

На правах рукописи

ТЕРЕНТЬЕВ ЕГОР ВАЛЕРИЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ
НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ СО СКВОЗНЫМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре Технологии металлов ФГБОУ ВПО
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: доктор технических наук
ДРАГУНОВ Виктор Карпович,
заведующий кафедрой технологий
металлов ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

Консультант: доктор технических наук
ЧУДИНА Ольга Викторовна,
профессор кафедры технологий
конструкционных материалов МАДИ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ГЕЙКИН Валерий Александрович,
заместитель генерального директора –
генеральный конструктор ОАО «ОДК»

доктор технических наук, профессор
ЛЮШИНСКИЙ Анатолий Владимирович,
главный специалист ОАО «РПКБ»

Ведущая организация: **ОАО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала»**

Защита состоится «25» декабря 2014 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Телефон для справок: +7(499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «____» _____ 2014 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета

доктор технических наук, доцент

Коновалов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. За последние десятилетия электронно-лучевая сварка (ЭЛС) получила широкое распространение во многих отраслях машиностроения при соединении ответственных конструкций. Несмотря на необходимость использования дорогостоящего оборудования и высокие требования к квалификации сварщиков, ЭЛС имеет значительные преимущества при сварке стыков большой толщины по сравнению с другими способами, поскольку позволяет получать высококачественные сварные соединения за один проход при высокой энергоэффективности и производительности.

В настоящее время технологии ЭЛС успешно применяются на практике. Несмотря на это в ряде случаев не всегда удается получать сварные соединения гарантированно без корневых дефектов. Поэтому ЭЛС со сквозным проплавлением и свободным формированием швов является перспективным методом получения сварных соединений, при котором опасность образования корневых дефектов значительно снижается. Тем не менее, при этом может образовываться вогнутость в вершине и превышение проплава. Для получения качественных сварных соединений с усилением в вершине шва, используют высокие скорости сварки, которые обеспечивают такие скорости охлаждения, при которых поверхностные явления препятствуют вытеканию металла со стороны корня шва. На практике выбор скорости электронно-лучевой сварки, при которой швы формируются без дефектов, осуществляется экспериментально, что приводит к дополнительным материальным и трудовым затратам. Несмотря на это, на сегодняшний день нет научно обоснованной методики определения минимально допустимой скорости сварки, при которой швы формируются без вогнутости в вершине шва. Поэтому данная работа, направленная на повышение качества сварных соединений и посвященная разработке методики определения параметров ЭЛС, изучению влияния скорости сварки на химический состав, структуру и механические свойства, является актуальной и востребованной.

Целью диссертационной работы является повышение качества формирования сварных соединений при ЭЛС со свободным формированием швов

материалов больших толщин путем научно обоснованного выбора параметров режима сварки.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи.

1. Разработка модели движения жидкого металла в сварочной ванне и определение минимально допустимой скорости сварки, обеспечивающей качественное формирование швов «на весу» в нижнем положении.
2. Разработка расчетной методики определения ширины шва как функции от скорости сварки, диаметра парогазового канала и физических свойств свариваемых материалов.
3. Определение закономерности изменения термического КПД процесса ЭЛС с глубоким проплавлением от скорости сварки и физических свойств материалов.
4. Разработка методики расчета тока луча, учитывающей изменение термического КПД в зависимости от скорости сварки.
5. Исследование влияния скорости сварки на химический состав, структуру и механические свойства сварных соединений.
6. Разработка технологии ЭЛС неповоротных стыков конструкций из титановых сплавов и аустенитных сталей.

Методы исследования. Поставленные задачи решали с использованием теоретических методов исследования с последующим экспериментальным подтверждением. Математическая модель движения жидкого металла в сварочной ванне разработана с использованием теории теплопередачи, классической механики и дифференциальных уравнений. Для расчетов использовали программное обеспечение MathCAD 15.0. Эксперименты по электронно-лучевой сварке проводились на установке ЭЛА 40И. Исследование микроструктуры сварных соединений и измерения параметров швов проводились на оптическом микроскопе Zeiss Observer Z1m с программным обеспечением AxioVert 1.0. Механические свойства сварных соединений исследовали с применением твердомера Instron Tukon 2500, прибора МЭИ-Т7, автоматизированного прибора МЭИ-ТА, испытательной машины Instron 5982 маятникового копра МК-30А. Химический состав свариваемых материалов и швов изучали на атомно-эмиссионном спек-

трометре с лазерным возбуждением LAES Matrix. Количественный состав определяли с использованием эталонных калибровочных образцов для соответствующих материалов.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Разработана аналитическая модель движения жидкого металла в сварочной ванне, в соответствие с которой получена формула, для определения минимально допустимой скорости сварки, обеспечивающей качественное формирование швов «на весу» в нижнем положении в зависимости от ширины шва, диаметра парогазового канала и физических свойств свариваемых материалов.

2. Установлено, что при ЭЛС материалов с низкой теплопроводностью на высоких скоростях, когда $vd/2a > 1$, использование модели движущегося цилиндрического источника теплоты в бесконечной пластине позволяет с точностью до 15% определять параметры сварки.

3. Установлено, что при выборе параметров режимов ЭЛС для получения постоянной глубины проплавления должна сохраняться линейная зависимость мощности луча от скорости сварки.

Практическая значимость диссертационной работы.

1. Предложены расчетные методики для определения параметров ЭЛС, учитывающие влияние скорости сварки на термический КПД и ширину шва.

2. Разработана и внедрена технология ЭЛС неповоротных стыков переменной толщины элементов энергетических установок из сплава 5В.

3. Разработаны технологические рекомендации по сварке крышек элементов защитного блока и несущей конструкции первой стенки модуля бланкета ИТЭР из стали аустенитного класса 316L(N).

Результаты исследований, изложенные в диссертации, использованы в курсах лекций «Физико-химические и металлургические процессы при обработке металлов КПЭ», а также в курсовом и дипломном проектировании в Национальном исследовательском университете «Московский энергетический институт».

Апробация работы. Основные положения работы представлены на Международной научной конференции «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов» (Орск, 2011), Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и электроника» (Москва, 2012), International conference of electron beam technologies – EBT’2012 (Варна, 2012), Научной конференции МФТИ «Проблемы современной физики» (Москва, 2012); на научно-технических выставках «Россварка 2012», «Энергоэффективность и энергосбережение 2013», «ВУЗПРОМЭКСПО 2013», «Nan-pover Messe 2014», опубликованы в журналах «Технология металлов», «Вестник ПНИПУ: Машиностроение, материаловедение», «Сварочное производство»; обсуждены и одобрены на научном семинаре кафедры Технологии металлов НИУ «МЭИ».

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано 4 научные работы, в том числе 2 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 128 наименований. Диссертация представлена на 160 страницах, содержит 105 рисунка и 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ПОЛУЧЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

В первой главе проведен литературный обзор и рассмотрены особенности электронно-лучевой сварки с глубоким проплавлением. Основные причины образования дефектов и особенности формирования швов при электронно-лучевой сварке изучены в работах таких ученых, как Ольшанский Н.А., Патон Б.Е., Лесков Г.И., Нестеренков В.М., Назаренко О.К., Кайдалов А.А., МакДаниель Е., Башенко В.В., Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А., Шевченко В.А., Тонг Г., Шиллер З., Акопянц К.С., Петренко В.Р., Нудельман Я.Б., Драгунов В.К., Трушников Д.Н., Халыштед А.С., Арутюнян Р.В. и др.

В этих работах показано, что использование технологии ЭЛС со свободным формированием снижает количество дефектов в корневой части шва, но сопровождается вытеканием жидкого металла со стороны корня под действием силы тяжести.

Поскольку известные в настоящее время модели свободного формирования швов не учитывают изменения формы сварочной ванны при высоких скоростях сварки, в диссертации обосновывается необходимость разработки модели движения жидкого металла в сварочной ванне, тогда как качественное формирование швов «на весу» достигается за счет увеличения скорости ЭЛС.

Однако увеличение скорости сварки не всегда благоприятно сказывается на структуре и механических свойствах, к тому же требует увеличения мощности луча. Поэтому возникает необходимость теоретического определения минимально допустимой скорости сварки и энергетических параметров электронного луча, с учетом динамики формирования сварного соединения и с использованием математических моделей, описывающих теплопередачу при ЭЛС с глубоким проплавлением.

В главе обоснована актуальность, поставлены цель и задачи исследования.

Глава 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ЭЛС СО СВОБОДНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ШВА

В настоящее время методики определения режимов сварки основаны на статической модели равновесия сил, действующих на жидкий металл в сварочной ванне. Она не учитывает динамический характер формирования шва, при котором происходит одновременное движение и кристаллизация жидкого металла. Поэтому для определения минимально допустимой скорости сварки предложили динамическую модель сварочной ванны (рис. 1), в которой сделали следующие допущения: сварочная ванна имеет вертикальные стенки, теплоотвод из сварочной ванны осуществляется только в поперечном направлении с постоянной скоростью, жидкий металл движется только в вертикальном направлении, вязкостное трение в жидком металле отсутствует. Учитывая уве-

личение объема металла в жидком состоянии, поперечные деформации сварного соединения и отсутствие вогнутости в вершине шва, допустимое провисание металла со стороны корня шва определили из выражения:

$$s = \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{ж}}} - 1 \right) \delta / 2, \quad (1)$$

где ρ – плотность металла при 300°K ; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкого металла; δ – толщина свариваемого металла.

Согласно предложенной модели, жидкий металл будет вытекать со стороны корня до тех пор, пока за счет сужения сварочной ванны из-за кристаллизации боковых стенок не выполнится условие равновесия. При этом, качественное формирование возможно, если провисание металла со стороны корня шва не превысит допустимого значения (1).

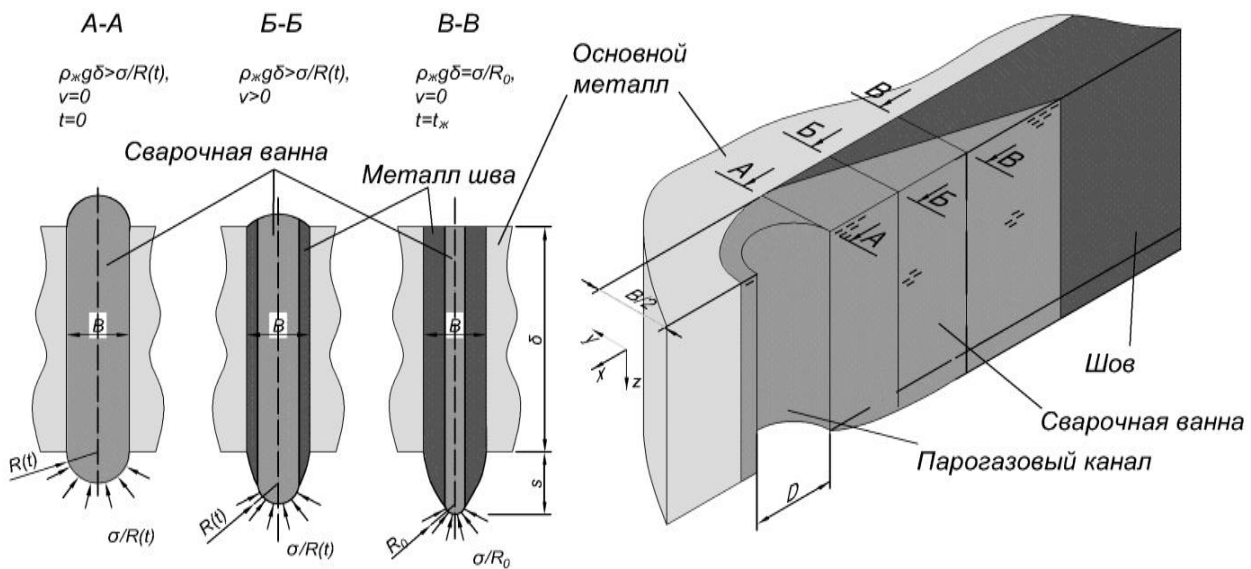


Рисунок 1. Модель сварочной ванны

Провисание определяли из условия равенства силы тяжести, сил поверхностного натяжения и инерции путем последовательного интегрирования по времени, допуская, что в начальный момент времени жидкий металл неподвижен, а кристаллизация идет с постоянной скоростью:

$$s = g \frac{t_{\text{ж}}^2}{2} - \frac{\sigma t_{\text{к}}^2 \left[\left(1 - \frac{t_{\text{ж}}}{t_{\text{к}}} \right) \left\{ \ln \left(1 - \frac{t_{\text{ж}}}{t_{\text{к}}} \right) - 1 \right\} + 1 \right]}{B / 2 \rho_{\text{ж}} \delta}, \quad (2)$$

где $t_{\text{жс}}$ – время в течение которого жидкий металл движется вниз; $t_{\text{к}}$ – продолжительность полной кристаллизации шва в рассматриваемом сечении; B – ширина шва; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла.

Поскольку в данной модели теплоотвод осуществляется с постоянной скоростью через боковые стенки, время $t_{ж}$ получили из закона теплопроводности Фурье для элементарного участка шва толщиной Δx :

$$Q_k = 2\delta\Delta x\lambda t_{ж} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (3)$$

где Q_k – количество теплоты, которое нужно отвести для выполнения условия равновесия; λ – теплопроводность металла; $\frac{\partial T}{\partial y} \approx (\frac{1}{B} + \frac{v}{2a})T_{пл}$ – градиент температуры в направлении теплоотвода; a – температуропроводность.

Зная теплосодержание жидкого металла, определили Q_k :

$$Q_k = 2(B/2 - R_0)\delta\Delta x\rho_{ж}(L + c(T_{в} - T_{пл})), \quad (4)$$

где R_0 – радиус скругления жидкого металла в корне, при котором выполняется условие статического равновесия; c – удельная теплоемкость металла; L – удельная теплота плавления; $T_{пл}$ – температура плавления; $T_{в}$ – температура жидкой ванны.

После приравнивания (1) и (2) с учетом (3) и (4) в результате математических преобразований получили формулу для определения минимально допустимой скорости сварки, при которой шов формируется без вогнутости:

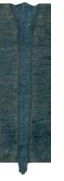
$$v = a \left[\frac{2\rho_{ж}\{L+c(T_{в}-T_{пл})\}}{\lambda T_{пл}} \sqrt{\frac{g[(B/2-R_0)^2-2R_0\{R_0 \ln(\frac{2R_0}{Be})+B/2\}]}{\delta(\frac{\rho}{\rho_{ж}}-1)}} - \frac{2}{B} \right] \quad (5)$$

Для оценки адекватности предложенной модели были проведены исследования формирования сварных соединений при ЭЛС со сквозным проплавлением пластин из титанового сплава 5В толщиной $\delta=32$ мм, стали 40Х13 толщиной $\delta=27$ мм и алюминиевого сплава Д16 толщиной $\delta=20$ мм на различных скоростях сварки. При этом, на каждой скорости подбирался режим с острой фокусировкой и запасом по мощности луча 40%, обеспечивающим уверенное сквозное проплавление. Эксперименты проводили на установке ЭЛА 40И с ускоряющим напряжением $U=60$ кВ, рабочее расстояние сохраняли на всех режимах постоянным $l=200$ мм. Режимы сварки представлены в табл. 1.

В результате получили сварные соединения с различным формированием швов. Так, при ЭЛС титанового сплава 5В и стали 40Х13 швы не имеют

вогнутости в вершине при скорости сварки 60 м/ч и выше, тогда как на на меньших скоростях образуется вогнутость в вершине шва. При сварке дуралюмина Д16 вогнутость присутствует на всех скоростях сварки, но она уменьшается по мере увеличения скорости сварки.

Таблица 1 – Режимы ЭЛС

Скорость сварки v , м/ч		20		40		60		90		120	
5В, $\delta=32$ мм	I_L , мА	140		190		240		300		350	
	$vd/2a$	0,39		0,78		1,16		1,74		2,33	
40Х13, $\delta=27$ мм	I_L , мА	160		-		280		-		450	
	$vd/2a$	0,42				1,27				2,54	
Д16, $\delta=20$ мм	I_L , мА	100		-		140		-		195	
	$vd/2a$	0,04				0,12				0,24	

Экспериментальные значения и расчетные зависимости минимально допустимой скорости сварки от ширины шва, разграничивающие область качественного формирования и формирования с вогнутостью в вершине показывают (рис. 2), что опытные и теоретические данные имеют неплохую сходимость, на основании чего можно сделать вывод об адекватности полученной расчетной модели для титанового сплава и стали.

Для алюминиевого сплава Д16 данная модель не подходит, поскольку из-за высокой теплопроводности в исследуемом диапазоне скоростей сварки значительная часть теплоты отводится через заднюю стенку, что противоречит сделанным в модели допущениям и требует рассмотрения других условий равновесия. На характер теплоотвода через боковые стенки сварочной ванны в первую очередь влияет скорость сварки и температуропроводность, поэтому в данной работе рассматривали в качестве высокой такую скорость сварки, при которой выполнялось условие $vd/2a > 1$ (табл. 1).

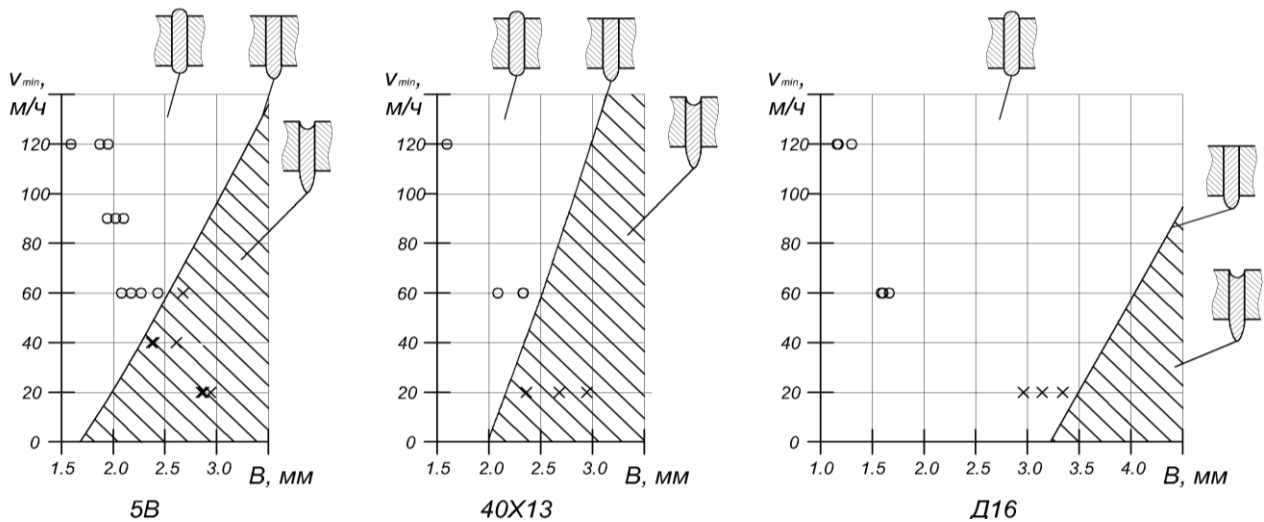


Рисунок 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных, полученных на различных скоростях

При расчете минимально допустимой скорости сварки по формуле (5) необходимо предварительно определить ширину шва, которая изменяется в зависимости от скорости сварки и физических свойств материалов. Ширину

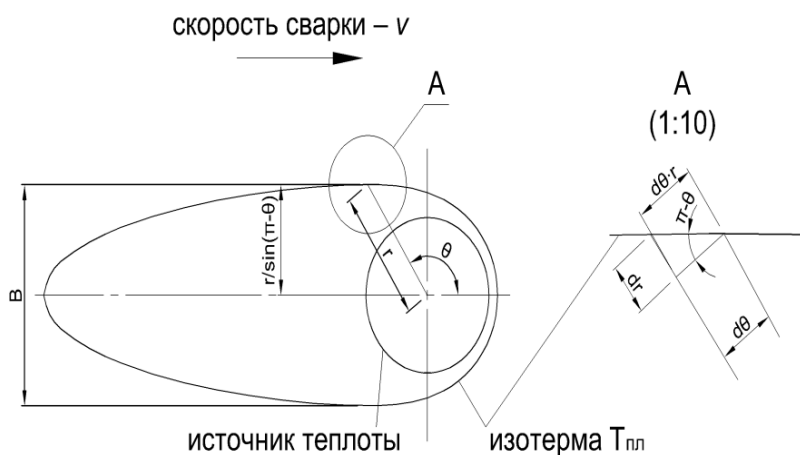


Рисунок 3. Схема определения ширины шва при движении цилиндрического источника теплоты

шва определили, используя модель движущегося цилиндрического источника теплоты и рассматривая элементарный участок, где изотерма $T_{пл}$ параллельна направлению сварки (рис. 3). Для этого

численно решали систему уравнений:

$$\begin{cases} T_{пл} = T_0 + (T_B - T_0)e^{(-\frac{vr \cos \theta}{2a})} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n I_n \left(\frac{vd}{4a} \right) \frac{K_n \left(\frac{vr}{2a} \right)}{K_n \left(\frac{vd}{4a} \right)} \cos(n\theta), & (6) \\ \frac{dr}{d\theta} = ctg(\pi - \theta) & (7) \\ B = 2r(\theta) \sin(\pi - \theta) & (8) \end{cases}$$

Стоит отметить, что ширину шва с использованием движущегося цилиндрического источника теплоты можно определять только для высоких скоростей сварки, когда влиянием гидродинамических явлений на теплоперенос в

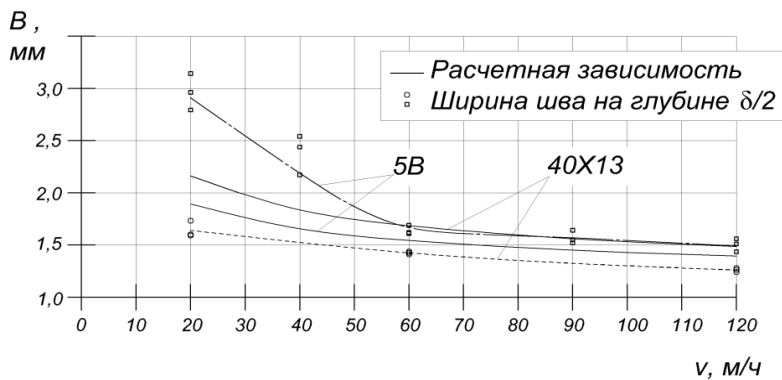


Рисунок 4. Зависимость ширины шва от скорости в сравнении с экспериментальными данными

мой мощности луча в данной работе оценили влияние скорости сварки на термический КПД как теоретически для линейного и цилиндрического источника теплоты, так и экспериментально.

Установили, что использование линейного и цилиндрического источников теплоты не позволяет теоретически рассчитать термический КПД с приемлемой точностью, а лишь позволяет продемонстрировать характер этой зависимости. На КПД процесса ЭЛС сильное влияние оказывает скорость сварки и

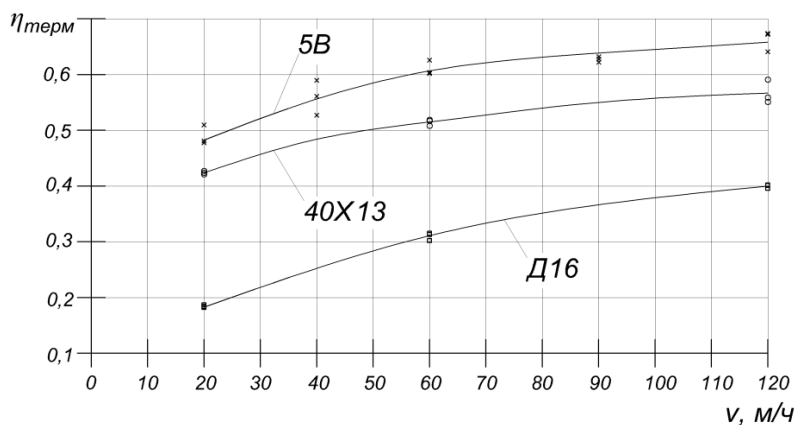


Рисунок 5. Зависимость термического КПД от скорости

жидкой ванне можно пренебречь благодаря узким швам, что подтверждает сравнение расчетных данных с экспериментальными (рис. 4).

Для повышения точности определения требуе-

свойства материала, например, максимальное значение $\eta_T=67\%$ получили для титанового сплава 5B при $v=120\text{м/ч}$, а минимальное $\eta_T=18\%$ для алюминиевого сплава при $v=20\text{м/ч}$ (рис. 5).

Для расчета тока луча использовали формулу на основе полной мощности цилиндрического источника с учетом затрат энергии на плавление и испарение:

$$Q = 2\pi\delta\lambda(T_B - T_0) \left(\frac{A_5}{\frac{vd}{2a} + A_6} + A_7 \left(\frac{vd}{2a} + A_6 \right) + A_8 \right) + B\delta v\rho(L + 0,02L_{\text{кип}}) \quad (8)$$

где $x = \frac{vd}{2a}$ – переменная; $A_5=-0,35$, $A_6=0,62$, $A_7=0,71$, $A_8=0,37$ – эмпирические коэффициенты, полученные для диапазона значений $x=0,025..5,0$.

$I, \text{мА}$

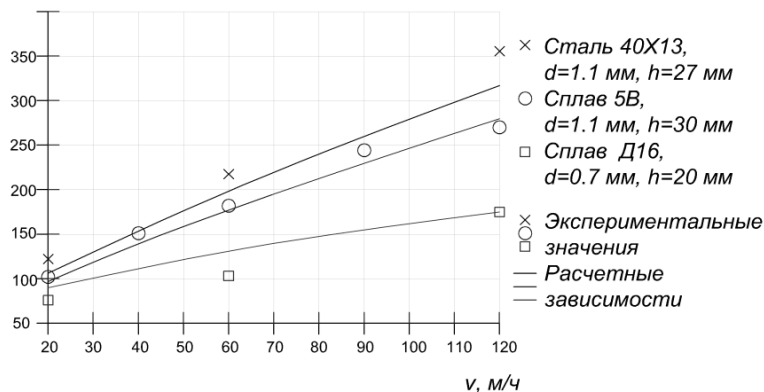


Рисунок 6. Зависимость тока луча от скорости сварки

Сравнение расчетных

данных с опытными показывается, что погрешность не превышает 15% во всем диапазоне скоростей сварки для различных материалов, таких как, сталь 40X13, сплавы 5В и Д16 (рис. 6). Это позволяет ре-

комендовать полученную формулу для предварительного расчета тока луча.

Глава 3. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СВАРКИ СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Данная глава посвящена изучению влияния скорости сварки на химический состав, структуру и механические свойства сварных соединений сплавов, обладающих различными технологическими свойствами.

В условиях ЭЛС возможно обеднение металла шва легирующими элементами с высокой упругостью паров, поэтому исследовали влияние скорости сварки на концентрацию наиболее летучих элементов в сварных соединениях стали 40X13 и сплавов 5В и Д16. Анализ химического состава позволил установить, что увеличение скорости сварки уменьшает потери летучих легирующих элементов в металле шва (рис. 7), что благоприятно сказывается на эксплуатационных характеристиках сварных соединений. Это связано с тем, что с

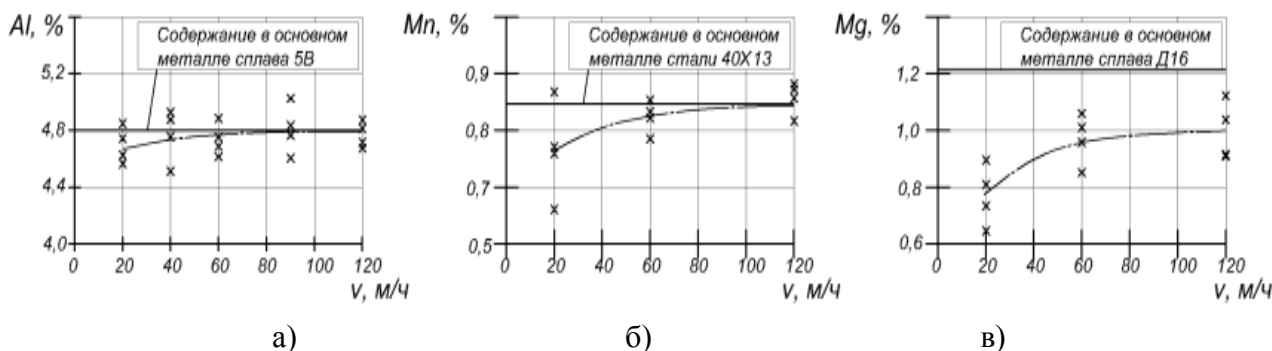


Рисунок 7. График зависимости содержания легирующих элементов с высокой упругостью пара в металле швов сплава 5В (а), стали 40X13 (б) и сплава Д16 (в) от скорости сварки

увеличением скорости сварки снижается длительность пребывания сплава в жидком состоянии из-за повышения скорости кристаллизации.

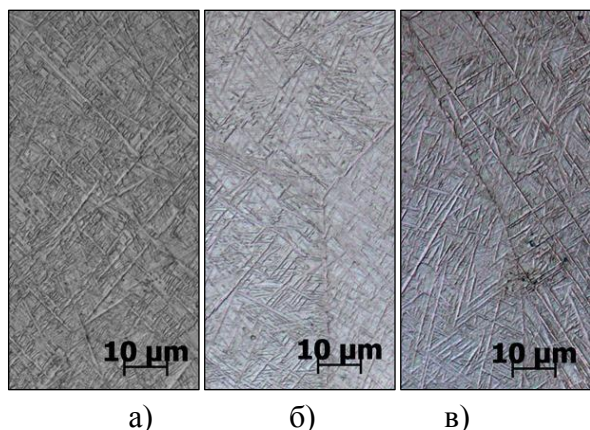


Рисунок 8. Микроструктура металла сварного шва сплава 5В, полученного на скорости 20м/ч (а), 60м/ч (б) и 120м/ч (в)

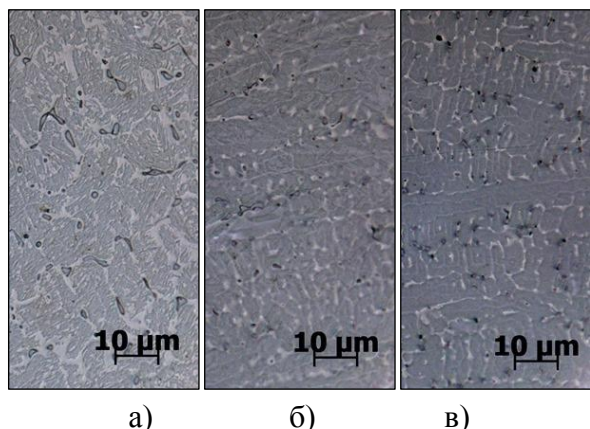


Рисунок 9. Микроструктура металла сварного шва стали 40Х13, полученного на скорости 20м/ч (а), 60м/ч (б) и 120м/ч (в)

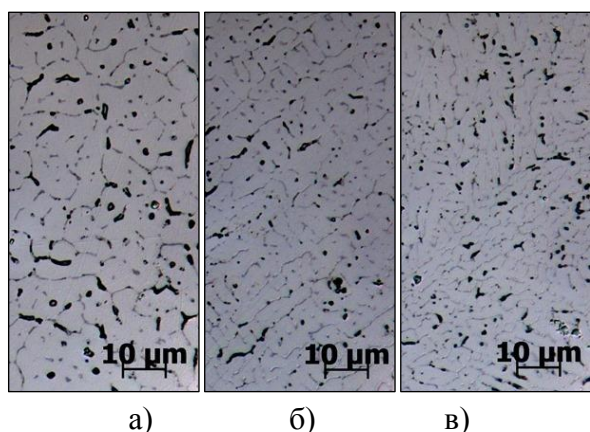


Рисунок 10. Микроструктура металла сварного шва сплава Д16, полученного на скорости 20м/ч (а), 60м/ч (б) и 120м/ч (в)

Основываясь на сведениях о свариваемости материалов и кинетике структурных превращений, проведены металлографические исследования различных зон сварного соединения. Установлено, что сварные соединения титанового сплава 5В, сталей 40Х13, 316 L(N) и дуралюмина Д16, полученных на разных скоростях, испытывают идентичные фазовые превращения под воздействием сварочного термического цикла. Так, микроструктура металла шва титанового сплава представляет собой игольчатый мартенсит (α' – фаза) с четкими границами зерен (рис. 8). Структура металла шва стали 40Х13 состоит из бейнита, мартенсита и включений остаточного аустенита (рис. 9). С увеличением скорости ЭЛС увеличивается количество мартенсита в стали 40Х13, что приводит к увеличению уровня остаточных напряжений, и как следствие к увеличению склонности к трещинообразованию. Микроструктура металла шва Д16 показана на рис. 10 и состоит из зерен α -фазы и включений вторичных избыточных фаз по границе зерен, что характерно для литой струк-

туры дуралюминов. Видно, что с увеличением скорости сварки структура металла шва измельчается на всех материалах, а зерна приобретают вытянутую форму, ориентированную в сторону максимального отвода тепла.

Исследование распределения твердости в сварных соединениях показало, что скорость сварки незначительно влияет на твердость металла шва, причем

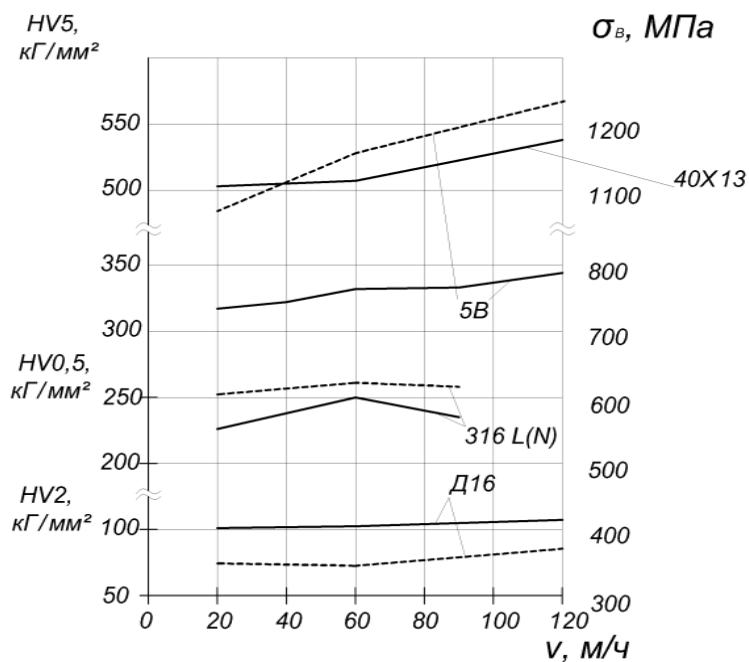


Рисунок 11. Влияние скорости сварки на среднюю твердость металла шва

некоторое увеличение твердости в сплаве 5В и стали 40Х13 с повышением скорости сварки вполне закономерно ввиду увеличения скорости охлаждения при мартенситном превращении (рис.11.). Для сталей аустенитного класса, не испытывающих фазовых превращений в твердом состоянии, повышение скорости сварки не влияет на твердость металла шва. Наблюдается

небольшое увеличение твердости металла швов сплава Д16, полученных на высоких скоростях, что объяснимо меньшими потерями летучих компонентов, таких как магний и более мелкозернистой структурой. Временное сопротивление и условный предел текучести, полученные безобразцовым методом, продемонстрировали аналогичный результат.

Глава 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ

Результаты проведенных исследований были использованы при разработке технологии ЭЛС со свободным формированием шва эллиптического днища с патрубком из титанового сплава 5В. Конструкция имеет сложную геометрию стыка с переменной толщиной и изменяющимся фокусным расстоянием, что с

учетом ограниченного доступа с обратной стороны позволяет использовать только ЭЛС со сквозным проплавлением (рис. 12).

Для расчета параметров режимов сварки были использованы разработанные методики. Скорость сварки рассчитывалась для максимальной толщины стыка. Поскольку стык имел переменную толщину и фокусное расстояние, то ток луча и ток фокусировки плавно изменялись в процессе сварки (рис. 13).

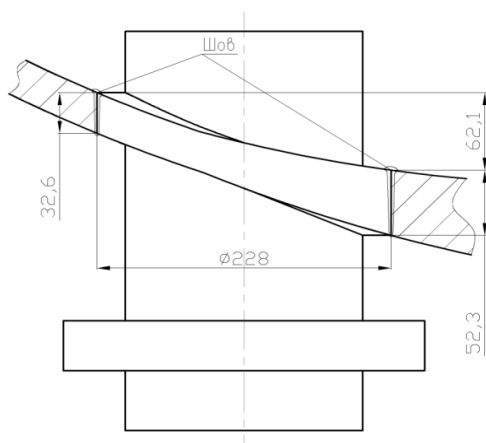


Рисунок 12. Конструкция сварного стыка патрубка Ø228 мм

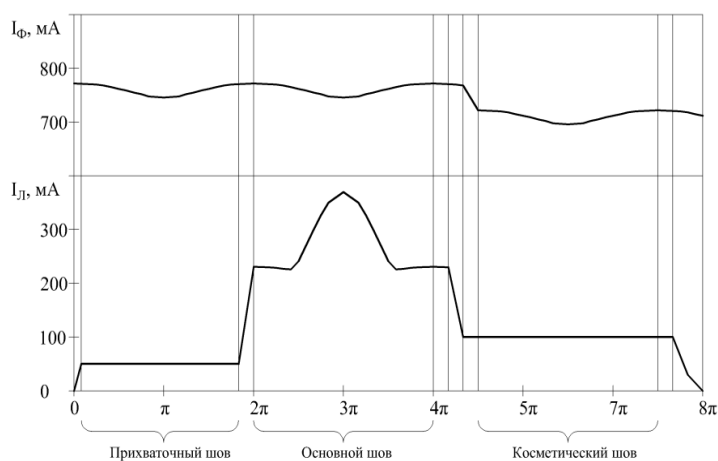


Рисунок 13. Циклограмма процесса сварки

После сварки и последующей термообработки сварных конструкций проводили рентгенографический контроль, который показал высокое качество сварных соединений. Внешний вид изделия представлен на рис. 14.



Рисунок 14. Внешний вид дна и поперечный макрошлиф шва



Также были разработаны технологические рекомендации по сварке крышек элементов защитного блока и несущей конструкции первой стенки модуля blankets ИТЭР из стали аустенитного класса 316L(N). Толщина стыков составляла от 5 до 10 мм. Основания сложность

при разработке технологии сварки была связана с отсутствием доступа с обратной стороны и недопущением технологических непроваров.

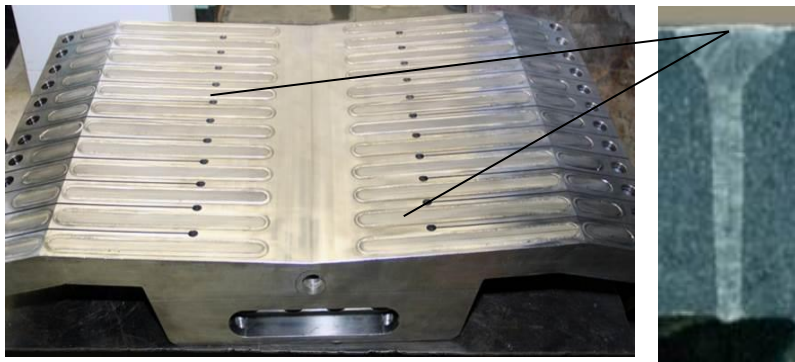


Рисунок 15. Внешний вид несущей конструкции первой стенки ИТЭР и поперечный макрошлиф шва

В таких условиях наиболее приемлемым способом получения сварного соединения является лучевая сварка «на весу». Используя результаты исследований, полученных в данной работе, определили режимы сварки, обеспечивающие

требуемое качество сварных соединений. Изготовлены экспериментальные макеты защитного блока и несущей конструкции первой стенки модуля blankets ИТЭР (рис. 15).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана аналитическая модель движения жидкого металла в сварочной ванне, в соответствии с которой получена формула, для определения минимально допустимой скорости сварки, обеспечивающей качественное формирование швов «на весу» в нижнем положении в зависимости от ширины шва, диаметра парогазового канала и физических свойств свариваемых материалов.

2. Установлено, что при ЭЛС на высоких скоростях материалов с низкой теплопроводностью, когда $vd/2a > 1$, использование модели движущегося цилиндрического источника теплоты в бесконечной пластине позволяет с точностью до 15% определять параметры сварки.

3. Разработана расчетная методика определения ширины шва в зависимости от скорости сварки, глубины проплавления, диаметра парогазового канала и физических свойств свариваемых материалов.

4. Выявлена закономерность изменения термического КПД процесса ЭЛС с глубоким проплавлением, показывающая, что термический КПД непрерывно возрастает с увеличением скорости сварки в диапазоне 20...120 м/ч независимо от состава и свойств свариваемых материалов. Показано, что использование моделей движущегося линейного и цилиндрического источника теплоты не позволяет с удовлетворительной точностью рассчитывать термический КПД.

5. Установлено, что при выборе параметров режимов ЭЛС для получения постоянной глубины проплавления должна сохраняться линейная зависимость мощности луча от скорости сварки.

6. Установлено, что с увеличением скорости сварки при ЭЛС уменьшаются потери легирующих элементов в металле шва за счет испарения.

7. Показано, что с увеличением скорости сварки закаливаемых сталей и сплавов уменьшается размер зерна в металле шва, увеличивается твердость и прочность сварных соединений. При сварке сталей, не испытывающих фазовых превращений, изменение скорости сварки не оказывает влияния на структуру и механические свойства сварных соединений.

8. Разработана и внедрена технология ЭЛС неповоротных стыков переменной толщины элементов энергетических установок из титанового сплава 5В и несущей конструкции первой стенки ИТЭР из стали аустенитного класса 316L(N).

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Журнальные статьи из списка ВАК

1. Влияние скорости сварки на свободное формирование шва при ЭЛС со сквозным проплавлением / Терентьев Е.В., Драгунов В.К., Слива А.П., Щербаков А.В. // Сварочное производство. 2014. №2. – С. 25–29.

2. Применение лазерной спектроскопии для определения химического состава металла / Драгунов В.К., Терентьев Е.В., Гончаров А.Л., Овечников С.А., Портнов М.А. // Технология металлов. 2013. №3. – С. 41–43.

Остальные публикации

3. Исследование сварных соединений разнородных сталей деталей магнитопровода / Гончаров А.Л., Слива А.П., Портнов М.А., Терентьев Е.В. Грибков М.С. // Вестник ПНИПУ: Машиностроение, материаловедение. 2013. Том 15 №4. – С. 74-87.

4. Выбор минимально допустимой скорости сварки при ЭЛС со сквозным проплавлением / Терентьев Е.В., Слива А.П. // Вестник ПНИПУ: Машиностроение, материаловедение. 2013. Том 15 №4. – С. 40-47.