

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

Пермского национального

исследовательского политехнического

университета,

технических наук, профессор

Кортаев В.Н.

2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Управление электронно-лучевой наплавкой проволочным материалом по параметрам тормозного рентгеновского излучения» выполнена на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов».

В период подготовки диссертации ВАРУШКИН Степан Владимирович работал в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов» в должности ведущего программиста, в лаборатории «Обработка материалов высококонцентрированными источниками энергии» в должностях лаборанта-исследователя и младшего научного сотрудника, в ООО «Фирма «Радиус-Сервис», в отделе перспективных технологий службы главного технолога в должности ведущего инженера-технолога.

В 2015 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», присуждена квалификация (степень) Магистр по направлению подготовки 150700.68 Машиностроение.

В 2019 году окончил аспирантуру по очной форме обучения Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки 15.06.01 Машиностроение (период обучения 01.10.2015 г. – 30.09.2019 г.).

Научный руководитель – доктор технических наук Трушников Дмитрий Николаевич, работает директором департамента науки и инноваций, профессором кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов» (по совместительству) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- Соискатель предложил метод оперативного управления параметрами электронно-лучевой наплавки проволокой по параметрам тормозного рентгеновского излучения для повышения стабильности качества наплавленных участков.
- Разработал математическую модель, которая описывает формирование тормозного рентгеновского излучения в зависимости от технологических параметров при взаимодействии осциллирующего электронного луча с присадочной проволокой и подложкой в процессе наплавки.
- Выполнил экспериментальные исследования особенностей и закономерностей формирования тормозного рентгеновского излучения в зависимости от технологических параметров электронно-лучевой наплавки проволокой.
- Провел экспериментальную апробацию разработанного способа электронно-лучевой наплавки с оперативным контролем положением присадочной проволоки, которая показала повышение до 50% стабильности качества наплавленных участков за счет уменьшения колебания ширины наплавленных слоев и их смещения относительно друг друга.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- 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.
- 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.

- 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.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждена использованием современных средств проведения исследований, обоснованностью методов исследований и верификацией модели по экспериментальным данным, полученным на действующих технологических машинах электронно-лучевой сварки. Результаты исследований не противоречат известным результатам других ученых. Математические модели верифицированы путем сравнения данных их численной реализации с экспериментальными данными. В работе использован комплекс научно-технологического оборудования: машина электронно-лучевой сварки на основе инверторного источника питания ЭЛА-6ВЧ, 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 фирмы LCard E20-10 и E14-440. В качестве основных методов обработки сигнала рентгеновского излучения использовались синхронное накопление и синхронное детектирование.

Практическая значимость исследования

- Разработаны методики визуализации положения присадочной проволоки относительно центра осцилляции электронного луча по параметрам сигнала тормозного рентгеновского излучения в процессе электронно-лучевой наплавки.

- Разработан способ электронно-лучевой наплавки с оперативным управлением положением присадочной проволоки по параметрам тормозного рентгеновского излучения, позволяющий до 50% повысить стабильность качества наплавленных слоев за счет уменьшения колебания ширины наплавленных слоев и их смещения относительно друг друга.

- Разработаны технологические рекомендации получения наплавленных электронным лучом слоев проволокой из аустенитной хромоникелевой стали, обеспечивающие стабильность процесса плавления присадочной проволоки и отсутствие дефектов наплавленных слоев. Технологические рекомендации использованы предприятиями АО «Машиностроитель» и ПАО «Протон-ПМ» в процессе разработки технологии электронно-лучевой многослойной наплавки экспериментальных образцов, в промышленных условиях это позволило получить образцы наплавленных участков с механическими свойствами близкими к свойствам основного металла.

Диссертационная работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки России (базовая часть): проект «Разработка технологических основ гибридных аддитивных технологий с подачей проволочного присадочного материала» (№ 9.9697.2017 /8.9); в рамках проекта BRICS Минобрнауки России: проект «Гибридный процесс изготовления деталей для аэрокосмической отрасли: моделирование, разработка программного обеспечения и верификация» (RFMEFI58317X0062); в рамках проекта МИГ Министерства образования Пермского края: проект «Послойный синтез материалов в низком вакууме. Разработка экспериментального образца» (договор № С-26/787 от 21.12.2017); в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований: «Разработка научных основ гибридных аддитивных технологий, использующих в качестве источника тепла электрическую дугу в вакууме» (РФФИ №18-08-01016 А).

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 23-х печатных работах, из них 5 работ опубликовано в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 4 работы опубликовано в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus или Web of Science, получено 2 патента РФ.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

1. 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. - №art. 012009. (Scopus)

Соискателем приведены результаты анализа информативности сигнала тормозного рентгеновского излучения из технологической зоны в процессе электронно-лучевой наплавки с использованием проволоки сплошного сечения и предложен метод оперативного управления процессом электронно-лучевой наплавки проволокой.

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)

Соискателем приведены результаты исследования влияния различных видов осцилляции электронного луча на сигнал тормозного рентгеновского излучения в процессе электронно-лучевой сварки.

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)

Соискателем приведены результаты исследований, регистрируемых из технологической зоны, сигналов различной физической природы с целью изучения возможности их использования для контроля электронно-лучевой сварки.

4. 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. (БАК)

Соискателем показаны результаты анализа влияния осцилляции электронного луча на стабильность качества сварных швов, выполненных электронным лучом.

5. 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. (БАК)

Соискателем показаны результаты экспериментальных исследований по регистрации сигнала тормозного рентгеновского излучения в процессе осцилляции электронного луча при электронно-лучевой сварке, а также и его последующей обработке этого сигнала методом синхронного накопления.

6. 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. (БАК)

Соискателем приведены результаты моделирования сигнала из зоны электронно-лучевой сварки, применяемого для осуществления оперативного контроля режима сквозного проплавления, приведен алгоритм расчета параметров системы, осуществляющей такой оперативный контроль.

7. 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.

Соискателем предложено два варианта способа электронно-лучевой наплавки с контролем положения присадочной проволоки относительно электронного луча.

Прочие научные труды по теме диссертации:

8. 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.

9. Варушкин, С.В. Применение экранированного коллектора для контроля режима сквозного проплавления при электронно-лучевой сварке / С.В. Варушкин, В.Я. Беленький, Д.Н. Трушников // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 6. - С. 158. (БАК)

10. Оценка температуры в канале проплавления при электронно-лучевой сварке разнородных материалов / Е.С. Саломатова, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький, С.В. Варушкин // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 2. - С. 81. (БАК)

11. 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)

12. Numerical Simulation of Electron Beam Welding of Dissimilar Materials Taking into Account Thermoelectric Phenomena / G. Permyakov, D. Trushnikov, S. Varushkin // The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation, in conjunction with Symposium on the Research Activities of Joint Usage, Osaka, Japan, Osaka Univ, Japan Welding Soc., 17-18 October, 2016. - P. 197-198.
13. Агафонов, К.А. Электронно-лучевая сварка в узкощелевую разделку с присадкой проволочного материала / К.А. Агафонов, С.В. Варушкин // Химия. Экология. Урбанистика. - 2019. - Т. 2. - С. 479-482.
14. Использование тормозного рентгеновского излучения для позиционирования присадочной проволоки при электронно-лучевой наплавке / Д.С. Шамов, С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, Е.Г. Колева // Химия. Экология. Урбанистика. - 2019. - Т. 2. - С. 567-571.
15. Варушкин, С.В. Использование тормозного рентгеновского излучения для наблюдения капельного переноса металла в процессе электронно-лучевой наплавки сплошной проволокой / С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, Д.С. Шамов // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2018). Сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Под редакцией А.Н. Яковлева. - 2018. - С. 181-182.
16. Ситников, И.В. Исследование влияния фокусировки и осцилляции электронного луча на структуру и свойства сварных швов / И.В. Ситников, В.Я. Беленький, С.В. Варушкин // Наука. Технологии. Инновации. Сборник научных трудов в 9 частях. Под редакцией Гадюкиной А.В.. - 2018. - С. 408-414.
17. Сивков, А.А. Контроль процесса лазерной сварки со сквозным проплавлением металла / А.А. Сивков, С.В. Варушкин, А.В. Метелев // Master's Journal. - 2015. - № 1. - С. 13-15.
18. Взаимосвязь параметров вторичного тока разряда в плазме с фокусировкой пучка при ЭЛС / Н.С. Портнов, А.В. Косьянов, С.В. Варушкин, А.А. Абдуллин // Master's Journal. - 2013. - № 1. - С. 29-36.
19. Зависимость вторично-эмиссионного сигнала от удельной мощности при ЭЛС с большой мощностью с осцилляцией луча / Н.С. Портнов, В.В. Зыков, С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников // Master's Journal. - 2012. - № 1. - С. 30-39.

20. Reconstruction of the Penetration Channel Shape in Electron Beam Welding Using Penetrating X-Rays / S. Varushkin, D. Trushnikov, E. Krotova, N. Musikhin, N. Bogdanov // The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation, in conjunction with Symposium on the Research Activities of Joint Usage, Osaka, Japan, Osaka Univ, Japan Welding Soc., 17-18 October, 2016. - P. 197-198.
21. Осцилляция луча при электронно-лучевой сварке как инструмент снижения пикообразования в корне шва / Н.А. Зырянов, В.Я. Беленький, С.В. Варушкин, А.А. Кылосов // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2016). Сборник трудов 3-ей Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2016» - 2016. - С. 69-71.
22. Исследование влияния формы сигнала в отклоняющей системе электронной пушки при сварке с продольной осцилляцией электронного пучка на геометрию сварного шва / А.А. Кылосов, В.Я. Беленький, С.В. Варушкин, Н.А. Зырянов // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2016). Сборник трудов 3-ей Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2016» - 2016. - С. 83-87.
23. Варушкин, С.В. Тормозное рентгеновское излучение при электронно-лучевой наплавке цельнометаллической проволокой / С.В. Варушкин, Д.Н. Трушников, В.Я. Беленький // Сварка и диагностика. тезисы докладов форума (Екатеринбург, 14-16 ноября 2017 г.) - Екатеринбург : УрФУ, 2017. - С. 113-115.

Основные результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались на 12 региональных, всероссийских и международных научно-технических конференциях, форумах и семинарах: III научно-технический Семинар по электронно-пучковому оборудованию и технологиям «Обь - 2019» (05-07 августа 2019г.) г. Новосибирск, ИЯФ СО РАН; 7-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» (26-30 ноября 2018г.) г. Томск, ТПУ; Международная научно-техническая конференция «Сварка и контроль - 2018» (18-20 сентября 2018г.) г. Пермь, ЗАО ЗУАЦ; 13-я международная конференция «Electron Beam Technologies - EBT 2018» (17-22 июня 2018г.) г. Варна (Болгария), Институт электроники Болгарской академии наук;

XVII региональная конференция «Сварка и родственные технологии» (14 ноября 2017г.) г. Екатеринбург, УрФУ; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг-2017» (16-19 мая 2017г.) г. Санкт-Петербург, СПбПУ; 5-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике» (05-07 декабря 2016г.) г. Томск, ТПУ; Международный симпозиум «Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation» (17-18 октября 2016г.) г. Осака (Япония), Joining and Welding Research Institute; 3-я Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2016» (03-07 октября 2016г.) г. Пермь, ПНИПУ; XXVI научно-техническая конференция сварщиков Урала и Сибири «Современные проблемы сварочного производства» (18-21 апреля 2016г.) г. Челябинск, ЮУрГУ; Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и студентов «Фундаментальные и прикладные исследования в области материаловедения и машиностроения 2015» (25-27 ноября 2015г.) г. Пермь, ПНИПУ; 15 международная научно-техническая конференция «Сварка и диагностика» (24-25 ноября 2015г.) г. Екатеринбург, УрФУ.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Представленная ВАРУШКИНЫМ Степаном Владимировичем диссертационная работа является прикладным исследованием в области электронно-лучевой наплавки, в работе разработан метод контроля и управления электронно-лучевой наплавкой присадочной проволокой для повышения стабильности качества наплавленных участков. Диссертационное исследование включает выявление особенностей и закономерностей формирования сигнала тормозного рентгеновского излучения в зависимости от смещения присадочной проволоки относительно центра осцилляции электронного луча и от технологических параметров процесса электронно-лучевой наплавки.

Указанная область исследования соответствует формуле паспорта специальности 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии.

Соответствие содержания диссертационной работы требованиям, установленным п. 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

В диссертации приведены ссылки на авторов и источники заимствованных материалов и отдельных результатов. В работе соискатель отмечает вклад в научные труды, опубликованные лично и/или в соавторстве.

Диссертация «Управление электронно-лучевой наплавкой проволочным материалом по параметрам тормозного рентгеновского излучения» ВАРУШКИНА Степана Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата *технических* наук по специальности 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии.

Заключение принято на заседании кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов».

В голосовании приняли участие 15 чел. Результаты голосования: за – 15 чел., против – нет, воздержалось – нет (протокол № 5 от 11.11.2019).

Заведующий кафедрой

«Сварочное производство, метрология

и технология материалов»,

д-р техн. наук, профессор



/ Щицын Ю.Д. /

Ученый секретарь кафедры

«Сварочное производство, метрология

и технология материалов»,

канд. техн. наук

/ Саломатова Е.С. /

ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614000, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

Тел./факс: +7 (342) 2–198–371, E-mail: svarka@pstu.ru, сайт <http://pstu.ru>