



На правах рукописи

РУМЯНЦЕВ ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО СТЫКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

Специальность 05.02.10 - Сварка, родственные процессы и технологии

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре Технологии металлов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: **Драгунов Виктор Карпович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Технологии металлов, проректор ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты: **Гейкин Валерий Александрович**
доктор технических наук, профессор,
действительный член Академии наук авиации и воздухоплавания, директор филиала НИИД ФГУП «ММПП «Салют», лауреат премии Правительства РФ

Трушников Дмитрий Николаевич
доктор технических наук, профессор
кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов, начальник управления науки и инноваций ФГБОУ ВО «ПНИПУ»

Ведущая организация **ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э.Баумана»**

Защита диссертации состоится «22» сентября 2020 г. 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.025 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, корпус И, Зал Ученого совета (4 этаж). Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, диссертационный совет МЭИ.025.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан «15» июля 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

МЭИ.025 к.т.н., доцент

 А.Ю. Марченков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как ракетостроение, ядерная энергетика, энергетическое машиностроение, в том числе турбостроение, находят применение технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС), обеспечивающие получение сварных соединений, чьи служебные характеристики могут составлять (85-95) % от аналогичных характеристик основного металла.

Вопросы исследования процессов взаимодействия пучка ускоренных электронов с металлом, а также вопросы исследования электрических сигналов, получаемых в ходе преобразования вторичных явлений при ЭЛС, отражены в работах Рыкалина Н.Н., Зуева И.В., Ольшанского Н.А., Драгунова В.К., Казакова В.А., Гладкова Э.А., Башенко В.В., Беленького В.Я., Лаптенка В.Д., Трушников Д.Н., Язовских В.М., Ластовири В.Н., Назаренко О.К., Кайдалова А.А., Mladenova G.M., Mauer K.O. и др.

Вопросы автоматизации процесса совмещения электронного луча со стыком всесторонне проанализированы в работах Бравермана В.Я., Лаптенка В.Д., Мурыгина А.В., Беленького В.Я., Трушников Д.Н., Кроза А.Г., Кривенкова А.Г., Лившица М.Л., Виноградова В.А., Пастушенко Ю.И., Куцана Ю.Г. и др.

Внедрение технологий ЭЛС, помимо использования иных ее преимуществ, должно обеспечивать получение качественных сварных соединений. Однако устранение дефектов в виде непроваров в корне шва, возникающих вследствие смещения сварочной ванны относительно стыка, является сложной задачей. Стабилизация основных параметров технологического процесса ЭЛС не гарантирует устранение нестабильности положения стыка. Необходимым условием устранения дефектов является использование оценки текущего положения сварочной ванны и стыка с целью стабилизации их положения в ходе ЭЛС. Теоретически, для формирования такой оценки может быть использовано любое сопутствующее процессу ЭЛС

вторичное явление: электромагнитные излучения или эмиссия заряженных частиц из области взаимодействия.

Вместе с тем известно, что такое вторичное явление как термоэлектронная эмиссия с поверхности сварочной ванны, зависит от смещения ванны относительно стыка. Однако зависимость между сигналом тока термоэмиссии и положением стыка в прикладном плане изучена недостаточно, что препятствует его практическому использованию для получения оценки текущего положения сварочной ванны относительно стыка при ЭЛС. Поэтому на сегодня, выявление характеристик вторичных явлений, достоверно отражающих характер смещения сварочной ванны относительно стыка и на их основе разработка способов коррекции пространственного положения пучка, позволяющих устранить непровары в сварных соединениях, является актуальной задачей, имеющей научную и практическую значимость.

Цель диссертационной работы – повышение качества и воспроизводимости сварных соединений за счет повышения точности совмещения электронного пучка со стыком в процессе сварки на основе использования вторичного электронного тока в плазме, регистрируемого над областью взаимодействия по обеим сторонам стыка.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть известные устройства совмещения электронного луча со стыком при ЭЛС с целью выявления существенных факторов, оказывающих как положительное, так и отрицательное воздействие на их функционирование;
- провести оценку влияния смещения сварочной ванны относительно стыка на распределение температуры по поверхности парогазового кратера;
- провести экспериментальные исследования по выявлению условий, необходимых для регистрации сигнала вторичного электронного тока в плазме, в зависимости от текущего положения сварочной ванны и стыка в ходе ЭЛС;

- разработать методику формирования управляющего воздействия, алгоритм и систему стабилизации положения сварочной ванны относительно стыка при ЭЛС;
- провести экспериментальные исследования системы стабилизации положения сварочной ванны относительно стыка в зависимости от энергетических и технологических параметров процесса ЭЛС.

Объект исследования – современные системы совмещения пучка со стыком.

Предмет исследования – зависимость сигнала вторичного электронного тока в плазме, содержащего составляющую тока термоэлектронной эмиссии с поверхности жидкой фазы верхней части парогазового кратера, от текущего положения стыка.

Методы исследований основывались на прямых натуральных экспериментах по сварке образцов, при этом использованы положения теории сварочных процессов, теоретических основ электротехники, теории автоматического управления, методов математического планирования эксперимента, в том числе стохастического метода экспериментальной оптимизации (метод Плакетта-Бермана, метод Ноллау и Фюрста), теории обнаружения сигналов. Предположения о наличии линейной, или близкой к ней, связи между парами величин проверялись путем расчета значений коэффициента корреляции R .

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием известных теоретических положений и отсутствием противоречий с ними, а также адекватности теоретических и полученных экспериментальных данных.

Научная новизна работы

1. Выявлена закономерность изменения сигнала вторичного электронного тока в плазме при смещении сварочной ванны относительно

стыка, которая показывает, что сигнал возрастает с поверхности той части сварочной ванны, в направлении которой смещается стык.

2. Установлена закономерность изменения аналога функции автокорреляции по дисперсии сигнала вторичного тока, которая показывает, что минимум функции соответствует отсутствию смещения стыка относительно сварочной ванны.

3. Разработаны алгоритм и методика стабилизации текущего положения стыка относительно сварочной ванны, в соответствие с которой необходимым условием регистрации сигнала тока является установка коллектора в области пространства над сварочной ванной, где различие между дисперсиями амплитудных выборок текущих значений сигналов тока и дисперсией амплитудной выборки значений сигнала тока, полученного в начальный период сварки, достигает максимума.

Практическая значимость работы заключается в разработке способа и системы стабилизации положения сварочной ванны относительно стыка в ходе ЭЛС, при использовании которых снижается общая длина дефектных мест и уменьшаются затраты на ремонт изделия.

Система внедрена на сварочных установках ЭЛУ-9Б и ЭЛУ-10 при электронно-лучевой сварке узлов ответственного назначения на предприятиях ракетно-космической отрасли А-1872 и В-8534.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на X Всесоюзной конференции «Электронно-лучевая сварка» (22-24 ноября 1988г., Москва); Первой Китайско-Российской научно-технической конференции по сварке и пайке (24-28 января 1994 г., Харбин, КНР); Научно-техническом семинаре главных сварщиков предприятий ракетно-космической промышленности (29.11-02.12 1995 г., Калининград); Российской научно-технической конференции «Сварка - 95» (23-25 мая 1995 г., Пермь); Международной конференции «Сварные конструкции» (10-12 октября 2000г. Киев, Украина); Всероссийской с международным участием научно-

технической конференции «Перспективные пути развития сварки и контроля - «Сварка и контроль-2001» (25-28 сентября 2001г., Воронеж); II Международной научно-технической конференции «Сварочное производство: перспективы развития (05-08 октября 2010 г., Краматорск, Украина); Третьей международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии»(12-15 ноября 2019 г., Москва)

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, из которых 6 в рецензируемых журналах из списка ВАК, 4 авторских свидетельства РФ и 2 патента РФ на изобретения.

Личный вклад соискателя. Соискателем лично предложено использование явления термоэлектронной эмиссии с поверхности жидкой фазы верхней части парогазового кратера с целью контроля текущего положения сварочной ванны относительно стыка, а также использование аналога функции автокорреляции по дисперсии сигнала вторичного электронного тока в плазме, содержащего составляющую тока термоэлектронной эмиссии, с целью выявления смещения сварочной ванны относительно стыка.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 136 наименований и 3 приложений. Общий объем работы составляет 130 страниц, включая 7 таблиц, 37 рисунков.

Положения, выносимые на защиту: оценка текущего положения сварочной ванны относительно стыка при ЭЛС на основе анализа вторичного электронного тока в плазме, регистрируемого над областью взаимодействия пучка с материалом и использование полученной оценки для целей стабилизации положения сварочной ванны относительно стыка при ЭЛС.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение. Приведено обоснование актуальности проблемы получения оценки текущего положения сварочной ванны относительно стыка при ЭЛС для повышения качества сварных соединений. Поставлены цель и задачи

исследования, определена научная новизна, указана практическая значимость работы.

Глава 1. Рассмотрены известные системы совмещения электронного пучка со стыком и закономерности, использование которых обеспечивает выявление ситуаций наличия и отсутствия смещения сварочной ванны относительно стыка, а также закономерности, позволяющие сделать вывод о характере процессов, протекающих в сварочной ванне при смещении. Приводится классификация и описание характерных особенностей систем совмещения. Показано, что получение оценки текущего положения стыка в условиях его динамической нестабильности в ходе ЭЛС была и остается до настоящего времени основным направлением технической реализации и метрологического обеспечения систем совмещения пучка со стыком. Показано также, что, несмотря на наличие теоретических и практических разработок, выполненных как отечественными, так и зарубежными специалистами, проблема получения оценки текущего положения стыка далека от окончательного решения.

Глава 2. Изложены результаты анализа влияния смещения сварочной ванны относительно стыка на интенсивность нагрева жидкой фазы в верхней части поверхности кратера для установившегося процесса ЭЛС (рис.1).

Оценку изменения интенсивности нагрева жидкой фазы в верхней области кратера проводили методом конечных разностей. Для этого провели замену непрерывного пространственно-временного процесса теплопроводности дискретным процессом, а также допустили неизменность температуры в произвольно выбранной точке поверхности кратера в течение некоторого временного интервала и ее скачкообразное изменение в начале каждого следующего интервала времени.

В данном случае для математической постановки задачи использовали нестационарное уравнение теплопроводности и граничные условия вида:

$$\lambda_1 T_1 / \partial z = \lambda_2 T_2 / \partial z \text{ при } 0 \leq z \leq h_1, \quad (1)$$

$$\lambda_1 T_1 / \partial z = (1/R)(T_1 - T_2) \text{ при } h_1 \leq z \leq h_2, \quad (2)$$

где λ_1, λ_2 - коэффициент теплопроводности металла кромок, Вт/(м К);

R - термическое сопротивление зазора, м²·К/Вт; T_1, T_2 - температура кромок, К.

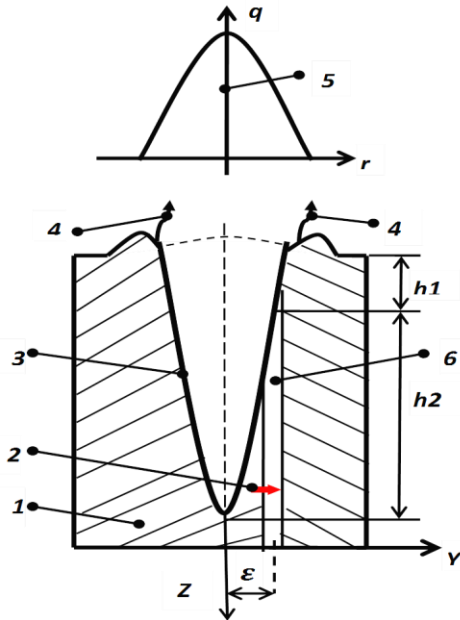


Рис.1. - Взаимное положение стыка относительно внутренней поверхности кратера и оси пучка: 1 - свариваемое изделие; 2 - поток тепла, отводимый в кромку через зазор; 3 - кратер; 4 - поток термоэлектронов; 5 - ось распределения плотности мощности источника тепла $q(r)$; 6 - зазор в стыке; ϵ - смещение сварочной ванны относительно стыка; h_1 - участок проплавления с меньшим термическим сопротивлением; h_2 - участок проплавления с большим термическим сопротивлением

$$\rho c \frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\tau} = \lambda \frac{T_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{h_y^2}, \quad (4)$$

где ρ - плотность кг/м³; c - удельная теплоемкость Дж / (кг·°С).

Для аппроксимации уравнения теплопроводности разностными уравнениями ввели пространственно-временную сетку с размером шага: $y_i = \Delta y / (N_y - 1)$ и $z_i = \Delta z / (N_z - 1)$ по осям Y и Z соответственно, где Δy и Δz - размер расчетной области; N_y и N_z - количество шагов по осям; $i = \overline{1, N_y}$ и $j = \overline{1, N_z}$ - номер шага по осям; по времени: $\tau = \tau_{\text{зад}} / 100$, где $\tau_{\text{зад}}$ - расчетное время.

Дискретизацию уравнений теплопроводности провели на основе локально одномерной схемы А.А. Самарского, которая является абсолютно устойчивой и обладает свойством суммарной аппроксимации.

Поле температуры находили из решения полученных одномерных уравнений

$$\rho c \frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\tau} = \lambda \frac{T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_y^2} \quad (3)$$

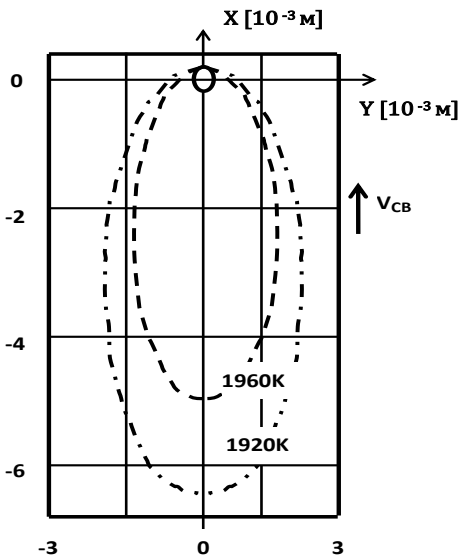


Рис.2. - Изотермы на поверхности сварочной ванны

В результате установили, что при смещении сварочной ванны относительно стыка изотермы располагаются несимметрично относительно оси X (рис.2). Нахождение стыка в области спада кривой распределения плотности мощности источника тепла $q(r)$ (рис.1) приводит к нарушению симметрии тепловых потоков относительно стыка и понижению теплосодержания расплавленного металла той части сварочной ванны, в направлении которой смещается стык. Поскольку температура поверхности сварочной ванны и плотность тока

термоэлектронной миссии связаны между собой через уравнение Ричардсона-Дэшмана, то сигнал вторичного электронного тока в плазме при смещении сварочной ванны относительно стыка должен убывать с той части сварочной ванны, в направлении которой смещается стык. Так, в процессе сварки сплавов на основе алюминия при изменении температуры поверхности ванны с 1920К до 1958К (2%) изменение плотности тока термоэлектронной эмиссии должно составить 180%. При сварке углеродистых сталей изменение температуры поверхности ванны с 2120К до 2162К (2 %) приведет к изменению плотности тока термоэлектронной эмиссии на 202%. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для получения оценки положения сварочной ванны относительно стыка можно использовать закономерность изменения сигнала вторичного электронного тока в плазме, регистрируемого над областью взаимодействия по обеим сторонам стыка.

Глава 3. Изложены результаты экспериментальных исследований по выявлению условий, необходимых для формирования и регистрации сигнала вторичного электронного тока в плазме в зависимости от текущего положения стыка. Для регистрации тока и формирования несамостоятельного разряда в

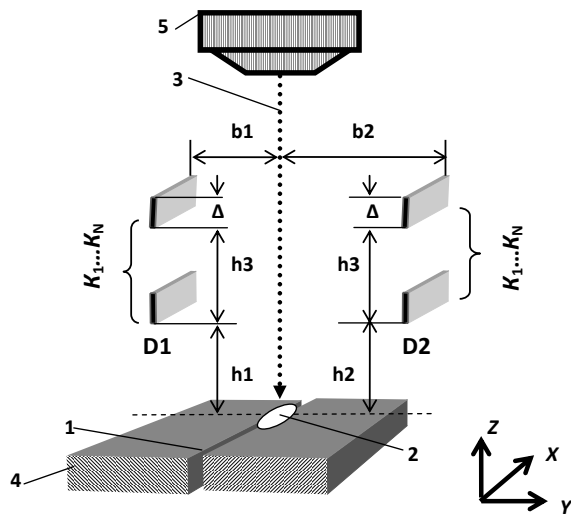


Рис. 3 - Пространственное расположение одиночных коллекторов электронов относительно сварочной ванны и оси сварочного пучка: 1 - стык; 2 - сварочная ванна; 3 - ось сварочного пучка (ось Z); 4 - изделие; 5 - электронно-лучевая сварочная пушка; b_1 , b_2 - расстояние датчик - ось пучка, мм; h_1 , h_2 - расстояние датчик - поверхность, мм; h_3 - расстояние между коллекторами, $K_1 \dots K_N$ - одиночные коллектора электронов; мм; D1 и D2 - датчики положения стыка; Δ - ширина коллектора, мм

плазме использовали датчик в виде вертикальной линейной решетки, состоящий из N ($N > 1$) одиночных коллекторов, n из которых регистрируют составляющую, зависимую от температуры поверхности ванны (рис. 3). Выбором места установки датчика, путем изменения размеров b_1 , b_2 , h_1 и h_2 , а так же ширины одиночного коллектора Δ обеспечивали придание датчику свойств пространственной избирательности. Ток в выходной цепи датчика $I_D(t)$ определили как аддитивную сумму токов одиночных коллекторов. Для представления сигнала $U(t)$, получаемого в ходе преобразования

тока $I_D(t)$, выбрали модель на основе аддитивной суммы в предположении того, что спектр сигнала ограничен некоторой максимальной частотой $f_0 = f_{max}$ и справедливо допущение о наличии свойств эргодичности и стационарности

$$U(t) = \sum_1^{N-n} u_0(t) + \sum_1^n [u_0(t)] + [\varepsilon u_1(t) \cdot G(\gamma)] \quad (5)$$

где $u_0(\tau)$ - составляющая, не зависящая от текущего положения (смещения) стыка; $\varepsilon u_1(\tau)$ - составляющая, связанная с изменением Δj_{T9} ; $G(\gamma)$ - текущее распределение термоэлектронов по углам вылета в вертикальной плоскости; N и n - количество одиночных коллекторов регистрирующих $u_0(\tau)$ и $\varepsilon u_1(\tau)$, соответственно.

Для определения оптимальной процедуры обработки сигналов, с точки зрения

получения максимума различия сигнала $U(\tau)$ между ситуациями $\varepsilon \neq 0$ и $\varepsilon = 0$, использовали отношение правдоподобия, предусматривающее формирование оценки дисперсии амплитудной выборки $D[U(t)]$. Выявление ситуации основано на использовании аналога функции автокорреляции по дисперсии амплитудной выборки сигнала

$$K[D] = \sum_{l_0}^{l_1} D[U(t)]^{-1} \cdot \sum_{l_1}^{l_n} D[U(t)], \quad (6)$$

где $D[U(t)]$ - дисперсии сигнала; $l_0 \dots l_1$ - длина стыка, соответствующая начальному периоду сварки, $l_1 \dots l_n$ - длина стыка, в пределах которой формируются выборки текущего значения сигнала.

Установлено, что необходимым условием формирования сигнала $U(t)$ является неравномерность температуры нагрева жидкой фазы верхних областей поверхности кратера. Это подтверждают результаты синхронной регистрации сигналов с поверхности противоположных кромок: при смещении стыка к правой кромке $K[D]_{\text{лев.кр.}} < K[D]_{\text{прав.кр.}}$, при смещении к левой кромке - $K[D]_{\text{лев.кр.}} > K[D]_{\text{прав.кр.}}$ (рис.4).

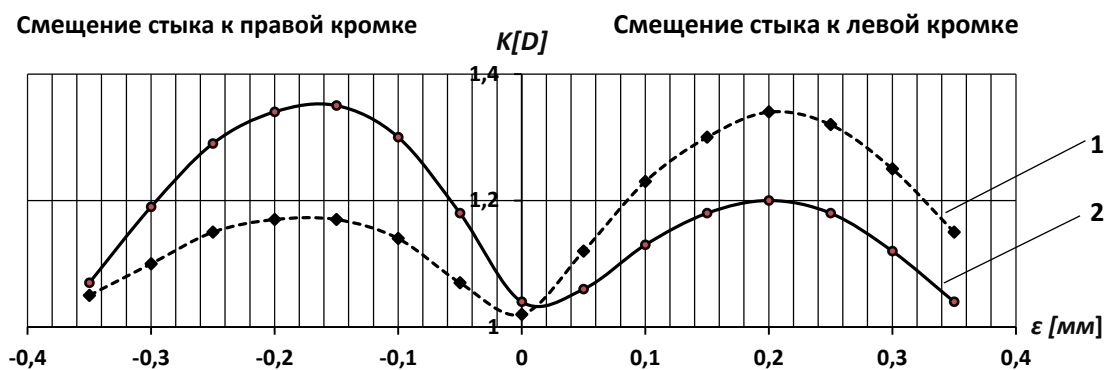


Рис.4. - Характер изменения $K[D]$ при регистрации сигнала с противоположных кромок при ЭЛС сплава АМгб: 1 - сигнал с поверхности левой кромки; 2 - сигнал с поверхности правой кромки; ток пучка - 0,1А; $U_{\text{уск}}$ - 30 кВ

Установлено также, что необходимым условием регистрации $U(\tau)$ является установка коллектора в области пространства над сварочной ванной, где выполняется условие $K[D] > 1$ (рис. 5), а также минимизация собственной

вторичной электронной эмиссии с поверхности коллектора.

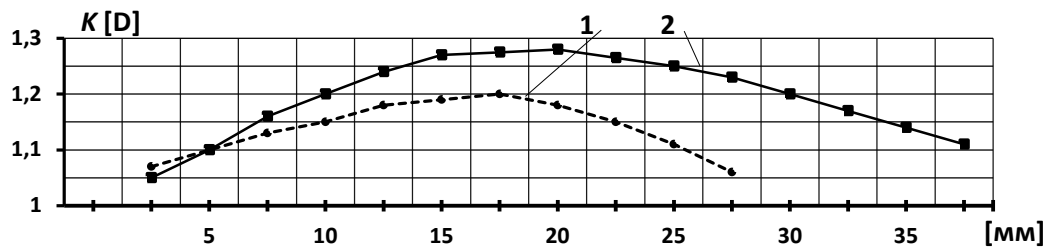


Рис. 5.- Влияние пространственного положения коллектора на $K(D)$ при ЭЛС сплава АМгб:
1 - удаление коллектора от оси пучка; 2 - удаление коллектора от поверхности ванны;
ток пучка - 0,1А; $U_{уск}$ - 30 кВ

Полученные результаты свидетельствуют об изменении плотности тока насыщения термоэлектронной эмиссии при смещении стыка, что позволяет использовать вторичный электронный ток в плазме, при наличии составляющей тока термоэлектронной эмиссии с поверхности парогазового кратера, для цели получения оценки текущего положения стыка.

Глава 4. В четвертой главе приведено описание укрупненного алгоритма и функциональной схемы системы стабилизации положения сварочной ванны относительно стыка, которая реализует алгоритм следующим образом (рис.6).

После включения питающего напряжения вводятся значения констант, определяющих параметры процесса ЭЛС, а также размеры участков стыка, в пределах которых осуществляется ввод и вывод тока пучка, а также формирование сигнальных выборок. Синхронизация работы отдельных узлов системы осуществляется *Схемой управления*. При завершении ввода тока пучка в точке с координатами $[x_0; y_0]$ начинается отсчет длины участков стыка в пределах которых формируются отсчеты сигналов.

Выходные сигналы U_{D1} и U_{D2} датчиков D1 и D2 поступают на входы *Блока обработки сигналов*, где осуществляется ограничение их спектра и осуществляется расчет оценок дисперсий выборок, после чего данные передаются на хранение в *Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ)*.

В *Блоке сравнения* осуществляется расчет $K[D]$ выборок, анализируется различие $K[D]$ между участками стыка с номером N и $(N + 1)$ на предмет не превышения заданного порогового уровня $||K_1[D]||$:

$$|K_1[D]| < \{K[D]_{(N)} - K[D]_{(N+1)}\} \quad (7)$$

Также анализируется уровень дисперсий выборок $D[U(t)]$ выходных сигналов датчика U_{D1} и U_{D2} на предмет не превышения заданного порогового уровня $|D_1[U(t)]|$

$$U_{D1}, U_{D2} \leq |D_1[U(t)]| \quad (8)$$

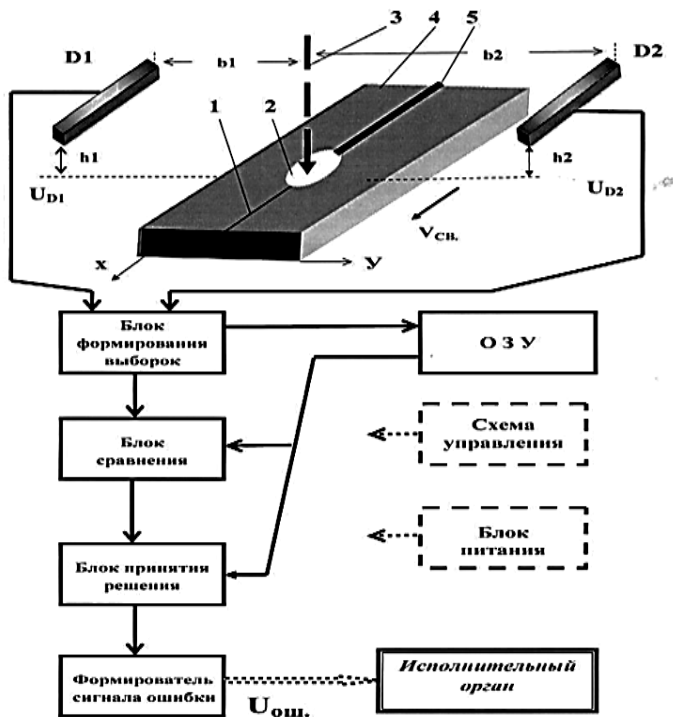


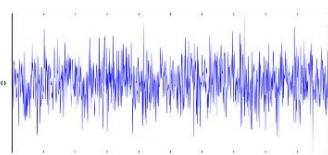
Рис.6.- Функциональная схема системы стабилизации положения стыка: 1 - стык; 2- сварочная ванна; 3 - ось сварочного пучка; 4 - изделие; 5 - сварной шов; D1, D2 - датчики положения стыка; U_{D1}, U_{D2} - выходной сигнал датчика; b_1, b_2 - расстояние датчик - ось пучка; h_1, h_2 - расстояние датчик - поверхность

При выполнении условий (7) и (8) принимается решение о наличии или отсутствии смещения стыка относительно оси пучка. В случае принятия решения о отсутствии смещения или в случае не выполнения условий (5) или (6) $U_{упр}$ фиксируется $|U_{упр.}| = const$ и сохраняется до момента изменения внешних условий.

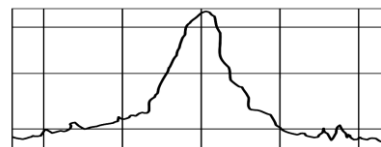
В случае принятия решения о наличии смещения формируется команда, поступающая на вход блока *Формирователя сигнала ошибки*. Типичные

осциллограммы сигналов в

выходной цепи коллектора и на выходе устройства сравнения приведены на рис.7.



а



б

Рис. 7. - Типичные осциллограммы сигналов в выходной цепи коллектора и на выходе устройства сравнения

В момент начала вывода тока пучка функционирование системы прекращается. Типичный характер изменения сигнала ошибки (сигнала управления) $U_{ош}$ при смещении стыка $U_{ош} = f(\epsilon)$ для случая ЭЛС сплава АМгб приведен на рис.8.

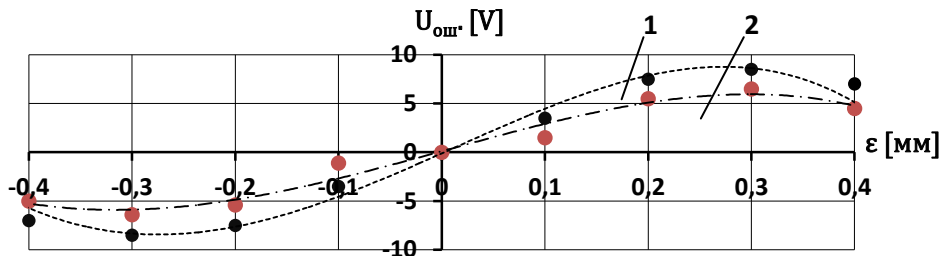


Рис.8 - Зависимость $U_{ош} = f(\epsilon)$: 1 -прямолинейный стык; 2 - разнотолщинный стык

Система слежения внедрена на сварочных установках ЭЛУ-9Б и ЭЛУ-10, предназначенных для электронно-лучевой сварки узлов ответственного назначения А-1872 и А-8534 на предприятиях ракетно-космической отрасли (рис.9).

Применение системы стабилизации снизило количество дефектов сварных швов в виде непроваров, что уменьшило затраты на ремонт и снизило эксплуатационные издержки потребителя.



а)



б)



в)

Рис. 9. - Внешний вид коллекторов в камере (а), система слежения (б) и макрошлиф

Суммарный экономический эффект составил 35 000 рублей в ценах 1989года. Результаты внедрения системы стабилизации приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты внедрения системы стабилизации

	Наименование показателя	Тип сварочной установки	
		ЭЛУ-9Б	ЭЛУ-10
		после внедрения	после внедрения
1	Количество дефектных швов	уменьшение - с 38 до 15 или на 253%	уменьшение - с 35 до 10 или на 350%
2	Среднее количество загрузок при ремонте	уменьшение - с 2,4 до 1,7 или на 141%	уменьшение - с 3,8 до 2,3 или на 165%
3	Общая длина дефектных мест, мм	уменьшение с 16 до 8 или на 200%	уменьшение - с 22 до 9 или на 244%

Общие выводы и результаты работы

1. На основании результатов анализа характерных особенностей технологии ЭЛС предложена гипотеза о влиянии смещения стыка относительно оси пучка на плотность тока насыщения термоэлектронной эмиссии с поверхности верхней части парогазового кратера, что делает целесообразным использование данного явления для получения оценки текущего положения стыка.
2. Выявлены закономерности влияния на сигнал вторичного электронного тока в плазме, содержащего составляющую формируемую током термоэлектронной эмиссии с поверхности верхней части парогазового кратера текущего положения сварочной ванны относительно стыка.
3. На основании аналитических и экспериментальных исследований доказана реализуемость и целесообразность использования явления термоэлектронной эмиссии с поверхности парогазового кратера для получения оценки текущего положения стыка на основе связи сигнала вторичного электронного тока в плазме и смещения сварочной ванны относительно стыка.
4. Выявлены необходимые условия и закономерности формирования сигнала вторичного электронного тока при смещении сварочной ванны от стыка, которые показывают, что формирование сигнала связано с нарушением симметрии тепловых потоков и повышением теплосодержания расплавленного металла одной из кромок.

5. Выявлены необходимые условия и закономерности регистрации сигнала вторичного электронного тока, которые определяют конструктивные характеристики датчика положения стыка, его расположение относительно поверхности сварочной ванны, а также характеристики устройства регистрации сигнала вторичного тока.
6. Установлено, что дисперсия амплитудной выборки сигнала вторичного электронного тока в плазме является параметром наиболее чувствительным к изменениям сигнала вторичного электронного тока в условиях, когда реализация процесса выявления смещения основана на сравнении двух равноценных по своей значимости и близким по своим свойствам сигналов.
7. Выявлено, что использование аналога функции автокорреляции по дисперсии амплитудной выборки сигнала вторичного электронного тока в плазме наиболее достоверно отражает изменение составляющей тока термоэмиссии при повышении теплосодержания расплавленного металла одной из кромок при смещении сварочной ванны относительно стыка.
8. Разработаны алгоритм стабилизации положения стыка при ЭЛС, позволяющий получить информационный сигнал в условиях динамической нестабильности стыка, методика формирования управляющего воздействия, в том числе в случае аварийных ситуаций и система стабилизации положения стыка на основе использования оценки текущего положения стыка в ходе ЭЛС.
9. Показано, что формирование оценки текущего положения стыка в ходе ЭЛС и ее использование приводит к повышению качества сварных соединений за счет повышения точности совмещения электронного пучка со стыком в процессе сварки и снижению количества дефектных сварных швов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Румянцев, Е.Н. Прибор для контроля за положением фокуса луча при электроннолучевой сварке [Текст] /Е.Н. Румянцев //Сварочное производство. - 1994. - № 11. - С. 27-28.
2. Румянцев, Е.Н. Расширение функциональных возможностей электронно-лучевого оборудования для восстановительного ремонта [Текст] / Е.Н. Румянцев, И.В. Алексеев, О.В. Токарев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2006. - № 4. - С. 42-44.
3. Румянцев, Е.Н., Повышение надежности работы энергетического электронно-лучевого энергетического оборудования, используемого для восстановительного ремонта [Текст] / Е.Н. Румянцев, И.В. Алексеев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2006. – № 5. – С. 27-30.
4. Румянцев, Е.Н. Расширение возможностей электронно-лучевого оборудования для восстановительного ремонта [Текст] /Е.Н. Румянцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2006. -№ 6.- С. 8-13.
5. Румянцев, Е.Н. Использование термоэмиссии с поверхности парогазового кратера для контроля положения стыка при ЭЛС [Текст] / Е.Н. Румянцев // Сварка и диагностика. - 2011. - №1. - С. 21-26.
6. Ластовиря, В.Н. К вопросу ведения пучка вдоль свариваемого стыка по току термоэлектронов кромок [Текст] / В.Н. Ластовиря, Е.Н. Румянцев // Глобальная ядерная безопасность. 2012. – № 2-3. – С. 27-32.

Патенты и авторские свидетельства

1. Патент № 1773641 СССР, МКИ³ В 23 К 15/00 Устройство для автоматической фокусировки сварочного электронного луча [Текст] /Румянцев Е.Н., Казаков В.А. заявл.22.09.90; опубл. 07.11.92, Бюл. 41.
2. Патент № 2012463 Способ адаптивного контроля фокусировки сварочного электронного луча и устройство для его осуществления [Текст] /Румянцев Е.Н., Казаков В.А. заявл.28.06.91; опубл. 15.05.94.
3. А.с. № 1139028 СССР, МКИ³ В 23 К 15/00 Устройство для совмещения луча со стыком при лучевой сварке [Текст] / Румянцев Е.Н., Калгухин В.Г., Солнцев А.А. заявл.29.07.83; опубл. 27.04.90, Бюл. 12.

4. А.с. № 1413817 СССР, МКИ³ В 23 К 15/00 Способ контроля положения электронного луча относительно стыка [Текст] / Румянцев Е.Н., Казаков В.А. заявл.19.05.86; опубл. 20.05.89, Бюл. 14.
5. А.с. № 1837470 СССР, МКИ³ В 23 К 15/00 Способ автоматического совмещения сварочного электронного луча со стыком при сварке и устройство для его осуществления [Текст] / Румянцев Е.Н., Казаков В.А. заявл.20.08.90; опубл. 20.05.95, Бюл. 14.
6. А.с. № 1290632 СССР, МКИ³ В 23 К 15/00 Способ контроля процесса электронно-лучевой сварки [Текст] / Румянцев Е.Н., Лямина С.А., Крюковский В.Н., Казаков В.А. заявл.05.05.85; опубл. 09.06.95, Бюл. 14.

Публикации в других изданиях

1. Румянцев, Е.Н. Использование составляющих парового потока для осуществления контроля параметров процесса ЭЛС [Текст] / И.В. Алексеев, Кулик, В.И. //Научные технологии производства РКТ. Сборник научных трудов: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, ФГУП «НПО «Техномаш». - Подольск, 2004.- 3 изд. - С. 131-135.
2. Румянцев, Е.Н. Оптимизация пространственного положения датчика информационного сигнала системы совмещения ЭЛ со стыком свариваемых кромок способной функционировать при номинальной мощности при ЭЛС [Текст] / Е.Н. Румянцев, И.В. Алексеев, А.В. Гудков //Научные технологии производства РКТ. Сборник научных трудов: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, ФГУП «НПО «Техномаш».- Подольск, 2004. - 3 изд. - С. 140-144.
3. Румянцев, Е.Н. К вопросу разработки системы контроля и управления параметрами процесса ЭЛС на основе использования вероятностных методов. [Текст] / Е.Н. Румянцев, И.В. Алексеев // Научные технологии производства РКТ. Сборник научных трудов: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, ФГУП «НПО «Техномаш».- Подольск, 2004.- 3 изд. - С. 136-139.
4. Румянцев, Е.Н. Прибор для контроля положения фокальной плоскости сварочного электронного луча повышенной мощности. [Текст] / Е.Н. Румянцев // Современные технологии сварки в производстве изделий аэрокосмической и оборонной техники. Материалы семинара главных

сварщиков предприятий ракетно-космической промышленности.- Калининград, 1994. - С. 57-58.

5. Румянцев, Е.Н. Программное управление процессом ЭЛС с учетом его динамики [Текст] / Е.Н. Румянцев // Современные технологии сварки в производстве изделий аэрокосмической и оборонной техники. Материалы семинара главных сварщиков предприятий ракетно-космической промышленности (29 ноября – 02 декабря) - Калининград, 1994. - С. 59-60.
6. Румянцев, Е.Н. Снижение вероятности возникновения пробоев в катодном узле ЭЛП. [Текст] / Е.Н. Румянцев, В.О. Токарев, И.В. Алексеев. // Научно-технические технологии производства РКТ. Сборник научных трудов: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, ФГУП «НПО «Техномаш». - Подольск, 2004. - 3 изд. - С. 127-130.
7. Румянцев, Е.Н., Состояние и перспективы создания универсальных модулей АСУ ТП ЭЛС [Текст] / Е.Н. Румянцев, Е.А. Ковылин // Научно-технический сборник: Технология. Технология машиностроения. Вып.5. Стабильность. Стабильность технологии при производстве сварных, паяных конструкций. - Москва, 1987. - ГОНТИ –2.- С.36 – 42.
8. Румянцев, Е.Н. Критерии качества управления при разработке локального регулятора АСУ ТП ЭЛС [Текст] / Е.Н. Румянцев, В.А. Казаков // Научно-технический сборник: Технология. Технология машиностроения. Вып.10. Сварка. Пайка. Покрытия. – Москва, -1988. ГОНТИ –2. - С. 31 – 38.
9. Румянцев, Е.Н. Стабилизация положения сварочной ванны относительно стыка при электронно-лучевой сварке [Текст] / Е.Н. Румянцев, В.К. Драгунов // Третья международная конференция Электронно-лучевая сварки и смежные технологии. Национальный Исследовательский Университет «МЭИ». (12-15) ноября 2019 года. Сборник материалов и докладов – М.: Издательство МЭИ, 2019. - С. 381-397.