

М 401903

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВУЗОВОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ
УЧИЛИЩЕ имени Н.Э. БАМАНОВА



На правах рукописи

УДК 621.791.72

ПЕТРЕНКО

Владимир Романович

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШВА ПРИ
ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

(Специальность 05.04.05 - "Технология и машины
сварочного производства")

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва
1982

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции энергетическом институте

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Н.А.ОЛЫШАНСКИЙ

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор В.В.ФРОЛОВ
Кандидат технических наук, ГЕЙКИН В.А.

решении специализированного

1982г. в _____ час. _____ мин.

та К053.15.03 при Московско-
Революции и ордена Трудо-
ком училище им.Н.Э.Баумана
ская ул., 5.

в библиотеке МВТУ им.Н.Э.Ба-

мпларе, заверенный печатью,

1982г.

В.М.ЯМПОЛЬСКИЙ

Объем I п.л. Тираж 105 экз.
ва, 2-я Бауманская, 5

М401903



1401903

Петренко В. Р. Повышение ста

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное состояние и перспективы развития таких областей промышленности как химическая, судостроение, энергетическое машиностроение, авиационная и реактивная техника требуют зачастую использования в качестве конструкционных материалов толстолистовых титановых сплавов. Получение сварных соединений из титановых сплавов толщиной 100 и более миллиметров сопряжено с необходимостью решения ряда проблем технологического характера и достижения требуемых свойств соединений. С этих позиций наиболее перспективно использование в качестве источника тепла электронного луча.

Внедрение электроннолучевой сварки (ЭЛС) больших толщин стало насущной потребностью, однако, несмотря на широкие возможности электронного луча, процесс сдерживается из-за отсутствия отработанных технологических приемов и сведений о связи параметров режима с формой шва и качеством соединения. Поэтому работы, выполненные в этом направлении, несомненно способствуют прогрессу не только в области ЭЛС, но и технологической культуры в целом.

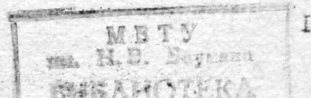
Цель работы. Целью настоящей работы является разработка технологии ЭЛС горизонтальным лучом титановых сплавов толщиной до 160 мм на основании исследования причин нестабильности формирования швов и использования мероприятий для их устранения.

Методы исследований. В работе использовался метод введения в сварной шов маркирующих материалов для определения специфики металлопереноса при вертикальном и горизонтальном расположениях луча. Фактическое количество тепловой энергии вводимой в свариваемый металл определялось по методу проходящего тока.

С помощью расчетного метода была создана математическая модель формирования сварного шва в горизонтальном положении. Необходимые расчеты выполнялись на ЭЦВМ "Минск-32". Содержание примесей и легирующих элементов в соединении определялось с помощью микрорентгеноспектрального анализатора JRX (Япония) и микрорентгеновского анализатора MS-46 «Самеса». Структурные исследования производились с помощью оптических и электронного сканирующего микроскопов. Содержание газов находили методом восстановительного плавления на анализаторах RO - 17 и TN - 15 фирмы «Leko».

Научная новизна. На основании предложенной математической модели формирования шва при сварке горизонтальным электронным лучом

1401903



получена возможность определять условия стабильного бездефектного формирования шва в зависимости от угла наклона электронного пучка, расположения фокуса, степени конусности канала, градиента давления в канале и других параметров.

Предложено оценивать возможность стабильного формирования шва с помощью критерия удержания жидкого металла сварочной ванны.

Практическая ценность. Разработаны технологические рекомендации по сварке за один проход изделий новой техники при толщине металла до 160 мм. Проведенные расчетные оценки скоростей охлаждения участков околосшовной зоны и применение предложенных рекомендаций позволили выбрать режимы, обеспечивающие получение качественных соединений.

При сварке титановых сплавов горизонтальным лучом соединения имеют высокие и равномерные по толщине металла механические свойства, пониженное содержание газов в швах, низкий уровень испарения легирующих компонентов и оптимальную форму проплава.

Результаты диссертационной работы прошли опытно-промышленную проверку и внедрены на одном предприятии с годовым экономическим эффектом 50 тыс. руб.

Апробация работы. Основное содержание работы доложено на семинаре "Новые сварочные техпроцессы" (Москва, 1977), VI Всесоюзной конференции по электроннолучевой сварке (Москва, 1978), Научно-технической конференции сварщиков Урала (Челябинск, 1978), I Всесоюзной конференции по сварке легких, цветных и тугоплавких металлов и сплавов (Киев, 1978), Московской городской конференции молодых ученых и специалистов по повышению надежности, экономичности и мощности энергетического и электротехнического оборудования (Москва, 1978), Научно-технической конференции "Прогрессивные способы сварочных работ" (Иркутск, 1979), заседании кафедры "Технология металлов" МЭИ (Москва, 1979), заседании кафедры "Оборудование и технология сварочного производства" ВПИ (Воронеж, 1980), конференции, посвященной 50-летию подготовки инженеров-сварщиков (Владивосток, 1980), VII Всесоюзной конференции по электроннолучевой сварке (Киев, 1980), научном семинаре МВТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 1981).

Публикации. о теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы и 139 наименований. В приложении помещен акт внедрения. Работа содержит 112

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы, кратко изложено содержание диссертации и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируется состояние вопроса сварки титана и его сплавов. Обсуждаются особенности сварки титановых сплавов, практические и теоретические достижения в этой области, а также недостатки, ограничивающие использование обсуждаемых методов.

Так, дуговая сварка в среде защитных газов, являясь наиболее распространенным и эффективным процессом соединения титановых сплавов, приводит к перегреву участков околошовной зоны и неоднородности соединений в случае многопроходной сварки. Сварка толстолистовых изделий сложной конфигурации целесообразна при применении общей защиты в камерах с контролируемой атмосферой. Однако в этом случае пластичность швов ниже, чем у основного металла. Дуговой сварке под флюсом и электрошлаковой сварке свойственны невысокая ударная вязкость, неудовлетворительное формирование шва, значительные объемы расплавленного металла и длительное пребывание его в районе высоких температур.

Рассматриваются также вопросы сварки титановых сплавов большой толщины электронным лучом. Обсуждается целесообразность использования для этих целей разработанного проф. Н.А.Ольшанским способа сварки горизонтальным лучом. Однако отсутствие практических рекомендаций применительно к титановым сплавам толщиной до 160 мм и конкретных условий для получения бездефектных соединений предопределяет следующие задачи исследований:

1. Выбор схемы процесса и сравнение особенностей металлопереноса в ванне при сварке вертикальным и горизонтальным электронными лучами.

2. Определение условий стабильного формирования шва при ЭЛС толстолистовых материалов.

3. Исследование механических свойств и распределения газов в полученных сварных соединениях.

4. Внедрение в производство электроннолучевой сварки конструкций из толстолистовых титановых сплавов.

Во второй главе представлен сравнительный анализ переноса жидкого металла сварочной ванны для случаев вертикального и горизон-

тального расположений электронного пучка. Такой анализ необходим для выбора и обоснования схемы процесса сварки металлов больших толщин. Эксперименты проводились с использованием маркирующих материалов на установке ЭЛУ-I с пушкой У-530М и источником питания У-250. Механизмы вакуумной камеры позволяли выполнять сварку пластин вертикальным и горизонтальным пучками. В качестве маркирующих материалов, которые в виде штифтов зачеканивались в проплавляемые образцы, использовали медь и железо. Проплавлялись образцы из сплавов ЗВ и ВТ22. Ось штифта и ось электронного луча при проплавлении совпадали, а параметры процесса, кроме пространственного положения луча, оставались неизменными. По расположению, количеству и градиенту плотности маркирующего материала на штифах судили о характере и особенностях движения жидкого металла.

В качестве критерия для оценки интенсивности перемешивания металла был предложен коэффициент заноса маркирующего материала, определяющий степень распространения материала маркера за ось штифта в направлении сварки.

В результате экспериментов удалось установить, что основным в процессе переноса и распределения маркирующего материала при ЭЛС является конвективное перемешивание. Распространение металла штифта вперед за ось штифта возрастает с увеличением толщины образца и скорости сварки, причем оно в 1,2...2,8 раза больше при одинаковых толщинах для вертикального луча по сравнению с горизонтальным. С увеличением скорости сварки и толщины металла интенсивность перемешивания сварочной ванны возрастает. Причем для вертикального луча этот рост идет значительно быстрее, чем для горизонтального.

Эксперименты с маркирующими материалами позволили также установить, что сварка деталей горизонтальным лучом со сквозным проплавлением выгодно отличается от традиционной схемы ЭЛС с точки зрения получения благоприятной геометрии шва с почти параллельными стенками и снижением вероятности несплавления свариваемых кромок в корневой части.

В третьей главе рассматриваются сравнительные энергетические особенности сварки титановых сплавов вертикальным и горизонтальным электронными пучками. Экспериментально установлено, что вкладываемая погонная энергия для малых толщин ($\delta = 5...10$ мм) не зависит от ориентации источника тепла. С увеличением толщины металла заметно уменьшение затрат на формирование шва, выполненного горизонтальным пучком по сравнению с вертикальным на 3...16%. При

этом следует учитывать, что часть энергии горизонтального луча, проходящая через образец, не расходуется на нагрев детали, а лишь поддерживает стабильное существование канала. Это установлено с помощью электрической схемы, фиксирующей величину тока, проходящего по каналу через образец. Поэтому, проводя расчеты термического цикла околосварной зоны при однопроводной сварке горизонтальным лучом со сквозным проплавлением, необходимо значение величины мощности умножать на коэффициент $\varphi = 0,8...0,85$.

Используя известные закономерности равновесия сил в канале проплавления, получено выражение для нахождения распределения температуры поверхности металла и давления в парогазовом канале по его длине.

Анализ полученных расчетных зависимостей показывает, что для горизонтального электронного луча со сквозным проплавлением образца распределение температур и давлений по глубине канала мало изменяется от поверхности к корню. При сварке вертикальным электронным лучом температура стенок и давление в кратере в поверхностной части образца значительно ниже, чем в корне. Установлено также, что для горизонтального пучка температура металла и давление паров в канале практически не зависят от толщины образца.

Необходимо отметить, что получаемые закономерности хотя и объясняют в достаточной степени разницу гидродинамической обстановки при двух схемах сварки, однако являются первым приближением. При более подробном анализе изменения давления в канале необходимо учитывать снижение этих давлений на концевых участках из-за истечения паровой фазы. Проведенные для этого случая расчеты показали, что в условиях ЭМС течение парогазовой фазы по каналу определяется как межмолекулярным взаимодействием, так и столкновениями молекул со стенками канала. Учитывая, что максимум давления паров будет располагаться в центре цилиндрического канала проплавления, а истечение парогазовой фазы происходит через оба отверстия диаметром D одновременно (рис.1), с помощью известных зависимостей теории течения разреженных газов получено выражение для распределения давления вдоль парогазового канала в следующем виде:

$$dL = 228 \frac{D^3}{I} (1 + 0,11DP) dP, \quad (1)$$

где D - диаметр канала проплавления, м;
 L - полудлина канала и текущая координата (расстояние от исследуемого сечения до среза), м;
 I - установившийся поток парогазовой фазы, Па·м³/с;
 P - давление в средней части канала проплавления, Па.

После интегрирования выражения (1), например, для случая $D = 5$ мм, $L = 60$ мм, $I = 0,61$ Па·м³/с, установлена взаимосвязь между давлением канала и текущей координатой (L) в следующем виде:

$$L = 4,67 \cdot 10^{-5} P (1 + 0,275 \cdot 10^{-3} P). \quad (2)$$

На рис. 1 представлены кривые изменения давления в канале на участке от среза до половины его длины $L = 60$ мм при установившемся потоке I и перепаде давлений на этом участке ΔP .

В связи с тем, что истечение парогазовой фазы из цилиндрического канала происходит одновременно через оба отверстия, распределение давления по длине канала будет симметричным с максимумом в центральной части. Изменение температурных условий, размеров цилиндрического канала, плотности парогазовой фазы и других параметров, зависящих от режимов процесса сварки, будут изменять и характер падения давления в канале. Для рассмотренных случаев промежуточного и молекулярного течения парогазовой фазы при режимах с формированием относительно широких каналов, давление в которых невелико ($\sim 10^3$ Па), падение давления от максимального значения до минимального у среза канала происходит по закону, близкому к линейному. Таким образом, проведенные исследования позволяют получить более близкое к реальному представление о распределении давления в парогазовом канале при электроннолучевой сварке.

Особенности распределения давления и температурный режим в каналах проплавления сказываются и на процессе испарения легирующих элементов сплавов при различных схемах процесса ЭЛС. Теоретические исследования этих процессов проведены аналогично тем положениям, которые приняты при плавке металла в вакуумных печах электронной бомбардировкой. Применительно к алюминию, являющемуся летучим элементом в титановых сплавах, выполнены расчеты и эксперименты показали, что расчетные данные несколько превышают экспериментальные, и фактическое испарение алюминия при сварке горизонтальным лучом меньше, чем при сварке вертикальным. Однако в обоих случаях процентное содержание компонентов сплава не выходит за допустимые пределы. Повышение скорости сварки ведет к не-

которому снижению испарения алюминия, что объясняется, видимо, уменьшением длительности пребывания металла при повышенных температурах.

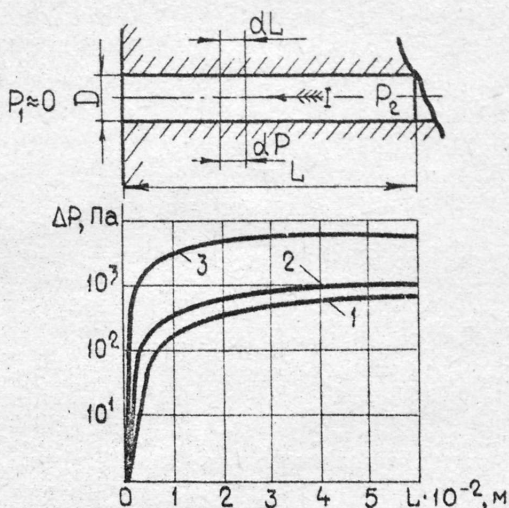


Рис. I Распределение давления парогазовой фазы по длине канала проплавления ($L = 60$ мм – полуудлина цилиндрического канала): 1 – $D = 10$ мм, $\Delta P = 5 \cdot 10^2$ Па, $I = 2,42$ Па·м³/с; 2 – $D = 5$ мм, $\Delta P = 10^3$ Па, $I = 0,61$ Па·м³/с; 3 – $D = 0,5$ мм, $\Delta P = 5 \cdot 10^5$ Па, $I = 2,82 \cdot 10^{-3}$ Па·м³/с.

В четвертой главе приведены данные о свойствах швов, выполненных горизонтальным электронным лучом с формирующим устройством. Формирующее устройство изготавливается из меди с U-образным пазом и предназначено для предотвращения вытекания жидкого металла в районе входа луча. Корневая часть может формироваться с использованием подкладки, формирующего устройства или на весу.

В этих случаях наблюдается значительная разница в ширине поверхности и корня шва. В результате появляются угловые деформации деталей и отмечается разница в свойствах металла соединения по его толщине. Кроме этих недостатков формирующие устройства способны лишь демпфировать процесс стекания металла, но не предотвра-

щать его. Поэтому оценка и определение условий стабильного свободного формирования шва при ЭЛС горизонтальным лучом толстолистовых материалов являются весьма важными. В некоторых случаях ЭЛС горизонтальным электронным лучом возможно стабильное формирование шва и на толстолистовых материалах. Основным условием для этого является квазистационарное существование сварочной ванны, под которым будем понимать такое состояние расплава, когда в любой момент времени объем и форма жидкого металла сварочной ванны, заключенного между поверхностной и корневой плоскостями изделия, а также скорость его истечения на эти поверхности остаются постоянными.

Для формулирования условий существования квазистационарной сварочной ванны ограничим ее объем цилиндрической поверхностью с постоянным по длине сечением (рис.2).

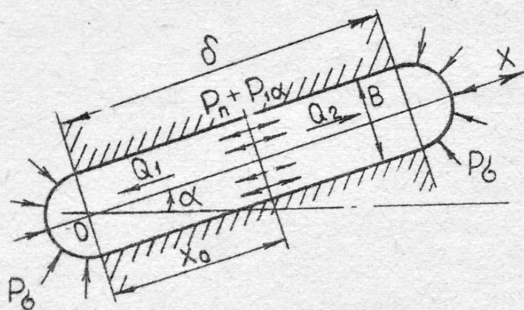


Рис.2 Схема модели цилиндрического канала проплавления

Будем полагать, что на жидкий металл сварочной ванны действуют давление паров P_n и гидростатическое давление P_g , стремящееся вытолкнуть расплав из канала. Силы поверхностного натяжения, действующие на вытекающую каплю на торцевых поверхностях, направлены на удержание потока. При условии

$$P_6 \geq P_n + P_g, \quad (3)$$

динамическое равновесие ванны не нарушается. Скорость истечения потока будем рассчитывать под действием сил $P_n - P_{6м}$ гид-

ростатических сил, где P_{0M} - давление внутри капли максимального радиуса, которая способна удерживаться силами поверхностного натяжения. Тогда уравнения Навье-Стокса для цилиндрического канала в предположении $\partial u / \partial \varphi = 0$, где φ - угловая координата точки, имеют вид:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{1}{\eta} \frac{dP}{dx}. \quad (4)$$

Здесь $u = u(r, x)$ - скорость движения расплава в точке с координатами (r, x) ;

dP/dx - градиент давления;

η - динамический коэффициент вязкости.

В связи с возможностью вытекания потока в двух направлениях градиент давления определим как

$$\begin{aligned} \frac{dP_1}{dx} &= \frac{\Delta P}{x_0} + \rho g \sin \alpha; \\ \frac{dP_2}{dx} &= \frac{\Delta P}{\delta - x_0} - \rho g \sin \alpha, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta P = P_n + 0,5 \rho g B \cos \alpha - P_{0M}$,

δ - толщина свариваемого металла;

B - ширина проплава.

Решив уравнение (4) для потоков в двух направлениях, получим скорости движения расплава u_1 и u_2 . Соответствующие объемные расходы согласно решению Хагена-Пуазейля будут:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{\pi r_0^4}{8\eta} \frac{dP_1}{dx} = \frac{\pi r_0^4}{8\eta} \left(\frac{\Delta P}{x_0} + \rho g \sin \alpha \right); \\ Q_2 &= \frac{\pi r_0^4}{8\eta} \frac{dP_2}{dx} = \frac{\pi r_0^4}{8\eta} \left(\frac{\Delta P}{\delta - x_0} - \rho g \sin \alpha \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Координату раздвоения потока жидкого металла, вытекающего из сварочной ванны - x_0 , определим из условия неизменности формы ванны. Для этого необходимо выполнение условия:

$$\frac{Q_1}{x_0 S_1} = \frac{Q_2}{(\delta - x_0) S_2}, \quad (7)$$

где $S_{1,2}$ - площади соответствующих сечений жидкометаллических частей сварочной ванны.

Будем считать при этом, что и фокус луча помещен в координату раздвоения потоков. Тогда искомая координата определится:

$$x_0 = \frac{\rho g \delta \sin \alpha - 2\Delta P}{2\rho g \sin \alpha} + \sqrt{\frac{(\rho g \delta \sin \alpha)^2 + 4\Delta P^2}{4(\rho g \sin \alpha)^2}}. \quad (8)$$

Анализ уравнения (8) показывает, что с увеличением угла наклона координата раздвоения потока перемещается к проплавляемой поверхности.

Учитывая, что реальная форма парогазового канала и сварочной ванны конические, было получено также выражение для координаты раздвоения потоков в этом случае. Установленная зависимость для сохранения стабильного формирования шва требует коррекции положения фокальной плоскости.

Одним из наиболее значимых параметров процесса сварки горизонтальным лучом толстолистовых изделий является угол наклона оси электронного луча относительно горизонтали.

Для конической формы канала определено

$$\alpha = \arcsin \frac{\Delta P}{\rho g} \frac{Kx^2 - (\delta - x)^2}{x[Kx(\delta - x) + (\delta - x)^2]}, \quad (9)$$

где K - коэффициент, характеризующий степень конусности канала проплавления.

Анализ уравнения (9) показывает, что знак и величина угла наклона оси электронного луча определяются значением конусности ванны и расположением фокуса в детали.

Логическим завершением теоретических исследований явилось определение величины критического радиуса проплавления, который обеспечивает удержание жидкого металла сварочной ванны при свободном формировании шва:

$$r_{кр} = \sqrt[3]{\frac{16\eta\delta\psi}{\rho g t(\Delta P/x_0 + \rho g \sin \alpha)}}, \quad (10)$$

где ψ - корректирующий множитель, равный 0,6...1,0;
 τ - время существования сварочной ванны;
 η - динамический коэффициент вязкости;
 σ - коэффициент поверхностного натяжения.

Величина критического радиуса для титана и его сплавов, определенная по зависимости (10), составляет 6,3 мм. Если учесть, что давление паров в канале находится в пределах $10^3 \dots 10^4$ Па, а давление в капле критического радиуса от сил поверхностного натяжения примерно на порядок ниже, то можно быть уверенным, что оно не будет оказывать существенного влияния на движение потока металла в канале проплавления. Анализ влияния изменения угла наклона сварочной ванны от 0 до 90° показывает, что для малых толщин металлов формирование шва не критично к углу наклона и зависит от давления паров в канале. При сварке металла большой толщины помимо гидростатического давления на величину критического радиуса существенное влияние оказывает угол наклона сварочной ванны. Расширению возможностей процесса электроннолучевой сварки со свободным формированием шва способствует повышение вязкости и поверхностного натяжения расплава. С этих позиций желательно вести процесс на режимах, обеспечивающих минимальный перегрев сварочной ванны, осуществлять теплоотвод от участков околошовной зоны и сварного шва, располагать ванну горизонтально.

Таким образом, оценка влияния различных параметров на условия свободного формирования шва при ЭЛС для конкретных металлов показывает, что зависимость (7) может быть использована для определения условий удержания жидкого металла.

В пятой главе применительно к полученным теоретическим положениям и выводам разработан технологический процесс сварки титановых сплавов ВТ6, ЗВ, ВТ22 толщиной 20-160 мм. Отработка технологии выполнялась с применением пушек У-530М и СШ60/60 при сквозном проплавлении образца и свободном формировании поверхности и корня шва. Фокусировка луча осуществлялась на уровне половины толщины образца, а угол наклона луча относительно горизонта составлял $3 \dots 5^\circ$. Выбор технологии сварки ряда титановых сплавов осуществлялся по расчетно-экспериментальной методике; кроме удельной теплотворительности внешнего формирования шва обеспечивалась необходимая скорость охлаждения околошовной зоны.

Для конкретных толщин металлов и составов получены практические технологические рекомендации. Необходимо отметить, что для

Таблица I

Параметры режимов ЭЛС горизонтальным пучком электронов со сквозным проплавлением толстолистовых титановых сплавов

Сплав	Толщина δ , мм	Скорость сварки V , мм/с	U , кВ	I_n , А	x , мм	α , град	Рас- четный $r_{кр}$, мм	Полушири- на на корня шва $B_{k/2}$, мм
ЗВ	70	2,20	37	0,54	36	2,8	2,97	2,60
Ti-Al-V-Zr	100	2,50	44	0,55	50	2	3,47	2,95
ЗВ	130	1,81	45	0,73	70	4	3,78	3,50
Ti-Al-V-Si	145	1,89	52	0,70	84	5	3,87	3,75
ВТ6	160	2,22	55	0,82	100	6,3	4,00	4,00

Таблица 2

Механические свойства участков сварных соединений титановых сплавов толщиной 100...160 мм

Сплав	Участок соединения	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU МДж/м ²
Ti-Al-V-Zr	Основной металл	740	700	11,5	23,5	0,9
	Металл шва	825	745	12,0	23,5	1,0
ЗВ *	Основной металл	664	588	7,4	14,5	0,8
	Металл шва	714	652	14,6	26,7	0,95
Ti-Al-V-Si	Основной металл	548	497	11,7	25,4	0,96
	Металл шва	600	539	14,9	33,8	1,04
ВТ6 **	Основной металл	809	775	4,2	17,9	0,78
	Металл шва	875	775	9,5	23,5	0,78

Примечание:

* Для сплава ЗВ приведены значения КСТ.

** Для сплава ВТ6 приведены значения КСВ.

устранения дефектов швов в виде полостей обязательно соблюдение фокусировки и угла наклона электронного луча относительно горизонтали. Конкретные параметры режимов сварки толстолистовых титановых сплавов и механические свойства соединений, полученных в условиях свободного формирования швов, приведены в таблицах I и 2.

Проведенный комплекс испытаний сварных соединений показал, что прочностные и пластические свойства металла шва и околошовной зоны выше, чем у основного металла, циклическая прочность шва и околошовной зоны толстолистовых соединений сплава ЗВ также выше, чем у основного металла. Механические свойства швов при сварке горизонтальным лучом со сквозным проплавлением не изменяются по высоте при формировании шва с параллельными стенками. Содержание газов в различных зонах соединения находится на одном уровне за исключением водорода, количество которого в шве понижено на 15-45%.

Технология ЭЛС титановых сплавов внедрена на одном из предприятий с годовым экономическим эффектом 50 тыс.руб.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ методов сварки, используемых для изготовления конструкций из титана и его сплавов, показал, что применение электроннолучевой сварки является наиболее целесообразным, так как при этом обеспечивается высокая производительность и достаточно высокое качество сварных соединений.

2. Проведенные исследования условий металлопереноса в сварочной ванне выявили качественные и количественные различия процессов сварки в зависимости от пространственного положения луча. Основным отличительным фактором - снижение интенсивности движения и перемешивания жидкого металла при горизонтальном положении луча - предопределяет сравнительно более высокую стабильность этого процесса сварки.

3. Экспериментальные исследования и использование расчетной методики позволили установить, что применение горизонтального луча для сварки деталей из титановых сплавов сопровождается снижением энергозатрат на единицу толщины на 20% и уменьшением тепловложений в шов на 30...40% по сравнению с традиционной схемой ЭЛС.

4. Предложенная модель процесса формирования шва при сварке горизонтальным электронным лучом позволяет оценивать распределение давлений и температур по каналу проплавления и определять в зависимости от расположения фокуса луча, угла наклона канала проплавления, степени его конусности, градиента давления и других параметров возможность стабильного бездефектного формирования шва.

5. Экспериментально установлены и объяснены высокие прочностные свойства соединений исследованных материалов и их равномерность по толщине, пониженное содержание газов в швах, сравнительно низкий уровень испарения легирующих компонентов, оптимальная форма проплава при сварке горизонтальным электронным лучом.

6. Разработана технология сварки ряда титановых сплавов толщиной до 0,16 м, обеспечивающая получение качественного сварного соединения.

7. Внедрение предлагаемой технологии для сварки изделий из толстолистовых титановых сплавов позволило получить экономический эффект 50 тыс. рублей в год за счет роста производительности труда и повышения качества сварных соединений.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Электроннолучевая сварка толстолистового титанового сплава. /Н.А.Ольшанский, В.Р.Петренко, В.Н.Мартынов, А.С.Некрасов. - Труды МЭИ, 1979, вып. 411. - с.14-16.

2. Сравнительное исследование прочности сварных соединений ковкого и литого сплавов титана. /В.Р.Петренко, А.С.Некрасов, Г.С.Расплетин, А.И.Шестаков. - Труды МЭИ, 1979, выпуск 411. - с.39-42.

3. Исследование распределения газов в сварных соединениях толстолистовых титановых сплавов, выполненных электронным лучом. /Н.А.Ольшанский, В.Р.Петренко, Р.А.Савенков, А.С.Некрасов. - В кн.: Прогрессивные способы сварочных работ. Иркутск, 1979, с.29.

4. Электроннолучевая сварка титановых сплавов средних толщин. /Н.А.Ольшанский, В.Р.Петренко, А.П.Панфилов, Р.Ф.Валаян. - Труды МЭИ, 1980, выпуск 475. - с.21-26.

5. Петренко В.Р., Куприянова Т.А. Исследование особенностей металлпереноса при ЭЛС вертикальным и горизонтальным пучками элект-

ронов титановых образцов. Труды/МЭИ, 1980, выпуск 475. - с.24-34.

6. Электроннолучевая сварка толстолистового титана. /Н.А.Ольшанский, В.Р.Петренко, В.Н.Мартынов, А.С.Некрасов. - В сб.:Актуальные проблемы сварки цветных металлов. - Киев: Наукова думка, 1980, с.310-314.

7. Петренко В.Р. Исследование энергетических затрат на формирование сварного шва при сварке титановых сплавов вертикальным и горизонтальным пучками. - Тезисы докладов конференции, посвященной 50-летию подготовки инженеров-сварщиков. Владивосток, 1980, с.32-33.

8. Технологические особенности получения качественных сварных швов при ЭЛС толстолистовых титановых сплавов. /В.В.Ардентов, А.И.Шестаков, В.Р.Петренко, Г.С.Расплетин. - Сборник материалов УІ Всесоюзной конференции по электроннолучевой сварке. Киев, ИЭС им.Е.О.Патона, 1981, с.106-109.

