

На правах рукописи



Атаманюк Василий Иванович

**РАЗРАБОТКА ПУТЕЙ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ
СТАБИЛЬНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШВОВ ПРИ СВАРКЕ
НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

Специальность 05 03 06 – Технологии и машины сварочного
производства

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

29 МАЙ 2008

Волгоград – 2008

Работа выполнена на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства»
Волгоградского государственного технического университета

Научный руководитель заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
ЛЫСАК Владимир Ильич.

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор,
СИДОРОВ Владимир Петрович.

кандидат технических наук,
КИРИЛИЧЕВ Николай Васильевич.

Ведущая организация ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратура», г Волгоград

Защита состоится 26 июня 2008 г в 12 00 на заседании диссертационного совета
Д 212 28 02 при Волгоградском государственном техническом университете по адре-
су 400131, г Волгоград, пр Ленина, 28, ауд 209

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского государст-
венного технического университета

Автореферат разослан «23» мая 2008 г

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кузьмин С В

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап развития техники обуславливает повышение требований к производительности процесса и формированию шва при сварке неплавящимся электродом

Изучению дугового разряда в инертных газах, а также его взаимодействию со свариваемым материалом посвящены работы *Ерохина АА*, *Петрова АВ*, *Сидорова ВП*, *Пентегова ИВ*, *Ковалева ИМ*, *Селяницкова ВН*, *Косовича ВА*, *Латина ИЕ*, *Savage WF*, *Кианпраа VP*, *Chihoski RA*, *Key JF*, *Суздалева ИВ*, *Руссо ВЛ* и многих других

Одной из причин, сдерживающих применение аргонодуговой сварки металлов большой толщины (свыше 5мм), является ее низкая производительность, ограниченная сравнительно невысокой тепловой эффективностью дуги и нарушением формирования швов (возникновением пор, подрезов, «претяжек», наплывов и т.п.) при сварке на высоких значениях погонной энергии. Последнее, по данным *Ковалева ИМ*, связано с чрезмерным силовым воздействием дугового разряда на расплавленный металл сварочной ванны, квадратично возрастающим с увеличением сварочного тока. По данным *Кудоярова БВ*, *Потехина ВП*, *Руссо ВЛ*, *Суздалева ИВ* и др. на величину силового воздействия дуги существенное влияние оказывают также состав защитного газа и форма рабочего участка электрода. Так, применение гелия и его смесей с аргоном повышает проплавливающую способность дуги, однако данные о влиянии состава смеси на силовое воздействие дуги и формирование шва в литературе отсутствуют. Не раскрыты также механизмы влияния конструкции неплавящихся электродов на формирование швов, отсутствуют систематизированные данные о взаимосвязях условий протекания катодных процессов и состава инертной атмосферы с распределением давления дуги на сварочную ванну, характер которого, по данным *Ерохина АА*, в значительной мере определяет гидродинамические процессы в сварочной ванне.

Среди известных способов (работы *Прилуцкого ВП*, *Замков ВП*, *Паршина СГ*) повышения производительности сварки неплавящимся электродом следует выделить также применение активирующих флюсов и добавок галогеносодержащих газов, обеспечивающих контрагирование дугового разряда, и, как следствие, высокую концентрацию вводимой энергии. В тоже время применение активирующих флюсов неизбежно сказывается на стойкости катодов и неэффективно при токах свыше 275А, вследствие того, что пары флюса уносятся из дуги и перестают влиять на ее строение.

В связи с выше изложенным, для разработки путей и средств повышения производительности и стабильности процесса сварки неплавящимся электродом необходим комплексный подход, учитывающий влияние состава защитного газа, режима горения дуги и конструкции неплавящихся электродов на тер-

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., профессору кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ВолгГТУ Латину ИЕ за участие в формировании направления и методологической подготовке исследований, а также за оказанную помощь при их анализе

мосиловое воздействие разряда на расплавленный металл сварочной ванны, определяющих проплавляющую способность дуги и качество формирования сварного шва

Целью работы является повышение производительности сварки неплавящимся электродом, качества формирования швов и внедрение новых технологических процессов, основанных на изучении термосилового воздействия дуги на металл сварочной ванны

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**

1 Обобщены существующие представления о механизмах нарушения формирования швов при сварке неплавящимся электродом в инертных газах.

2 Исследовано влияние состава аргоно-гелиевой смеси газов и конструкции рабочего участка неплавящихся катодов на эффективный КПД сварочной дуги и полный КПД проплавления

3 Выявлено влияние концентрации гелия в защитном газе и характера протекания катодных процессов на формирование сварных швов, их форму и размеры

4 Экспериментально и методами математического моделирования показано влияние состава защитного газа и конструкции неплавящегося электрода на характер распределения давления дуги на сварочную ванну

5 Разработаны пути и средства стабилизации формирования сварных швов при сварке неплавящимся электродом дугой постоянного тока на высоких значениях погонной энергии.

Методы исследования. В работе применялись методы физического и математического моделирования, оптической пирометрии, цифровой видео- и фотосъемки, калориметрии, осциллографирование, металлографическис исследования и механическис испытания сварных соединений

Научная новизна работы заключается в установлении взаимосвязей между электрофизическими параметрами, термосиловым воздействием и технологическими свойствами дуги с неплавящимся электродом в смесях инертных газов при сварке на высоких значениях скорости и погонной энергии

1 Установлено, что силовое воздействие дуги на сварочную ванну определяется характером протекания катодных процессов и составом защитного газа. При этом переход от дуги с сосредоточенным катодным пятном к разряду с диффузным катодным пятном, а также увеличение концентрации гелия в аргоно-гелиевой смеси газов снижают силовое воздействие дуги на сварочную ванну в 1,6 – 3,2 раза

2 На основе экспериментов и математического моделирования установлено, что давление дуги с сосредоточенным катодным пятном в аргоне характеризуется большим градиентом в центре сварочной ванны и высоким максимальным значением p_{max} , превышающим при равном токе в 1,5 – 1,8 раза максимальное давление дуги в гелии. Это является одной из причин нарушения формирования швов при аргонодуговой сварке на высоких значениях скорости и погонной энергии

3. Показано, что при сварке в аргоно-гелиевых смесях максимальное давление дуги p_{max} скачкообразно уменьшается на 650 – 1000 Па в диапазоне увеличения концентрации гелия 20 – 25%. Наименьшие значения p_{max} наблюдаются у разряда с диффузным катодным пятном в чистом He, а максимальная тепловая эффективность такой дуги достигается при концентрации гелия 50 – 75%

Практическая ценность. Разработаны на уровне изобретений и полезных моделей новые конструкции неплавящихся электродов и способы сварки, обеспечивающие горение дуги с диффузным катодным пятном на токах свыше 10А, высокую стабильность разряда и, как следствие, качественное формирование швов в широком диапазоне сварочных токов и скоростей сварки. Выработаны методические рекомендации по сварке неплавящимся электродом в аргоно-гелиевых смесях газов на высоких значениях погонной энергии и скорости

Результаты научных исследований легли в основу разработки новых технологических процессов сварки неповоротных стыков толстостенных трубок (труб-токоподводов) электропечей для металлургического завода ЗАО ВМЗ «Красный Октябрь» (г Волгоград) Суммарный экономический эффект от внедрения разработанных технологий составил более 400 тыс рублей, доля автора – 20%

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях «Современные материалы и технологии – 2002г» (Пенза, 2002г), «Аэрокосмическая техника и высокие технологии 2002» (Пермь, 2002г), «МАТИ – Сварка XXI века» (Москва, 2003г), «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства» (Тольятти, 2006г.), «Инновационные технологии в обучении и производстве» (Камышин, 2001-2003гг), а также на VI, VII, IX и X региональных конференциях молодых исследователей Волгоградской области, ежегодных внутривузовских конференциях ВолГТУ (2001-2005гг) и научных семинарах кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ВолГТУ, г Волгоград

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 22 печатные работы, среди которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, а также 3 патента РФ на изобретения и патент РФ на полезную модель

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложения Работа содержит 154 страницы, 79 рисунков и 8 таблиц Список литературы содержит 109 наименований

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности предмета исследований, формулируются цели и задачи диссертационной работы, определяется практическая значимость полученных результатов

В первой главе проведен подробный литературный анализ, рассмотрены основные проблемы, возникающие при сварке неплавящимся катодом, а также

возможные пути их решения. Показано, что при изучении процессов сварки в инертных газах неплавящимся электродом вопрос о влиянии силового воздействия дуги и ее пространственной устойчивости на качество формирования сварного соединения имеет существенное значение. Выявлено, что состав защитного газа и конструкция рабочего участка неплавящегося катода оказывают существенное влияние на указанные свойства дугового разряда.

Показано, что имеющихся данных по сварке неплавящимся электродом на высоких скоростях и значениях погонной энергии недостаточно для эффективного управления качеством формирования шва.

Во второй главе приведены применяемые методики оценки проплавляющей способности дуги в аргоне, гелии и их смесях, силового и теплового воздействия разряда на металл сварочной ванны, нагрева неплавящихся электродов при сварке.

В третьей главе представлены результаты исследований проплавляющей способности дуги и формирования швов при сварке в аргоне, гелии и их смесях. Показано, что для условий сварки в аргоне критическая величина тока, выше которой образуются значительные дефекты формирования шва (наплывы, газовые полости и «перетяжки», грубая чешуйчатость), зависит от скорости сварки (рис. 1).

Другим важным фактором, определяющим качество формирования швов, является характер протекания катодных процессов. Так, для традиционных катодов с конической заточкой рабочего участка, горение дуги характеризуется сильным сжатием катодного пятна и формированием мощного катодного потока, обуславливающего высокое силовое воздействие дуги на металл (рис. 2 линия 1). Дуга с диффузным катодным пятном, наблюдаемая, например, при использовании полых катодов, отличается значительно меньшими показателями такого воздействия (рис. 2 линия 2). При прочих равных условиях F_0 в аргоне оказывается существенно большим, чем в гелии (рис. 2 линии 3,4). В целом для дуг, горящих с сосредоточенным катодным пятном в аргоне, коэффициент, характеризующий скорость нарастания F_0 с увеличением сварочного тока $k_{Ar}=5,12 \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$, в гелии — $k_{He}=3,6 \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$. Для дуг с диффузным катодным пятном, соответственно, $k_{Ar}=3,27 \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ и $k_{He}=1,6 \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$. Установлено, что при изменении конструкции неплавящегося катода и соотношения компонентов газовой смеси отношение $k_F = \frac{k_{\text{max}}}{k_{\text{min}}}$, характеризующее изменение скорости нарастания силового воздействия с ростом сварочного тока, достигает $k_F=3,2$.

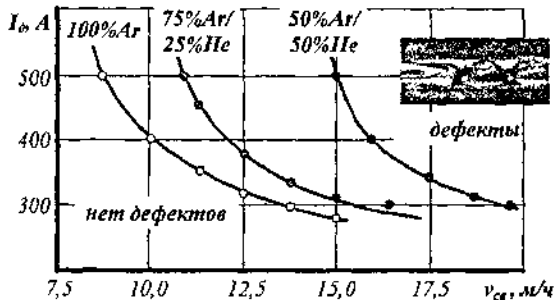


Рис. 1 — Зависимость критического тока I_0 от скорости сварки $v_{св}$. $\alpha=45^\circ$, $d_0=4\text{ мм}$, $d_{np}=0,5\text{ мм}$

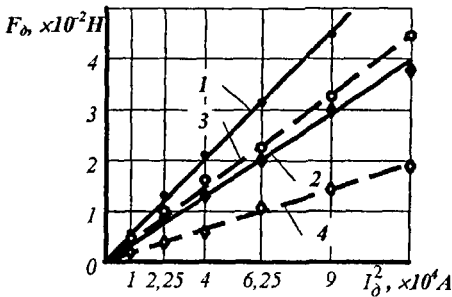


Рис 2 — Влияние характера протекания катодных процессов, защитного газа и силы тока I_0 на силовое воздействие дуги F_d . 1, 3 — сосредоточенное и 2, 4 — диффузионное катодное пятно, 1, 2 — Ar, 3, 4 — He

ванны и захлопывание газовых полостей в корне шва. Аналогичная картина, при более низком подпоре расплавленного металла и интенсивности его движения, наблюдается в смеси газов с содержанием He до 50%. Дальнейшее повышение концентрации гелия в смеси оказывает стабилизирующее воздействие на формирование шва, а наилучшее его качество достигается при сварке в чистом He. Течение расплава замедляется, размеры сварочной ванны существенно увеличиваются, а кратер имеет незначительный прогиб.

Применение полых катодов обеспечивает удовлетворительное формирование сварного шва во всем исследуемом диапазоне токов и соотношений компонентов аргоно-гелиевой смеси.

Увеличение концентрации гелия в защитном газе приводит к росту площади проплавления при использовании электродов любой конструкции. Однако, если для диапазона токов 100–250 А это возрастание носит в целом монотонный характер (рис. 3), то при $I_0 \geq 300 \text{ А}$ зависимость $S_{np} = f(\text{He})$ имеет выраженный минимум при концентрации гелия в смеси 25% (рис. 4). Этот эффект наиболее выражен в случае использования полых катодов и композиционных электродов с сердечником из вольфрама и медной плакирующей оболочкой. В тоже время для дуги с традиционным катодом, заточенным на конус, снижение S_{np} менее заметно.

По всей видимости, увеличение содержания гелия в смеси газов инициирует два влияющих на изменение свойств сварочной дуги процесса: увеличение мощности разряда, с одной стороны, и снижение его газодинамического воздействия, затрудняющего эффективность теплообмена, — с другой. На начальном этапе роста концентрации гелия в смеси снижение газодинамического воздействия дуги с диффузным

Образование вышеуказанных дефектов напрямую определяется величиной силового воздействия дуговой дуги и, как следствие, характером течения металла сварочной ванны. Так, при сварке в чистом аргоне на токах выше критических происходит интенсивное перемешивание расплава, вытеснение его из-под дуги, вплоть до дна ванны, обратное натекание металла в хвостовой части

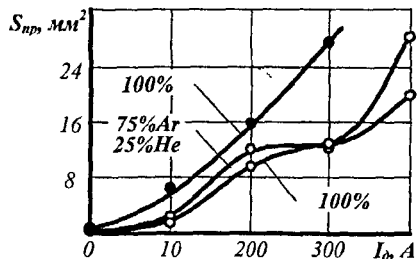


Рис 3 — Зависимость площади проплавления S_{np} от силы тока I_0 . $\alpha = 45^\circ$, $d_s = 4 \text{ мм}$, $d_{np} = 0,5 \text{ мм}$, $v_{св} = 20 \text{ м/ч}$

катодным пятном оказывает более значимое влияние на нагрев металла, чем рост мощности разряда, что приводит к снижению проплавляющей способности. В тоже время, с дальнейшим изменением соотношения компонентов смеси в сторону увеличения содержания гелия влияние роста мощности дуги и связанного с ним повышения проплавляющей способности носит преобладающий характер. В случае применения электродов с конической заточкой уровень силового воздействия дуги, несмотря на рост концентрации гелия, остается достаточно высоким, что объясняет незначительное снижение проплавляющей способности дуги на начальном этапе.

В пользу этого говорят результаты проплавлений, выполненных на токе 200 А. При таких значениях I_0 газодинамическое воздействие дуги на металл малозначимо и рост концентрации гелия не существенно сказывается на абсолютной величине F_0 . В результате площадь проплавлений с увеличением концентрации гелия непрерывно возрастает, а снижение проплавляющей способности дуги при его 25%-ном содержании отсутствует.

Для всех рассмотренных конструкций электродов характерно наличие выраженного максимума эффективного КПД η_u , соответствующего 75–80% концентрации He. Значение η_u в зоне максимума в некоторой степени зависит от параметров рабочего участка катода. Наибольшее значение η_u достигает 0,77 для композиционных электродов и катодов с заточкой рабочего участка на 90° , наименьшее для полых катодов – 0,73. Наличие максимума в диапазоне 75–80% концентрации He объясняется скачкообразным ростом напряжения на дуге и, по данным Липина И Е., ее анодной области. Последующее снижение значений η_u связано с тем, что расчетные значения мощности дуги увеличиваются быстрее, чем мощность, фактически поступающая в металл. Полный КПД проплавления характеризуется минимумом при 25% концентрации He, что согласуется с результатами исследований проплавляющей способности дуги.

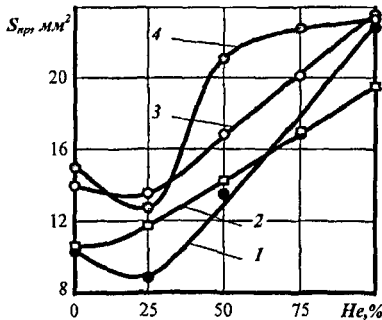


Рис 4 – Зависимость площади проплавления $S_{пр}$ от соотношения компонентов аргоно-гелиевой смеси композиционный электрод (1), $\alpha = 45^\circ$, $d_0 = 4$ мм, $d_{пр} = 0,5$ мм, (2, 3), полый катод (4), $I_0 = 300$ А (1, 3), $I_0 = 200$ А (2), $I_0 = 400$ А (4), $v_{св} = 20$ м/ч

Исследования показали, что при одном значении F_0 можно получить различные результаты с точки зрения качества формирования сварного шва. Так силовое воздействие порядка $4,4 \times 10^2$ Н может реализовываться при сварке дугой с сосредоточенным катодным пятном в аргоне и гелии на токах 300 и 350 А соответственно. Однако в первом случае сварной шов имеет множество дефектов, а во втором – наблюдается его качественное формирование. Таким образом, величина силового воздействия разряда на расплавленный металл не является единственным фактором, определяющим формирование сварного шва. Существенное значение, по видимому, имеют также условия горения

дуги, определяющие характер распределения ее давления на поверхности сварочной ванны

Несмотря на очевидные преимущества сварки с использованием полых катодов, последние обладают рядом недостатков, основными из которых являются сложность изготовления и достаточно высокие значения $I_{мин}$, когда возможно горение дуги с диффузным катодным пятном. В ходе исследований разработана принципиально новая конструкция электрода (рис 5), обладающего преимуществами полого катода, и способного реализовывать их в широком диапазоне токов (патент РФ на полезную модель №63279)

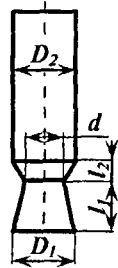


Рис 5 – Конструкция электрода с рабочим участком в виде сопряженных конусов

Экспериментально установлено, что применение электрода предложенной конструкции снижает вероятность образования подрезов, наплывов, газовых полостей и улучшает формирование швов не зависимо от соотношения компонентов аргоно-гелиевой смеси.

В таблице 1 указаны ориентировочные диапазоны рабочих токов и геометрических параметров рабочего участка предлагаемого катода, которые варьируются в зависимости от соотношения аргона и гелия в применяемом защитном газе

Таблица 1

Конструктивные параметры нового электрода и диапазоны его рабочих токов

Диаметр исходного вольфрамового прутка D_2 , мм	Диаметр малого основания конуса d , мм	Диаметр большого основания конуса D_1 , мм	Высота конуса l_1 , мм	Диапазон рабочих токов, А
1	0,4–0,7	0,65–1,0	1,0–1,5	10–24
2	0,7–1,3	1,0–2,0	1,5–2,5	24–94
3	1,35–2,0	2,0–3,0	2,0–3,5	94–210
4	2,1–2,85	3,0–4,0	3,0–4,5	210–380
5	3,0–3,7	4,0–5,0	4,0–6,0	380–590
6	3,9–4,65	5,0–6,0	5,0–6,5	590–850
7	4,9–5,7	6,0–7,0	6,0–7,5	850–1150

В четвертой главе представлена методика расчетно-экспериментальной оценки эпюр давления дуги на сварочную ванну, в соответствии с которой экспериментально определяется профиль сварочной ванны, а распределение давления строится расчетными методами, учитывающими гидростатическое давление в сварочной ванне, распределение температуры в ней, силы поверхностного натяжения, магнитное поле и его взаимодействие с металлом. В основе указанной методики лежит математическая модель, базирующаяся на анализе свободной поверхности и дна сварочной ванны, получаемых экспериментальным путем.

Для единичного объема расплавленного металла на поверхности сварочной ванны испытывающего действие сил магнитной природы и давления II -ой закон Ньютона принимает следующий вид.

$$\rho \times \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} = \bar{f}_{\text{маг}} + \bar{f}_{\text{давл}}$$

$$\text{или } \rho \times \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} = -\bar{\nabla} p + \rho \times \bar{g} + \frac{1}{c} [\bar{j} \times \bar{B}] \quad (1)$$

Уравнение, позволяющее рассчитывать распределение давления на сварочную ванну, основывается на балансе сил вдоль z -координаты для стационарной жидкой проводящей среды во внешнем гравитационном поле с учетом магнитного поля.

$$\rho \times u \times \frac{\partial \omega}{\partial r} + \rho \times \omega \times \frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho \times q - \frac{\partial}{\partial z} \times \frac{B^2}{8\pi} + \frac{1}{4\pi} \times \left(B_x \times \frac{\partial B_z}{\partial x} + B_y \times \frac{\partial B_z}{\partial y} \right) \quad (2)$$

Уравнение (2) решали с учетом выполнения уравнений Максвелла. Также учитывался температурный перегрев сварочной ванны (на 300–500K), приводящий к градиенту объемной плотности, характеризующейся температурным коэффициентом объемного расширения.

Расчет проводился с учетом пространственного распределения плотности тока (3) совместно с магнитным полем при заданных граничных условиях, которые диктуются условиями в плазме. При этом, параметры плазменного столба в свою очередь зависят от $J(\bar{r})$ и \bar{B} в аноде

$$j(r) = J_0 \times \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} \times \left(\frac{2r}{R_I} \right)^2, & 0 \leq r \leq \frac{R_I}{2} \\ \frac{1}{2} \times \left(2 - \frac{2r}{R_I} \right)^2, & \frac{R_I}{2} \leq r \leq R_I \\ 0, & r > R_I \end{cases} \quad (3)$$

Считая, что в точке $r = 0$ поле конечно, магнитное поле в этом случае учитывается в виде:

$$B_\varphi(r) = \frac{\mu_0 \times J_0}{r} \times \begin{cases} \frac{r^2}{2} \times \left[1 - \left(\frac{2r}{R_I} \right)^2 \right], & r \leq \frac{R_I}{2} \\ r^2 \times \left[1 - \frac{4r}{3R_I} + \frac{r^2}{2R_I^2} \right] - \frac{R_I^2}{48}, & \frac{R_I}{2} \leq r \leq R_I \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, на поверхности сварочной ванны давление плазменного столба определяется вкладом рассмотренных выше факторов

$$p_{пл} = C - \rho_0 \times g \times H - \rho_0 \times g \times \bar{\beta} \times \left. \frac{\Delta T}{\Delta z} \right|_0 \times \left(\frac{H^2}{2} - hH \right) + p_{\sigma} + p_B^{пл} + p_B^M \quad (5)$$

Разработанная математическая модель позволяет построить кривые распределения давления на поверхности сварочной ванны на основе баланса сил вдоль оси неплавящегося катода для стационарной жидкой токопроводящей среды во внешнем гравитационном поле с учетом магнитного поля

Для построения профиля сварочной ванны разработана методика, основанная на применении вставок-индикаторов из тугоплавких металлов В пластине, подвергаемой проплавлению, в плоскости перпендикулярной поверхности материала находились вставки из вольфрамовой проволоки (рис 6), диаметром 0,5мм с шагом 1,25мм

Индикаторная пластина выполнялась сваркой взрывом в виде биметалла с армированием вольфрамовой проволокой. Получаемый биметалл по своим механическим и теплофизическим свойствам сопоставим с исходным материалом, в качестве которого использовали пластины из стали 08Х18Н10Т

Полученная пластина разрезалась на образцы необходимого размера и к ним приваривались входные и выходные планки. Размеры образцов и входных-

выходных планок выбирался таким образом, чтобы исключить влияние теплонасыщения пластины на результаты проплавления

Таким образом, достигалось устранение сколь-нибудь значимых искажений формы

профиля сварочной ванны связанных с тепловым барьером и нарушением пространственной стабильности дуги (при использовании вставок из тугоплавких пластин или цилиндров)

При выполнении проплавлений верхняя часть вставок, охваченная кратером сварочной ванны, оплавлялась под прямым воздействием высокотемпературной плазмы, очерчивая тем самым форму прогиба (кратера). При скоростях сварки до 20м/ч действительная толщина жидкой прослойки $\delta'_{жс}$ определялась с учетом растворения вольфрама в расплаве сварочной ванны со скоростью 0,5мм/с (Размышляев А Д)

$$\delta'_{жс} = \delta_{жс} + \Delta = \delta_{жс} + \frac{v_p \times L}{v_{св}}, \quad (6)$$

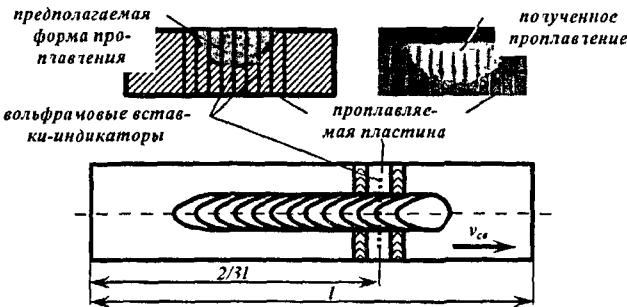


Рис 6 - Схема расположения вольфрамовых вставок-индикаторов в проплавляемом образце

где $\delta_{эс}$ — толщина прослойки, полученная на макрошлифах, мм, v_p — средняя скорость растворения вольфрамовых вставок-индикаторов, мм/с, $v_{св}$ — скорость сварки, мм/с, L — расстояние от оси электрода до сечения с тугоплавкими вставками, мм.

При скоростях более 20м/ч фронт плавления и, соответственно, кристаллизации распространялся значительно быстрее, чем происходило растворение вольфрамовых индикаторов, и заострением вставок в результате их растворения пренебрегали. По величине неоплавленной части вставок-индикаторов определялась толщина жидкой прослойки основного металла. На основе анализа макрошлифов оценивали профиль сварочной ванны, координаты которого служили для расчета при помощи математической модели

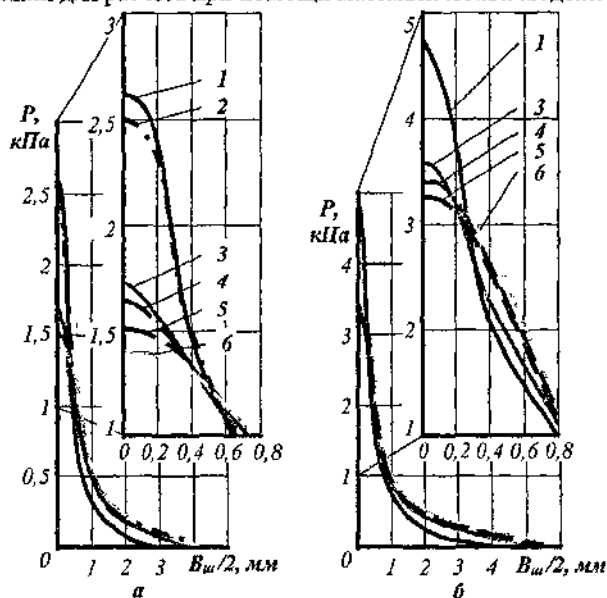


Рис. 7 — Влияние соотношения компонентов защитного газа на распределение давления дуги с сосредоточенным катодным пятном $\alpha = I_0 = 300A$, $\beta = I_0 = 400A$, 1 — 100%Ar, 2 — 80%Ar20%He, 3 — 75%Ar25%He, 4 — 50%Ar50%He, 5 — 25%Ar75%He, 6 — 100%He, $\alpha = 45^\circ$, $d_s = 4mm$, $d_{эп} = 0,5mm$

показывает, что в случае сварки в аргоне с использованием катода с конической заточкой рабочего участка максимальное давление достигает значения $P_{max} = 2630Pa$ при токе дуги 300A. При удалении от оси дуги происходит резкое снижение давления (2390Pa при $V_w/2 = 0,2mm$ и 1470Pa при $V_w/2 = 0,4mm$), которое близко к нулю в зоне выхода линии сплавления на поверхность свариваемого металла.

В ходе экспериментов концентрация гелия в смеси изменялась от 0 до 100%, а общий расход газов составлял $Q_2 = 20л/мин$. Расстояние между катодом и проплавляемой пластиной устанавливалось $l = 2mm$. Анодом служила пластина с индикаторными вставками толщиной $\delta = 10mm$.

В качестве катодов использовали электроды с заточкой на конус 45° , полый катод, а также разработанный электрод с рабочим участком в виде сопряженных усеченных конусов.

Анализ полученных данных (рис. 7)

Существенно меняется характер распределения давления на поверхности сварочной ванны при увеличении концентрации гелия в аргоно-гелиевой смеси, причем наблюдаемое снижение максимального давления носит нелинейный характер. Так, при 20% концентрации гелия в смеси отмечается снижение максимального давления до 2500 Па , что составляет 95% от значения аналогичного показателя в аргоне, а при 25% $\text{He} - p_{\text{max}}$ принимает значение 1700 Па (или 65% от значения при сварке в аргоне). В чистом гелии p_{max} падает до 1430 Па на фоне некоторого повышения давления в периферийной зоне сварочной ванны, что позволяет, с определенным приближением, говорить о выравнивании эпюры давления дуги.

Таким образом, при концентрации гелия в защитном газе в диапазоне 20 – 25% происходит скачкообразное снижение максимального значения и качественное изменение характера распределения давления на поверхности сварочной ванны.

Такая трансформация эпюры давления является одной из причин, вызывающих появления минимума на кривой глубины проплавления, описанного выше. Связано это с увеличением толщины жидкой прослойки металла, и как следствие, ухудшением условий теплопередачи в свариваемый металл. Аналогичная картина наблюдается и при больших значениях сварочного тока.

Однако добавление 25% He в смесь, несмотря на резкое снижение максимального давления и его благоприятное распределение на поверхности ванны, не приводит к сколь-нибудь значимому улучшению формирования сварного шва. Причиной этого является уменьшение объема расплавленного металла сварочной ванны, вследствие чего, несмотря на пониженное давление дуги, интенсивное движение расплава, вызывает появление дефектов. Нормализация формирования сварного шва происходит при концентрации He близкой к 50%, когда объем расплавленного металла сварочной ванны и давление на ее поверхности достигают некоторого баланса.

Показано, что увеличение тока дуг в аргоне свыше 300 А при использовании катодов, заточенных на конус, не является целесообразным, т.к. сильное заглибление дугового разряда в сварочную ванну приводит к появлению значительного подпора расплавленного металла. Высокая величина p_{max} приводит к разделению металла сварочной ванны, движению и кристаллизации расплава отдельными порциями, вплоть до появления сплошного несплавления, выходящего на поверхность проплавления.

Для дуги с полым катодом в аргоне также характерна высокая концентрация давления, однако, максимальная величина не превышает 2620 Па при токе 400 А и 3530 Па при 500 А , что значительно ниже аналогичного показателя для катода с традиционной формой рабочего участка.

В случае сварки полым катодом в аргоно-гелиевых смесях на эпюрах можно выделить области относительно равного давления (отклонение от p_{max} не более 10%), что также наблюдается, хоть и в меньшей степени, при использовании традиционных катодов с заточкой на конус на токах более 400 А . Такое изменение в распределении давления дуги можно объяснить влиянием свойств

защитного газа на характер разогрева неплавящегося катода. Так, установлено, что при увеличении концентрации гелия происходит выравнивание температуры нагрева рабочего участка, увеличение площади активного пятна, снижение плотности тока в нем и, как следствие, концентрации катодного плазменного потока.

При использовании полых катодов рост тока дуги мало сказывается на качестве формирования сварного шва и во всем исследуемом его диапазоне и диапазоне изменения соотношения компонентов защитного газа получены качественные проплавления.

Однако из-за сложности конструкции полого катода и существенных затрат при изготовлении сварка с такими электродами не нашла широкого практического применения. При использовании электрода с рабочим участком в виде сопряженных конусов характер катодных процессов и качество формирования сварного соединения аналогичны полученным при сварке с полым катодом. Несколько более высокие значения p_{max} объясняются особенностями привязки и формы диффузного катодного пятна на рабочем участке разрабатанного электрода и полого катода.

Таким образом, применение электродов новой конструкции для сварки в инертных газах оправдано не только с точки зрения расширения диапазона сварочных токов, но и качества формирования шва. Полученные результаты хорошо согласуются с данными главы 3, согласно которым, изменяя соотношение компонентов защитного газа и форму рабочего участка катода, можно влиять на силовое воздействие дуги.

Зависимости максимального давления от процентного соотношения компонентов аргоно-гелиевой смеси представлены на рис. 8.

Таким образом, на движение расплава в сварочной ванне, а в конечном итоге и на качество полученного соединения, определяющее влияние оказывает

характер распределения давления на поверхность свариваемого материала. Наличие острого пика эпюры давления при сварке заточенным на конус катодом, приводит к значительному подпору металла и образованию связанных с этим дефектов. Избежать этого можно достиганием более пологой эпюры давления, что, согласно полученным результатам, возможно двумя путями: применением электродов, обеспечивающих горение дуги с диф-

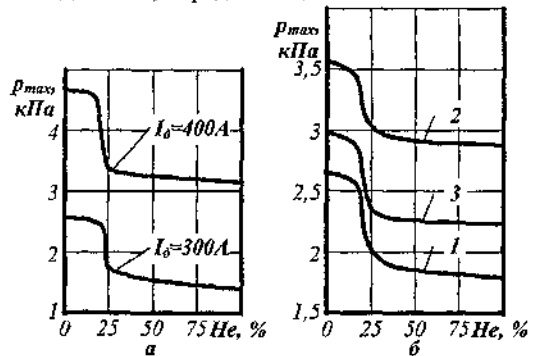


Рис. 8 - Пиковое значение давления дуги p_{max} в сосредоточенным (а) и диффузным (б) катодным пятном в зависимости от концентрации гелия в защитном газе: а - $\alpha = 45^\circ$, $d_s = 4$ мм, $d_{np} = 0,5$ мм, б - полый катод (1, 2) и электрод с рабочим участком в виде сопряженных конусов (3), 1, 3 - $I_0 = 400 A$, 2 - $I_0 = 500 A$.

фузным катодным пятном или увеличением концентрации гелия в защитном газе для сварки с сосредоточенным катодным пятном

В пятой главе рассмотрены варианты применения разработанных технологий сварки неплавящимся электродом в смесях инертных газов. Приведены результаты внедрения технологии сварки неповоротных стыков толстостенных трубошин (труб-токоподводов) электропечей для металлургического завода ЗАО ВМЗ «Красный Октябрь». Суммарный экономический эффект от внедрения разработанных технологий составил более 400 тыс. рублей, доля автора – 20%

Общие выводы

1. Установлено, что при сварке в аргоне неплавящимся электродом с конической заточкой рабочего участка критическая величина скорости сварки, выше которой образуются значительные дефекты формирования шва, зависит от тока и имеет минимум 10 – 11 м/ч при величине тока 390 – 420 А. При увеличении тока выше указанного критическая скорость сварки возрастает благодаря росту объема сварочной ванны, стабилизирующему формирование шва, а при снижении тока – в результате уменьшения силового воздействия дуги

2. Показано, что управлять силовым воздействием дуги на металл сварочной ванны и формированием шва можно путем изменения состава защитного газа и конструкции электрода. Так для катодов с заточкой рабочего участка на конус силовое воздействие дуги в аргоне в 1,4 раза выше, чем в гелии, для дуг с диффузным катодным пятном – в 2 раза. Переход от дуги с сосредоточенным катодным пятном в аргоне к разряду в гелии с диффузным течением катодных процессов снижает коэффициент, характеризующий интенсивность нарастания F_0 с увеличением тока, в 3,2 раза в диапазоне $5,12 \times 10^{-7} - 1,6 \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$

3. Установлено, что распределение давления дуги на поверхности сварочной ванны зависит от процентного соотношения компонентов аргоно-гелиевой смеси и характера протекания катодных процессов, определяемого конструкцией рабочего участка неплавящихся электродов. Увеличение концентрации гелия в защитном газе ведет к снижению максимального значения и выравниванию давления в периферийной зоне сварочной ванны

4. Показано, что решающим фактором качественного формирования сварного шва является не интегральная величина силового воздействия дугового разряда, а значение максимального давления дуги на сварочную ванну, определяющее характер его распределения в целом. Высокий градиент давления, присущий дуге с сосредоточенным катодным пятном в аргоне, является главной причиной нарушения формирования швов при сварке сильноточной дугой

5. Зависимости эффективного КПД от соотношения компонентов аргоно-гелиевой смеси имеют выраженный максимум, соответствующий 75 – 80% концентрации He. Наибольшее значение η_e достигается при использовании композиционных электродов и катодов с конической заточкой рабочего участка, наименьшее – полых катодов

6 Показано, что с увеличением концентрации гелия в защитном газе до 25% наблюдается значительное снижение проплавляющей способности дуги, сопровождаемое резким уменьшением максимального давления на сварочную ванну. Данный эффект отсутствует при сварке на токах до 250А, что связано с низким уровнем силового воздействия дуги на металл.

7 Разработаны на уровне изобретений и полезных моделей новые конструкции неплавящихся электродов и способы сварки, обеспечивающие горение дуги с диффузным катодным пятном в широком диапазоне токов (10–1000А), высокую стабильность разряда и, как следствие, качественное формирование швов в широком диапазоне сварочных токов и скоростей сварки.

8 Выработаны методические рекомендации по сварке неплавящимся электродом в аргоно-гелиевых смесях газов на высоких значениях погонной энергии и скорости. Показано, что хорошее формирование швов при сварке сильноточной дугой с конической заточкой рабочего участка достигается применением аргоно-гелиевых смесей газов при концентрации гелия более 50%, а электродами, обеспечивающими горение дуги с диффузным катодным пятном – при любом соотношении газов. При этом наилучшие показатели формирования швов и тепловой эффективности процесса обеспечиваются в первом случае при сварке в чистом гелии, а во втором – при концентрации He 50 – 75%.

Основные положения диссертационного исследования
опубликованы в работах:

1 * Лапин, И.Е. Стойкость и технологические свойства неплавящихся электродов при сварке алюминиевых сплавов дугой переменного тока с прямоугольной формой импульсов / И.Е. Лапин, А.В. Савинов, А.Н. Потапов, В.И. Атаманюк, В.И. Лысак // Сварочное производство – 2005 – №1 – С 3 – 7

2 Савинов, А.В. Влияние состава защитного газа на тепловые условия работы неплавящихся электродов / А.В. Савинов, В.И. Атаманюк, И.Е. Лапин, В.И. Лысак, А.Б. Маркин // Сварочное производство – 2007 – №6 – С 10 – 14

3. Атаманюк, В.И. Моделирование нагрева неплавящихся электродов с учетом катодных процессов / В.И. Атаманюк, И.Е. Лапин, В.И. Лысак, А.В. Савинов, Л.В. Хоперскова // Известия ТулГУ – 2005 – Выпуск 3. – С 174 – 180

4 Пат. 2232668 Российская Федерация, МКИ В 23 К9/16 Способ сварки в защитных газах с принудительным охлаждением шва и зоны термического влияния / Власов С.Н., Лапин И.Е., Савинов А.В., Лысак В.И., Потапов А.Н., Атаманюк В.И., заявитель и патентообладатель Волгоградский гос техн ун-т – заявл 04.11.02 – опубл 20.07.04, Бюл № 20

5 Пат 2254214 Российская Федерация, МКИ В 23 К9/167 // В 23 К103 10 Способ дуговой сварки алюминия и его сплавов неплавящимся электродом / Атаманюк В.И., Лапин И.Е., Савинов А.В., Лысак В.И., Потапов А.Н., Власов С.Н., заявитель и патентообладатель Волгоградский гос техн ун-т – заявл 29.12.03 – опубл 20.06.05, Бюл № 17

6 Пат 2318642 Российская Федерация, МКИ В 23 35/02 Неплавящийся электрод для дуговой обработки материалов / Власов С.Н., Лапин И.Е., Савинов

А В, Атаманюк В И, Маркин А Б, заявитель и патентообладатель Волгоградский гос техн ун-т – заявл 26 05 06 – опубл 10 03 08, Бюл № 7

7 Пат на полезную модель 63279 Российская Федерация, МКИ В 23 35/02 Неплавящийся электрод для дуговой обработки материалов / Атаманюк В.И., Лапин И Е, Маркин А Б, Савинов А В, Власов С.Н., заявитель и патентообладатель Волгоградский гос техн ун-т – заявл. 20 12 06 – опубл 27 05 07, Бюл № 15

8 Атаманюк, В.И Влияние инертных газов на вольт-амперные характеристики сварочной дуги с неплавящимся электродом / В И Атаманюк, С Н Власов // VI Межвузовская конференция молодых исследователей Волгограда и Волгоградской области Тезисы докладов Волгоград, 2001 С 93 – 95

9 Власов, С Н Исследование механических свойств сварных соединений элементов сопротивления из сплавов системы Fe-Cr-Al / С Н Власов, В И Атаманюк // VI Межвузовская конференция молодых исследователей Волгограда и Волгоградской области Тезисы докладов Волгоград, 2001 С 80 – 81

10 Атаманюк, В И Влияние состава аргоно-гелиевой смеси газов на стойкость неплавящихся электродов / В И Атаманюк, А В Савинов, И Е Лапин // Международная научно-техническая конференция «Современные материалы и технологии – 2002» Сб статей Пенза, 2002 С 283 – 285

11 Лапин, И Е Особенности тепловых условий работы неплавящихся электродов при сварке цветных металлов и их сплавов в аргоно-гелиевых смесях / И Е Лапин, В И Атаманюк, А В Савинов, А И Поталов // Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2002» Сб тезисов докладов Пермь, 2002 С 159

12 Власов, С Н Исследование и оптимизация механических свойств соединений при сварке неплавящимся электродом прецизионных сплавов / С Н Власов, И Е Лапин, В И Атаманюк // Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2002». Сб тезисов докладов Пермь, 2002 С 68

13 Атаманюк, В И. Вольт-амперные характеристики дуги с неплавящимся электродом в аргоно-гелиевых смесях // В И Атаманюк, А В Савинов, И Е Лапин // Всероссийская конференция «Прогрессивные технологии в обучении и производстве» Сб материалов Камышин, 2002 С 4

14 Атаманюк, В И О качестве катодной очистки при сварке в гелии токолистого алюминия и его сплавов / В И Атаманюк, А В Савинов // VII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области Тезисы докладов Волгоград, 2003 С 148 – 149

15 Савинов, А В Применение неплавящихся электродов с полостью на рабочем участке для сварки алюминия на переменном токе импульсами прямоугольной формы / А В Савинов, И Е Лапин, А Н Поталов, В И Атаманюк // II Всероссийская конференция «Прогрессивные технологии в обучении и производстве» Сб материалов Камышин, 2003 С 68 – 69

16 Власов, С Н К вопросу об исследовании малоамперной дуги, горящей в гелии, методом зондирования / С Н Власов, И Е. Лапин, В И Атаманюк // II

Всероссийская конференция «Прогрессивные технологии в обучении и производстве» Сб материалов Камышин, 2003 С 22 – 24

17 Атаманюк, В И Особенности сварки в гелии неплавящимся электродом тонколистового алюминия / В И Атаманюк, И Е Лапин, С Н Власов // Всероссийская научно-техническая конференция «МАТИ – Сварка XXI» Сб докладов Москва, 2003 С 108 – 110

18 Атаманюк, В И Электрофизические характеристики дуги с вольфрамовым катодом в аргоно-гелиевых смесях / В И Атаманюк // IX Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области Тезисы докладов Волгоград, 2004 С 144 – 145

19 Атаманюк, В И Силовое воздействие дуги с неплавящимся электродом при сварке в аргоно и гелии / В И Атаманюк, А Б Маркин // III Всероссийская конференция «Инновационные технологии в обучении и производстве» Сб материалов Камышин, 2005 С 14

20 Атаманюк, В И Влияние состава защитного газа на тепловые условия работы неплавящихся электродов при сварке дугой постоянного тока / В И Атаманюк, Ш Ч Динь // X региональная конференция молодых исследователей волгоградской области Тезисы докладов Волгоград, 2005 – С 119 – 121

21 Атаманюк, В И. Математическое моделирование распределения давления на поверхности сварочной ванны при сварке неплавящимся электродом / В И Атаманюк, И Е Лапин, А В Савинов, А Б Маркин // «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства» Сб ст. по докладом всероссийской научно-технической конференции – Тольятти, 2006 С 28 – 35

22 Савинов, А В Влияние состава защитного газа на тепловые условия работы неплавящихся катодов / А В Савинов, И Е Лапин, В И. Атаманюк, А Б Маркин // «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства» Сб ст по докладом всероссийской научно-технической конференции – Тольятти, 2006 С 59 – 62

Личный вклад автора. В представленных работах, выполненных в соавторстве с другими исследователями, автором получены и проанализированы результаты исследований тепловых условия работы и стойкости неплавящихся электродов [1 – 3, 10, 11, 20, 22], электрофизических характеристик дуги с вольфрамовым катодом в аргоно, гелии и их смесях [8, 13, 16, 18], а так же определено влияние состава аргоно-гелиевой смеси и условий горения разряда на распределение давления дуги на поверхности сварочной ванны [19, 21], разработаны технические решения по реализации способов сварки [4, 5] и конструкций неплавящихся электродов [6, 7], выполнены исследования качества формирования и механических свойств получаемых соединений [1, 9, 12, 14, 15, 17]

Подписано в печать 22.05.08 г. Заказ № 370 Тираж 100 экз. Печ. л. 1,0
Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Типография РПК «Политехник»
Волгоградского государственного технического университета

400131, г. Волгоград, ул. Советская, 35