

Варушкин Степан Владимирович

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

05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Трушников Дмитрий Николаевич**
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Браверман Владимир Яковлевич**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Сварка летательных аппаратов» Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

Мелюков Валерий Васильевич
доктор технических наук, профессор,
директор ООО «Вятский аттестационный центр», г. Киров

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится 7 февраля 2020 года в 12 часов 30 мин на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.03, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 423б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru/>)

Автореферат разослан «26 декабря 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Е.М. Федосеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Наплавка как технологический процесс широко применяется в мире с целью ремонта изношенных участков изделия или придания поверхностным слоям специальных свойств. В последнее десятилетие стремительно развивается использование процессов многослойной наплавки проволочных материалов для формирования заготовок крупногабаритных металлических деталей.

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

Электронно-лучевая наплавка проволочным металлическим материалом наиболее ярко проявляет свои преимущества при изготовлении деталей из химически активных материалов при одновременно высоких требованиях к уровню механических свойств и к низкой остаточной пористости. Стоит отметить такие преимущества электронно-лучевой наплавки, как высокая производительность и точность дозирования тепловой мощности.

Примерами деталей, изготавливаемыми с применением электронно-лучевой наплавки проволокой, могут стать элементы авиационного двигателя или газоперекачивающей турбины, гребные винты, детали типа «шнек», и многие другие, в том числе изделия с элементами бионического дизайна.

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

Одной из сложностей проведения процесса электронно-лучевой наплавки проволочным материалом является проблема обеспечения точного совмещения электронного луча с присадочной проволокой. Диаметр электронного луча в точке фокусировки составляет доли миллиметра. Даже незначительное смещение проволоки относительно оси луча приводит к существенной асимметрии теплового источника и вызывает нарушение стабильности формирования наплавленного валика. Во избежание выхода присадочной проволоки из-под воздействия электронного луча применяют дополнительные приемы, чаще всего расфокусирование электронного луча. При этом размер электронного луча в плоскости его взаимодействия с присадочной проволокой получают сопоставимым с размером сечения присадочной проволоки. Это приводит к снижению энергетической эффективности процесса,

увеличению припусков под механическую обработку, увеличенному тепловложению в изделие со всеми вытекающими последствиями.

Альтернативой такому подходу служит оперативное управление положением присадочной проволоки по сигналам обратной связи. Существующие системы для осуществления такого регулирования имеют ряд недостатков. В качестве наиболее общих для них можно отметить потребность в относительно высоких вычислительных мощностях.

Цель диссертационной работы. Целью настоящей работы является разработка метода оперативного управления положением присадочной проволоки относительно электронного луча для обеспечения стабильности качества изделий при многослойной электронно-лучевой наплавке.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих систем оперативного позиционирования электронного луча в процессе электронно-лучевой обработки металлов.
2. Исследование сигнала тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны.
3. Построение модели формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе взаимодействия электронного луча с присадочной проволокой и подложкой.
4. Разработка метода оперативного управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки по сигналу рентгеновского излучения из технологической зоны.

Методология исследования. Для достижения поставленной цели работа включала в себя теоретические и практические исследования. Было применено математическое моделирование формирования тормозного рентгеновского излучения при взаимодействии электронного луча с присадочной проволокой и подложкой в процессе наплавки. Численная реализация математической модели производилась в программном комплексе MathCAD. В работе использован комплекс научно-технологического оборудования: машина электронно-лучевой сварки, компактный механизм подачи проволоки с приводом на основе шагового двигателя, сцинтилляционный детектор на основе монокристалла активированного йодистого цезия и кремниевый фотоэлектронный умножитель, компьютерная информационно-измерительная система, многоканальные аналого-цифровые преобразователи. В качестве основных методов обработки сигнала рентгеновского излучения использовались синхронное накопление и синхронное детектирование.

Научная новизна работы:

1. Разработана модель описывающая формирование тормозного рентгеновского излучения в зависимости от технологических параметров при взаимодействии

осциллирующего электронного луча с присадочной проволокой и подложкой в процессе наплавки.

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

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

Практическая значимость работы:

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

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

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

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

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

технологий, использующих в качестве источника тепла электрическую дугу в вакууме».

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием современных средств проведения исследований, обоснованностью методов исследований и верификацией модели по экспериментальным данным, полученным на действующих технологических машинах электронно-лучевой сварки.

На защиту выносятся:

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

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

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

Апробация работы. Основные результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались на 11 региональных, всероссийских и международных научно-технических конференциях, форумах и семинарах. Среди них: III научно-технический Семинар по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «Объ – 2019» 2019г., Новосибирск, ИЯФ СО РАН; Международная научно-техническая конференция «Сварка и контроль – 2018» 2018г., Пермь, ЗАО ЗУАЦ; 6-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» 2018г., Томск, ТПУ; 13-я международная конференция «Electron Beam Technologies - EBT 2018» 2018г., Болгария, г. Варна, Институт электроники Болгарской академии наук; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг-2017» 2017г., Санкт-Петербург, СПбПУ; Международный симпозиум «Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation» 2016г. Япония, г. Осака, Joining and Welding Research Institute.

Личный вклад автора. Соискателем лично предложен способ оперативного управления параметрами электронно-лучевой наплавки. Разработана математическая модель описывающая формирование тормозного рентгеновского излучения от технологических параметров при взаимодействии осциллирующего электронного

луча с присадочной проволокой и подложкой в процессе наплавки. Выполнены экспериментальные исследования формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе электронно-лучевой наплавки проволокой. Проведена экспериментальная апробация разработанного способа управления.

Публикации. По теме диссертационного исследования было опубликовано 24 печатные работы, в том числе 4 в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus или Web of Science, 6 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патента РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Объем работы составляет 130 страницу, среди них 56 рисунков, 8 таблиц. Список литературы содержит 142 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, виды и количество публикаций.

В первой главе отражен анализ различных литературных данных в области управления процессами электронно-лучевой обработки материалов.

Рассмотрены физические и технологические основы реализации различных методов слежения за положением электронного луча в процессе сварки или наплавки.

Установлено, что наиболее распространенные способы позиционирования электронного луча при электронно-лучевой сварке основываются на следующих принципах: регистрация возмущений наведенного магнитного поля; регистрация вторичных электронов со сканированием технологической зоны; использование оптической системы в видимом спектре; регистрация тормозного рентгеновского излучения при сварке статичным лучом; регистрация тормозного рентгеновского излучения с периодическим сканированием технологической зоны; регистрация отраженных электронов с периодическим сканированием технологической зоны.

Показано, что использование рентгеновского излучения из технологической зоны в качестве сигнала обратной связи для осуществления оперативного управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки создает сочетание преимуществ помехозащищенности сигнала и простоты его измерения. Необходимо исследование закономерностей и особенностей формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе электронно-лучевой наплавки проволокой для разработки способа оперативного управления положением

проволоки с целью повышения стабильности геометрии и качества наплавленных слоев.

Вторая глава посвящена разработке методики проведения исследований, описанию использованного оборудования, программного обеспечения и предложенных методов математической обработки.

Рисунок 1 поясняет методику проведения экспериментальных исследований формирования тормозного рентгеновского излучения в процессе взаимодействия электронного луча с присадочной проволокой или ее имитацией – вольфрамовым стержнем. Проволока или вольфрамовый стержень устанавливаются параллельно поверхности подложки, которая должна располагаться перпендикулярно оси электронного луча. Электронный луч фокусируется вблизи поверхности подложки и непрерывно осциллирует по кольцевой траектории. Присадочная проволока или ее имитатор равномерно перемещаются, пересекая область воздействия электронного луча. Датчик рентгеновского излучения располагается над зоной обработки и направлен на область воздействия электронного луча. Сигнал тормозного рентгеновского излучения в процессе проведения эксперимента непрерывно измеряется и записывается в файл для обработки и анализа.

Для регистрации и измерения рентгеновского излучения из технологической зоны был разработан компактный датчик (рисунок 2) и электрическая схема, позволяющая производить измерения.

В работе предложено использовать два основных способа обработки сигналов: синхронное накопление и синхронное детектирование. Метод синхронного

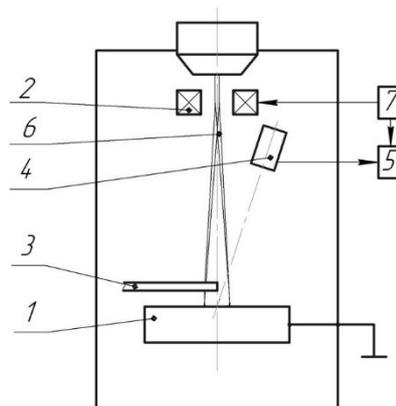


Рисунок 1. Схема проведения эксперимента по взаимодействию электронного луча с вольфрамовой цилиндрической мишенью: 1 – подложка; 2 – отклоняющие катушки; 3 – проволока или вольфрамовый стержень; 4 – датчик рентгеновского излучения; 5 – блок обработки; 6 – электронный луч; 7 – блок управления токами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

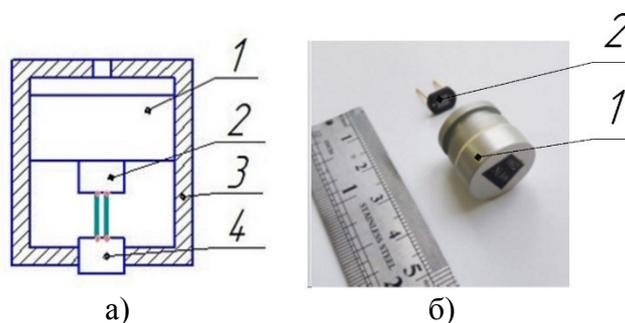


Рисунок 2. Схема (а) и фотография (б) малогабаритного датчика рентгеновского излучения: 1 – сцинтилляционный детектор; 2 – кремниевый фотоумножитель; 3 – свинцовый корпус датчика; 4 – разъем сопряжения.

накопления, будучи разновидностью метода синхронного детектирования, является методом оптимальной фильтрации, позволяет наилучшим образом выделить составляющую на частоте внешнего воздействия, описывается выражением:

$$S(\tau) = \frac{\int_0^{t_0} g(t+\tau) \cdot Data(t) dt}{\frac{t_0 \cdot \Delta T}{T}}, \quad (1)$$

где $Data(t)$ – обрабатываемый сигнал; $g(t+\tau)$ – вспомогательный сигнал; t – время; T – период внешнего воздействия; t_0 – время выборки ($t_0 \gg T$); ΔT – ширина импульсов вспомогательного сигнала; τ – сдвиг по времени вспомогательного сигнала ($0 < \tau < T$). Вспомогательный сигнал формируется из сигнала внешнего воздействия и представляет из себя прямоугольный сигнал малой скважности такого же периода.

Метод синхронного детектирования отличается возможностью его простой реализации, как в цифровой, так и аналоговой форме, и математически описывается выражением:

$$b_{\text{дет}} = \frac{\int_0^{t_0} I_{dc} \sin(\omega t) \cdot Data(t) dt}{t_0}, \quad (2)$$

где $I_{dc} \sin(\omega t)$ – переменная составляющая сигнала внешнего воздействия; ω – частота внешнего воздействия. В качестве внешнего воздействия применялась осцилляция электронного луча.

В третьей главе отражены результаты экспериментов по электронно-лучевой наплавке проволокой, разработка и верификация математических моделей, установление закономерностей и особенностей сигнала тормозного рентгеновского излучения в процессе электронно-лучевой наплавки проволокой.



Рисунок 3. Поперечный шлиф образца, полученного в результате электронно-лучевой наплавки проволокой

Выполнены исследования по определению схемы и параметров режимов электронно-лучевой наплавки проволокой, обеспечивающих стабильное плавление присадочной проволоки и сплавление с подложкой или с предыдущим валиком. Оценка режимов производилась путем визуального контроля процесса и результатов наплавки. На рисунке 3 представлены результаты выращивания одиночной стенки с применением присадочной проволоки ER308L диаметром 0,8 мм и подложки из стали 12X18H10T.

Сплавление первого слоя с подложкой происходит с минимальным проплавлением в подложку. Наплывы, несплавления, поры, раковины отсутствуют.

Для построения математической модели процесса формирования тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой наплавке проволокой за основу были взяты два известных уравнения: уравнение описывающее интегральный поток

энергии тормозного рентгеновского излучения Φ_e при взаимодействии электронного луча с плоской мишенью и уравнение описывающее $\Phi_\varphi(\varphi)$ относительное значение потока энергии рентгеновского излучения от угла φ между направлением электронного луча и нормалью к поверхности мишени:

$$\Phi_e = k_0 I Z U_0^2, \quad (3)$$

$$\Phi_\varphi(\varphi) = \frac{\Phi(\varphi)}{\Phi_e} = \left[1 - \left(\frac{\varphi}{90} \right)^3 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где k_0 – коэффициент пропорциональности, I – ток электронного пучка, Z – атомный номер обрабатываемого материала, U_0 – ускоряющее напряжение.

Выразив угол φ через координату по оси X (рисунок 4), проходящей через центр сечения присадочной проволоки, параллельной поверхности подложки и направленной поперек проволоки, а также с учетом распределения тока электронного луча в поперечном сечении $j(x,y)$ было получено выражение, описывающее статическую математическую модель зависимости потока энергии сигнала от отклонения присадочной проволоки Δ_x

$$\Phi(\Delta_x) = \begin{cases} k_0 Z U_0^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{D_{np}}{2}}^{\frac{D_{np}}{2}} \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D_{np}} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \cdot j(x + \Delta_x, y) dx dy, & -\frac{D_{np}}{2} < x < \frac{D_{np}}{2} \\ k_0 Z U_0^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} j(x + \Delta_x, y) dx dy, & x \leq -\frac{D_{np}}{2}, \frac{D_{np}}{2} \leq x \end{cases} \quad (5)$$

где D_{np} – диаметр проволоки; Δ_x – отклонение по оси X присадочной проволоки от оси электронного луча; x – координата по оси X; y – координата по оси Y; $j(x + \Delta_x, y)$ – распределения плотности тока электронного луча в поперечном сечении при смещении присадочной проволоки относительно электронного луча на Δ_x .

Сигнал интенсивности тормозного рентгеновского излучения, регистрируемый датчиком описывается следующим выражением:

$$J_{рег} = \frac{\Phi \cdot S_d}{l^2}, \quad (6)$$

где S_d – площадь чувствительной зоны датчика, l – расстояние от зоны формирования тормозного рентгеновского излучения до чувствительной зоны датчика.

При введении осцилляции электронного луча поперек проволоки $x(t) = A \cdot \sin(2\pi\omega t)$, A – амплитуда колебаний, ω – частота колебаний, t – время, в спектре сигнала появляется периодические составляющие на частотах кратных

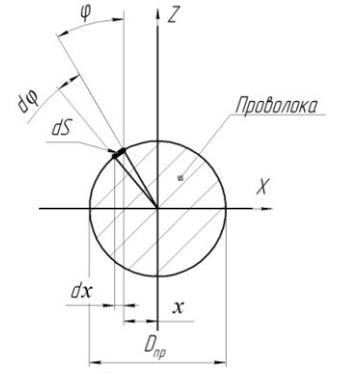


Рисунок 4. Схема расчета угла φ в произвольной точке на поверхности проволоки через положение этой точки по оси X.

частоте осцилляции. Выражение для величины первой гармоники, совпадающей с результатом обработки методом синхронного детектирования:

$$b_1(\Delta x) = \begin{cases} \frac{k_0 Z U_0^2 S_d}{l^2} \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\frac{D_{np}}{2}}^{\frac{D_{np}}{2}} x(t) \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D_{np}} \right)^2 \right]^{\frac{2}{3}} \cdot j(x + \Delta_x + x(t), y) dx dy dt, & -\frac{D_{np}}{2} < x < \frac{D_{np}}{2} \\ \frac{k_0 Z U_0^2 S_d}{l^2} \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot j(x + \Delta_x + x(t), y) dx dy dt, & x \leq -\frac{D_{np}}{2}, \quad x \geq \frac{D_{np}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

Для верификации построенных моделей, результаты их численной реализации сравнивались с эмпирическими данными. В качестве сравниваемых величин было выбрано относительное значение интенсивности тормозного рентгеновского излучения, которое определяется как отношение мгновенного регистрируемого сигнала $J_{рег}$ к сигналу, регистрируемому от плоской подложки J_0 . В качестве диаметра луча $D_{л}$ принимался диаметр окружности, вмещающей в себя 95% энергии электронного луча. Результаты сравнения представлены на рисунках 5 и 6.

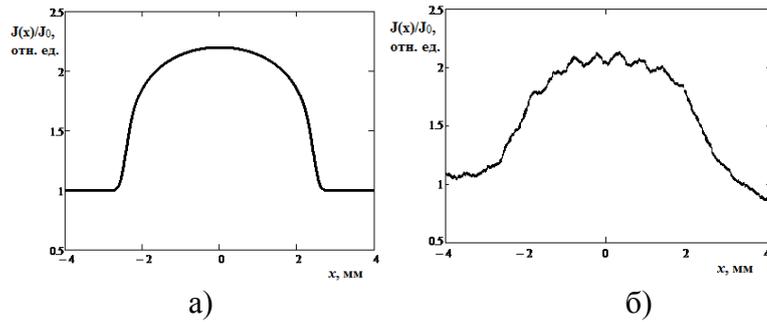


Рисунок 5. Величина сигнала относительной интенсивности рентгеновского излучения в зависимости от положения электронного луча относительно проволоки. Подложка – ХН67МВТЮ, проволока – Вольфрам. $D_{np}=5$ мм; $D_{л}=0,5$ мм: а) результаты моделирования; б) экспериментальные результаты.

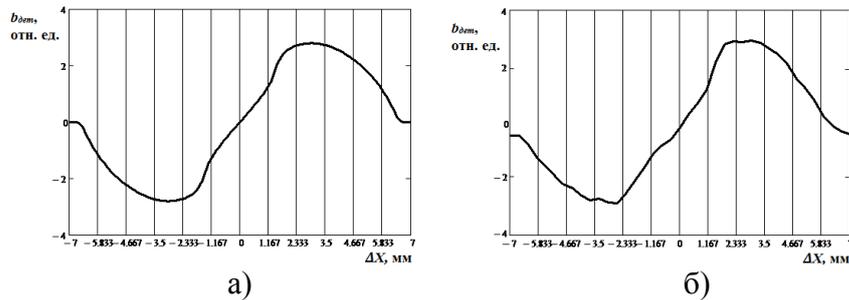


Рисунок 6. Результат обработки сигнала относительной интенсивности тормозного рентгеновского излучения методом синхронного детектирования. Подложка – ХН67МВТЮ, проволока – Вольфрам. $D_{np}=5$ мм; $A=4$ мм; $\omega=800$ Гц; $D_{л}=0,5$ мм: а) результаты моделирования (3); б) практические результаты.

Анализ сравнения теоретических данных с эмпирическими подтвердил адекватность разработанных моделей. Для статической модели средняя ошибка аппроксимации $\bar{A} = 6\%$, расчетная величина критерия Фишера $F=611$, коэффициент

корреляции $R=0,98$. Для динамической модели средняя ошибка аппроксимации $\bar{A} = 3\%$, критерий Фишера составил $F=340$, коэффициент корреляции $R=0,996$. Табличное значение порогового значения критерия Фишера для надежности $0,95$ $F_T=2,49$.

На рисунке 7 представлены графики изменения первой гармоники тормозного рентгеновского излучения, обработанного методом синхронного детектирования, в зависимости от значения отклонения проволоки относительно центра осцилляции электронного луча для разных диаметров луча.

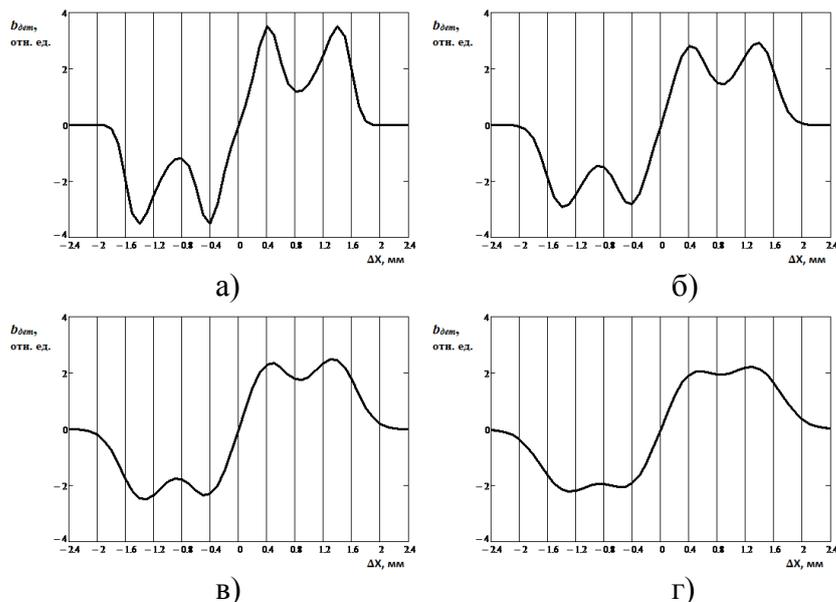


Рисунок 7. Результат обработки сигнала относительной интенсивности тормозного рентгеновского излучения методом синхронного детектирования для разных диаметров луча.

Подложка – сталь 12X18Н10Т, проволока – 308L; $D_{пр}=0,8$ мм; $A=2$ мм; $\omega=800$ Гц:

а) $D_л=0,5$ мм; б) $D_л=0,8$ мм; в) $D_л=1,1$ мм; г) $D_л=1,4$ мм.

Первая гармоника сигнала тормозного рентгеновского излучения содержит в себе составляющую, несущую информацию о положении присадочной проволоки относительно центра осцилляции электронного луча. Выделение этой информационной составляющей из спектра сигнала было выполнено посредством метода синхронного детектирования. Зависимость в районе 0 близка к линейной и может быть использована для оперативного управления параметром отклонения луча от проволоки в процессе наплавки.

Зависимость значения сигнала, обработанного методом синхронного детектирования $b_{дет}$, от значения отклонения проволоки относительно центра осцилляции электронного луча Δ_x имеет линейный характер в пределах, которые могут быть вычислены по выражению:

$$\left(-A + \frac{D_{пр}}{2}\right) < \Delta_x < \left(A - \frac{D_{пр}}{2}\right), \quad (8)$$

где A – амплитуда осцилляции электронного луча; $D_{\text{пр}}$ – диаметр присадочной проволоки.

Характер зависимости $b_{\text{дет}}$ не меняется при изменении фокусировки электронного луча в пределах диаметра луча от 0,5 до 1,4 мм, однако, несколько меняется наклон прямой в районе 0.

Исследование изменения параметров тормозного рентгеновского излучения в зависимости от амплитуды осцилляции электронного луча (рисунок 8) показало, что при амплитудах осцилляции, значительно превышающих диаметр присадочной проволоки, в области относительно малых смещений проволоки наблюдается близкая к линейной зависимость $b_{\text{дет}}$ от Δx . По мере уменьшения амплитуды осцилляции и приближения её значения к значению диаметра присадочной проволоки происходит уменьшение участка с линейной зависимостью значений $b_{\text{дет}}$ от Δx (рисунок 8а). При амплитуде осцилляции равной радиусу присадочной проволоки, в значительной области вблизи малых значений Δx наблюдается практически горизонтальный участок графика $b_{\text{дет}}$ (рисунок 8б). При снижении амплитуды осцилляции до значений меньше диаметра присадочной проволоки происходит переход от прямой к обратной зависимости $b_{\text{дет}}$ на участке с линейной зависимостью значений $b_{\text{дет}}$ от Δx (рисунок 8в).

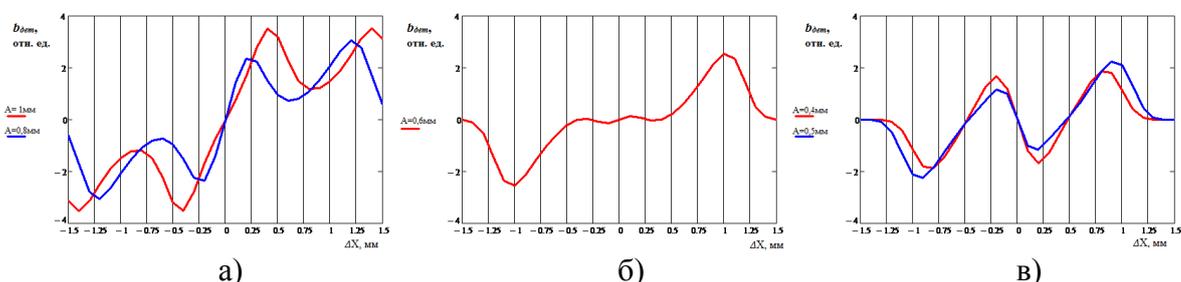


Рисунок 8. Результат синхронного детектирования в зависимости от положения присадочной проволоки ($D_{\text{л}}=0,5$ мм): а) $A \geq \frac{D_{\text{пр}}}{2}$; б) $A = \frac{D_{\text{пр}}}{2}$; в) $A \leq \frac{D_{\text{пр}}}{2}$.

Четвертая глава посвящена разработке способа многослойной электронно-лучевой наплавки с оперативным управлением положением присадочной проволоки по сигналу тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны.

Для представления визуальной информации о положении присадочной проволоки разработана методика графического представления информации о положении присадочной проволоки по локальному максимуму функции $S(\tau)$, получаемой путем обработки сигнала рентгеновского излучения методом синхронного накопления. Для этого график функции $S(\tau)$ должен быть представлен в пространственных координатах X-Y (рисунок 9а), соответствующих траектории осцилляции электронного луча. Далее осуществляется построение прямой линии, проведенной через точку, соответствующую центру осцилляции электронного луча, и

локальный максимум функции $S(\tau)$, расположенный между двумя минимумами (рисунок 9б). Тогда через точку пересечения этой прямой с траекторией осцилляции электронного луча проведем ось присадочной проволоки. Границы присадочной проволоки определяются исходя из известных диаметров проволоки и траектории осцилляции электронного луча (рисунок 9в).

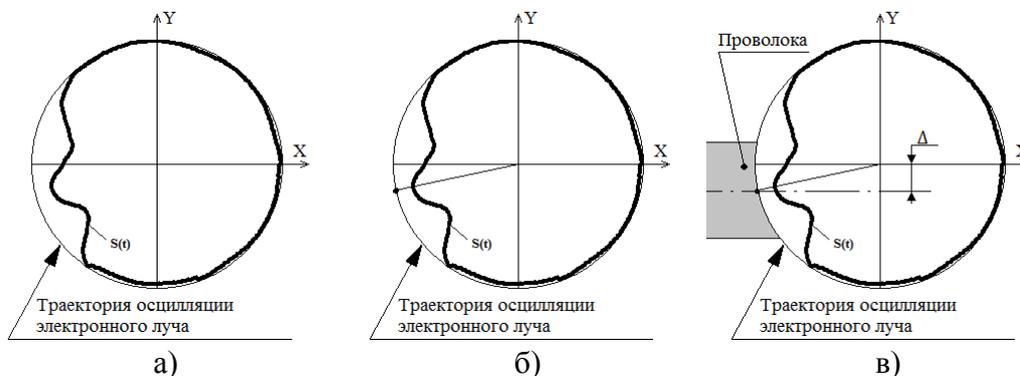


Рисунок 9. Визуализация положения присадочной проволоки по локальному максимуму функции $S(\tau)$: а) построение графика функции $S(\tau)$ в пространственных координатах; б) нахождение оси присадочной проволоки; в) определение границ проволоки и величины отклонения проволоки Δ .

Разработанный способ многослойной электронно-лучевой наплавки с оперативным управлением положением присадочной проволоки в процессе основывается на этапах:

1. В процессе электронно-лучевой наплавки проволокой осуществляется непрерывная осцилляция электронного луча по траектории имеющей пересечение с присадочной проволокой.

2. В режиме реального времени с датчика рентгеновского излучения, располагающегося над зоной наплавки, производится измерение сигнала рентгеновского излучения.

3. Сигнал рентгеновского излучения обрабатывается методом синхронного детектирования или синхронного накопления.

4. С использованием установленных зависимостей выделяется информационная составляющая, коррелирующая с отклонением присадочной проволоки относительно центра осцилляции электронного луча.

5. Осуществляется управление механизмом позиционирования присадочной проволоки или системой отклонения электронного луча совместно с механизмом позиционирования изделия для поддержания значения информационной составляющей на уровне, соответствующем требуемому положению присадочной проволоки.

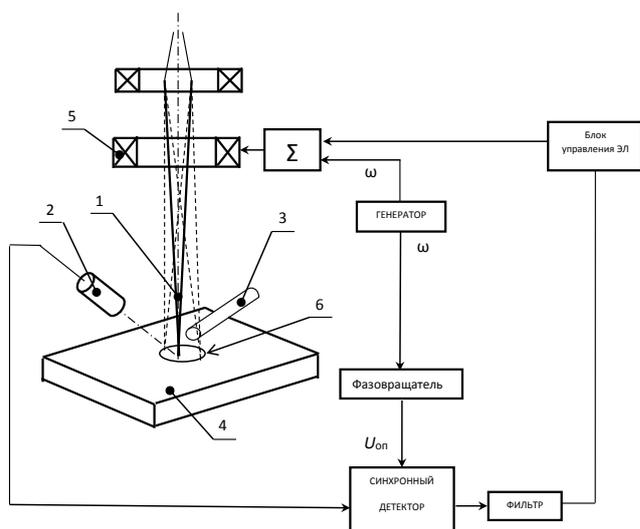


Рисунок 10. Схема экспериментальной установки для осуществления оперативного контроля:

- 1 – электронный луч; 2 – датчик рентгена;
- 3 – присадочная проволока; 4 – подложка;
- 5 – отклоняющие катушки; 6 – траектория осцилляции электронного луча.

детектирования по второму варианту способа. Для определения отклонения присадочной проволоки от требуемого положения систему отклонения электронного луча настраивается так, что одна из осей отклоняющей системы должна совпадать с осью присадочной проволоки. Иначе перед выполнением наплавки должна быть проведена тарировка системы для учета угла подачи присадочной проволоки.

В результате обработки сигнала рентгеновского излучения из технологической зоны методом синхронного накопления по первому варианту способа получают функцию $S(\tau)$ и величину $\Delta\tau_0$, определяющую отклонение экстремума функции $S(\tau)$ от сигнала тока $Osc(\tau)$ в отклоняющих катушках, то есть величину, характеризующую запаздывание функции $S(\tau)$ относительно сигнала тока в отклоняющих катушках (Рисунок 11).

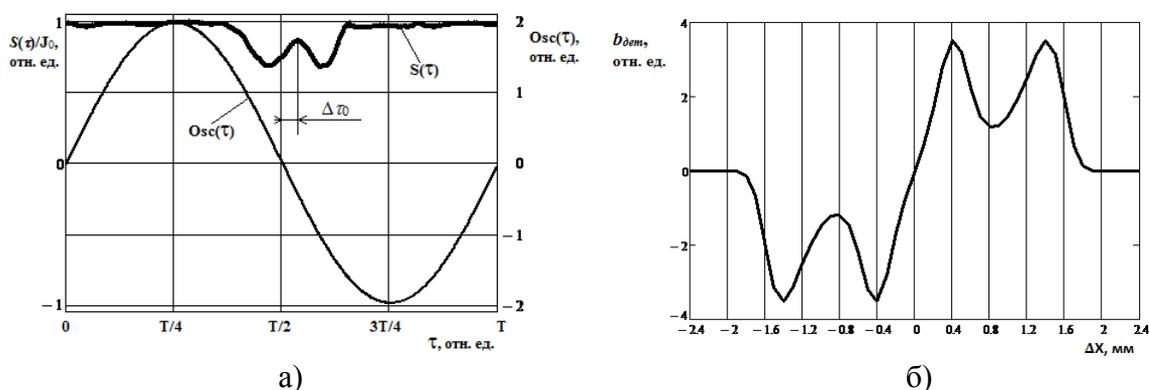


Рисунок 11. Результат обработки сигнала тормозного излучения методом синхронного накопления $S(\tau)$ (а) и методом синхронного детектирования $b_{дет}$ (б). $Osc(\tau)$ – сигнал тока в отклоняющих катушках.

На рисунке 10 показаны схема экспериментальной установки, осуществляющей разработанный способ оперативного управления. Сигнал с датчика тормозного рентгеновского излучения подвергают фильтрации и выпрямлению в блоке обработки. В этом же блоке, совместно с сигналами токов отклоняющих катушек, отфильтрованный и выпрямленный сигнал тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны обрабатывается методом синхронного накопления по первому варианту способа, или методом синхронного

Величина $\Delta\tau_0$ зависит от положения присадочной проволоки относительно центра осцилляции электронного луча и принимает значения, равные нулю, при прохождении присадочной проволоки через центр осцилляции электронного луча.

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

Структурная схема системы оперативного управления положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки представлена на рисунке 12.

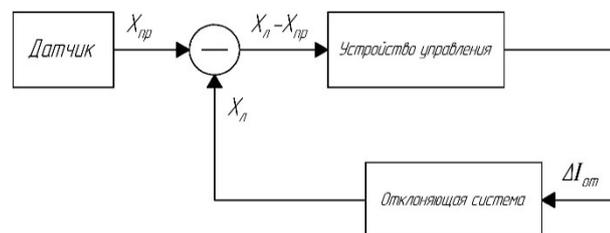


Рисунок 12. Структурная схема системы для осуществления оперативного управления положением присадочной проволоки относительно электронного луча: $X_{гр}$ – положение проволоки по оси X; $X_л$ – положение центра осцилляции электронного луча по оси X; $\Delta I_{от}$ – смещение тока отклоняющей катушки по оси X при котором присадочная проволока проходит через центр осцилляции электронного луча

На рисунке 13 представлены участки наплавки без управления и с оперативным управлением положением присадочной проволоки.

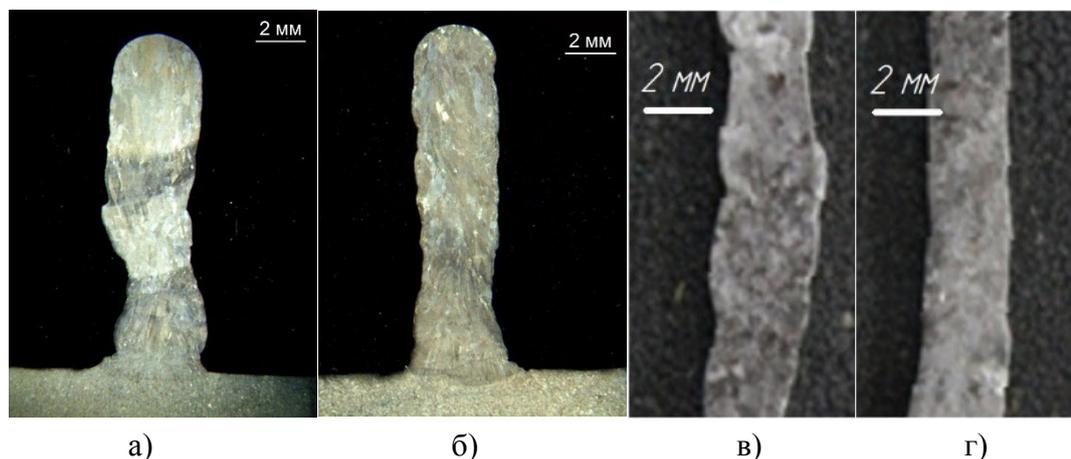


Рисунок 13. Поперечное сечение участков наплавленных образцов: а) наплавка 308L с оперативным контролем положения присадочной проволоки; б) наплавка 308L с оперативным управлением положением присадочной проволоки; в) наплавка техническим титаном с оперативным контролем положения присадочной проволоки; г) наплавка техническим титаном с оперативным управлением положением присадочной проволоки;

Анализ геометрических характеристик участков наплавленных стенок показывает, что применение разработанного способа оперативного управления

положением присадочной проволоки в процессе электронно-лучевой наплавки позволяет повысить стабильность качества наплавленных слоев на величину до 50% за счет уменьшения колебания ширины слоев и их смещения относительно друг друга.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

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

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

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

4. Разработан способ электронно-лучевой наплавки с оперативным управлением положением присадочной проволоки по сигналу тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны. Способ исключает вынужденные прерывания процесса вследствие выхода присадочной проволоки из-под воздействия электронного луча. И повышает воспроизводимость качества наплавки на величину до 50% за счёт уменьшения колебания ширины наплавленных слоев и их смещения относительно друг друга.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Входящие в международные базы цитирования Scopus или Web of Science:

1. Varushkin, S Using bremsstrahlung X-Ray for positioning of the filler wire during electron beam surfacing / S. Varushkin, D. Trushnikov, E. Koleva, D. Shamov // Journal of Physics Conference Series. – 2018. – Vol. 1089. – P. 012009. (Scopus)
2. Varushkin, S Optimal Mode of Beam Oscillation for Melt-Through Mode in Electron Beam Welding and Its Influence on Penetration Control System / S. Varushkin, D. Trushnikov, G. Permyakov // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1360-1364. (Web of Science, Scopus)
3. Varushkin, S. Researching signals from workpiece backside during electron beam welding in full penetration mode / S. Varushkin, V. Belenkiy, D. Trushnikov // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 743 KEM. – P. 231-235. (Scopus)
4. Trushnikov, D. N. Current-driven ion-acoustic and potential-relaxation instabilities excited in plasma plume during electron beam welding / D. N. Trushnikov, G. M. Mladenov, V. Y. Belenkiy, E. G. Koleva, S. V. Varushkin // AIP Advances. – 2014. – Vol. 4, Iss. 4. – P. 047105. (Web of Science, Scopus)

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Многослойная электронно-лучевая наплавка проволочным материалом / С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, Е.С. Саломатова, В.Я. Беленький, Г.Л. Пермяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2019. Т. 21, № 4. С. 89-94. (ВАК)
2. Варушкин, С.В. Осцилляция электронного луча как средство улучшения формирования корня сварного шва и облегчения контроля сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке / С.В. Варушкин, В.Я. Беленький, Н.А. Зырянов, А.А. Кылосов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 151-159. (ВАК)
3. Варушкин, С.В. Особенности сигнала тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке с осцилляцией электронного луча / С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, Г.Л. Пермяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 3. – С. 93-106. (ВАК)
4. Варушкин, С.В. Модель формирования сигнала для контроля сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке / С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 6-2. – С. 244-252. (ВАК)

Патенты:

5. Способ электронно-лучевой наплавки с контролем положения присадочной проволоки относительно электронного луча (варианты): пат. 2704682 Рос. Федерация. № 2018145458 / Трушников Д.Н., Варушкин С.В.; заявл. 20.12.18; опубл. 30.10.19, Бюл. 31. 17 с.
6. Способ электронно-лучевой сварки: пат. 2494846 Рос. Федерация. № 2012101077/02 / Трушников Д.Н., Кротова Е.Л., Беленький В.Я., Варушкин С.В.; заявл. 11.01.12; опубл. 10.10.13, Бюл. 28. 12 с.