

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

Пермского национального

исследовательского политехнического

университета,

доктор технических наук, профессор

Коротаев 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 «Разработка технологии и оборудования аддитивного производства плазменной наплавкой плавящимся электродом» выполнена на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов».

В период подготовки диссертации ТЕРЕНТЬЕВ Сергей Александрович работал в ООО «PAP», в конструкторско-технологическом бюро в должности инженера сварочного производства.

В 2012 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», присуждена квалификация (степень) Магистр техники и технологий по направлению «Технологические машины и оборудование».

В 2019 году окончил аспирантуру очной формы обучения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки 15.06.01 – Машиностроение (период обучения 01.10.2015 – 30.09.2019).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор ЩицЫн Юрий Дмитриевич, заведующий кафедрой «Сварочное производство, метрология и

технология материалов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

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

1. Соискателем предложено использовать способ плазменной наплавки плавящимся электродом, который позволяет повысить производительность процесса для аддитивного формирования металлических изделий.

2. Определены оптимальные параметры плазменной наплавки плавящимся электродом, при которых обеспечивается стабильная совместная работа дуг, равномерное плавление присадочной проволоки и постоянство формирования наплавленного валика.

3. Разработана математическая модель, которая позволяет прогнозировать размеры и форму одиночного валика при плазменной наплавке плавящимся электродом. Полученная модель необходима для «нарезки» модели изделия на 2D слои, расчета траектории наплавки слоя и определения параметров наплавки.

4. Установлены особенности теплопередачи в узлы плазмотрона и изделие при плазменной наплавке плавящимся электродом, что позволило определить необходимую мощность системы охлаждения плазмотрона для аддитивного формирования металлических изделий при беспрерывной работе.

5. Спроектирован и изготовлен плазмотрон для автоматической плазменной наплавки плавящимся электродом, адаптированный к требованиям аддитивного производства.

6. Исследована структура, и свойства аустенитной стали, полученной послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом. Полученный материал не уступает по свойствам материалу, полученному за счет литья с последующей обработкой (ковка, штамповка и др.). Таким образом, представлена возможность получения нового материала способом послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом.

**Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:**

- Выявлены зависимости параметров режима плазменной наплавки плавящимся электродом на устойчивость процессов взаимного горения дуг, переноса

электродного металла и формирование наплавленного валика при работе на режимах с минимальными плотностями тока электрических дуг.

- Разработана математическая модель прогнозирования размеров и профиля наплавленного валика, для формирования алгоритма построения изделия послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом.
- Установлено комплексное влияние конструктивных и технологических параметров плазменной наплавки плавящимся электродом на характер распределения и величину теплопередачи в узлы плазмотрона и изделие.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований** подтверждена использованием современного научно-исследовательского оборудования и методов исследования, всестороннего и тщательного проведения экспериментов, комплексным анализом результатов экспериментов. Результаты исследований не противоречат известным результатам других ученых, опубликованных в открытой печати. Математическая модель верифицирована с применением стандартных методик и сравнением расчетных данных с эмпирическими результатами. В экспериментальных исследованиях использовалось калиброванное измерительное оборудование. Исследование образцов полученного материала осуществлялось методами визуально-измерительного, цветного, ультразвукового, рентгенографического контроля. Структура металла исследовалась с применением стандартных методик металлографического исследования. Рентгенофлюоресцентный анализ применялся для определения химического состава наплавленного металла. Прочностные характеристики определяли по стандартным методикам для одноосного растяжения, ударного изгиба и др. на стандартном испытательном оборудовании.

### **Практическая значимость исследования**

1. Создан компактный плазмотрон, как составная часть оборудования для аддитивного производства полного цикла, совместимый с серийным сварочным оборудованием, имеющий простое устройство, позволяющий выполнять плазменную сварку и наплавку плавящимся электродом с аксиальной подачей присадочной проволоки черных и цветных металлов и их сплавов.
2. Разработаны технологические рекомендации для аддитивного формирования изделий плазменной наплавкой плавящимся электродом, обеспечивающие стабильное

горение дуг, равномерное плавление электродного металла и постоянство формирования наплавленного валика.

3. Разработан высокопроизводительный способ аддитивного формирования металлических изделий из высоколегированных сталей плазменной наплавки плавящимся электродом, который обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики.

Диссертационная работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 11708ГУ/2017, «Разработка технологии аддитивного формирования металлических изделий послойно плазменной наплавкой»), Минобрнауки России (проведение исследований в рамках многосторонней научно-исследовательской инициативы БРИКС (RFMEFI58317X0062), «Гибридный процесс изготовления деталей для аэрокосмической отрасли: моделирование, разработка программного обеспечения и верификация»), Министерства образования Пермского края (грант на поддержку проектов, реализуемых международными исследовательскими группами №26/795, «Гибридные аддитивные технологии. Послойное деформационное упрочнение»).

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.**

Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 6 печатных работах, из них 5 работ опубликованы в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 2 – в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus или Web of Science, получен 1 патент РФ.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

1. Formation of 04Cr18Ni9 steel structure and properties during additive manufacturing of blanks / Y.D. Shitsyn, S.D. Neulybin, S.A. Terentiev, A.O. Artemov // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 102. – № 9-12. – pp. 3719-3723. (Scopus, Web of Science, ВАК)

*Соискателем представлены результаты исследования структуры и свойств заготовки из аустенитной стали, полученной послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом. Представлены результаты сравнения структуры и свойств*

*образцов из аустенитной стали, полученного послойной плазменной наплавкой плавящимся электродом и аналогичного материала, полученного способами СМТ и плазменной наплавкой неплавящимся электродом током прямой полярности.*

2. Development of Layered Growth Technology for a Workpiece of Highly Alloyed Steel by Plasma Surfacing / Y.D. Shitsyn, D.S. Belinin, S.D. Neulybin, S.A. Terentiev, N.V. Plotnikova // Metallurgist. – 2017. – Vol.61. – №5-6. – pp. 418-423. (Scopus, Web of Science, ВАК)

*Соискателем показана возможность получения заготовок из аустенитной стали 12Х18Н10Т послойной плазменной наплавкой на токах прямой и обратной полярности, а также представлены результаты исследования структуры и свойств металла заготовки.*

3. Использование плазменной наплавки для аддитивного формирования заготовок из алюминиевых сплавов / Ю.Д. Щицyn, Е.А. Кривоносова, С.Д. Неулыбин, Т.В. Ольшанская, Р.Г. Никулин, Е.М. Федосеева, С.А. Терентьев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2019. – Т. 21. – № 2. – С. 63-72. (ВАК)

*Соискателем показана возможность получения металлических заготовок послойной плазменной наплавкой, а также представлены результаты исследования структуры и прочностных свойств наплавленного металла.*

4. Создание слоистых материалов на основе высоконикелевых сплавов с использованием плазменной дуги на токе обратной полярности / Ю.Д. Щицyn, Д.С. Белинин, С.Д. Неулыбин, С.А. Терентьев, А.А. Ефимова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2016. – Т. 18. – № 2. – С. 7-20. (ВАК)

*Соискателем показана возможность получения послойной плазменной наплавкой аустенитной стали и никелевого сплава, представлены результаты исследования структуры и механических свойств полученных образцов.*

5. Формирование структуры и свойств стали 04Х18Н9 при аддитивном производстве заготовок / Ю.Д. Щицyn, С.А. Терентьев, С.Д. Неулыбин, Д.С. Белинин, А.О. Артемов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета «Машиностроение, материаловедение». – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 55-61. (ВАК)

*Представлены результаты исследования структуры и свойств материала аустенитной стали, полученного послойной плазменной наплавкой.*

6. Пат. 2702512. Российская Федерация, МПК B23K 10/00. Плазмotron / С.А. Терентьев; заявитель и патентообладатель Терентьев С.А. - №2019107987; заявл. 20.03.19; опубл. 08.10.19, Бюл. №28.

*Соискателем предложена конструкция плазмотрона для плазменной сварки и наплавки плавящимся электродом черных и цветных металлов, которая отличается от имеющихся аналогов компактностью, высокой надежностью, простотой изготовления и эксплуатации.*

*Прочие научные труды по теме диссертации:*

7. Терентьев, С.А. Влияние параметров режима наплавки методом Плазма-МИГ на геометрию валика / С.А. Терентьев, Т.Э. Ефремов, Ю.Д. ЩицЫн // Высокие технологии в современной науке и технике. ВТСНТ-2018 [Электронный ресурс]: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, [г. Томск], 26-30 нояб. 2018 г. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Наци. исслед. Томск. политехн. ун-т, Инж. шк. новых произв. технологий, Рос. фонд фундам. исслед. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 220-221. Режим доступа: Ссылка - [http://portal.tpu.ru/files/conferences/hightech/2018/proceedings\\_2018.pdf](http://portal.tpu.ru/files/conferences/hightech/2018/proceedings_2018.pdf). – Загл. с экрана.

8. Исследование свойств заготовки из стали 04Х18Н9, полученной послойной плазменной наплавкой на токе обратной полярности / С.А. Терентьев, Ю.Д. ЩицЫн, С.Д. Неулыбин, Д.С. Белинин, Г.Л. Пермяков // Сварка и диагностика на транспорте: тез. докл. форума, Екатеринбург, 14-15 нояб. 2017 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Ин-т физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН. – Екатеринбург : Атлант, 2017. - С. 63-64.

Основные результаты диссертационной работы представлялись на 7 международных, всероссийских и других конференциях. Среди них: VII Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике», г. Томск, 26-30 ноября 2018 г.; Международная научно-техническая конференция «Сварка и контроль», посвященная 130-летию изобретения Н.Г. Славянова электродуговой сварки плавящимся электродом, г. Пермь, 18-21 сентября 2018 г.; Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов

«Современные и прогрессивные технологии сварки», посвященная памяти заведующего кафедрой «Сварочное производство» с 1982 по 1994 года «Каратыша Виктора Васильевича», г. Пермь, 10-11 мая 2017 г.; I Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и студентов «Фундаментальные и прикладные исследования в области материаловедения и машиностроения 2016», г. Пермь, 26-27 апреля 2016 г. и др. Практические результаты диссертационной работы демонстрировались на 3-х международных выставках: Авиационно-космический салон «МАКС-2019», г. Жуковский, 28 августа 2019 г.; «Металлообработка-2019», г. Москва, 27-30 мая 2019 г.; Ганноверская промышленная выставка-ярмарка «Hannover Messe», г. Ганновер (Германия), 1-5 апреля 2019 г.

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

Представленная ТЕРЕНТЬЕВЫМ Сергеем Александровичем диссертационная работа является прикладным исследованием в области аддитивного производства плазменной наплавкой плавящимся электродом. Диссертационное исследование включает: исследование закономерностей влияния параметров режима плазменной наплавки плавящимся электродом на стабильность процесса, характер переноса электродного металла, теплопередачу в изделие и узлы плазмотрона; разработку математической модели формирования одиночного валика, как структурную составляющую процесса аддитивного производства; исследование нового способа получения металлических заготовок; разработку оборудования для наплавки и аддитивного формирования металлических изделий.

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, отмечен вклад соискателя в работах, опубликованных лично и/или в соавторстве.

Диссертация «Разработка технологии и оборудования аддитивного производства металлических изделий плазменной наплавкой плавящимся электродом» ТЕРЕНТЬЕВА Сергея Александровича 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 г.).

Председательствующий, и.о. декана  
механико-технологического факультета,  
д-р. техн. наук, профессор

 /Беленький В.Я./

Ученый секретарь кафедры  
«Сварочное производство, метрология  
и технология материалов»,  
канд. техн. наук

 /Саломатова Е.С./

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29  
Тел./факс: +7 (342) 2-198-371, E-mail: svarka@pstu.ru, сайт <http://pstu.ru>