

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**доктора технических наук, профессора Мелюкова Валерия Васильевича
на диссертационную работу Акуловой Светланы Николаевны
«Повышение механических свойств изделий из сплава системы Ti-Al-V,
получаемых методом аддитивной плазменной наплавки»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических
наук по специальности 2.5.8 – Сварка, родственные процессы и
технологии.**

Актуальность темы диссертационной работы

Задача применения и совершенствования аддитивных технологий в современном производстве деталей сложной конфигурации является актуальной, т.к. решает важную проблему получения уникальных изделий путем постоянной наплавки и сокращает объемы расходования дорогостоящих материалов, при применении оригинального цикла изготовления. Задача применения аддитивных технологий также является актуальной и при изготовлении деталей из титановых сплавов. Титан и его сплавы относятся к числу дорогостоящих и обладают особыми физико-механическими свойствами, благодаря которым можно получать изделия с необходимыми технологическими и эксплуатационными характеристиками. При аддитивной плазменной наплавке для получения качественного материала из сплава ВТ6св с высоким уровнем эксплуатационных характеристик необходимо исследовать и находить условия формирования требуемой структуры и свойств материала. На формирование необходимых свойств наплавленного материала оказывают существенное влияние режим наплавки, характеристики термического цикла и структура аддитивного технологического процесса наплавки. Применение оригинальных способов наплавки с управлением режима позволяет получить качественный наплавленный металл.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Новизна результатов исследования заключается в установлении метода аддитивной плазменной наплавки титанового сплава ВТ6св, при котором реализуется термический цикл, обеспечивающий формирование однородной дисперсной структуры и прочности на уровне 840 МПа, за счет регулирования скорости охлаждения. Автором установлено, что температура предыдущего слоя при наплавке последующего должна составлять 250-300°C, при этом основным регулирующим параметром является длительность межслойного охлаждения, определенная на основе

математического моделирования. Определены закономерности формирования однородной дисперсной структуры сплава ВТ6св, которые обеспечиваются предложенным термическим циклом наплавки и заключаются в снижении эффекта прорастания β -зерен до двух слоев наплавки и уменьшении среднего размера игл α' -мартенсита до уровня 35-40 мкм.

Достоверность полученных данных подтверждается применением современных методов исследований структуры и свойств материалов, результатами статистической обработки, опубликованием результатов исследований в научных изданиях.

Научная и практическая ценность работы

Научная ценность работы состоит в представлении обоснованных технологических решений по повышению качества изделий из двухфазных титановых сплавов системы Ti-Al-V, полученных аддитивной плазменной наплавкой. Практическая значимость работы заключается в разработке технологических рекомендаций для процесса плазменной наплавки рассматриваемого титанового сплава, обеспечивающих требуемый уровень механических свойств изделий при использовании отечественной проволоки ВТ6св. Кроме этого, показано, что достижение высоких показателей стабильности геометрических размеров и бездефектности получаемого наплавленного материала обеспечивается плазменной наплавкой дугой с прямой полярностью тока в камере с защитной атмосферой при двухдуговой схеме процесса.

Оценка содержания диссертации, степени ее завершенности и качества оформления

Диссертационная работа изложена на 140 страницах, включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы из 154 наименований и приложение. В работе представлены 64 рисунка и 17 таблиц.

Во введении автор обосновывает актуальность темы диссертационной работы, формулирует цель и задачи диссертационного исследования, научную новизну и практическую значимость.

Первая глава посвящена обзору и анализу научных публикаций о видах наплавки титановых сплавов различными технологиями и особенностях процесса наплавки на формирование структуры материала и механических свойств изделий. Автором дано описание существующих процессов проволочной дуговой, лазерной и плазменной наплавки, а также проанализированы их недостатки.

Во второй главе приведена информация о методике проведения исследований: рассматриваемом материале, используемом оборудовании, а также представлены результаты исследований по оценке влияния

технологических параметров наплавки на качество наплавляемого металла. Автором установлено, что плазменная наплавка на прямой полярности тока, с погонной мощностью теплового источника в пределах 180...200 Дж/м позволяет получать наплавленные слои титановых сплавов системы Ti-Al-V с максимальной стабильностью высоты валика без дефектов формирования. В рамках исследований показана возможность стабильного ведения процесса плазменной наплавки по двухдуговой схеме, которая позволяет снижать суммарное тепловложение в изделие по сравнению с однодуговой схемой до 10% и более.

В третьей главе приведены результаты исследования макроструктуры и прочностных свойств металла наплавленных слоев титанового сплава, полученных технологией плазменной наплавки проволочного материала.

Проведенный автором анализ результатов исследования образцов рассматриваемого сплава ВТ6св, сформированных плазменной наплавкой в двух исследуемых режимах – по непрерывному циклу и с охлаждением слоев до комнатной температуры, показал безусловное влияние термического цикла на формирование структуры и свойств материала наплавки. Результаты предварительных исследований структуры, механических характеристик и микротвердости наплавленного титанового сплава ВТ6св подтвердили необходимость управления термическим циклом наплавки ввиду значительного влияния скорости охлаждения материала при наплавке на формирование структуры.

В четвертой главе представлен выбор предпочтительного термического цикла плазменной наплавки титанового сплава ВТ6св по структурным и прочностным критериям материала с применением математического моделирования. Для поиска параметров термического цикла плазменной наплавки автором использовалась математическая модель распределения температур при сварке непрерывно-действующим подвижным нормально-круговым источником, а для определения режимов охлаждения была применена математическая модель процесса и выполнена ее численная реализация в конечно-элементном пакете ANSYS.

В результате моделирования были проанализированы зависимости скорости охлаждения от температуры слоя при наплавке, а также зависимости времени охлаждения до определенной температуры слоя. Далее при численной реализации модели в конечно-элементном пакете ANSYS определена зависимость температуры от времени на этапе остывания соответствующего слоя и зависимость времени охлаждения для номера соответствующего слоя. Таким образом, определен предпочтительный термический цикл плазменной наплавки, при этом показано, что основным

регулирующим параметром процесса управления структурообразованием является длительность межслойного охлаждения.

В пятой главе представлены результаты исследования макро- и микроструктуры и механических свойств сплава, сформированного плазменной аддитивной наплавкой на определенных режимах. Установлено, что при соблюдении предложенного термического цикла наплавки, происходит снижение эффекта прораствания первичных β -зерен, а также уменьшение размеров элементов структуры. Предел прочности наплавленного металла составляет $\sigma_b = 840$ МПа, что обеспечивает соблюдение целевых значений, а ударная вязкость превышает целевые значения в 1,5 – 2 раза для всех методов плазменной аддитивной наплавки. При этом режим наплавки с заданным термическим циклом обеспечивает высокие показатели пластичности и трещиностойкости.

Диссертационная работа имеет логичную, структурированную форму. Материал изложен технически грамотно, сопровождается иллюстрациями и таблицами.

Замечания

1. В работе при анализе микроструктуры приведена размерная характеристика параметров структуры материала, полученного при исследованиях. Однако нет информации о количестве проведенных измерений структурных параметров, по которому были определены значения, представленные в качестве результатов измерений?

2. В работе представлены результаты исследований образцов материала, полученного плазменной наплавкой по двухдуговой схеме процесса, однако нет четкого описания выбора режимов наплавки по данной схеме.

Указанные замечания не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы.

Заключение

Представленная диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлены новые научно обоснованные технологические решения по повышению механических свойств двухфазного титанового сплава системы Ti-Al-V при аддитивной плазменной наплавке материала ВТ6св посредством управления термическим циклом, имеющие важное значение для авиационной промышленности.

Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.8. Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки) пунктам паспорта научной специальности: 3. Физические процессы в материалах при сварке и родственных технологиях, фазовые и структурные превращения,

образование соединений и формирование их свойств; 9. Материалы для сварки, родственных процессов и технологий.

Диссертационная работа Акуловой Светланы Николаевны соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 28 мая 2024 г. №27-О, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор диссертационной работы, Акулова Светлана Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.8 Сварка, родственные процессы и технологии.

Официальный оппонент,
Мелюков Валерий Васильевич,
доктор технических наук,
профессор,
директор ООО «Вятский аттестационный центр».

Адрес организации: 610033, г. Киров, ул. Московская, 107б, оф. 402
Телефон: +7 (8332) 25-19-25
E-mail: vcc.naks@mail.ru
Сайт: <http://naks-kirov.ru>

Наименование научной специальности, по которой была защищена докторская диссертация: 05.03.06 – Технология и машины сварочного производства.

Я, Мелюков Валерий Васильевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Акуловой Светланы Николаевны, и их дальнейшую обработку.

«09» 06 2025 г.

Подпись д-ра техн. наук, проф.

Мелюкова В.В. заверяю:

А.М. Чернов



Руководитель АЦСО, АЦСТ
ООО «ВАЦ»