

На правах рукописи



Карташев Максим Федорович

**ТРЕХМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ НАПЛАВКА
СПЛАВА ВТ6 ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **Трушников Дмитрий Николаевич**
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Мелюков Валерий Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
ООО «Вятский аттестационный центр»,
директор

Рубцов Валерий Евгеньевич
кандидат физико-математических наук,
Институт физики прочности и материаловедения
Сибирского отделения Российской академии
наук, лаборатория контроля качества материалов
и конструкций, заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»

Защита состоится 23 декабря 2022 года в 14 часов 00 мин на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.13, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru/>)

Автореферат разослан 21 ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.13,
кандидат технических наук, доцент

Е.М. Федосеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Аддитивное производство или технологии послойного синтеза являются прорывными технологиями этого столетия и представляют собой процессы объединения материала с целью создания объекта из компьютерной модели слой за слоем.

Трёхмерная наплавка обладает высоким потенциалом внедрения в современной промышленности, так как в перспективе может позволить производить изделия сложной формы с высоким коэффициентом используемого материала, что особенно важно для дорогостоящих сплавов. Применение проволочных материалов позволяет избавиться от ряда проблем, связанных с низкой производительностью существующих методов, высокой стоимостью применяемого оборудования, ограниченностью типов применяемых материалов, обусловленных традиционным использованием порошковых систем в качестве материала для аддитивного формирования изделий. Наиболее ярко преимущества технологии раскрываются при работе с дорогостоящими материалами, такими как титановый сплав ВТ6, который широко распространён в авиационной, космической и атомной промышленности.

Однако, эти отрасли выдвигают высокие требования к механическим характеристикам получаемых в процессе послойного синтеза материалов, а при трёхмерной наплавке титановых сплавов встречается ряд проблем, ограничивающих качество получаемых по таким технологиям изделий. Это образование столбчатых первичных β -зерен вдоль направления выращивания, анизотропия механических свойств, низкие механические свойства. Существует проблема обеспечения стабильности геометрических характеристик наплавленных слоев в связи с изменяющимися условиями теплоотвода в процессе наплавки. Существует проблема образования внутренних дефектов при трёхмерной наплавке: пористость, несплавления, трещины, которые могут быть связаны с выбором неблагоприятных режимов наплавки и/или стратегии заполнения.

Достаточно подробно исследовано влияние термообработки (ТО) на структуру металла и свойства изделий, получаемых традиционными способами из титанового сплава ВТ6. В известных данных можно найти большое количество стандартных режимов ТО сплава ВТ6 в зависимости от желаемых свойств. Однако, имеющаяся на данный момент информация в известных данных пока не позволяет в полной мере судить о влиянии режимов ТО на качество изделий, полученных с помощью трёхмерной наплавки.

Степень разработанности темы. Известны примеры применения проковки для улучшения свойств материалов: А.В. Киричек (Брянский государственный технический университет); К.Р. Karunakaran (ИТ Bombay), в том числе известны

современные исследования влияния послойной ударной обработки на структуру многослойно наплавляемых изделий: применение межслойной проковки: J.R. Hönnige, P. Colegrove (Университет Крэнфилда), применение межслойной поверхностной ультразвуковой ударной обработки: Yichong Yang (Пекинский технологический университет). Выявлено, что применение послойной ударной обработки позволяет измельчить первичные β -зерна, однако исследования влияния послойной ударной обработки на анизотропию механических свойств образцов из сплава ВТ6, наплавляемых плавящимся электродом, пока отсутствуют. Кроме того, в открытых литературных источниках на данный момент отсутствуют исследования влияния совместного воздействия деформационной и термической обработки на качество многослойно наплавляемых изделий из титанового сплава ВТ6 или его аналогов.

Цель диссертационной работы. Повышение качества материала из сплава ВТ6, получаемого при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом, посредством комплексного управления режимами наплавки, термическими циклами наплавки, послойным деформационным воздействием и последующей общей термообработкой.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ существующих экспериментальных и теоретических данных о формировании геометрических параметров, дефектов, структуры, механических свойств изделий из сплава ВТ6 при трехмерной наплавке.

2. Исследование влияний технологических параметров трехмерной электродуговой наплавки плавящимся электродом на качество формирования получаемого материала из сплава ВТ6.

3. Разработка способа управления тепловложением при наплавке посредством математического моделирования.

4. Исследование влияний послойной деформационной обработки и последующей общей термообработки на структуру и механические свойства наплавленного материала из сплава ВТ6 при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом.

Методология исследования. Для достижения поставленной цели работа включала в себя теоретические и практические исследования. Было применено математическое моделирование требуемых значений мощности теплового источника и тепловых полей в выращиваемом изделии в каждый момент времени в процессе наплавки. Численная реализация математической модели производилась в программном комплексе COMSOL Multiphysics. При выполнении диссертационной работы принято решение исследовать технологию трехмерной электродуговой наплавки плавящимся электродом с процессом холодного переноса металла (Cold

Metal Transfer), обеспечивающую наименьшее тепловложение при наплавке слоев за счет высокой частоты циклов прерывающегося горения дуги, позволяющих образовывать в основном только каплю жидкого металла на торце присадочной проволоки с минимальным оплавлением подложки.

Научная новизна работы:

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.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны технологические основы, обеспечивающее осуществление гибридного процесса трехмерной электродуговой наплавки плавящимся электродом, совмещенной с послойным деформационным упрочнением и термообработкой, благодаря которым возможно получение трехмерно наплавленных 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 и 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».

Поддержка работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках проекта международной исследовательской группы «Моделирование послойного синтеза наплавкой проволочных материалов в реальном времени. Разработка прототипа ПО» (Соглашение № С-26/512), при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по государственному заданию FSNM-2020-0028, по государственному заданию FSNM-2021-0011, при финансовой поддержке РНФ по гранту 21-19-00715, при финансовой поддержке Правительства РФ (по постановлению №220) по гранту 2020-220-08-9026.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов 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.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования влияния технологических параметров трехмерной электродуговой наплавки плавящимся электродом на качество формирования получаемого материала из сплава ВТ6.

2. Способ управления тепловложением при наплавке, использующий численный алгоритм определения требуемого изменения технологических параметров во времени при решении тепловой задачи посредством математического моделирования.

3. Результаты исследования влияния послойной деформационной обработки и последующей общей термообработки на структуру и механические свойства наплавленного металла при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом сплава ВТ6.

Апробация работы. 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.

Личный вклад автора. 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. Предложен способ управления тепловложением при наплавке, использующий численный алгоритм определения требуемого изменения технологических параметров во времени при решении тепловой задачи посредством математического моделирования. Проведены исследования влияния послойной деформационной обработки и последующей общей термообработки на качество наплавленного материала из сплава ВТ6 при трехмерной наплавке плавящимся электродом.

Публикации. По теме диссертационного исследования было опубликовано 13 печатных работ, в том числе 3 – в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и/или Web of Science, 9 – в изданиях, рекомендованных ВАК, получен 1 патент РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы. Объем работы составляет 157 страниц, среди них 113 рисунков, 13 таблиц. Список литературы содержит 168 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 существующих экспериментальных и теоретических данных в области трехмерной наплавки титанового сплава ВТ6.

Проанализированы возможные способы улучшения свойств сплава ВТ6, получаемого трехмерной наплавкой, рекомендуемые режимы ТО изделия из сплава ВТ6. Известна послойная прокатка для повышения качества многослойно наплавленного сплава ВТ6, которая позволяет значительно измельчить первичные бета зерна, а также повысить пластичность и прочность многослойно наплавленных изделий. Однако послойная прокатка является сложно осуществимым способом упрочнения изделий со сложным профилем наплавки. В последнее время появляются сообщения по применению послойной проковки, как более гибкого способа послойного деформационного воздействия. Существуют исследования влияния послойной ударной обработки на структуру многослойно наплавленных изделий,

позволяющей измельчить первичные бета зерна, однако исследования влияния послойной ударной обработки на механические свойства наплавляемых образцов пока отсутствуют. На данный момент отсутствуют исследования, показывающие влияние совместного воздействия деформационной и термической обработки на качество многослойно наплавляемых изделий.

Установлено, что необходимо повышение качества материала из сплава ВТ6, получаемого при трехмерной наплавке, посредством комплексного управления режимами наплавки, термическими циклами наплавки, послойным деформационным воздействием и последующей общей термообработкой.

Вторая глава посвящена разработке методики проведения исследований, описанию использованного оборудования, исследованию влияния технологических параметров наплавки на качество наплавляемого металла.

В работе использован комплекс научно-технологического оборудования АТ-300 производства Группы Компаний «Гибридное аддитивное производство», включающий 3-х осевой фрезерный станок с ЧПУ и источник питания Fronius TransPuls Synergic 5000 СМТ. Для защиты наплавленного металла от окружающего воздуха использовалась камера с контролируемой атмосферой аргона, либо защитное устройство с локальной подачей защитного газа. Проковка производилась с помощью пневматического ударного устройства. ТО производилась при помощи вакуумных печей. Исследование микроструктуры производилось на микрошлифах, изготовленных на шлифовально-полировальном станке Top Tech серии Plato-NA модель FS-B, изображения получены с помощью светового инвертированного микроскопа OlympusGX 51 при увеличении до 1000 крат и программного обеспечения Olympus Stream Motion 1.8.

Варьировались следующие технологические параметры: состав защитного газа, расходы защитного газа из горелки и из защитного устройства, полярность дуги, мощность дуги, скорость наплавки, скорость подачи проволоки, длина дуги, динамический коэффициент, параметры стратегии заполнения.

Для обеспечения стабильного формирования наплавляемого металла при дуговой наплавке плавящимся электродом более целесообразно использовать прямую полярность, так как она обеспечивает более стабильное формирование наплавляемого металла. При дуговой наплавке плавящимся электродом для обеспечения требуемой сплошности материала необходима разработка специальной стратегии заполнения и использование защитного газа гелия, обеспечивающего повышение энтальпии дуги. Совместное применение камеры с контролируемой атмосферой и локальной защиты зоны наплавки позволяет добиться лучшего качества поверхности наплавленного металла. Полученный режим трехмерной наплавки сплава ВТ6 плавящимся электродом обеспечивает стабильное формирование изделия без дефектов.

В третьей главе отражены результаты разработки способа управления тепловложением при наплавке, использующего численный алгоритм определения требуемого изменения технологических параметров во времени при решении тепловой задачи посредством математического моделирования.

Способ направлен на обеспечение стабильности процесса наплавки, а также требуемых геометрических характеристик и отсутствия дефектов многослойно наплавляемого изделия.

Математическая постановка задачи заключается в следующем.

Тепловой источник принимается объемным с постоянной объемной плотностью. Размеры источника тепла являются входными параметрами для моделирования. Ширина источника тепла обычно принимается равной ширине валика. Высота источника принимается равной высоте наплавляемого валика, длина вдоль наплавления наплавки принимается равной ширине.

При моделировании распределение тепловой энергии в расчетной области описывается с помощью дифференциального уравнения переноса энергии (1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{C_{eff} \rho}, \quad (1)$$

где T – температура, t – время, a – коэффициент температуропроводности, x, y, z – координаты, Q – объемная мощность, C_{eff} – теплоемкость, ρ – плотность.

Скрытая теплота плавления или кристаллизации в уравнении (1) определяется введением эффективной теплоемкости, которая в этих условиях скачком возрастает в интервале температур двухфазной зоны (2):

$$C_{eff} = \begin{cases} C_0 & T < T_S, T > T_L \\ C_0 + \frac{L_m}{T_L - T_S} & T_S \leq T \leq T_L \end{cases}, \quad (2)$$

где C_0 – теплоемкость, в общем случае, зависящая от температуры, L_m – удельная теплота фазового перехода (удельная теплота плавления).

При вычислениях кусочно-непрерывную функцию эффективной теплоёмкости (2) возможно заменить гладкой функцией (3):

$$C_{eff} = C_0 + \frac{\exp[-((T - T_{SL}) / (T_L - T_S))^2]}{\sqrt{\pi} (T_L - T_S)} H_f, \quad (3)$$

где H_f – скрытая теплота плавления, T_{SL} – средняя температура затвердевания (плавления), которая принята средней в интервале от температуры солидуса до температуры ликвидуса.

Тепловой поток на всех границах, ограничивающих выращиваемую стенку, выражается формулой (4):

$$q = q_h(T - T_0) - \sigma_{сб} \varepsilon_\mu (T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

где T_0 – температура окружающей среды вдали от зоны наплавки; $\sigma_{сб}$ – константа Стефана-Больцмана, ε_μ – степень черноты металла.

В самой общей формулировке могут быть использованы граничные условия третьего рода (5):

$$q = h(T - T_0), \quad (5)$$

где коэффициент теплоотдачи h отражает условия закрепления подложки.

Численный алгоритм определения требуемого изменения технологических параметров заключается в следующем. В качестве входного воздействия при управлении рассматривается заданное значение p_{vol}^{ycm} объема расплавленной ванны. Звено $p_{vol}(P_{св})$ соответствует решению прямой задачи теплопроводности определения распределения температурных полей в процессе послойного формирования изделия. На каждом временном шаге осуществляется сравнение величины контролируемого параметра (p_{vol}) с величиной значения уставки (p_{vol}^{ycm}). Далее по величине рассогласования ($p_{vol} - p_{vol}^{ycm}$) осуществляется корректировка величины мощности теплового источника по известным законам регулирования: пропорциональному (ПИ), пропорционально-интегральному (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД).

На каждом временном шаге корректировка подводимой мощности выбрана по закону ПИ-регулирования при помощи передаточной функции ПИ-регулятора $W_R(p)$ (6):

$$W_R(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I p} \right), \quad (6)$$

где K_p – пропорциональный коэффициент, T_I – постоянная интегрирования.

В процессе расчета зависимости тепловых полей от времени в процессе выращивания мощность сварочного потока на каждом временном шаге корректируется в соответствии с выражением (7):

$$P_{св}(t_i) = P_{св}(t_{i-1}) - K_p \cdot P_{св}(t_{i-1}) (p - p^{ycm}) / p^{ycm} - KI \cdot P_{св}(t_{i-1}) \cdot u_{-p}, \quad (7)$$

где u_{-p} определяется из решения дифференциального уравнения (8):

$$\frac{\partial u_{-p}}{\partial t} = (p - p^{ycm}) / p^{ycm}, \quad (8)$$

Разработанный способ обеспечивает стабильный процесс формирования наплавляемого металла с постоянным размером сварочной ванны.

Четвертая глава посвящена исследованию влияний послышной деформационной обработки и последующей общей ТО на качество наплавленного металла при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом.

Исследованы структуры и механические свойства образцов в четырех случаях: при наплавке без дополнительной обработки, и как с отдельным, так и с совместным применением проковки и ТО.

Для улучшения структуры и повышения уровня механических свойств наплавляемого металла был выбран известный из литературных источников режим ТО для сплава ВТ6 - изотермический отжиг: нагрев до 850°C, выдержка 2 часа, охлаждение с печью до 550°C, выдержка 0,5 часа.

По результатам влияния послышной проковки и последующей общей ТО на макроструктуру выявлено следующее. При наплавке без дополнительной обработки на макрошлифах хорошо видны границы между наплавляемыми слоями и валиками с тонкой переходной зоной. Формируется крупнозернистая макроструктура. Крупные зерна столбчатой формы, образующиеся в процессе роста первичных β -зерен, прорастают через несколько слоев наплавки и имеют четкие границы между собой.

Проведение проковки слоев в процессе наплавки (рисунок 1, б) приводит к тому, что отсутствуют четкие границы между наплавленными слоями и валиками, наблюдается значительное уменьшение размера первичных β -зерен. В основном размер этих зерен ограничивается пределами 1-2 валиков. Границы между первичными β -зернами так же четко видны. Проведение последующей термической обработки не способствовало изменению размера первичных β -зерен, как при наплавке без проковки (рисунок 1, в), так и при наплавке с проковкой (рисунок 1, г). Границы между первичными β -зернами стали не четко выражены, как бы размытые. В макроструктуре термически обработанных образцов после наплавки границы между наплавленными валиками проявляются слабо, а на образцах после наплавки с проковкой они не видны.

При анализе микроструктуры наплавленных слоев сплава ВТ6 при наплавке наблюдается типичная структура титанового сплава системы Ti-Al-V: небольшое количество исходного β -зерна, пластинчатая α -фаза и крупно игольчатый α' -мартенсит (рисунок 2-4, а). Микроструктура наплавленных слоев сплава Ti-6Al-4V с проковкой: наблюдается уменьшение размеров первичных β -зерен (с 500 до 100 мкм в среднем) и увеличение дисперсности образованных α - и α' -фаз (рисунок 2-4, б). Длина игл α' -мартенсита и размеры пластин α -фазы уменьшаются на 15-20%. На некоторых границах между наплавленными слоями наблюдается незначительная

коагуляция α -фазы. На границах некоторых первичных β -зерен происходит выделение α -фазы как при наплавке без проковки, так и при наплавке с проковкой. При наплавке с послойным деформированием пластинки $\alpha(\alpha')$ -фазы имеют меньшую толщину и ярко выраженный игольчатый характер формы (рисунок 4, б).

При применении последующей общей ТО в обоих вариантах наплавки, с проковкой и без, внутрезеренная микроструктура приобретает корзинчатое строение, длина пластин α -фазы уменьшается, ширина увеличивается, пластины имеют ветвистый вид, иногда делятся на цепочку отдельных α -частиц (рисунок 2-4, в, г). На образцах с наплавкой без проковки между некоторыми наплавленными слоями наблюдается коагуляция и частичная глобуляция частиц α -фазы. На границах между первичными β -зернами наблюдается увеличение зоны выделения $\alpha(\alpha')$ -фазы. У термически обработанных образцов на отдельных частицах наблюдаются выделения дисперсной α_2 -фаза в виде белых участков (рисунок 4, в, г).

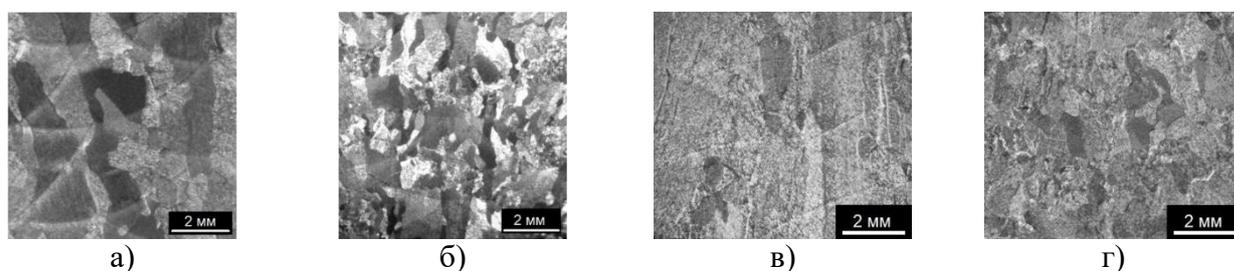


Рисунок 1 – Макроструктура наплавленного металла: а) без проковки и ТО; б) при послойной проковке; в) после ТО без проковки; г) после ТО при послойной проковке.

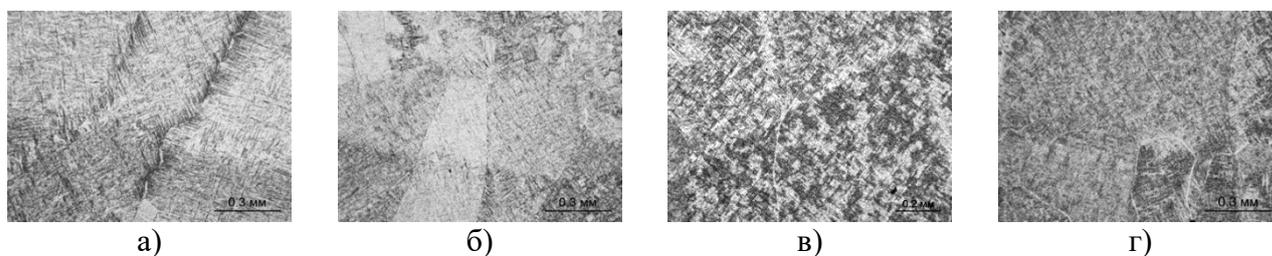


Рисунок 2 – Границы между наплавленными слоями, $\times 100$: а) без проковки и ТО; б) при послойной проковке; в) после ТО без проковки; г) после ТО при послойной проковке.

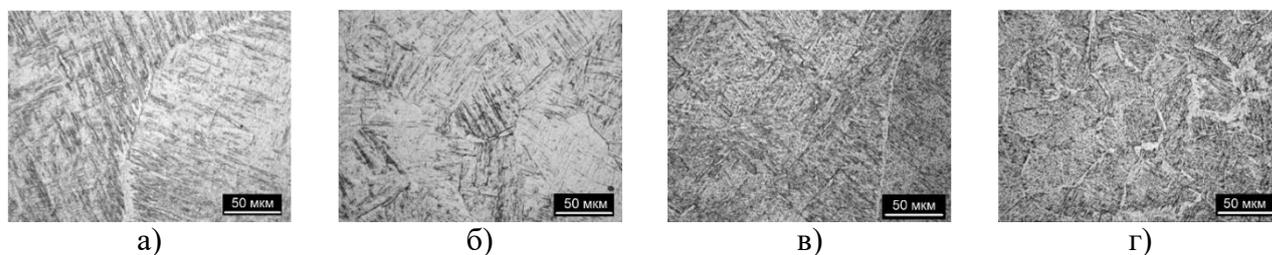


Рисунок 3 – Границы между первичными β -зернами, $\times 500$: а) без проковки и ТО; б) при послойной проковке; в) после ТО без проковки; г) после ТО при послойной проковке.

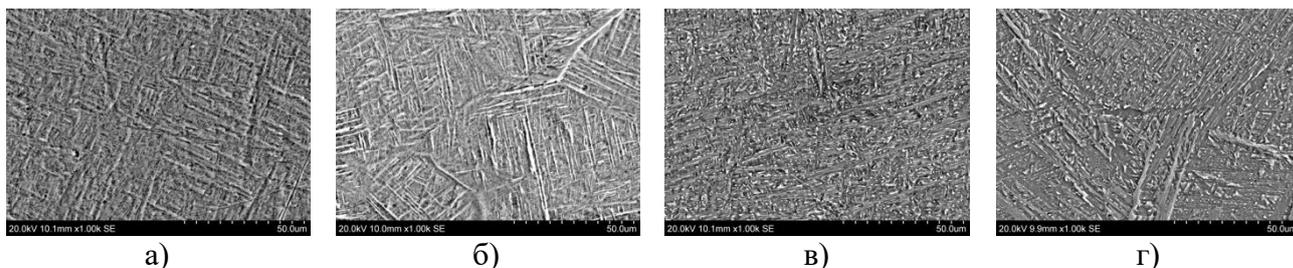


Рисунок 4 – Микроструктура, $\times 1000$: а) без проковки и ТО; б) при послойной проковке; в) после ТО без проковки; г) после ТО при послойной проковке.

Механические свойства представлены в таблице 1. Результаты испытаний показали, что анизотропия свойств в вертикальном и горизонтальном направлениях незначительна. Наплавленный материал имеет высокие механические свойства.

Таблица 1 – Механические свойства изделий из сплава ВТ6

Образец	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{\text{т}}$, МПа	δ , %	КСУ
ЗНАЧЕНИЯ ИЗ СТАНДАРТОВ				
ОСТ 1 90000-70 (ВТ6, поковка, после ТО)	900	-	10	300
AMS 4999 (Ti-6Al-4V, аддитивное производство) min, XY / Z	899 / 855	800 / 765	6 / 5	-
AMS 4928 (Ti-6Al-4V, поковка после отжига), XY / Z	896 / -	827 / -	10 / -	-
ПОЛУЧЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ				
Наплавка без дополнительной обработки, X / Z	925...980 / 920...945	810...880 / 840...870	4,1...9,8 / 4,9...8,0	340...590 / 500...640
Наплавка с ТО, X / Z	985...1000 / 960...980	905...930 / 870...895	7,5...8,0 / 5,0...7,0	-
Наплавка с проковкой, X / Z	1050...1060 / -	960...980 / -	6,8...11,0 / -	480...510 / -
Наплавка с проковкой и с ТО, X / Z	980...1000 / 1000...1010	870...930 / 910...930	13...14 / 11...15	500...530 / 500...530

Последующая ТО приводит к повышению механических свойств наплавленного металла, но не решает проблему анизотропии свойств. Использование послойной проковки позволяет измельчить структуру наплавленного металла и повысить его прочность (1050...1060 МПа) и пластичность, однако пластичность остается на уровне стандарта для аддитивного производства и не достигает требуемых значений стандартов для поковок. Совместное применение проковки и ТО приводит к дополнительному измельчению и микроструктуры, позволяет повысить пластичность (относительное удлинение до 13...14%) при высоком уровне прочности наплавленного металла (980...1000 МПа). Образцы, изготовленные методом трехмерной наплавки с послойной деформационной обработкой и последующей ТО, демонстрируют высокое качество, характеризующееся практически полным отсутствием анизотропии и гарантированным уровнем механических свойств материала поковок из сплава ВТ6.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ существующих экспериментальных и теоретических данных о формировании геометрических параметров, дефектов, структуры, механических свойств изделий из сплава ВТ6 при трехмерной наплавке. Показана необходимость применения комбинированной гибридной технологии, сочетающей трехмерную наплавку, послойную деформационную обработку и последующую общую термообработку наплавляемого изделия для образования мелкозернистой равноосновесной зеренной структуры, снижения остаточных напряжений и деформаций, комплексному повышению механических свойств наплавляемых изделий.

2. Исследовано влияние технологических параметров трехмерной электродуговой наплавки плавящимся электродом сплава ВТ6 на качество формирования получаемого материала. Установлено, что для обеспечения стабильного формирования целесообразно использовать прямую полярность. Установлено, что при дуговой наплавке плавящимся электродом для обеспечения требуемой сплошности материала и стабильного формирования геометрии необходима разработка специальной стратегии заполнения металла и подача в зону наплавки защитного газа гелия, обеспечивающего повышение энтальпии дуги. Совместное применение камеры с контролируемой атмосферой и локальной защиты зоны наплавки позволяет добиться лучшего качества поверхности наплавленного металла. Найден предпочтительный режим трехмерной наплавки сплава ВТ6 плавящимся электродом.

3. Разработан способ управления тепловложением при наплавке, использующий численный алгоритм определения требуемого изменения технологических параметров во времени при решении тепловой задачи посредством математического моделирования. Способ включает управление параметрами режима наплавки для поддержания размеров ванны расплавленного металла на заданном уровне и обеспечения постоянства размера наплавленных валиков в результате стабильного процесса формирования стенки и предпочтительных термических циклов.

4. Исследовано влияние послойной деформационной обработки и последующей общей термообработки на структуру и механические свойства наплавленного металла при трехмерной электродуговой наплавке плавящимся электродом. Последующая общая термообработка непрокованных образцов не приводит к значимому повышению механических свойств наплавленного металла. Применение межслойной проковки при электродуговой наплавке позволяет улучшить структуру наплавленного металла и повысить его прочность (1050...1060 МПа). Последующая общая термообработка прокованных образцов приводит к дополнительному измельчению

макро- и микроструктуры, позволяет повысить пластичность (относительное удлинение до 13...14 %) при высоком уровне прочности наплавленного металла (980...1000 МПа). Изготовленные трехмерной наплавкой с управляемым тепловложением, послойной деформационной обработкой и последующей термической обработкой образцы показывают высокое качество, характеризующееся стабильностью геометрических характеристик, практически полным отсутствием анизотропии и гарантированным уровнем механических свойств для материала поковок из сплава ВТ6 (ОСТ 1 90000-70).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Входящие в международные базы цитирования Scopus или Web of Science:

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.

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.

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.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Способ управления процессом трехмерной наплавки / Д. Н. Трушников, М. Ф. Карташев, Р. П. Давлятшин, С. З. Ф. Раймундо // *СТИН*. – 2022. – № 8. – С. 29-31.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

Патенты:

1. Трушников Д. Н., Карташев М. Ф., Безукладников И. И. Способ управления процессом наплавки. Патент RU2750994C1. 07.07.2021.