

## Отзыв

официального оппонента на диссертацию Зубковой Юлии Валерьевны на тему «**Обеспечение точности позиционирования электронного луча при электронно-лучевой сварке**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами (в машиностроении и приборостроении)»

### *Актуальность темы диссертации*

Повышение качества выпускаемой продукции является требованием современного производства, что обосновывается как уменьшением издержек, так и увеличением срока службы данных изделий. Особое внимание уделяется при этом производству ответственных и надежных изделий, изготавливаемых с применением технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Одним из способов улучшения качества таких изделий является автоматизация управления процессом сварки и повышение точности позиционирования электронного луча при электронно-лучевой сварке. Ошибки в позиционировании электронного луча складываются из ошибок позиционирования робота манипулятора удерживающего электронно-лучевую пушку, в процессе ее переноса по траектории, определяемой свариваемым изделием. На практике часто приходится сталкиваться с ситуацией, когда точности, задаваемой программным образом недостаточно, в силу ошибок позиционирования - разных для разных положений и скоростей движения манипулятора. Необходимы исследования по выявлению существенных характеристик устройства манипулятора и их влиянию на ошибки позиционирования электронного луча по свариваемому стыку. Требуется определить и формализовать зависимости, по которым можно контролировать положение электронного луча для обеспечения заданной точности и стабильности процесса сварки. Такие особенности, как высокая скорость и прецизионность процесса электронной сварки, отсутствие визуального контроля, создают дополнительные трудности при управлении позиционированием электронного луча, что делает актуальной задачу исследования и разработки новых моделей позиционирования луча и создание на их основе средств автоматизации процесса позиционирования по стыку при ЭЛС.

Для решения поставленных в диссертационной работе задач проведен анализ работ отечественных и зарубежных ученых, внесших значительный вклад в изучение объекта исследования.

Таким образом, была сформулирована цель исследования: развитие методов и алгоритмов управления точностью позиционирования электронного луча как средство повышения качества сварных соединений, получаемых методом ЭЛС.

## *Краткий обзор содержания диссертации по главам*

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Библиографический список использованной литературы включает 129 наименований.

Объём работы составляет 133 страницы машинописного текста. В приложении приведены акты использования результатов работы.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ уровня теории и прикладных исследований технологии ЭЛС и процесса позиционирования электронного луча по сварному стыку, выявлены особенности оборудования, используемого при ЭЛС, определены параметры, влияющие на обеспечение точности позиционирования луча, проведен анализ погрешностей мехатронных модулей движения в АЭЛТК, сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена выбору и обоснованию критериев обеспечения точности позиционирования электронного луча по стыку при ЭЛС, разработке математической модели процесса позиционирования луча на основе учета кинематической и динамической погрешностей ММД механической части АЭЛТК, особенностям построения кинематической и динамической моделей, а также разработке алгоритма управления процессом позиционирования электронного луча на основе разработанной модели.

В третьей главе описано проведение экспериментального исследования процесса позиционирования электронного луча и оценке влияния полной погрешности ММД на точность отработки траектории сварного стыка выходным звеном манипулятора. Проведено планирование экспериментов, оценена их точность и представлены результаты экспериментов. Проведенные исследования подтвердили, что реализация управления процессом позиционирования луча при ЭЛС на основе разработанной математической модели позволила повысить точность позиционирования ЭЛ по стыку в среднем в 2 раза при сохранении стабильности процесса.

В четвертой главе представлена методика определения полной погрешности электромеханического оборудования АЭЛТК, приведенной к выходному звену манипулятора, для обоснованного выбора параметров, определяющих положение луча, и с целью обеспечения заданной точности позиционирования электронного луча при ЭЛС. Разработанная методика расчета кинематической и динамической погрешностей реализует результаты проведенных исследований процесса позиционирования луча по стыку с учетом режимов ЭЛС.

В заключение работы приведена общая характеристика работы и основные выводы по результатам диссертации.

### ***Новизна научных положений, сформулированных в диссертации***

В работе представлен анализ параметров, влияющих на точность и определяющих критерии обеспечения точности позиционирования электронного луча по сварному стыку при ЭЛС.

Диссертантом разработана математическая модель процесса позиционирования электронного луча при отработке заданной траектории с учётом кинематических и динамических погрешностей мехатронных модулей движения в составе АЭЛТК. При этом для определения величины полной погрешности манипуляторов автором обосновано использование двух методов: метод определения скалярных кинематических и динамических инвариантов с использованием формул тензорного анализа и метод Лагранжа – Эйлера для построения уравнений движения.

Предложен алгоритм управления процессом позиционирования электронного луча при ЭЛС использующий построенные модели для определения кинематических и динамических характеристик электромеханического оборудования АЭЛТК.

Автором разработана структурная схема автоматизированной системы управления при ЭЛС на основе учета погрешностей ММД АЭЛТК, отличающаяся тем, что она содержит контур обратной связи для контроля погрешности позиционирования, что позволяет достигать требуемой точности позиционирования.

В результате экспериментальных исследований установлено, что применение предложенной модели позволяет повысить точность позиционирования электронного луча по стыку при ЭЛС. Экспериментально исследованы закономерности изменения положения выходного звена опытной установки от линейной скорости и массы рабочего органа манипулятора с учетом кинематической и динамической погрешностей исполнительных устройств.

### ***Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации***

Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью постановки задачи, обоснованностью использованных теоретических зависимостей и принятых допущений, применением известных математических методов.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, подтверждают применимость математической модели, предложенной методики планирования и проведения экспериментов, полученных кинематических и динамических зависимостей, для программной корректировки положения электронного луча. Приведенные сравнительные данные управления позиционированием электронной пушки в трехзвенном

манипуляторе показывают возможность корректировки ошибок данным методом.

### ***Общие замечания по работе***

1. В первой главе на рисунке 1.3 изображен АЭЛТК с внутрикамерным расположением электронной пушки, на рисунке 1.4 приведена кинематическая схема технологического оборудования АЭЛТК, на которой стрелками изображены возможные перемещения манипулятора сварочной пушки и устройства перемещения заготовки. Возникает вопрос, соответствует ли данная схема приведенной конструкции АЭЛТК (рисунок 1.3). Является ли данная схема предметом исследования движений манипулятора на кинематическом и динамическом уровне

2. Во второй главе сказано, что разработана математическая модель движения манипулятора на кинематическом и динамическом уровне. Однако в диссертации данная модель не приведена, а имеются только ссылки на ее использование для определения кинематических и динамических инвариантов и построения уравнений движения.

3. В формуле (2.1) представлены основные параметры процесса позиционирования электронного луча виде функциональной зависимости. Однако не отмечено, что положение электронного луча определяется векторной характеристикой, определяемой пятью координатами (три координаты положения точки «подвеса» электронного луча и две угловых координаты направления).

4. Во второй главе в разработанной математической модели процесса позиционирования электронного луча, однако, при этом не рассмотрено направление электронного луча в пространстве. Таким образом, не все параметры ЭЛС становятся управляемыми и контролируются.

5. В третьей главе приведены регрессионные уравнения, построенные по результатам экспериментальных исследований точности позиционирования выходного звена манипулятора только по оси  $z$ . Отсутствует обоснование, почему возможен переход к контролю и управлению только одной координатой  $Z$ .

### ***Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней***

Диссертация, представленная Зубковой Ю.В., является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, в которой предложены и обоснованы критерии обеспечения точности позиционирования электронного луча при ЭЛС, разработана математическая модель процесса позиционирования луча, учитывающая погрешности оборудования АЭЛТК, а также предложены структурная схема

автоматизированной системы управления при ЭЛС, содержащая контур обратной связи для контроля погрешности позиционирования, и методика обеспечения требуемой точности позиционирования электронного луча по стыку.

Полученные автором научные результаты по теме диссертации опубликованы в 17 научных работах. Автор имеет 3 научных труда в изданиях, выпускаемых в РФ и рекомендуемых ВАКом для публикации основных результатов диссертаций.

Диссертационная работы соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Зубкова Ю.В. заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами (в машиностроении и приборостроении)».

Официальный оппонент,  
д.т.н., профессор,  
председатель совета директоров  
холдинга «Белфингрупп».  
426000, Россия, г. Ижевск,  
ул. Красноармейская, 71.  
Тел. +7(3412)908966.



/В.А. Кутергин/

426000, Россия, УР, г. Ижевск, ул. Красноармейская, 71. [info@belfingroup.com](mailto:info@belfingroup.com)