

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

Пермского национального

исследовательского

политехнического университета,

доктор физ.-мат. наук, доцент

___ Швейкин А.И.

16/09 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Трехмерная электродуговая наплавка сплава ВТ6 плавящимся электродом» выполнена на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Карташев Максим Федорович работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов» в должности инженера, а также в лаборатории «Методы создания и проектирования систем» в должности младшего научного сотрудника.

EX 1000
PNDAT 1000
UTHEMAD 1000

В 2018 году окончил магистратуру очной формы обучения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 15.04.01 «Машиностроение».

В 2022 году окончил аспирантуру очной формы обучения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 15.06.01 Машиностроение, по специальности 05.02.10 Сварка, родственные процессы и технологии (период обучения с 01.10.2018 г. по 31.07.2022 г.).

Научный руководитель – доктор технических наук, Трушников Дмитрий Николаевич, работает профессором кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов», проректором по разработкам и инновациям федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:
 - 1) Соискателем лично проведены исследования влияния технологических параметров трехмерной электродуговой наплавки плавящимся электродом на стабильность формирования получаемого металла и найден предпочтительный режим трехмерной наплавки сплава ВТ6 плавящимся электродом.
 - 2) Предложен способ управления тепловложением при наплавке, использующий численный алгоритм определения требуемого изменения технологических параметров во времени при решении тепловой задачи посредством математического моделирования.
 - 3) Проведены исследования влияния послойной деформационной обработки и последующей общей термообработки на качество

наплавленного материала из сплава ВТ6 при трехмерной наплавке плавящимся электродом.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1) Разработан численный алгоритм определения закона изменения технологических параметров во времени при решении тепловой задачи для определения предпочтительных режимов процесса трехмерной наплавки для обеспечения качественного формирования изделий.

2) Установлено, что применение послойной холодной деформации небольшой величины в процессе трехмерной наплавки титанового сплава ВТ6 способствует измельчению структуры и повышению механических свойств наплавленного металла.

3) Установлено, что при трехмерной наплавке титанового сплава ВТ6 с послойной холодной деформацией небольшой величины ведущим механизмом, приводящим к измельчению зерна, являются процессы перекристаллизации α -фазы, происходящие при нагреве и охлаждении прокованного слоя во время наплавки последующих слоев.

4) Установлена возможность получения материала из сплава ВТ6 с высокой изотропией, прочностными и пластическими свойствами на уровне кованных материалов из сплава ВТ6 (предел прочности до 1000 МПа, относительное удлинение до 13...14 %) трехмерной электродуговой наплавкой плавящимся электродом в сочетании с деформационной обработкой и последующей общей термической обработкой.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается использованием поверенного оборудования лаборатории, аккредитованной Росавиацией, и современных средств проведения исследований, корректностью принимаемых допущений, обоснованностью методов исследований и верификацией моделей по экспериментальным данным, полученным на действующих установках для гибридной аддитивной технологии, апробацией полученных

посредством этой технологии материалов, представлением результатов исследования в публикациях.

4. Практическая и теоретическая значимость исследования:

1) Разработаны технологические рекомендации, обеспечивающие осуществление гибридного процесса трехмерной электродуговой наплавки плавящимся электродом, совмещенной с послойным деформационным упрочнением и термообработкой, благодаря которым возможно получение трехмерно наплавляемых изделий с требуемыми механическими свойствами с практически полным отсутствием анизотропии.

2) Разработан способ определения параметров теплового воздействия, включающий динамическое управление параметрами режима наплавки, для поддержания размеров ванны расплавленного металла на заданном уровне, обеспечения постоянства размера наплавленных валиков и устойчивого формирования выращиваемого изделия.

3) Получен патент на изобретение №2750994 от 07.07.2021 (RU) «Способ управления процессом наплавки» (Приоритет изобретения 02.06.2020).

Результаты диссертационного исследования применены при разработке рабочей конструкторской документации на установки 3D печати в рамках работ для компании ООО «иксВелд», при наплавке опытных заготовок детали проточной части авиационного двигателя из сплава ВТ6 для АО «Пермский завод «Машиностроитель» и заготовки детали типа «Кронштейн» для АО «РЕДУКТОР-ПМ».

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Содержание диссертационной работы Карташева Максима Федоровича достаточно полно отражено в 13-ти печатных работах, из них 9 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, 3 работы опубликовано в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus или Web of Science, получен 1 патент РФ.

Основные положения и результаты работы отражены в следующих научных публикациях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, и/или в базы цитирования Web of Science, Scopus:

1. Formation of Structure and Properties of Two-Phase Ti-6Al-4V Alloy during Cold Metal Transfer Additive Deposition with Interpass Forging / Y. Shchitsyn, M. Kartashev, E. Krivonosova, T. Olshanskaya, D. Trushnikov // Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 16. – P. 4415. (вклад автора 6 с./18 с.)
(Web of Science, Scopus)

Соискателем приведены результаты исследования влияния послойной деформационной обработки, последующей общей термообработки, а также совместного применения послойной деформационной обработки и термообработки на структуру и механические свойства титанового сплава ВТ6, полученного при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом.

2. Improving VT6 Titanium-Alloy Components Produced by Multilayer Surfacing / D. N. Trushnikov, M. F. Kartashev, T. V. Ol'shanskaya, M. R. Mindibaev, Yu. D. Shchitsyn, F. R. Saecedo-Zendejo // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41. – № 9. – P. 848-850. (вклад автора 1с./ 3 с.)
(Scopus)

Соискателем приведены результаты исследования влияния послойной деформационной обработки и последующей общей термообработки на структуру и механические свойства титанового сплава ВТ6, полученного при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом.

3. Evaporation processes of alloying components during wire-arc deposition of aluminum alloy 5056 / E. S. Salomatova, M. F. Kartashev, D. N. Trushnikov, G. L. Permykov, T. V. Olshanskaya, I. R. Abashev, E. M. Fedoseeva, E. G. Koleva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2020. – Vol. 758. – № 1. – P. 012064. (вклад автора 1 с./ 5 с.) **(Scopus)**

Соискателем приведены результаты химического анализа образцов из алюминиевого сплава 5056, полученных при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом для оценки испарения легирующих элементов в процессе наплавки.

4. Способ управления процессом трехмерной наплавки / Д. Н. Трушников, М. Ф. Карташев, Р. П. Давлятшин, С. З. Ф. Раймундо // СТИН. – 2022. – № 8. – С. 29-31. (вклад автора 1 с./3 с.) **(ВАК)**

Соискателем приведены результаты разработки способа управления тепловложением при трехмерной наплавке, использующего численный алгоритм требуемого изменения технологических параметров во времени при решении тепловой задачи посредством математического моделирования.

5. Формирование структуры и механических свойств заготовок из Al-Mg сплавов при многослойной наплавке с межслойным деформационным воздействием / Г. Л. Пермяков, Д. Н. Трушников, Т. В. Ольшанская, Ю. Д. Щицын, М. Ф. Карташев, Т. Хассель // СТИН. – 2022. – № 8. – С. 32-35. (вклад автора 1с./ 4с.) **(ВАК)**

Соискателем приведены результаты испытаний на растяжение и ударный изгиб образцов из Al-Mg сплава, полученных методом многослойной наплавки с применением различных стратегий нанесения слоев в сочетании с межслойной деформационной обработкой и без нее. Представлена оценка влияния стратегии аддитивной наплавки и применения межслойного деформационного воздействия на структуру и

наплавленного металла, общий уровень и анизотропию механических свойств наплавленных образцов.

6. Искажение формы, локализация пластической деформации и распределение остаточных напряжений при односторонней проковке/обкатке бруса: применение результатов к аддитивному производству шпангоута с послойной обработкой давлением / И. Э. Келлер, А. В. Казанцев, Д. С. Дудин, Г. Л. Пермяков, М. Ф. Карташев // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14. – № 4. – С. 434-443. (вклад автора 1 с./10 с.) **(ВАК)**

Соискателем представлена численная модель формирования напряженно-деформированного состояния в призматическом бруске при его односторонней обработке пластическим деформированием.

7. Повышение качества изделий из сплава ВТ6, получаемых при многослойной наплавке / Д. Н. Трушников, М. Ф. Карташев, Т. В. Ольшанская, М. Р. Миндибаев, Ю. Д. Щицын, С. З. Ф. Раймундо // СТИН. – 2021. – № 6. – С. 12-14. (вклад автора 1 с./3 с.) **(ВАК)**

Соискателем приведены результаты исследования влияния послойной проковки и последующей термообработки на формирование структуры и свойств многослойно наплавленных изделий из сплава ВТ6.

8. Использование СМТ-наплавки для аддитивного формирования заготовок из титановых сплавов / Т. В. Ольшанская, Д. Н. Трушников, М. Ф. Карташев, С. Д. Неулыбин, Е. А. Кривоносова, Ю. Д. Щицын // Metallurg. – 2020. – № 1. – С. 63-68. (вклад автора 1 с./6 с.) **(ВАК)**

Соискателем представлены результаты исследования аддитивного формирования изделий из титанового сплава 2В системы Ti-Al-V с использованием наплавки плавящимся электродом в защитном газе.

9. Исследование влияния поверхностного деформационного воздействия и термообработки при многослойной наплавке на механические свойства и

пористость алюминиевого сплава 1580 / М. Ф. Карташев, М. Р. Миндибаев, Д. О. Панов, Г. Л. Пермяков, Д. Н. Трушников // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – № 6. – С. 22-30. (вклад автора 2 с./5 с.) **(ВАК)**

Соискателем приведены результаты исследования влияния деформационного воздействия и термообработки на пористость и механические свойства изделий из магний-скандий содержащих алюминиевых сплавов, полученных при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом.

10. Исследование влияния термообработки на микроструктуру и механические свойства образцов из алюминиевого магнийсодержащего сплава 1580, полученных способом многослойной наплавки / М. Ф. Карташев, М. Р. Миндибаев, Д. Н. Трушников, Р. Д. Гребенкин, А. Н. Юрченко, Г. Л. Пермяков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 38-46. (вклад автора 3 с./9 с.) **(ВАК)**

Соискателем приведены результаты исследования влияния термообработки на структуру и механические свойства образцов из алюминиевого сплава 1580, полученных при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом.

11. Исследование процессов испарения легирующих компонентов при СМТ наплавке проволоки типа АМг5 / И. Р. Абашев, М. Ф. Карташев, Г. Л. Пермяков, Д. Н. Трушников, Е. Г. Колева, Е. С. Саломатова, Т. В. Ольшанская // Известия Тульского государственного университета. – 2019. – № 12. – С. 305-311. (вклад автора 2 с./ 7 с.) **(ВАК)**

Соискателем приведены результаты химического анализа образцов из алюминиевого сплава АМг5, полученных при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом для оценки испарения легирующих элементов в процессе наплавки. Также представлена представлена

нелинейная теоретическая модель, которая описывает неравновесные процессы в жидкой фазе наплавляемого металла, с учетом процессов испарения химических легкоиспаряемых элементов из наплавляемой проволоки в зоне воздействия источника нагрева при наплавке.

12. Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки / М. Ф. Карташев, Г. Л. Пермяков, Д. Н. Трушников, М. Р. Миндибаев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – Т. 17. – № 3. – С. 38-45. (вклад автора 3 с./8 с.) **(ВАК)**

Соискателем представлены результаты механических испытаний образцов из алюминиевого сплава АМг5, полученного при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом при различных температурных циклах, с применением деформационного воздействия и без применения послойного воздействия.

13. Трушников Д. Н., Карташев М. Ф., Безукладников И. И. Способ управления процессом наплавки. Патент РФ №2750994. 07.07.2021. (вклад автора 8 с./23 с.)

Соискателем предложен способ управления тепловложением при трехмерной наплавке, использующий численный алгоритм требуемого изменения технологических параметров во времени при решении тепловой задачи посредством математического моделирования.

Основные результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались на 3 всероссийских и международных научно-технических конференциях. Среди них: IV-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Электрофизические методы обработки в современной промышленности», гор. Пермь, декабрь 2020 г.; Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика», гор. Пермь, апрель 2019 г.; 4-я

научно-практическая конференция с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении – ИТММ-2019», гор. Пермь, сентябрь 2019.

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

Представленная КАРТАШЕВЫМ Максимом Федоровичем диссертационная работа является прикладным исследованием в области электродуговой наплавки. В работе изучены влияния послойного деформационного воздействия и последующей общей термообработки на фазовые и структурные превращения и формирование механических свойств в сплаве ВТ6, получаемом при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом. Также, в работе предложена система программного управления и регулирования тепловложения при трехмерной наплавке, использующая численный алгоритм требуемого изменения технологических параметров во времени при решении тепловой задачи посредством математического моделирования. Кроме того, диссертационное исследование включает технологические основы трехмерной электродуговой наплавки сплава ВТ6 плавящимся электродом.

Указанная область исследования соответствует формуле паспорта специальности 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии.

7. Соответствие диссертационной работы требованиям, «Положения о присуждении ученых степеней», «Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ».

Диссертация КАРТАШЕВА Максима Федоровича отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и 12.10.18 № 1168), требованиям «Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ», предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Трехмерная электродуговая наплавка сплава ВТ6 плавящимся электродом» КАРТАШЕВА Максима Федоровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии.

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

Присутствовало на заседании 16 чел. Результаты голосования: «за» - 16 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0, протокол № 2 от «20» сентября 2022 г.

Заведующий кафедрой

«Сварочное производство, метрология

и технология материалов»

д-р техн. наук, профессор


/Щицын Ю.Д./

исх

ФИО

Ученый секретарь кафедры

«Сварочное производство, метрология

и технология материалов»

канд. техн. наук, доцент


/Федосеева Е.М./

ФИО

ФГАОУ 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>