

11497431
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

УДК 621.791.014

МАРКУШЕВИЧ ЛГОРЬ СЕМЕНОВИЧ

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ НА ФОРСИРОВАННЫХ РЕЖИМАХ
МОНТАЖНЫХ ШВОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ
КОНСТРУКЦИЙ

05.03.06. - Технология и машины сварочного производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Брянском ордена Знак Почета
институте транспортного машиностроения

Научный руководитель: доктор технических наук,
доцент ЧЕРНЫШОВ Г.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор СТЕКЛОВ О.И.
кандидат технических наук
ТРУХ С.Ф.

Ведущее предприятие ВНИИМонтажспецстрой

Защита диссертации состоится "13" 12 1990 г.
на заседании Специализированного ученого совета К053.15.03 в
Московском государственном техническом университете им. Н.Э.
Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

кз., заверенный печатью,

в библиотеке МГТУ им.

10 1990 г.

В.И.Гирш

М 4 9 7 4 3 1

Объем 1,0 п.л.

Типография МГТУ

им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986 – 1990 г.г. и на период до 2000 года предусматривают резкое повышение эффективности производства. Главным фактором экономического развития должно стать повышение производительности труда, особенно в ключевых отраслях народного хозяйства, в том числе в промышленности.

В современном производстве сварка является одним из ведущих технологических процессов, от степени развития которого зависит эффективность ряда отраслей промышленности. При изготовлении крупногабаритных конструкций из металла толщиной 25 ... 50 мм широкое распространение получила многослойная сварка под флюсом, имеющая значительную трудоемкость. Для повышения производительности разработаны способы сварки с подачей дополнительного присадочного металла, с программированием режима сварки, двумя или тремя дугами. Однако применение перечисленных способов сварки в монтажных условиях сопряжено с определенными трудностями. Перспективным путем повышения производительности сварки толстолистового металла является применение форсированных преимущественно по току режимов. При этом наибольший эффект достигается, если применяются оптимальные режимы, обеспечивающие выполнение швов заданных размеров с максимально возможной для данного способа сварки скоростью. В связи с этим являются актуальными исследования, направленные на разработку технологии сварки толстолистового металла на оптимальных форсированных режимах.

Целью работы является повышение производительности сварки под флюсом за счет применения оптимальных форсированных режимов.

Методы исследования. Влияние потоков металла в сварочной ванне на формирование шва изучали путем анализа характера распределения закристаллизовавшегося металла на внутренней поверхности ванны после удаления из нее расплава методом, защищенным авторским свидетельством № 1227390. Расчеты температурных полей выполняли численным методом на ЭВМ ДВК-2М. Качество сварных соединений оценивали с помощью макроструктурного анализа и стандартных механических испытаний.

Научная новизна. I. Понижение уровня расплава в сварочной

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1497431

Маркушевич И. С. Разработка



вание с ростом скорости сварки или тока, приводящее к образованию подрезов, обусловлено при сварке под флюсом увеличением давления дуги на боковые кромки ванны, в результате чего происходит переход от преимущественно боковых потоков расплавленного металла к донному потоку. Причем это происходит, как и при сварке неплавящимся электродом в аргоне, при равенстве диаметров теплового и силового пятен дуги ($d_r = d_c$), что позволяет критериально оценивать качество формирования шва по параметрам режима сварки.

2. Влияние величины и распределения давления дуги на размеры и качество формирования шва при одно- и двухэлектродной сварке под флюсом с достаточной степенью точности учитывается в трехмерной математической модели распространения теплоты от одиночного и двойного равномерно распределенного эллипсоидного источника путем задания размеров и формы источника, что позволяет вычислить критическую скорость сварки, при которой $d_r = d_c$ и в шве появляются подрезы.

3. В качестве целевых функций для оптимизации режима сварки и размеров разделки кромок при сварке под флюсом целесообразно использовать плотность теплового потока дуги на поверхности теплового пятна (M_1) и площадь поперечного сечения усиления шва (M_2). Оптимальными параметрами режима сварки и разделки кромок, т.е. обеспечивающими сварку металла данной толщины с максимально возможной скоростью, являются параметры, при которых

$$M_1 = M_{1max}, \quad M_2 = M_{2min}$$

и выполняются ограничения, наложенные на отношение диаметров теплового и силового пятен дуги ($d_r/d_c \geq 1,2$) и размеры шва.

Практическая ценность работы заключается в разработке технологии двухэлектродной сварки на форсированных режимах низкоуглеродистой стали толщиной 30 ... 45 мм, обеспечивающей повышение производительности процесса не менее, чем в 2 раза. Результаты диссертационной работы внедрены на Брянском и Белгородском цементных заводах при сварке корпусов вращающихся цементных печей с экономическим эффектом 33 тыс.руб.

Разработанная технология и оборудование могут быть использованы на предприятиях металлургической и химической промышленности для сварки корпусов вращающихся печей, являющихся техно -

логическим оборудованием для производства глинозема и содо-по-
ташных продуктов.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на Всесоюзной научно-технической конференции " Экономия материальных и трудовых ресурсов в сварочном производстве " (Челябинск, 1986 г.), Всесоюзной научно-технической конференции " 100- летие изобретения сварки по методу Н.Г. Славянова и современные проблемы развития сварочного производства (Пермь, 1988 г.) , семинаре кафедры " Машины и автоматизация сварочных процессов" МВТУ им. Н.Э. Баумана (1989 г.) .

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами, общих выводов, приложений и списка литературы. Работа выполнена на 149 страницах машинописного текста , содержит 41 рисунок, 2 таблицы, 93 наименования используемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан обзор путей повышения производительности электродуговой сварки толстолистового металла. Рассмотрены существующие способы сварки и методы оптимизации режима сварки. Для соединения металла толщиной свыше 50 мм получила распространение технология многослойной сварки в узкую разделку кромок, позволяющая повысить производительность процесса за счет уменьшения количества металла, требуемого для заполнения разделки. Повышение производительности сварки металла толщиной 25 - 50 мм достигается при использовании способов и технологий сварки, обеспечивающих увеличение поперечного сечения шва, выполняемого за один проход. Разработаны способы сварки с комбинированной подачей порошкового присадочного металла, с программированием режима сварки, двумя или тремя дугами, горящими в одну ванну. Применение перечисленных способов сварки в монтажных условиях связано с определенными трудностями, обусловленными повышением требований к точности сборки, необходимостью использования флюсовой подушки и некоторыми другими причинами.

Простым и эффективным приемом, позволяющим увеличить сечение шва, является применение форсированных преимущественно по току режимов сварки. Возникающие трудности связаны с необходимостью предотвращения образования дефектов формирования шва ти-

на подрезов и несплавлений. Исследованием причин образования этих дефектов занимались Макара А.М., Патон Б.Е., Мандельберг С.Л., Щетинина В.И., Чернышов Г.Г., Ковтун В.Л., Ковалев И.М., Деев Г.Ф., *Ando K., Akahide K., Probst R., Savage W., Nishi T., Yamamoto T., Shimada W., Nomura H., Bradstreet B.J.* и другие исследователи. Однако в известных физических моделях не установлена с требуемой полнотой причинно-следственная связь между режимом сварки и процессами в системе "дуга-ванна", ответственными за появление подрезов. Для оценки влияния режима сварки на качество формирования шва предложено несколько критериев, в основе которых лежат различные представления о механизме образования подрезов. Все это затрудняет разработку технологии сварки толстолистового металла на форсированных режимах.

Дополнительный резерв повышения производительности сварки толстолистового металла заключается в применении оптимальных форсированных режимов, обеспечивающих выполнение швов заданных размеров с максимально возможной для данного способа сварки скоростью. Для моделирования теплового потока углубленной дуги, характерной для сварки повышенным током, предложены схемы быстро движущегося нормально-эллиптического источника и нормально-эллипсоидного источника. Однако эти схемы не могут быть использованы для оптимизации форсированных режимов сварки, поскольку не позволяют учесть влияние величины и распределения давления дуги на качество формирования шва.

На основании проведенного анализа были определены следующие задачи исследования:

1. Исследовать связь между параметрами режима сварки и процессами в системе "дуга-ванна", ответственными за появление подрезов и несплавлений при сварке под флюсом без разделки и с разделкой кромок.

2. Разработать математическую модель для вычисления размеров зоны проплавления и критериальной оценки качества формирования шва при сварке под флюсом на форсированных режимах.

3. Разработать методику оптимизации форсированных режимов сварки и геометрических параметров разделки кромок.

4. Разработать технологию и модернизировать серийное сварочное оборудование для сварки на форсированных режимах низкоуглеродистой стали толщиной 30 ... 45 мм.

Вторая глава посвящена исследованию связи между параметра-

ми режима сварки и процессами в системе " дуга-ванна ", ответственными за появление подрезов и несплавлений, изучению влияния технологических процессов сварки на качество формирования шва.

Влияние режима сварки на качество формирования шва оценивали критериально. Использовали критерий, предложенный Ковтуном В.Л. и Чернышовым Г.Г. для сварки в аргоне неплавящимся электродом и представляющий отношение диаметра теплового пятна дуги (d_T) к диаметру её силового пятна (d_c), согласно которому подрезы образуются при $d_T/d_c \leq 1$. Для сравнения аналогичную оценку выполняли с помощью критерия, предложенного Мандельбергом С.Л. и Сидоренко Б.Г. для сварки под флюсом и представляющего отношение гидростатического давления жидкого металла в ванне (P_B) к давлению дуги (P_d), согласно которому подрезы образуются при $P_B/P_d < 1$. Методика определения d_T и d_c отличалась от известной. В связи с тем, что при сварке под флюсом ванна достигает наибольших размеров на определенном расстоянии от зоны непосредственного теплового воздействия дуги d_T приравнивали не максимальной ширине ванны, а её ширине в поперечном сечении, проходящем через ось электрода. Из-за отсутствия данных о количественном влиянии режима сварки на параметры распределения давления дуги d_c определяли не расчетным, а экспериментальным путем. Его приравнивали ширине, которую имеет ванна в поперечном сечении, проходящем через ось электрода, при появлении в шве подрезов, поскольку в этом случае граница силового пятна дуги проходит по кромкам головной части ванны. Размеры ванны, расположение электрода относительно её кромок, характер распределения закристаллизовавшегося металла определяли после выплескивания из ванны расплава. Сварку выполняли переменным током проволокой Св-08А диаметром 5 мм под флюсом АН-348А на режимах, обеспечивающих качественное и defectное формирование шва.

Установлено, что критерий d_T/d_c позволяет оценить влияние параметров режима сварки на появление в шве подрезов при сварке под флюсом как без разделки, так и с разделкой кромок, в то время как критерий P_B/P_d не отражает влияния напряжения дуги. При этом выявлены особенности влияния режима сварки на характер теплового и силового воздействия дуги, присущие сварке под флюсом. При повышении оварочного тока от 950 до 1400 А d_c сохра

няет постоянное значение (рис. 1), что объясняется увеличением коэффициента сосредоточенности давления дуги. Происходящее снижение критической скорости сварки ($V_{кр}$), при которой $dt/dc = 1$ и появляются подрезы, обусловлено уменьшением dt (см. рис. 1) вследствие значительного углубления дуги в основной металл. Применение разделки кромок не оказывает влияния на dc , но может вызвать уменьшение dt , если уровень ванны опускается в разделке ниже поверхности основного металла. Такое влияние разделки кромок наблюдается при сварке током 1400 А и приводит к снижению $V_{кр}$ (см. рис. 1). Повышение напряжения дуги вызывает уменьшение $V_{кр}$ в связи с увеличением dc на большую величину, чем dt .

Установлено, что при формировании качественного шва, когда зона эффективного силового воздействия дуги не охватывает боковые кромок ванны ($dt/dc > 1$), фронт кристаллизации выдвинут вперед (в направлении сварки) по дну ванны (рис. 2, а, где штриховой линией показан фронт кристаллизации). Такой характер кристаллизации обусловлен перемещением расплавленного металла преимущественно вдоль боковых стенок ванны (боковыми потоками). Под действием теплоты, распространяющейся в боковых потоках, происходит дополнительное оплавление боковых стенок ванны, что создает благоприятные условия для формирования шва без подрезов. При появлении подрезов, когда давление дуги на боковые кромок ванны возрастает ($dt/dc = 1$), фронт кристаллизации выдвинут вперед на боковых кромок ванны (рис. 2, б). Это свидетельствует о переходе от преимущественно боковых потоков металла в ванне к донному потоку. При этом, судя по изменению толщины слоя закристаллизовавшегося металла на боковых стенках ванны, уровень донного потока находится значительно ниже поверхности основного металла (см. рис. 2, б, на котором штрихпунктирной линией показана граница между верхним участком стенки ванны, где толщина слоя закристаллизовавшегося металла сохраняет неизменное значение, и нижним участком, где она увеличивается по мере удаления от оси электрода). Прекращение процесса кристаллизации на верхних участках боковых стенок ванны свидетельствует об отсутствии на их поверхности перемещающегося расплава. При контакте этих участков с жидким металлом в хвостовой части ванны повторного расплавления не происходит, что приводит к образованию подрезов и несплавлений.

Улучшить качество формирования шва и расширить диапазон докритических скоростей сварки можно за счет изменения соотношения диаметрами теплового и силового пятен дуги при сохранении постоянными энергетических параметров процесса. К технологическим приемам, позволяющим управлять распределенностью теплового и силового воздействия дуги, относятся механические колебания электрода, электромагнитные колебания дуги, использование электродов с различной формой поперечного сечения. Последний прием не требует существенного усложнения сварочных аппаратов поскольку основан на естественном перемещении дуги по торцам одного или нескольких электродов. Достаточно простым и эффективным вариантом является использование двух проволочных электродов, подключенных к одному источнику питания и расположенных поперек стыка. Регулирование давления дуги на боковых кромках ванны, где его величина определяет появление подрезов, обеспечивается за счет изменения расстояния между электродами.

Для исследования процесса двухэлектродной сварки использовали проволоку Св-08А диаметром 5 мм и флюс АН-348А. Методика проведения экспериментов соответствовала примененной при исследовании одноэлектродной сварки. Дополнительно оценивали характер горения дуги путем осциллографирования тока, протекающего по каждому электроду. При двухэлектродной сварке током 1400 А с расположением электродов на расстоянии 10 мм между их осями

$V_{кр}$ возрастает по сравнению с одноэлектродной сваркой (см. рис. 1). Это достигается благодаря увеличению $d\tau$ на общую величину, чем $d\sigma$. При этом боковые кромки ванны отодвигаются от зоны эффективного силового воздействия дуги, давление дуги на кромки резко снижается, что вызывает появление в ванне боковых потоков металла и, как следствие, улучшение формирования шва. Применение разделки кромок не приводит к снижению $V_{кр}$, т.к. не сопровождается понижением уровня ванны в разделке относительно поверхности основного металла и уменьшением $d\tau$. В диапазоне токов 1400 ... 2100 А критическая скорость сварки не изменяется и составляет 60 м/ч. Это объясняется тем, что повышение тока в указанном диапазоне практически не оказывает влияния на $d\tau$ и $d\sigma$ в связи с углублением дуги в основной металл и увеличением коэффициента сосредоточенности давления дуги. Существенное влияние на формирование шва оказывает расстояние между осями электродов. Увеличение этого расстояния также

10 мм может привести к образованию в шве седловидного проплавления и подрезов. Это объясняется переходом к поочередному горению дуги на каждом электроде. Боковая кромка ванны, близлежащая к токоведущему в данный момент электроду, подвергается импульсному воздействию давления дуги, величина которого достаточна для подавления боковых потоков и понижения уровня расплавления в ванне.

Третья глава посвящена разработке методики определения геометрических параметров и качества формирования шва при сварке на форсированных режимах. Тепловой поток дуги при одно- и двухэлектродной сварке представили равномерно распределенным по поверхности соответственно одного и двух полуэллипсоидов вращения. Уравнение распространения теплоты от одиночного эллипсоидного источника в полубесконечном теле при адиабатических граничных условиях, отнесенное к подвижной системе цилиндрических координат, имеет вид

$$T(r, \theta, z_0, \infty) = 2 \int_0^\infty \frac{dt}{c_p (4\pi \alpha t)^{3/2}} \times \quad (1)$$

$$\times \iint_S q ds \exp\left(\frac{V^2 t}{4\alpha} - \frac{D^2}{4\alpha t} - \frac{V(R \cos \theta - r \cos \varphi)}{2\alpha}\right),$$

где $q = Q/S$ - плотность теплового потока на поверхности полуэллипсоида; Q - эффективная тепловая мощность дуги; S - площадь поверхности полуэллипсоида вращения; R - радиус вектор элемента M полубесконечного тела в горизонтальной плоскости;

D - расстояние между элементом M и элементарной площадкой на поверхности полуэллипсоида вращения. Текущий радиус полуэллипсоида вращения

$$r = \sqrt{\frac{\rho}{h} (h^2 - z^2)}, \quad (2)$$

где ρ и h - соответственно горизонтальная и вертикальная полуоси полуэллипсоида.

Температуру в заданной точке тела при нагреве двойным эллипсоидным источником (рис. 3) определили по принципу наложения, как сумму температур, вычисленных по уравнению (1), при нагреве каждым одиночным эллипсоидным источником по отдельности. В качестве исходных данных задавали эффективную тепловую мощность

ность дуги, скорость сварки, расстояние между вертикальными полуосями полуэллипсоидов, которое приравнивали расстоянию между осями электродов ℓ , и размеры полуосей полуэллипсоида. Ширину эллипсоидного источника в плоскости, перпендикулярной направлению сварки, принимали равной диаметру силового пятна дуги. Горизонтальную полуось источника при одно- и двухэлектродной сварки определяли по формулам соответственно

$$b = 0,5 d_c ; \quad b = 0,5 (d_c - \ell) . \quad (3)$$

Диаметр силового пятна вычисляли по эмпирической зависимости

$$d_c = k_1 U_d , \quad (4)$$

где k_1 - коэффициент составляющей для одно- и двухэлектродной сварки соответственно 0,31 и 0,45.

Вертикальную полуось эллипсоидного источника приравнивали глубине кратера, которую определяли из условия квазистатического равновесия между давлением дуги и давлением жидкого металла в хвостовой части ванны по формуле

$$h = \frac{k_2 \mu_0 I_{cb}^2}{\pi^2 d_c^2 \rho g} , \quad (5)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость в вакууме ; ρ - плотность расплава ; g - ускорение свободного падения ; $k_2 = 0,3$ - эмпирический поправочный коэффициент одинаковый для одно- и двухэлектродной сварки.

Форму сварочной ванны представляли как изотермическую по - поверхность, соответствующую температуре плавления. Уравнение (I) после соответствующих преобразований решали численным методом. В расчетах учитывали влияние разделки кромок на размеры однослойного шва. Погрешность вычислений диаметра теплового пятна дуги, ширины и глубины проплавления при одноэлектродной сварке в диапазоне

$I_{cb} = 800 \dots 950$ А, $U_d = 40 \dots 42$ В, $V_{cb} = 20 \dots 40$ м/ч и двухэлектродной сварке в диапазоне режимов $I_{cb} = 1400 \dots 2100$ А, $U_d = 40 \dots 42$ В, $V_{cb} = 20 \dots 40$ м/ч не превышает 10 %. При больших значениях тока и скорости сварки погрешность вычислений возрастает в связи с усилением влияния потоков металла в сварочной ванне на форму кратера и механизм теплопереноса.

Формирование усиления шва рассматривали как образование равновесной поверхности жидкости под действием сил межфазного натяжения в поле однородных массовых сил. Для расчетов использо-

Балл дифференциальное уравнение, позволяющее определять высоту усиления шва в зависимости от ширины проплавления, площади поперечного сечения усиления и величины капиллярной постоянной межфазной поверхности.

Влияние режима сварки на качество формирования шва оценивали путем вычисления величины критерия $d\tau/dc$. Расчетные значения критической скорости сварки, при которой $d\tau/dc = 1$ и в шве появляются подрезы, имеют удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

Четвертая глава посвящена разработке методики оптимизации форсированных режимов двухэлектродной сварки. Современные методы многомерного поиска, позволяющие достаточно быстро достичь оптимума, предусматривают формализацию задачи. Оптимизационная задача должна свестись как задача поиска экстремума целевой функции. С точки зрения производительности процесса оптимальными являются параметры режима и разделки кромок, обеспечивающие выполнение однослойного шва заданных размеров с максимально возможной для данного способа сварки скоростью. В предложенной математической модели нагрева металла эллипсоидным источником теплоты величина и распределенность давления дуги отражаются размером и формой источника (см. главу 3). Поэтому в качестве первой целевой функции, характеризующей режим сварки, приняли расчетное значение плотности теплового потока дуги на поверхности теплового пятна

$$M_1 = \frac{4Q}{\pi d_T^2}, \quad (6)$$

где Q - эффективная тепловая мощность дуги; d_T - расчетное значение диаметра теплового пятна дуги.

В качестве второй целевой функции, характеризующей параметры разделки кромок, приняли площадь поперечного сечения усиления шва

$$M_2 = P_H - P_P, \quad (7)$$

где P_H, P_P - соответственно площадь наплавленного металла и площадь разделки кромок.

Оптимизационная задача сводится к вычислению сварочного тока, скорости сварки и глубины разделки, при которых плотность теплового потока дуги (первая целевая функция) максимальна, площадь поперечного сечения шва (вторая целевая функция) минимальна и выполняются ограничения:

$$I_{min} \leq I_{св} \leq I_{max}; dt/dc \geq k_{min}; H_{min} \leq H \leq H_{max};$$

$$L \leq L_{max}; C_{min} \leq C \leq C_{max}, \quad (8)$$

где I_{min}, I_{max} – минимальное и максимальное значение сварочного тока, ограничивающие пространство проектирования; k_{min} – минимальное отношение диаметров теплового и силового пятен дуги, при котором шов формируется без подрезов; H_{min}, H_{max} – минимально и максимально допустимая глубина проплавления; L_{max} – максимально допустимая глубина разделки, зависящая от толщины металла и типа разделки; C_{max}, C_{min} – максимально и минимально допустимая высота усиления шва.

Для решения оптимизационной задачи разработали алгоритм, в основу которого положили многомерный метод прямого поиска Нелдера-Мида. Размеры шва вычисляли по математическим моделям, приведенным в главе 3. Программа расчета разработана для ПЭВМ ДВК – 2М. В процессе оптимизации режима двухэлектродной сварки пространство проектирования ограничивали значениями сварочного тока $I_{min} = 1400$ А, $I_{max} = 2100$ А ($U_d = 40$ В, $l = 10$ мм). Минимальное отношение диаметров теплового и силового пятен дуги (k_{min}), при котором в условиях возможных колебаний режима сварки сохраняется формирование шва без подрезов, приняли равным 1,2. Рассчитали оптимальные параметры режима сварки с X – образной разделки кромок для соединения металла толщиной 30 ... 45 мм.

Пятая глава посвящена разработке технологии и модернизации серийного сварочного оборудования для двухэлектродной сварки на форсированных режимах кольцевых монтажных швов корпуса вращающейся цементной печи. Корпус печи изготавливается из стали В Ст. 3 сп и представляет сварную трубу диаметром 3,6 ... 5 м о толщиной стенки 30 ... 45 мм длиной до 200 м. Монтаж корпуса выполняется в два этапа. На роликовом стенде обечайки собирают и сваривают в блока длиной до 25 м. Затем непосредственно на роликовых опорах печи из блоков собирают и сваривают корпус. В последнем случае предпочтительной является X – образная несимметричная разделка кромок, позволяющая выполнить основной объем сварки с внешней стороны корпуса. Такая технология обусловлена рядом трудностей, возникающих при автоматической сварке внутренних швов. В связи с этим изучали варианты двухэлектродной сварки

на форсированных режимах с X - образной симметричной и несимметричной разделкой кромок.

Отработку технологии сварки выполняли на обечайках диаметром 3,6 и 4 м с толщиной стенки 30 ... 45 мм. За основу взят оптимальные параметры режимов сварки и разделок кромок, полученные расчетным путем (см. главу 4). При односторонней сварке с симметричной разделкой кромок расчетные режимы практически не потребовали корректировки. Формирование качественного шва обеспечивается при смещении электродов с зенита на 150 ... 200 мм. Однако при односторонней сварке внешних швов обечайек с толщиной стенки 40 ... 45 мм и несимметричной разделкой кромок формирование шва нарушается из-за стекания сварочной ванны. Для выполнения этих швов отработали режимы сварки за два и три прохода. Односторонняя сварка на форсированных режимах обеспечивает повышение производительности, по сравнению с обычной многослойной сваркой, в 4 ... 5 раз, двух- и трехпроходная - в 2 ... 2,5 раза.

Макроструктурный анализ сварных соединений показали отсутствие дефектов в металле шва. Механические испытания свидетельствуют, что металл шва и участок перегрева зоны термического влияния имеют свойства не ниже, чем у основного металла.

Для выполнения двухэлектродной сварки разработали приставку к серийному сварочному трактору АДФ-1002-УЗ, обеспечивающую подачу в зону сварки двух электродных проволок в плоскости, перпендикулярной стыку, и плавное регулирование расстояния между ними. Приставка имеет шкалу, позволяющую регулировать расстояние между электродными проволоками с требуемой точностью. Дополнительно на трактор устанавливается механическое копирующее устройство, бункер для флюса, повышенного объема, и две кассеты для сварочной проволоки.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Повышение производительности сварки под флюсом за счет форсирования режима ограничивается появлением дефектов формирования шва. При докритических значениях сварочного тока и скорости сварки, при которых обеспечивается формирование качественного шва, жидкий металл перемещается в сварочной ванне преимущественно боковыми потоками. Теплота, распространяющаяся в

боковых потоках металла, осуществляет дополнительное оплавление боковых стенок ванны, что исключает образование подрезов и несплавлений.

2. При достижении скорости сварки или током критического значения, при котором нарушается формирование шва, давление дуги на боковые кромки ванны возрастает, в результате чего в ванне происходит переход от преимущественно боковых потоков металла к донному потоку, уровень которого у стенок ванны располагается ниже поверхности основного металла. Верхние участки боковых стенок ванны перестают подвергаться воздействию теплоты, переносимой потоками металла, кристаллизуются и при контакте с жидким металлом в хвостовой части ванны повторно не расплавляются, что приводит к появлению в шве подрезов и несплавлений.

3. Влияние режима сварки на качество формирования шва при одно- и двухэлектродной сварке под флюсом на форсированных режимах как без разделки, так и с разделкой кромок может быть оценено с помощью критерия, представляющего отношение диаметра теплового пятна дуги (d_T) к диаметру её силового пятна (d_c), согласно которому понижение уровня расплава у боковых стенок ванны происходит при равенстве диаметров указанных пятен. Формированию качественного шва соответствует условие $d_T/d_c > 1$, образованию в шве подрезов — $d_T/d_c = 1$.

4. Эффективным путем управления течением металла в сварочной ванне при сварке на форсированных режимах является регулирование отношения между диаметрами теплового и силового пятен дуги. Замена одной электродной проволоки двумя, расположенными поперек стыка на определенном расстоянии, позволяет увеличить диаметр теплового пятна дуги на большую величину, чем силового, в результате чего давление дуги на кромки ванны снижается, в ванне возникают боковые потоки металла и, как следствие, обеспечивается формирование качественного шва.

5. Трехмерная математическая модель распространения теплоты углубленной дуги при одно- и двухэлектродной сварке, в которой тепловой поток дуги представлен равномерно распределенным по поверхности соответственно одного и двух полуэллипсоидов вращения, имеющих размеры, заданные в зависимости от величины и распределения давления дуги, позволяет вычислить размеры шва и критическую скорость сварки, при которой $d_T/d_c = 1$ и в шве появляются подрезы, с удовлетворительной для практики точностью.

6. В качестве целевых функций для оптимизации режима сварки и размеров разделки кромок при сварке под флюсом целесообразно использовать плотность теплового потока дуги на поверхности теплового пятна (M_1) и площадь поперечного сечения усиления шва (M_2). Оптимальными параметрами режима сварки и разделки кромок, т.е. обеспечивающими сварку металла данной толщины с максимально возможной скоростью, являются параметры, при которых $M_1 = M_{1max}$, $M_2 = M_{2min}$ и выполняются ограничения, наложенные на отношение диаметров теплового и силового пятен дуги ($d_T/d_C \geq 1,2$) и размеры шва.

7. Разработанная технология двухэлектродной сварки на оптимальных форсированных режимах стыковых монтажных швов корпуса вращающейся печи с толщиной стенки 30 ... 45 мм обеспечивает повышение производительности, по сравнению с базовой, не менее, чем в два раза. Сварка выполняется модернизированным серийным оварочным трактором, снабженным разработанной приставкой для двухэлектродной сварки. Технология и оборудование внедрены в производство с экономическим эффектом 33 тыс.руб.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Чернышов Г.Г., Маркушевич И.С., Николаенко М.Р. Особенности формирования шва при дуговой сварке при повышенном токе // Сварочное производство. - 1984. - № 9. - С. 19 - 20.

2. Чернышов Г.Г., Маркушевич И.С., Николаенко М.Р. Влияние потоков металла в сварочной ванне на образование дефектов формы шва при сварке под флюсом // Сварочное производство. 1987. - № 10. - С. 41 - 42.

3. Технология сварки многослойных швов на повышенном токе // Г.Г.Чернышов, И.С. Маркушевич, М.Р. Николаенко и др. / Экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов в сварочном производстве : Тр. Всесоюзный научн.техн.конф. - Челябинск, 1986. - С. 71.

4. Маркушевич И.С., Николаенко М.Р. Технология и оборудование для сварки монтажных швов корпуса цементной печи на форсированных режимах // 100 - летие изобретения сварки по методу Н.Г. Славянова и современные проблемы развития сварочного производства: Тр. Всесоюзной научн.техн.конф. - Пермь, 1988. - Ч. I. - С. 65 - 66.

5. Чернышов П.Г., Маркушевич И.С. Критериальная оценка

появления подрезов при сварке под флюсом на форсированных режимах //Сварочное производство.-1989.-#9.-С. 41 - 43.

6. А.с. I227390 СССР, МКИ³ В 23К 28/00, 9/16. Способ определения геометрических параметров и формы внутренней поверхности сварочной ванны/ И.С. Маркушевич, М.Р. Николаенко (СССР).- № 3835778/25-27 ; Заяв. 04.01.86 ; Оpubл. 30.04.86// Бюл. Открытия. Изобретения.- 1986.- № 16.- С. 57.

7. А.с. I45462I СССР, МКИ³ В 23К 37/02. Головка для двух - электродной сварки/И.С. Маркушевич, М.Р. Николаенко, Б.А. Литвинов, М.И. Россомеха, Г.Г. Чернышов (СССР).- № 4317396/3I-27; Заяв. 15.10.87 ; Оpubл. 30.01.89// Бюл. Открытия. Изобретения.- 1989.- № 4.- С. 71.

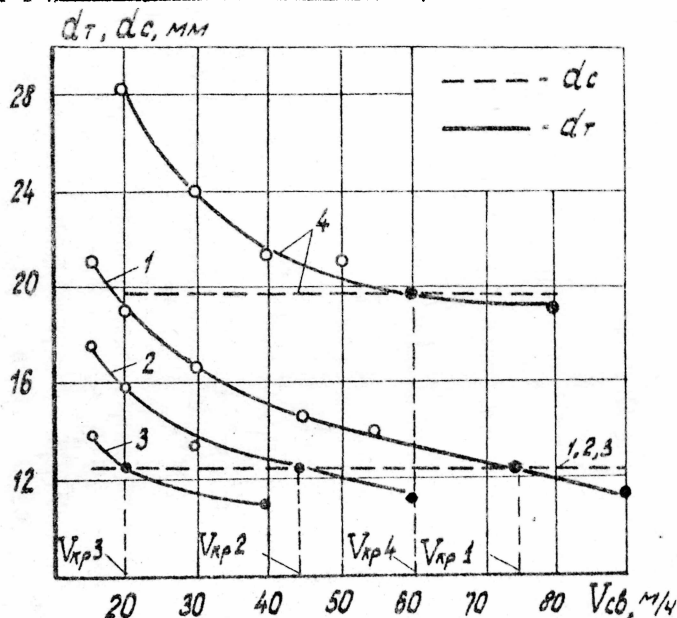
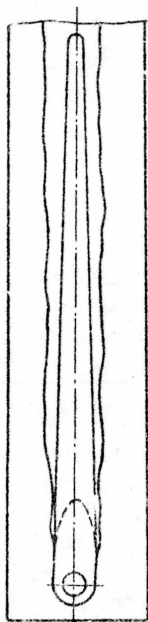


Рис. I. Влияние режима сварки на диаметры теплового и силового пятен дуги: 1,2 - одноэлектродная сварка без разделки кромок (I-950A ; 2-I400A); 3-одноэлектродная сварка с разделкой кромок (I400A); 4-двухэлектродная сварка с разделкой кромок (I400A, $l = 10$ мм); $U_d = 40$ В ;

○ - подрезов нет, ● - подрезы



а)



б)

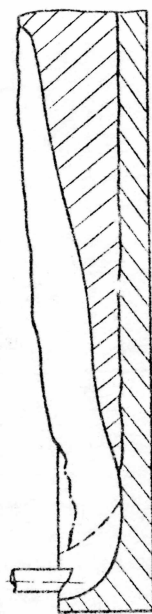


Рис. 2. Форма сварочной ванны при качественном формировании шва (а) и образовании подрезов (б)

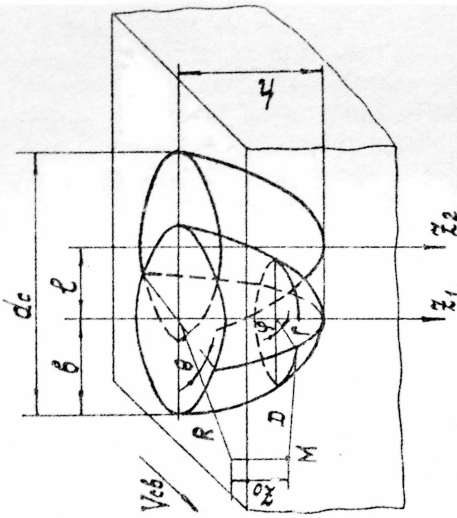


Рис. 3. Расчетная схема двойного эллипсоидного источника теплоты