

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Стробыкин Никита Алексеевич

**Управление процессом автоматической аргонодуговой
сварки при формировании неразъемных соединений
титановых ребристых панелей**

Направление подготовки
15.04.01 – «Машиностроение»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Коротченко
Лариса Никитовна

Проверено

17.06.2024 Зачтено Библиотека

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете» и в филиале ПАО «ОАК» - «КнААЗ» им. Ю.А. Гагарина».

Научный руководитель:

Бахматов Павел Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева» ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета»

Научный консультант:

Фролов Алексей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника»

Рецензент:

Жилин Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре

Защита состоится «14» июня 2024 г. в 15:30 ч. на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д.27, учебный корпус 2, аудитория 221.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте www.knastu.ru и на кафедре «Технология сварочного и металлургического производства» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

Автореферат разослан «07» июня 2024г.

Секретарь ГЭК
К.Т.Н.

О.Н. Клешнина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: В практике серийного производства титановых панелей каждый сварной шов подвергается исправлению дефектов в виде пор, что требует дополнительных затрат и увеличивает цикл производства летательных аппаратов. Известные в настоящее время методы снижения пористости не гарантируют исключения пор, а методы увеличения времени существования расплавленной ванны при полном исключении пористости не гарантируют требуемых механических свойств и кроме того, не позволяют управлять режимами термического цикла сварки (ТЦС), обеспечивающими требуемые условия фазовых превращений, позволяющими улучшить структуру и свойства титановых панелей, что обуславливает коробление деталей после сварки, образование холодных трещин. Коробление тонкостенных конструкций после сварки не позволяет достичь их размерной точности, требует дополнительных операций по исправлению геометрии деталей (термофиксация, отжиг в вакууме).

В этих условиях повышение эффективности сварки тонкостенных титановых конструкций путём исключения пористости в металле шва с обеспечением размерной точности и равнопрочности конструкции является актуальной и важнейшей научной задачей в авиастроении.

Цель работы: разработка методов, исключающих порообразование в сварных соединениях, как возможность уменьшения неравномерности поля остаточных напряжений и концентрации напряжений металла в процессе изготовления авиационных титановых тонколистовых ребристых конструкций путем управления режимами импульсно-дуговой сварки.

Для достижения цели работы поставлены и решены следующие **задачи**:

1 Уточнить механизм порообразования в металле шва неразъёмных соединений при сборке элементов титановых конструкций.

2 Исследование способов обработкистыкуемых кромок свариваемых деталей, способствующих исключению порообразования в сварных соединениях.

3 Оценить возможность импульсно-дуговой сварки на получение беспористых сварных соединений, а также регулирования теплового воздействия источника тепла на металл с целью уменьшения коробления.

4 Рассмотреть возможность выполнения импульсно-дуговой сварки с осцилляцией движения сварочной горелки и подачи сварочной проволоки на имеющемся оборудовании.

Объект исследования – процесс формированиястыковых соединений тонкостенных титановых панелей автоматической (роботизированной) сваркой в среде инертных газов с применением программного управления траекторией перемещения дуги, подачи сварочной проволоки и режимами сварки.

Предмет исследования – металла шва с отсутствием внутренних дефектов и минимальным уровнем остаточных напряжений.

Научная новизна:

1 Установлены технологические факторы подготовкистыкуемых кромок, оказывающие влияние на дефектность и свойства сварных соединений;

2 Предложен метод, исключающий порообразование при сварке тонколистовых титановых конструкций, путем внедрения газолазерного раскряя в среде азота или аргона как конечной операции подготовки стыкуемых кромок.

3 Установлено положительное влияние на применение автоматической аргонодуговой сварки в среде защитных газов пульсирующей дуги на уменьшения неравномерности поля остаточных напряжений и концентрации напряжений металла.

Обоснованность и достоверность полученных результатов основывается на использовании поверенного комплекса контрольно-измерительного оборудования для проведения экспериментальных исследований, использованием нормированных методик определения физико-механических свойств и макро- и микроструктурных параметров, а также соответствием полученных результатов экспериментальных данных фундаментальным положениям.

Практическая значимость работы. Использование разработанной технологии позволит повысить качество сборки конструкций в авиастроении путём снижения материальных затрат на сварочные работы; повышения качества сварных соединений; уменьшения трудоемкости изготовления. Предложенный метод подготовки стыкуемых кромок позволяет исключить дефекты порообразования и открывает возможность управления термическим циклом при сварке пульсирующей дугой, что в дальнейшем приведет к исключению термообработки сварных соединений, что значительно повлияет на сокращении времени и стоимости изготовления летательных аппаратов. Применение автоматизированной установки позволит повысить объем выпускаемой продукции без потерь качества сварных соединений.

Личный вклад авторов заключается в постановке цели и задач работы, непосредственном участии в процессе модернизации и ремонта сварочной установки и специального оборудования, проведении исследований, обработке и анализе результатов, формировании выводы, написании статей.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на Международной научно – практической конференции «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 2023 г.; VI Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых «Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований», г. Комсомольск-на-Амуре, 2023 г.; II Международной научно – практической конференции молодых ученых «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 2023 г.; Хабаровском краевом открытом фестивале «Студенческая весна – 2024» (внутриузовский этап), г. Комсомольск-на-Амуре, 2024 г.; Конкурсе студенческих научных проектов в области инноваций и технологического творчества в Хабаровском краевом открытом фестивале «Студенческая весна – 2024», г. Хабаровск, 2024 г. XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов» 13 мая 2024 г. – ИРНИТУ, г. Иркутск.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы. Диссертация содержит 84 страниц, 36 рисунков, 18 таблиц; список литературы состоит из 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, объект и предмет, поставлена цель и задачи ее реализации, используемые методы исследования, а также научная новизна. Обоснована цель работы и задачи.

В **первой главе** представлен литературный обзор по теме диссертации. В главе описаны основные составляющие устройства автоматизированных сварочных установок, их комплектующие и программное обеспечение.

Повышенная производительность процесса сварки и высокое качество сварных соединений, а также экономические показатели использования металла способствовали тому, что сварочное производство является одним из ведущих технологических процессов в машиностроении.

Для сварки титана эффективно использовать сварку неплавящимся электродом с осуществлением непрерывной и импульсной подачей энергии. Швы получаются непрерывными и точечными. Для повышения стабильности повторных возбуждений импульсной дуги и получения сварных точек одинаковых размеров между вольфрамовым электродом и изделием постоянно горит маломощная «дежурная дуга». Ток дежурной дуги составляет около 15% тока импульсной дуги и устанавливается в зависимости от толщины свариваемого металла. При импульсе тока определенной длительностью дуга возбуждается и на свариваемом участке получается сварочная точка. Сварной шов образуется расплавлением отдельных точек с заданным перекрытием.

Для обеспечения наилучшего качества и высокой производительности применяется автоматическая сварка неплавящимся электродом.

Сварку титана и его сплавов осуществляют с применением вольфрамового электрода, который является катодом. Рабочая часть вольфрамового электрода затачивается на конус. При автоматической сварке с присадочной проволокой конус электрода следует притуплять до диаметра от 0,5 до 0,8 мм, что улучшает формирование шва и повышает стойкость электрода.

Автоматическая сварка неплавящимся электродом в непрерывном режиме обычно рекомендуется для свариваемого материала толщиной от 0,8 до 3,0 мм без присадочного металла и более 3,0 мм с присадочной проволокой.

В импульсном режиме автоматическая сварка неплавящимся электродом за один проход обычно рекомендуется при сварке встык без присадочного металла для металла толщиной от 0,5 до 2,0 мм. При сварке в импульсном режиме можно сваривать более тонкие материалы без прожогов, при этом уменьшается деформация в зоне сварного шва и можно регулировать структуру металла шва в широких пределах.

Во **второй главе** изложено описание имеющегося оборудования на предприятии КнААЗ, предназначенного для автоматической аргонодуговой сварки

титановых панелей, а также изложен основной концепт проектирования оснастки.

Для выполнения ААрДЭС сварки имеется установка УСП-5000. Программное обеспечение установки приближено к стапелю УСП-2.6, который требует в процессе сварки участия сварщика для постоянного визуального контроля за размерами сварочной ванны и ручной корректировки как параметров режима сварки, так и положения горелки относительно вертикальной оси шва, что делает термический цикл сварки нестабильным.

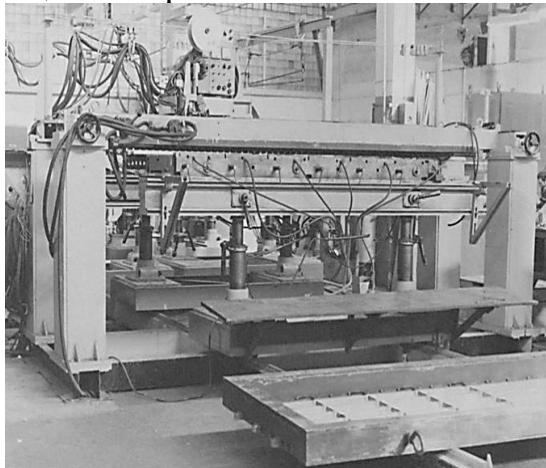


Рисунок 1 – Внешний вид сварочного стапеля УСП-2.6

В свою очередь управление установкой УСП-5000 выполняется по программируемой траектории относительно координат X, Y, Z с погрешностью $\pm 0,005$ мм. Для регулировки постоянного расстояния между электродом и свариваемыми деталями предусмотрен автоматический регулятор напряжения дуги (АРНД). Диапазон скорости сварки варьируется от 10 до 60 м/ч с точностью отработки $\pm 5\%$. Скорость подачи присадочной проволоки от 5 до 30 мм/с. Пределы регулировки силы сварочного тока от 20 до 800 А. Все параметры вносятся в систему оператором исключительно перед сваркой. Установка оснащена двумя источниками питания TETRIX 400 Synergic, способными выполнять TIG сварку на переменном и постоянном токе, а также режимом импульсной сварки. Процесс сварки осуществляется при помощи сварочной горелки TVi AT 420S с водяных охлаждением.



Рисунок 2 – Внешний вид сварочного стапеля УСП-5000

В третьей главе представлены результаты исследования наличия на стыкуемых кромках капиллярно конденсированных загрязнений, как причина образования пористости в сварных соединениях. Описано решение исключения порообразования с последующим применением сварки пульсирующей дуги как метод уменьшения неравномерности поля остаточных напряжений и концентрации напряжений металла.

Статистический анализ механических свойств сварных титановых тонкостенных конструкций, выявленных в производственных условиях КнАЗ показал, что прочность соединений снижена и составляет 8...12 % от прочности основного металла. Анализу выявляемых дефектов при рентгеноскопии подвергнуто 589 сварных швов, из которых дефектных 137, что составляет 23,3 % от общего количества дефектов. Из внутренних дефектов наибольшее количество составляют цепочки пор – 59 (43 % от общего количества дефектов); одиночная пора – 15 (11 % от общего количества дефектов); скопление пор – 16 (12 % от общего количества дефектов); трещины – 19 (14 % от общего количества дефектов); галтель (дефект, характерный только для тавровых соединений стингера) – 28 (20 % от общего количества дефектов). Диаметр одиночных пор 0,1...2,0 мм. Трещины, как правило, располагаются в концах сварных швов. Нередко дефектные места подвергаются неоднократному исправлению.

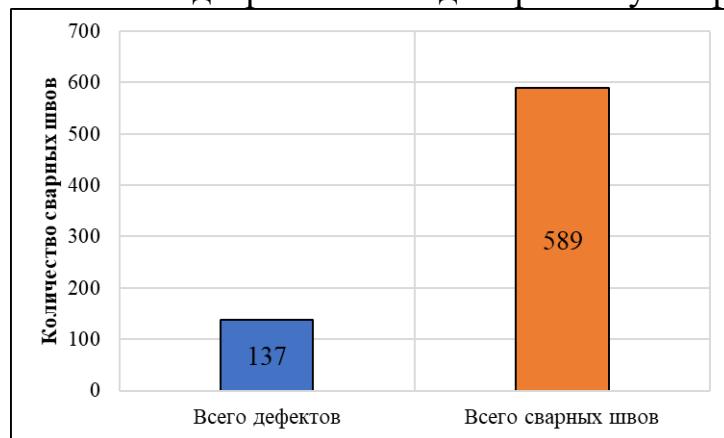


Рисунок 3 – Соотношение дефектных мест от общего количества сварных соединений

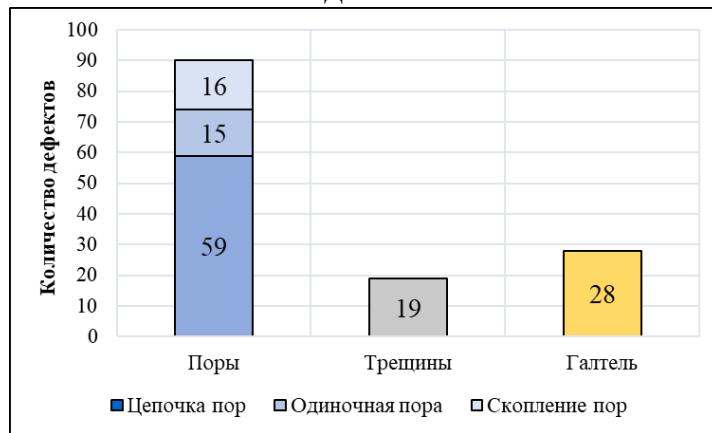


Рисунок 4 – Количество дефектов в сварных соединениях

Как показывает анализ существующих технологических процессов, порообразование в неразъёмных соединениях связано с неэффективностью оценки

качества поверхности кромок заготовок и присадочной проволоки по стандартным параметрам шероховатости (R_a , R_z), который не в полной мере характеризует качество сформированной поверхности раздела, т. к. не учитывает глубину разрыхлённого слоя с образованием в нём макро-, микро- и субмикротрешин и глубину растрескивания, особенно по границам зёрен.

Поскольку важнейшую роль зарождения пузырьков при порообразовании в процессе сварки играет влага, находящаяся в объёме дефектов торцевой поверхности, а её количество возможно определить по содержанию водорода спектральным анализом, который может стать основой метода контроля качества подготовки поверхности под сварку и даст возможность определить вид адсорбированной влаги (поверхностно-, или капиллярно-конденсированная влага (ККВ)).

Оценивать порообразование в металле шва титановых сплавов предлагается параметром «насыщенность поверхности стыкуемых кромок и присадочной проволоки капиллярно-конденсированной влагой» по условной величине.

Количество капиллярно-конденсированной влаги на торцевой поверхности свариваемых кромок определялось по содержанию водорода спектральным анализом на спектрографе ИСП-51 низковольтным импульсным разрядом с последующей регистрацией интенсивности спектральной линии водорода фотоэлектрическим способом, а градуировочный график строился методом «трёх эталонов» по ОСТ 1 90034-81. В отличие от стандартной методики определения содержания водорода на торцевых поверхностях соединяемых кромок после различных операций раскрыя, подготовки кромок под сварку образцы не подвергались дополнительной зачистке исследуемой поверхности.

Существующие виды разделительных операций разделены по механизму образования поверхности на три вида: разрушение; травление; плавление.

Газолазерная резка в азоте с раскроем на гильотинных ножницах полностью исключает образование пор в сварном шве титановых сплавов, при этом свойства сварного соединения идентичны свойствам основного металла.

Величина погонной энергии, вводимой в сварочную ванну электрической дугой, и время существования сварочной ванны (скорость сварки) во многом определяют скорость охлаждения расплавленного металла, его структуру и свойства. Чем больше значение погонной энергии и меньше времени импульса, тем выше скорость охлаждения в интервале фазовых превращений, а соответственно, выше значение временного сопротивления разрыву и угла загиба, меньше величина изменения содержания легирующих элементов. Такой термический цикл характерен импульсной сварке или сварке пульсирующей дугой.

Достижение нулевого уровня дефектности по порообразованию делает возможным обеспечение идентичности механических свойств сварных соединений титановых конструкций основному металлу управлением термическим циклом сварки. Для наглядности, был выполнен расчёт распределения температур линейного и точечного источника тепла. Расчетные схемы для определения зависимости распространения теплоты принимаются в полубесконечном теле.

Расчеты выполняются для сравнения распределения теплоты на титановой пластине при импульсной сварке и сварке на постоянном токе.

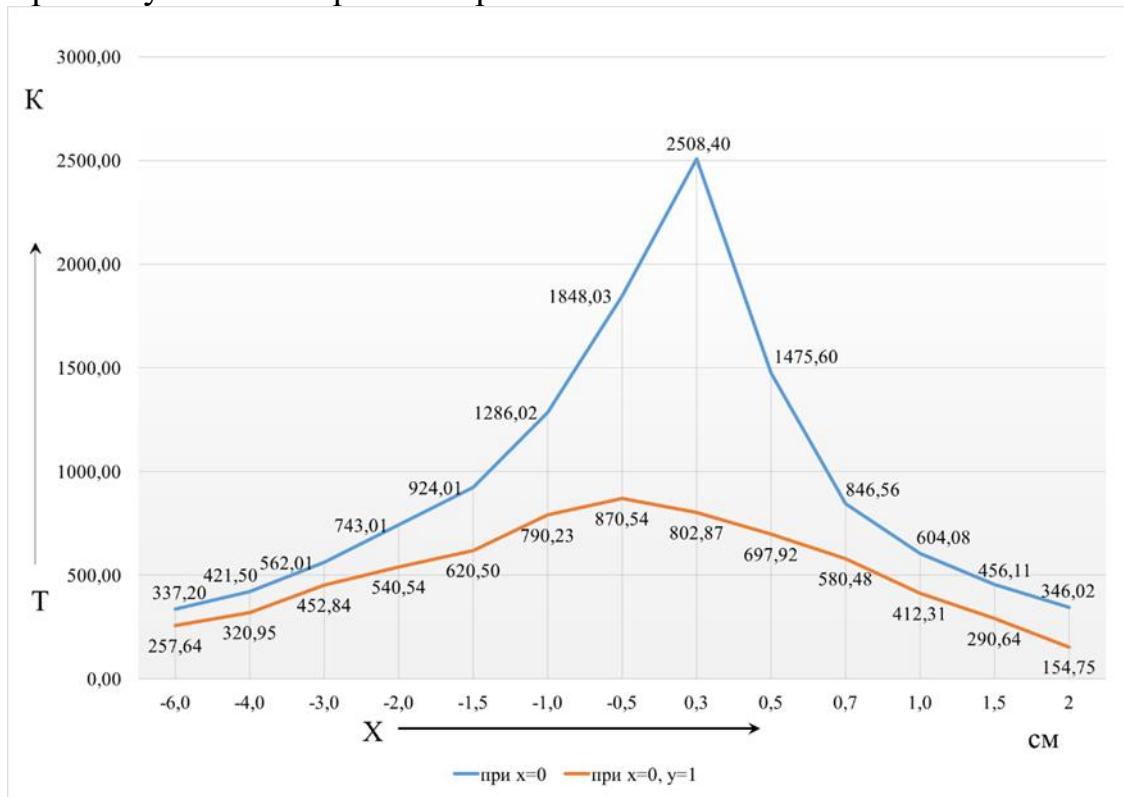


Рисунок 5 – График распределения температур точечного источника вдоль оси шва, позади и впереди источника тепла на различных расстояниях

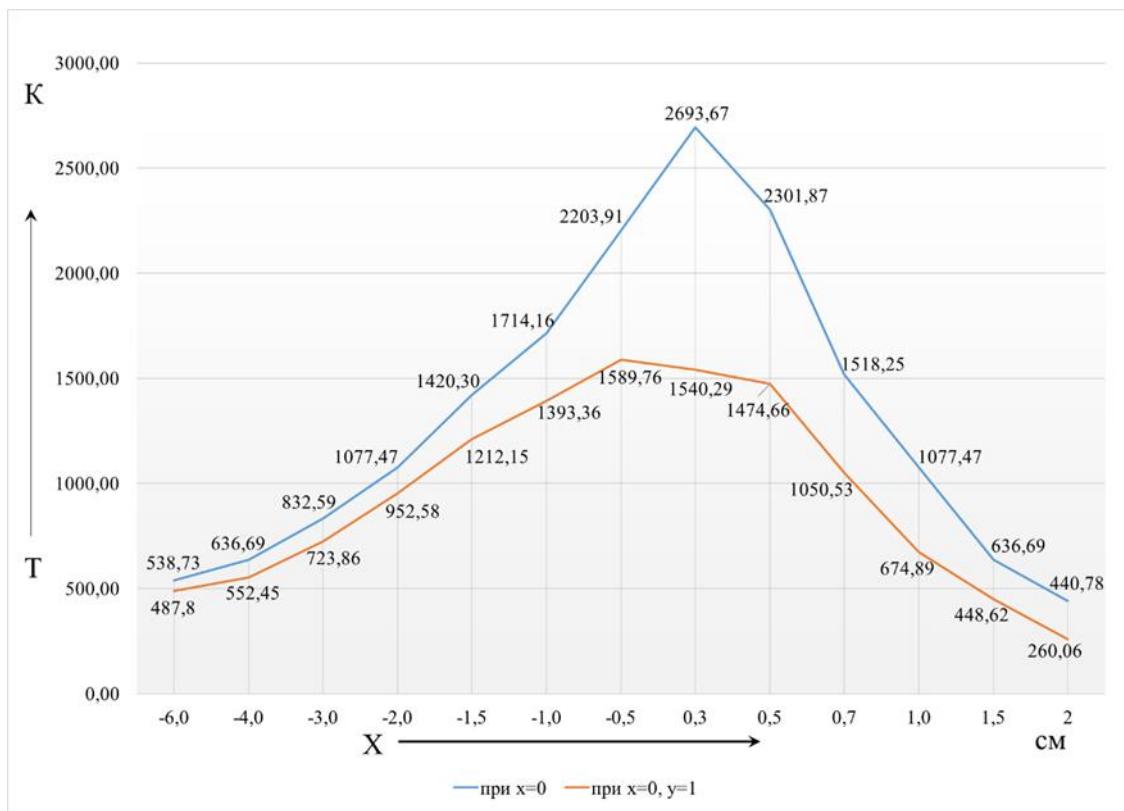


Рисунок 5 – График распределения температур линейного источника вдоль оси шва, позади и впереди источника тепла на различных расстояниях

ИДС имеет широкий спектр регулирования тепловым воздействием источника тепла на металл, чем привычные нам методы. Это объясняется тем, что высококонцентрированная энергия с повышенной температурой за кратковременный промежуток импульса, более эффективно использует тепло на расплавление свариваемого металла. Так же необходимо учесть тот факт, что каждый последовательный импульс имеет сложную систему запрограммированного сварочного цикла. В процессе, которого нужно обеспечить параметры формы импульса, величину импульса и дежурной дуги, время импульса и паузы. Эти параметры влияют на ширину шва, глубину проплавления, перемешивание сварочной ванны и тепловложения.

Известно, что титановые сплавы склонны к росту зерна и сварочные режимы ИДС задают так, чтобы сформировалось наименьшее перекрытие сварочных точек с минимальной жесткостью режимов сварки. Что бы обеспечить оптимальный и ровный профиль сварного шва с полным проваром и без визуальных дефектов (кратер, подрез, усадка металла) перекрытие должно составлять большую часть диаметра точки, но в то же время превышение перекрытия или снижение их интервала значительно снизит производительность процесса. Если взять во внимание тот факт, что при предварительном подогреве под действием предыдущей точки, минимальное перекрытие может быть уменьшено до $n = 55\%$. Это позволит снизить перекрытие точек и увеличить скорость сварки на 30%

Продолжительность цикла сварки в значительной степени воздействует на величину остаточных напряжений в сварном шве. Увеличение проплавляющей способности за счет уменьшения продолжительности импульса вызывает снижение остаточных напряжений, а за счет повышения времени между последовательными импульсами к повышению. С увеличением времени между последовательными импульсами увеличивается расстояние между сварочными точками, это приводит к увеличению теплоотвода, скорости кристаллизации и усадке металла, то есть идет образование более жестких условий кристаллизации.

К сложностям импульсно-дуговой сварке можно отнести трудность создания замкнутых систем управления. На рисунке 5 представлена циклограмма ИДС с поступательным движением сварочной горелки, процесс сварки начинается с паузы движения горелки в течении определенного времени, в процессе которого идет возбуждение сварочной дуги, нарастание силы сварочного тока, формирование сварочной ванны. Во время начала движения сила сварочного тока опускается до значений дежурной дуги с одновременным движением горелки.

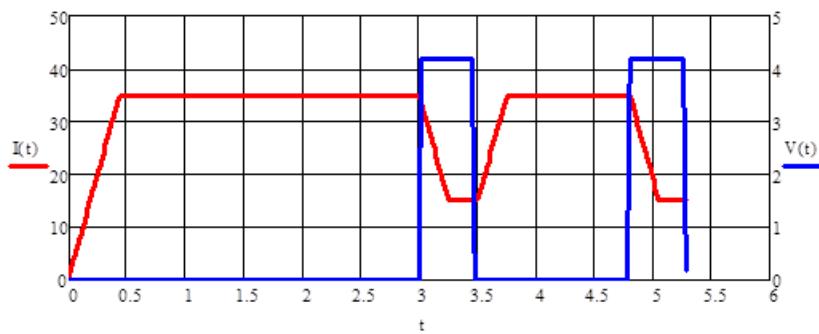


Рисунок 5 – Циклограмма сварки пульсирующей дугой и характер поступательного перемещения сварочной горелки

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) Решение проблемы порообразования в сварных соединениях титановых тонкостенных конструкций требует концептуального пересмотра нормативно-технологической документации, регламентирующей разработку технологических процессов, в частности по вопросам операций подготовки кромок под сварку.

2) Анализом насыщенности поверхности кромок, подготовленных под сварку, капиллярно-конденсированными загрязнениями и уровня дефектности металла шва определены разделительно-подготовительные технологические операции: пластическая деформация обкаткой фрезерованной поверхности, газолазерный раскрой в среде азота и аргона, комбинации газолазерного раскроя с любым видом раскроя, обеспечивающие $q_{\text{деф}} = 0$ при $N \approx 1$.

3) Показано, что при сварке плавлением псевдо- α -титановых сплавов с увеличением скорости охлаждения в интервале фазового $\beta \rightarrow \alpha$ превращения, характерного для импульсного режима сварки, происходит увеличение прочности сварных соединений.

4) Применение импульсно-дуговой сварки позволяет контролировать и регулировать степень вводимой тепловой энергии в металл шва, что позволяет снизить неравномерность поля остаточных напряжений и концентрацию напряжений металла и обеспечит равномерную мелкозернистую структуру.

5) Исключение порообразования в металле шва в процессе сварки плавлением титановых конструкций открывает возможность программируемого управления параметрами термического цикла сварки для обеспечения размерной точности и прогнозирования свойств сварных конструкций и реализуется на УСП-5000 путём модернизации установки для работы в импульсном режиме.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

- Патент № 2491159 С2 Российская Федерация, МПК B23K 31/12, B23K 103/14. Способ оценки перед сваркой качества сварочной проволоки и заготовок сварной конструкции из титановых сплавов : № 2011149420/02 : заявл. 05.12.2011 : опубл. 27.08.2013 / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, С. З.

Лончаков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет" (ФГБОУ ВПО "КнАГТУ").

2. Стробыкин, Н. А. Исключение пористости и управление термическим циклом при сварке тонкостенных титановых авиационных конструкций / Н. А. Стробыкин, П. В. Бахматов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 16–17 ноября 2023 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 80-83. – EDN EABCQX.

3. Стробыкин, Н. А. Сварка титановых сплавов импульсно-дуговым методом (Обзор) / Н. А. Стробыкин, П. В. Бахматов // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 3-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 10–14 апреля 2023 года. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 107-110. – EDN ZRKZHT.

4. Стробыкин, Н. А. Проблемы сварки длинномерных ребристых титановых панелей на автоматической установке УСП-5000 / Н. А. Стробыкин, П. В. Бахматов, В. В. Григорьев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 года / Редколлегия: А.В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 166-169. – EDN XRUUOF.