / К.С. Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. СПб.: Питер, 2004. 377 с.
97. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 752 с.
98. Тихоненко Д.В., Мурыгин А.В. Автоматическое устройство наведения на стык при электронно-лучевой сварке // Вестник СибГАУ. 2010. № 3. С. 143–149.
99. Тэреда Ура. Исследования способа обнаружения границы проплавления при электронно-лучевой сварке: Пер. с яп. ТТП Москвы № 19263 от 29.11.1987.
100. Управление электронно-лучевой сваркой / В.Д. Лаптенко, А.В. Мурыгин, Ю.Н. Серегин, В.Я. Браверман: Под ред. В.Д. Лаптенка. Красноярск: САА, 2000. 234 с.
101. Установка для электронно-лучевой сварки с программным управлением от ЭВМ для авиационной промышленности / К. Хара и др. // Пер. с яп. ВЦП № М-03756 от 12.02.1986.
102. Устройство для получения изображения с помощью вторичных электронов из зоны электронно-лучевой сварки / Е.Н. Балакирев, Л.Н. Майоров, М.Л. Лившиц // Сварочное производство. 1979. № 6. С. 73–78.
103. Физический энциклопедический словарь. / Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. М.: Сов. энциклопедия, 1984. 944 с.
104. Хараджа Ф.Н. Общий курс рентгенотехники. Л.: Энергия, 1966. 586 с.

105. Хара К. Новая машина для электронно-лучевой сварки с программным управлением: Пер. с яп. ВЦП № М-03755 от 12.03.1986.
106. Шиллер Э., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. М.: Энергия, 1980. 526 с.
107. Экспериментальные исследования по оптимизации технологии электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов / Ю. Н. Серегин, В. Д. Лаптенко, Н. В. Успенский, В. П. Никитин // Технологии и оборудование ЭЛС-2011: доклады Санкт-Петербургской международной научно-технической конференции (23–26 мая 2011, г. Санкт-Петербург) / под ред. В. Б. Вихмана; С-Пб. гос. политехн. ун-т. С-Пб., 2011. С. 71–80.
108. Электричество и магнетизм. Методика решения задач / А.С. Жукарев, С.А. Иванов, С.А. Киров и др. // М.: МГУ, 2010. 436 с.
109. Юрченко Ю. Ф. III Международный коллоквиум по электронно-лучевой сварке, резке и наплавке. Сварочное производство. № 7, 1984.
110. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Физматгиз, 1963. 840 с.
111. Application of high power EB Welding / F. Echhorn, M. Panten, B. Spies, K. Depner // Electron and Laser Beam Weld.: Proc. Int. Conf. (14-15 July 1986, Tokyo). Oxford, 1986. P. 183–192.
112. A study on occurrence and prevention of defects of EBW: report 2 / K. Watanabe, T. Shida, H. Susuki, H. Okamura // J. Jap Weld Soc. 1975. Vol. 44. No 2. P. 121–127.
113. Automatic weld line sensing and work positioning for electron beam welding / S. Sasaki, H. Murakami, T. Iwami, S. Yasunaga // IIW DOC. 4-368-84.
114. Automatische Steuerung des Elektronenstrahlschweißprozesses mit Schweißzusatz in Abhängigkeit von der Werkstückabmessung und magnetischen Storfeldern / P. Anderl, C. Monk, W. Paul, K. Steigerwald // DVS-Berichte 63 / Steigerwald Strahltechnik GmbH Puchheim. Munchen, 1963. P. 3–10.
115. Blakeley P.J, Sanderson A. The Origin and Effects of magnetic Fields in Electron Beam Welding / Welding Journal. 1984. Vol. 63, pp.42–49.

116. Carrol M.J., Powers D.E. Automatic joint for CNC-programmed electron beam welding // *Weld. J.* 1985. Vol. 64. No 8. P. 34–38.
117. Cooper J.C., Previs A., Schumacher B.W. Closed-loop beam Position controller for electron beam welding // *DVS-Ber.* 1980. Vol. 63. P. 20–25.
118. Ctorbunov V.C., Lokshin V.E., Nazarenko O.K. Seam-tracking in electron beam welding of thick metal // 1st. Int. Conf. Adv. Weld Syst. (19-21 Nov. 1985, London). Abington, 1987. P. 359–365.
119. Druzhinina A. A. On the need of monitoring and compensating the effect of magnetic interference in the process of electron-beam welding / A. A. Druzhinina, V. D. Laptенок, O. V. Maslova // *Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации: материалы XII Междунар. науч. конф. бакалавров, магистрантов и аспирантов*, Красноярск: СибГАУ, 2013. С. 99–100.
120. Druzhinina A. Compensation of the effect of magnetic fields on the electron beam position in the process of electron beam welding / V. Laptенок, A. Druzhinina, A. Murygin, Y. Seregin // *Elektrotechnica & Elektronika E+E*, Sofia, 2014. Vol. 49. No 5-6. P. 62–67.
121. Elektronenstralschweissen. Das Verfahren und seine industrielle Anwendung fuhr hochste Produktivitat. / D. von Dobeneck., T. Lower, V. Adam. // *Moderne Industrie*. Germany, 2001.
122. Furner A. J. Electron beam welding thin section precipitation hardening steel // *Weld J.* 1981. Vol 1. P. 18–66.
123. High power electron beam welding of thick steel plates. Method for elimination beam deflection caused / H. Kihara, S. Minehisa, N. Sacabata, X. Shibuya // *Weld. Wold.* 1984. Vol. 22. No 516. P. 126–136.
124. Hiromoto S., Yamare Y., Moriyasu M., Amine M. Muzubisy denky zuxo. 1985. Vol. 59. No 5. P. 394–398.
125. Lange A., Cramer A., Beyer E. Thermoelectric currents in laser induced melts pools // *J. Laser appl.* 2009. Vol. 21, No. 2. P. 82–87.
126. Mauer K.O. Systems for beam positioning in electron beam welding. *Schweisstechnik.* 1982. Vol. 32. No 8. P. 368–373.

127. Murakami H., Iwami T, Yasunaga S., Automatic positioning system for electron beam welding // IECON 84. Proc. Int. Conf. Ind. Electron. Contr. and Instrum. (22-26 Oct. 1984, Tokyo). Ind. Appl. Microelectron. New York, 1984. Vol. 1. P. 545–556.

128. Pat. 1585918 Great Britan, MKU B 23K 15/00. A method of setting a path for a charge carrier beam of charge carrier beam apparatus and charge carrier beam apparatus with means for carrying out the method / W. Scheffels. Publ. 11.03.1981.

129. Pat. 3766355 USA, MKU И 23K 15/00. Apparatus for use with Electron Beam Welding Machines / E. Kottkamp. Publ. 23.08.1971.

130. Pat. 4223200 USA, MKU И 23K 15/00. Charged particle beam processing with magnetic field compensation / C. Mocnch, W. Scheffels, D. Konly, K. H. Steigerwald. Publ. 16.09.1980.

131. Shercliff J.A. Thermoelectric magnetohydrodynamics // J. Fluid Mech. 1979. Vol. 91. P. 231-251.

132. Sobisch G. Anwendung einer mikrorechnerges teurten Elektronenstrahlshweißanlage für Forschung und Prodaction // Zis Mitt. 1984. Vol. 26. No 1. P. 12–16.

133. Sun Naiwen, Ding Peifan. A new seam tracking system with differential feed back of the reflected electrons during the EB welding // Weld. Melt. Electrons and Laser Beam: 4-th Int. Colloq. (26–30 sept. 1988,Cannes). P. 775–781.

134. Wei P. S., Chih-Wei Wen. Missed joint induced by thermoelectric magnetic field in electron-beam welding dissimilar metals – Experiment and scale analysis // Metallurgical and Materials Transactions B. 2002. Vol. 33. P. 765–773.

135. Wei P.S., Lii T.W. Electron beam deflection when welding dissimilar metals // Journal of Heat Transfer. 1990. Vol. 112. P. 714–720.

136. Ziolkowski M., Brauer H. Modelling of Seebeck effect in electron beam deep welding of dissimilar metals // COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2009. Vol. 28. No 1. P. 140–153.