

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (НИУ «БелГУ»)



**НИУ
БелГУ**
BELGOROD STATE
UNIVERSITY (BSU)

Победы ул., д. 85, г. Белгород, 308015; e-mail: info@bsu.edu.ru,
тел.: (4722) 30-12-11, факс 30-10-12, Web: http://www.bsu.edu.ru
ОКПО 02079230, ОГРН 1023101664519, ИНН/КПП 3123035312/312301001

№ _____

ВЕЖДАЮ

по
скому развитию,
новациям

В. Скрипникова

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Белгородский государственный национальный
исследовательский университет» на диссертационную работу
Акуловой Светланы Николаевны на тему «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

Работа Акуловой С. Н. посвящена актуальной для машиностроения теме
аддитивной технологии получения изделий из сплава ВТ6. Аддитивные
технологии, в частности метод аддитивной плазменной наплавки,
предоставляет технологические преимущества по сокращению затрат
посредством экономного использования относительно дорогостоящих
материалов и значительного сокращения производственного цикла. Таким
образом, реализуемая в диссертационной работе технология плазменной
наплавки позволяет повысить производительность при изготовлении изделий
сложной конфигурации и габаритных размеров за счет снижения
производственного цикла, а также дополнительно обеспечить возможности
регулирования тепловложения и управления формированием состава,
структуры и свойств получаемого материала. При этом использование
наплавочного материала в виде проволоки сплошного сечения обеспечивает
получение практически беспористых изделий.

В работе решается комплексная задача по получению качественного аддитивно выращенного изделия из сплава ВТ6св с высоким уровнем эксплуатационных характеристик при аддитивной плазменной наплавке и по технологическому улучшению процесса наплавки за счет управления режимами наплавки, оказывающих влияние на формирование структуры и свойств материала.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения. Общий объем диссертации составляет 140 страниц. Работа содержит 64 рисунка и 17 таблиц, список цитируемой литературы включает 154 источника. Содержание и структура диссертации соответствуют поставленной цели исследования и находятся в логическом единстве.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту, сведения о личном вкладе автора в работу, также приводится список публикаций автора по теме диссертации и сведения об апробации работы. Немаловажно отметить во введении, что работа поддержана Российским научным фондом.

В первой главе автор проводит анализ известных исследований по теме диссертации. Представлен анализ научных публикаций о видах наплавки титановых сплавов различными технологиями: проволочно-дуговой, лазерной и плазменной; о влиянии режимов и особенностей процесса наплавки на формирование структуры материала и механических свойств изделий. Литературный обзор изучен автором последовательно: от рассмотрения аддитивных технологий в общем ключе до анализа информации по применению аддитивных технологий при производстве изделий из титановых сплавов. При этом подчеркивается, что существует пробел знаний в технологиях плазменной наплавки, имеющих на данный момент в литературе, что не дает в полной мере представления о зависимости формирования структуры и свойств титановых сплавов от применяемых режимов рассматриваемой технологии.

Во второй главе приведена информация о технологии исследований: рассматриваемом материале, используемом оборудовании и методиках механических испытаний, а также результаты оценки зависимости качества наплавленного материала от технологических параметров наплавки. Приводится оценка зависимости качества наплавленного материала от

технологических параметров наплавки. По результатам предварительных исследований в диссертации определен предпочтительный режим трехмерной наплавки сплава ВТ6св, обеспечивающий минимальную волнистость боковой поверхности и высокую стабильность высоты валика, отсутствие пористости, несплавлений и трещин. Таким образом, предложена плазменная наплавка на прямой полярности тока в камере с защитной атмосферой, с погонной энергией теплового источника в пределах 180-200 Дж/м. Также показана возможность стабильного ведения процесса плазменной наплавки по двухдуговой схеме.

В третьей главе представлены результаты исследования структуры и свойств титанового сплава ВТ6св, полученного по технологии многослойной плазменной наплавки в технологической камере с контролируемой атмосферой. Было определено влияние режимов плазменной наплавки на структуру наплавленных слоев материала. Полученные 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. Анализ результатов исследования наплавленного металла из сплава ВТ6св, сформированного плазменной наплавкой по двум исследуемым режимам, показал 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 предпочтительного термического цикла плазменной наплавки использовалась математическая модель распределения температур при сварке непрерывно-действующим подвижным нормально-круговым источником. Также для определения режимов охлаждения наплавленного металла из титанового сплава ВТ6св при плазменной наплавке проволочного материала была применена математическая модель процесса и выполнена ее численная реализация в конечно-элементном пакете ANSYS. Была приведена численная реализация моделирования термических циклов аддитивной плазменной наплавки титанового сплава ВТ6св, по результатам которой был выбран термический цикл наплавки, который способствует обеспечению невысокой скорости охлаждения в интервале температур ниже полиморфного превращения (900-700°C): скорости охлаждения в рекомендуемом в научных источниках

диапазоне составляет $40...30^{\circ}\text{C}/\text{с}$; температура предыдущего слоя при этом должна составлять $250-300^{\circ}\text{C}$.

В пятой главе представлены результаты исследования макроструктуры, микроструктуры и механических свойств сплава, сформированного плазменной аддитивной наплавкой с контролем термического цикла. Были установлены структурные изменения и механические свойства сплава ВТ6св, полученного различными технологиями плазменной аддитивной наплавки. Установлено, что лучшие показатели прочностных свойств имеет материал, полученный технологией плазменной наплавки в контролируемой атмосфере с управляемым термическим циклом: его предел прочности достигает значения 840 МПа, что обеспечивает соблюдение целевых значений. Режим наплавки с предпочтительным термическим циклом обеспечил высокие показатели пластичности (относительное удлинение - на уровне ковального материала) и трещиностойкости.

В заключении приведены общие выводы, сделанные по полученным в диссертационной работе результатам, а также перспективы дальнейшего развития темы.

Научная новизна результатов, изложенных в диссертации

Научная новизна диссертационного исследования заключается в реализации термического цикла аддитивной плазменной наплавки титанового сплава ВТ6св, обеспечивающего формирование однородной дисперсной структуры и прочности наплавленного металла на уровне 840 МПа за счет регулирования скорости охлаждения. При реализации этого термического цикла необходимо учитывать, чтобы температура предыдущего слоя при наплавке последующего составляла $250-300^{\circ}\text{C}$. При этом основным регулирующим параметром является длительность межслойного охлаждения, определенная на основе математического моделирования.

Также автором установлены 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.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением современных средств и оборудования, необходимых для проведения исследований, стандартизированными методами испытаний

согласно стандартам ГОСТ 9454-78, ГОСТ 25.506-85, ГОСТ 1497-84, а также публикацией результатов исследований в научных изданиях, представленных в списке литературы. Материалы диссертационной работы были представлены автором и обсуждались на всероссийских и международных научно-практических конференциях. Кроме того, результаты диссертационной работы были апробированы и успешно применены при разработке рабочей конструкторской документации по оборудованию для трехмерной наплавки для компании ООО «РусАТ».

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором работы, заключается в следующем:

1. Разработка технологических рекомендаций для процесса аддитивной плазменной наплавки титанового сплава системы Ti-Al-V, обеспечивающих требуемый уровень механических свойств изделий при использовании отечественной проволоки ВТ6св;
2. Установлено, что достижение высоких показателей стабильности геометрических размеров и бездефектности получаемого наплавленного металла обеспечивается плазменной наплавкой дугой с прямой полярностью тока в камере с защитной атмосферой при двухдуговой схеме процесса.

Результаты исследований диссертационной работы, заключающиеся в выборе предпочтительной технологической схемы процесса аддитивной плазменной наплавки титанового сплава системы Ti-Al-V, были использованы при разработке рабочей конструкторской документации по оборудованию для трехмерной наплавки для компании ООО «РусАТ».

Замечания

Диссертационная работа Акуловой С.Н. целостная, является законченным научным исследованием, однако имеются некоторые замечания, требующие пояснений:

1. За счет чего глубина переплавляемого слоя металла при плазменной наплавке может достигать до 0,01 мм (стр. 5 диссертации)?
2. Можно ли за счет стратегии наплавки дополнительно регулировать термический цикл аддитивной плазменной наплавки? Из всех известных схем, почему выбрано наложение 2-ух параллельных валиков с взаимным перекрытием?
3. Чем обусловлено разнообразие технологий аддитивной плазменной наплавки в диссертационной работе (одно- и двухдуговой метод,

локальная и контролируемая наплавка в технологической камере с контролируемой атмосферой)?

4. Из рис. 4б и рис. 5б автореферата видно, что охлаждение наплавленного металла до 300°C составляет более 2 мин. Сопоставима ли производительность процесса аддитивной плазменной наплавки по такой технологии с другими методами?

5. Поясните, пожалуйста, почему при охлаждении до комнатной температуры между валиками наблюдается рост первичных β -зерен до 5 слоев, без охлаждения 7-9 слоев, однако при охлаждении до $250-300^{\circ}\text{C}$ между валиками наблюдается рост первичных β -зерен только до 2-ух слоев?

6. Требуется уточнение, высокая скорость охлаждения наплавленного металла (при охлаждении до комнатной температуры между валиками) влияет только на размер игл α' -мартенсита, или еще оказывает эффект на рост первичных β -зерен?

7. Предпочтительней было бы использовать метод точечного химического анализа, а не с участка (рис. 8 автореферата), так как выделенные желтым маркером участки охватывают как матрицу, так и игольчатые включения. Кроме того, характерного увеличения по ванадию не наблюдается. Пик ванадия при EDX-микроанализе совпадает с пиком титана, всё в пределах погрешности.

8. Требуется уточнение, за счет чего показатели ударной вязкости у наплавленного металла из ВТ6св, полученного методом аддитивной плазменной наплавки, превышают целевые значения в 1,5 – 2 раза (таблица 1 автореферата)? Сопоставимы ли значения ударной вязкости наплавленного металла, полученного плазменной наплавкой, с аналогичными дуговыми методами или другими аддитивными технологиями?

9. Результаты таблицы 2 автореферата на трещиностойкость сложно трактуемы, особенно если говорить об их высоких значениях, так как нет сравнений, например, с кованой заготовкой или другими литературными данными.

Приведенные выше замечания носят рекомендательный характер и не снижают значимость проведенной работы.

Заключение

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

образование соединений и формирование их свойств»; п. 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.

Диссертация соискателя и отзыв на нее были заслушаны и обсуждены на расширенном заседании кафедры материаловедения и нанотехнологий ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» 19 мая 2025 г. (протокол № 10). Результаты голосования: «За» — 16 чел., «Против» — нет, «Воздержались» — нет.

Отзыв подготовили:

Доцент кафедры материаловедения
и нанотехнологий ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ»

канд. техн. н. по специальности

05.02.10. Сварка, родственные процессы и технологии

_____/ Наумов Станислав Валентинович
26.05.2025

И.о. заведующего кафедрой материаловедения
и нанотехнологий ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ»

д. техн. н. по специальности 2.6.1 Металловедение
и термическая обработка металлов и сплавов

_____/ Федосеева Александра Эдуардовна
26.05.2025

Сведения о ведущей организации

Адрес: 308015, Белгородская область, г. Белгород, ул. Победы

Наименование организации: Федеральное государственное
образовательное учреждение высшего образования

государственный национальный исследовательский университет

Телефон: +7 (4722) 30-12-11

Адрес электроники почты: Info@bsuedu.ru

