

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе ФГБОУ

ВО «НИУ «МЭИ», докт. техн. наук.

Драгунов В.К.

января 2020г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Варушкина Степана Владимировича на тему «Управление электронно-лучевой наплавкой проволочным материалом по параметрам тормозного рентгеновского излучения».

Представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук диссертационная работа Варушкина Степана Владимировича посвящена повышению стабильности качества участков, наплавляемых электронным лучом с подачей присадочной проволоки. В работе соискателя рассматривается стабильность ширины наплавляемых слоев и смещение их относительно друг друга в условиях многослойной наплавки. Исследования, направленные на решение данной проблемы путем применения оперативного управления положением присадочной проволоки являются **актуальными** и направлены на минимизацию отклонений присадочной проволоки от электронного луча.

Актуальность исследований подтверждается повышенным вниманием в мире к разработке таких способов оперативного управления, в том числе для аддитивных электронно-лучевых технологий, например, фирмой Sciaky или NASA. Однако, существующие системы для осуществления такого управления имеют ряд недостатков, в качестве наиболее общих для них можно отметить низкое быстродействие и потребность в относительно высоких вычислительных мощностях.

Значимость для науки и практики определяется установленными закономерностями и характерными особенностями сигнала тормозного

рентгеновского излучения из зоны электронно-лучевой наплавкой проволокой, возможностью снижения припусков под механическую обработку из-за повышения стабильности ширины наплавляемых валиков и смещения их относительно друг друга.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки РФ № 9.9697.2017 /8.9; проекта BRICS (Федеральная целевая программа, идентификатор соглашения RFMEFI58317X0062); проекта, поддерживаемого Министерством образования Пермского края (договор № С-26/787 от 21.12.2017); проекта РФФИ №18-08-01016 А.

Структура диссертационной работы Варушкина С.В. соответствует предъявляемым к ней требованиям, состоит из введения, литературного обзора (глава 1), собственных исследований автора (главы 2-4), основных результатов и выводов. Общий объем работы составляет 130 страниц, список литературы содержит 142 источника.

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. 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.

Вторая глава посвящена разработке методики проведения исследований, описанию использованного оборудования, программного обеспечения и предложенных методов математической обработки. Разработан компактный датчик и электрическая схема, позволяющая производить измерения рентгеновского излучения. Предложены основные

способы обработки сигналов: синхронное накопление и синхронное детектирование.

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. Определены схема и параметры режимов электронно-лучевой наплавки проволокой, обеспечивающие стабильное плавление присадочной проволоки и сплавление с подложкой или с предыдущим валиком. Построены и верифицированы математические модели процесса формирования тормозного рентгеновского излучения при электронно-лучевой наплавке проволокой. 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.

Четвертая глава посвящена разработке способа многослойной электронно-лучевой наплавки с оперативным управлением положением присадочной проволоки по сигналу тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны. Разработана методика графического представления информации о положении присадочной проволоки. Разработан способ многослойной электронно-лучевой наплавки с оперативным управлением положением присадочной проволоки, выполнена экспериментальная апробация разработанного способа.

В результате проведенных исследований достигнуты поставленные цели и задачи. Результаты использованы предприятиями АО «Машиностроитель» и ПАО «Протон-ПМ» в процессе разработки технологии электронно-лучевой многослойной наплавки экспериментальных образцов. Соискателем 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, получено 2 патента РФ.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных средств проведения исследований, обоснованностью методов исследований, верификацией моделей по экспериментальным данным, полученным на действующих технологических машинах электронно-лучевой сварки. Полученные результаты не противоречат известным результатам других ученых.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

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.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы. Разработанный способ электронно-лучевой наплавки с оперативным контролем и управлением положением присадочной проволоки по параметрам тормозного рентгеновского излучения может быть использован для обеспечения стабильности качества изделий при многослойной электронно-лучевой наплавке, в том числе для аддитивных технологий.

Результаты могут быть полезны производителям электронно-лучевого оборудования для сварки и наплавки, предприятиям авиастроительной

отрасли, а также другим потребителям технологий электронно-лучевой сварки и наплавки.

Замечания:

1. В тексте диссертации описано повышение стабильности формирования слоев за счет совмещения положения оси осцилляции электронного луча с осью проволоки. Исходя из названия работы, предполагается, что для повышения стабильности будет использован способ управления положением присадочной проволоки при неизменном положении оси электронного луча. Однако, из текста неясно, реализован ли способ управления положением присадочной проволоки при электронно-лучевой наплавке. Отсутствует описание устройства, обеспечивающего управление положением присадочной проволоки. Также непонятно, каким именно образом осуществлялось оперативное управление положением проволоки при проведении экспериментов по наплавке образца цилиндрической формы из титанового сплава BT1-0 на подложку из BT20 и наплавке образца из хромоникелевой стали 308L.

2. Автор диссертации в качестве одного из выводов указано: «Повышение воспроизводимости качества наплавки до 50% за счет уменьшения колебания ширины наплавленных слоев». Непонятно из текста, что такое «воспроизводимость качества наплавки» и в каких абсолютных единицах она измеряется. Кроме того, считаю некорректным применение термина «воспроизводимость» на основании двух проведенных экспериментов с применением заявленного способа оперативного управления. Не сформированы четко критерии, позволяющие количественно определить качество наплавки, также указанное в выводах. Оценка качества наплавленных участков производится по двум показателям: колебания ширины наплавляемых валиков и смещение наплавляемых валиков относительно друг друга. Оценка качества могла бы производиться по большему числу параметров, например, по механическим свойствам или по структуре наплавленного металла.

3. Неясно каким образом определяется положение фокальной плоскости электронного-луча. Не представлено влияние положения

фокальной плоскости на формирование слоев при электронно-лучевой наплавке.

В своей работе автор решает проблему колебания конца проволоки при электронно-лучевой наплавке за счет применения способа оперативного управления положением присадочной проволоки. Однако непонятно, предпринимались ли иные способы устранения или минимизации колебаний конца присадочной проволоки. Например, за счет применения других сварочных проволок с меньшей кривизной проволоки или за счет уменьшения длины вылета проволоки из мундштука. В работе отсутствуют данные о длине вылета и нет оценки влияния длины вылета на колебания проволоки или стабильности формирования слоев.

4. Не рассмотрен вопрос применения разработанного метода управления положением присадочной проволоки для схем электронно-лучевой наплавки, отличающихся от предложенных, например, для подачи проволоки под углом к поверхности подложки или для подачи проволоки в жидкую ванну расплавленного металла.

Заключение. Диссертационная работа является законченным научным исследованием, обладает актуальностью, научной новизной и практической значимостью. Выводы соответствуют цели работы и поставленным научным задачам. Разработанный способ электронно-лучевой наплавки с оперативным управлением до 50% снижает колебания ширины наплавленных слоев и их смещения относительно друг друга. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Управление электронно-лучевой наплавкой проволочным материалом по параметрам тормозного рентгеновского излучения» соответствует предъявляемым к ней требованиям, а ее автор Варушкин Степан Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии.

Диссертация, автореферат и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании кафедры технологии металлов Федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Протокол № 6 от
«22» января 2020 г.

Заместитель заведующего
кафедрой технологии металлов
канд. техн. наук, доцент


 / Алексей Леонидович Гончаров /
«22» января 2020г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Адрес: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Телефон: +7 (495) 362-70-01
E-mail: universe@mpei.ac.ru