

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИО-
НАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УДК 621.791.052

**ЯКУБОВИЧ
ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА СВАРКИ ТОНКОЛИСТОВЫХ СТА-
ЛЕЙ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К ТЕРМИЧЕСКОМУ ЦИКЛУ, С
УПРАВЛЕНИЕМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ ИСТОЧНИКА
НАГРЕВА**

Специальность 05.03.06

«Технологии и машины сварочного производства»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОГИЛЕВ 2006

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель	-доктор технических наук, профессор Сергей Кириллович Павлюк, ГУВПО «Белорусско-Российский университет» кафедра «Оборудование и технология сварочного производства», г. Могилев.
Официальные оппоненты	-доктор технических наук, профессор Виктор Николаевич Ковалевский, Белорусский национальный технический университет, кафедра «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» г. Минск - кандидат технических наук, доцент Александр Петрович Рогач. ОАО «Завод полимерных труб», г. Могилев
Оппонирующая организация	Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии». г. Минск

Защита диссертации состоится « 22 » декабря 2016г. а 12⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций К 02.18.01 при Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212005. г. Могилев, пр-т Мира. 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан « 22 » ноября 2006г.

**Ученый секретарь
Совета по защите диссертаций
доктор физико-математических наук**



В. И. Борисов



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Из тонколистовых сталей с использованием сварки плавлением изготавливаются кабины автомобилей и тракторов, корпуса троллейбусов и трамваев, тонкостенные формы, многие элементы продукции сельхозмашиностроения, емкости для хранения жидкостей, транспортные ленты, пилы и д.р.

Влияние теплового режима старки на качество соединения для тонколистовых сталей существенно выше, чем для металла средней толщины, т.к. даже незначительные его отклонения могут приводить к дефектам в виде прожогов, подрезов, провисания сварочной ванны. Особенно сильно это проявляется при некачественной заготовке и сборке деталей, что еще имеет место на производстве. Трудности сварки изделий малой толщины существенно возрастают, если они изготовлены из сталей с большим содержанием углерода, легирующих элементов, а также упрочненных холодной пластической деформацией и чувствительных к термическому циклу. В этом случае нарушение оптимальных тепловых характеристик процесса нагрева и охлаждения при сварке может привести к разупрочнению металла в зоне термического влияния или появлению трещин в сварном соединении.

Постоянное расширение ассортимента сталей повышенной прочности и кислотостойкости вынуждает разрабатывать современные технологические процессы их сварки, основанные на строгой регламентации параметров термического цикла по критериям скорости охлаждения металла и времени его пребывания при температуре роста зерна или разупрочнения металла.

Механизм образования и пути устранения дефектов сварных соединений на тонколистовом металле изучены недостаточно, не разработаны научно-обоснованные рекомендации и технологические процессы сварки, позволяющие одновременно повысить устойчивость сварочной ванны, влиять на формирование и воздействовать на структурообразование зоны термического влияния на сталях, чувствительных к нагреву сваркой, за счет регулирования термического цикла сварки.

Поиск путей улучшения качества сварки тонколистовых соединений и устранения дефектов является актуальным. В настоящей работе эта задача решается за счет управления тепловым потоком источника нагрева.

Связь работы с крупными научными программами. Научные исследования по теме диссертации проводились в рамках приоритетных направлений фундаментальных научных исследований Республики Беларусь (Машиностроение) с 1998 по 1999г. в рамках темы “Повышение технологической прочности сварных соединений из прокаливающихся инструменталь-



ных сталей и разработка научно-технических основ их сварки” номер Гос.рег. 1998871, с 2001 по 2004г. в рамках темы “Улучшение качества сварных соединений в транспортном машиностроении” номер Гос.рег. 20011079 Могилевского государственного технического университет»

Цель. Целью работы является разработка процесса сварки плавлением тонколистовых сталей, чувствительных к термическому циклу, обеспечивающего условия устойчивого равновесия сварочной ванны и бездефектного образования сварного соединения за счет управления тепловым потоком источника нагрева.

Задачи исследований. 1. На базе разработанной математической модели образования сварочной ванны при сварке на весу тонколистового металла толщиной 0,5 - 2 мм исследовать пути управления процессом проплавления металла и структурообразования в сварных соединениях.

2. Изучить влияние перераспределения тепло вложения в тонколистовые изделия при дуговой сварке в защитных газах плавящимся электродом на условия перекрытия зазоров и смещений кромок, а также установить оптимальные параметры траектории перемещения, амплитуды и частоты колебаний электрода

3. Исследовать влияние термического цикла сварки на образование закалочных структур мартенситно-бейнитного типа при дуговой сварке металла малой толщины с целью снижения скорости охлаждения и уменьшения вероятности образования холодных трещин.

4. Разработать на базе исследований технологии и устройства, обеспечивающие перераспределение теплового потока источника нагрева перпендикулярно оси сварного шва для осуществления технологического процесса без образования прожогов в сварном шве и внедрить их в производство

Объект и предмет исследований. Объектом исследований являются сварные соединения, выполненные сваркой плавлением из тонколистовых материалов, преимущественно из сталей, чувствительных к термическому циклу сварки. Предметом исследований является устойчивость сварочной ванны при сварке на весу и сопротивляемость образованию трещин в сварных соединениях из сталей малой толщины.

Гипотеза. В работе сформулировано следующее научное предположение: возможность повышения устойчивости формирования сварочной ванны при дуговой сварке плавлением тонколистового металла, предотвращающая образование прожогов, за счет перераспределения теплового потока источника нагрева перпендикулярно оси сварного шва.

Методологов в методы проведения исследований. Основные задачи в работе решались расчетным и экспериментальными методами.



Процессы формирования шва исследовались с использованием математических моделей, теоретические расчеты устойчивости сварочной ванны при сварке металла малой толщины производились с применением программы Mathcad. Анализ динамики переходных процессов сварочной дуги при исследовании влияния смещения кромок на устойчивость горения дуги осуществлялся при помощи программной оболочки Simulink программы Matlab.

Исследование структуры и свойств сварных соединений осуществлялось методами современной металлографии, определением микротвердости и прочностных характеристик сварных соединений. Разработка технологии сварки тонколистового металла с повышенными зазорами производилась с применением робототехнического комплекса РМ-01.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

Впервые на основании математического моделирования процесса формирования сварного шва при сварке тонколистового металла на весу с технологическим зазором, учитывающего условия формирования сварочной ванны и перемещения расплавленного металла, установлена область, в которой силы поверхностного натяжения, удерживающие сварочную ванну, имеют максимальные значения (при провисании сварочной ванны 3 мм и ширине ванны 3-4 мм), что позволило определить оптимальные геометрические размеры ванны жидкого металла.

Установлено впервые, что перераспределение теплового потока источника нагрева использованием колебаний электрода перпендикулярно оси сварного шва позволяет повысить устойчивость ванны жидкого металла и избежать прожогов при сварке тонколистового металла с технологическими зазорами и смещением кромок. Показано, что соединение без образования прожогов при толщине металла 0,8-1,2 мм формируется при оптимальных параметрах колебаний электрода: амплитуде 1,9-2 мм, частоте 3 Гц. При этом сила сварочного тока устанавливается в зависимости от толщины металла.

Показано, что регулирование скорости охлаждения зоны термического влияния, за счет управления тепловым потоком источника нагрева колебаниями электрода снижает содержание мартенсита и вероятность образования холодных трещин при сварке сталей, чувствительных к термическому циклу. В результате этого скорость охлаждения стали 45 толщиной 1 мм составила 18 и 30 °C/с, с образованием 90-93% мартенсита (М) и 88-91%М соответственно, что существенно меньше, чем при сварке без колебаний (48 °C/с) с образованием 97-99%М.

Установлено, что концентрация теплового потока источника нагрева, приводящая к уменьшению ширину шва в 2-2,5 раза, за счет увеличения плотности тока и снижения теплового режима сварки обеспечивает на сталях,



упрочненных холодной пластической деформацией, уменьшение зоны нагрева и времени пребывания металла при температурах возврата и рекристаллизации, а также оптимизирует форму сварочной ванны. При этом происходит повышение прочности соединения на 15-20 %.

Практическая и экономическая значимость полученных результатов. Предложен новый способ дуговой сварки в защитных газах плавящимся электродом с целью уменьшения количества прожогов в сварном шве и регулирования структурообразования в зоне термического влияния. Разработана конструкция сварочной горелки для сварки в защитных газах плавящимся электродом, обеспечивающая перераспределение теплового потока источника нагрева за счет колебаний электрода (патент на изобретение ВУ 6962 С1 от 14.12.2004). Разработан новый технологический процесс (ТП-08608862.02291.00237) сварки тонколистовых соединений, который позволил уменьшить вероятность образования прожогов при сварке тонколистового металла на весу.

Результаты работы прошли производственные испытания и внедрены в производство при изготовлении бортов полуприцепа на участке сборки и сварки бортов заготовительно-сварочного цеха на филиале РУП «МАЗ» завод «Могилевтрансмаш» и при производстве сварных тонкостенных форм для изготовления композиционных панелей на ЗАО «Завод полимерных труб», а также внедрены в учебный процесс на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» ГУВПО «Белорусско-Российский университет» при проведении лабораторных работ по курсу «Теория сварочных процессов». Экономический эффект от внедрения результатов работы в ценах 2005 года составил 19594337 рублей.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Концентрация теплового потока дуги в зоне нагрева изделия и оптимизации состава защитной атмосферы дуги, приводящая к её сжатию, способствует снижению содержания мартенсита и вероятности образования холодных трещин при сварке соединений из тонколистовых сталей, чувствительных к термическому циклу.

2. Перераспределение теплового потока источника нагрева за счет колебаний электрода в плоскости перпендикулярной оси сварного шва, обеспечивает устойчивость жидкой перемычки сварочной ванны и снижает количество прожогов в сварном шве при сварке конструкций из тонколистового металла, имеющих зазоры и смещения кромок.

3. Новый подход к комплексному устранению дефектов в сварном соединении, отличающийся перераспределением теплового потока источника нагрева перпендикулярно оси сварного шва и позволяющий одновременно



повысить устойчивость сварочной ванны против образования прожогов, а также влиять на её формирование и воздействовать на образование закалочных структур зоны термического влияния на сталях, чувствительных к термическому циклу.

Личный вклад соискателя. Опубликованные по теме диссертации работы выполнены автором лично или в соавторстве. Научному руководителю принадлежит основная идея работы. Основными соавторами по опубликованным работам являются профессор Павлюк С.К. и доцент Лупачев А.Г. В опубликованных работах автор осуществлял постановку задач, предлагал направления решения научных проблем, участвовал в теоретических и экспериментальных исследованиях, формулировке подходов к проблеме обеспечения условий устойчивого равновесия сварочной ванны и бездефектного образования сварного соединения, а также выводов по результатам работы.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертации доклады-вались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Ресурсосберегающие технологии в сварочном производстве» (Могилев, 1998 г.), «Международная 53-я научно-техническая конференция профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов Белорусской государственной политехнической академии» (Минск, 1999 г.), «Современные направления развития производственных технологий и робототехника» (Могилев, 1999 г.), «Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка» (Могилев, 2000 г.), «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование» (Могилев, 2003 г.), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2004 г.), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2005 г.).

Опубликованность результатов. Результаты диссертации опубликованы в 14-ти научных работах, в том числе: 4 статьи в научно-технических журналах, включенных в перечень изданий для опубликования результатов диссертационных исследований, 1 статья в сборнике научных трудов, 1 статья в журнале для специалистов сварочного производства и 7 тезисов докладов конференций, по результатам работы получен 1 патент Республики Беларусь (№6962 С1). Общее количество страниц опубликованных материалов составляет 34 страницы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 145 страницах печатного текста, состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Содержит 84 страницы основного текста, 70 рисунков, 11 таблиц и 123 библиографические ссылки.



ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, дана общая характеристика работы.

Первая глава содержит обзор литературных данных по теме диссертации. Рассмотрены результаты исследований по вопросам сварки тонколистовых материалов. Показаны трудности, возникающие при образовании соединений из металла малой толщины, и способы их преодоления.

Проанализированы работы Никифорова Г.Д., Федорова С.А., Овчинникова В.В., Ищенко Ю.С., Букурова В.А., Croker M., Nacey T., Акулова А.И., Гусакова Г.Н. и других исследователей, в которых оценены основные силы, действующие на сварочную ванну, выявлены закономерности формирования поверхности ванны и исследовано влияние основных параметров режима на процесс формирования сварного шва на весу.

Рассмотрены работы Чернышева Г.Г., Столбова В.И., Прохорова Н.Н., Масакова В.В., в которых показано, что образование прожогов, зазоров в стыке и несовпадения кромок по высоте в значительной степени зависят от качества сборки деталей под сварку. Установлено, что в рассматриваемом диапазоне толщин 0,5 - 2 мм одной из главных причин разрушения сварочной ванны является высокое давление в центре дуги, обуславливающее локальное утонение и разрыв жидкой прослойки. Выявлены особенности образования сварного шва на металле малой толщины и оценены существующие методы преодоления трудностей формирования шва.

Отмечены возможности получения качественного сварного соединения на материалах, чувствительных к термическому циклу, которые предусматривают уменьшение зоны разупрочнения металла и снижение вероятности образования мартенсита при дуговой сварке.

При тепловых расчетах М.М.Штрикманым, А.Е.Кучерявым использовались модели источника нагрева в виде нескольких расчетных источников тепла.

Для уменьшения количества прожогов перспективно применение технологии сварки с перераспределением теплового потока источника нагрева за счет колебаний электрода. Однако проведенные исследования не раскрыли полностью технологические возможности этого способа. Он нуждается в дальнейшем совершенствовании с целью повышения устойчивости формирования сварочной ванны при сварке тонколистового металла.

Во второй главе изложены результаты математического исследования формирования ванны жидкого металла при сварке тонколистового металла и возможности управления тепловым потоком источника нагрева.

При формировании соединения на весу без зазора между стыкуемыми кромок сварочная ванна близка по форме к эллипсу. В момент образования сварочной ванны формирующаяся жидкая перемычка с увеличением ширины ванны становится тоньше и может разорваться. При этом

жидкий металл остается на оплавленных кромках /10/. В этот момент процесс представлен как сварка со сквозным проплавлением без образования жидкой перемычки.

Для определения условий успешного формирования сварочной ванны нами определена результирующая сила поверхностного натяжения, которая с учетом радиусов кривизны поверхности жидкого металла имеет вид:

$$P_{\text{пн}} = \sqrt{\frac{2 * \pi * \sigma^2}{(d - \varepsilon) * \delta} - \frac{\sigma * a}{b^2}}$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения;

d - ширина шва;

ε - ширина зазора между кромками сварного соединения;

δ - толщина основного металла;

a и b - соответственно большая и малая полуось эллипса.

На рис. 1 представлен график зависимости силы поверхностного натяжения, при сварке металла толщиной 1 мм, от ширины зазора при разных значениях ширины шва.

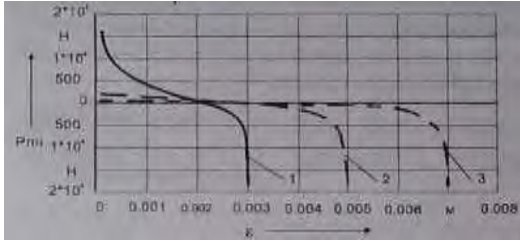


Рис. 1 - Зависимость силы поверхностного натяжения от зазора при различной ширине сварного шва: 1-3 мм; 2-5 мм; 3-7 мм

При величине зазора меньше 2 мм равнодействующая сил поверхностного натяжения удерживает сварочную ванну при всех значениях ширины шва, что приводит к его стабильному формированию. Максимальное значение равнодействующая сил поверхностного натяжения имеет при ширине шва 3 мм.

Дальнейшее увеличение зазора и ширины шва приводит к изменению направления равнодействующей силы и, соответственно, образованию прожогов. При ширине шва 7-8 мм равнодействующая сил поверхностного натяжения близка к нулю, т.е. такая ширина является критической /5/, при большем её значении прожоги неизбежны.

При формировании сварочной ванны с зазором жидкий металл остается на оплавленных кромках. Шов образуется без формирования жидкой перемычки по всему участку нагретого металла. Образование сварного шва происходит в условиях, когда сварочную ванну образует объем расплавленного металла, соприкасающийся по бокам с основным металлом, а снизу и сверху с газовой фазой.

В наших исследованиях учитывалось, что сварка тонколистового металла выполняется на малых токах, обеспечивающих качественное соединение, когда форма сварочной ванны близка к эллипсу. Осесимметричная ванна представляет собой часть эллипсоида, что позволяет использовать достаточ-

но простые аналитические выражения /2/.

Для определения равнодействующей силы поверхностного натяжения в сварочной ванне нами получена следующая математическая зависимость:

$$P_{\text{ин}} = 2\sigma \int_0^h \left[\frac{C_a^2 + h^2}{2h} - z + \frac{C_b^2 + h^2}{2h} - z \right] \pi \left(1.5 \left(C_a \sqrt{1 - \frac{z^2}{C_b}} + C_b \sqrt{1 - \frac{z^2}{C_b}} \right) - \sqrt{C_a \sqrt{1 - \frac{z^2}{C_b}} C_b \sqrt{1 - \frac{z^2}{C_b}}} \right) dz$$

где C_a - половина длины сварочной ванны; C_b - половина ширины сварочной ванны, h — величина провисания ванны.

Выражение (2) позволило определить изменение равнодействующей сил поверхностного натяжения при изменении значений ширины, глубины и величины провисания сварочной ванны. При изменении провисания сварочной ванны до 3 мм наблюдаются максимальные значения равнодействующей сил поверхностного натяжения.

Экспериментальные исследования дали результаты, сопоставимые с расчетными. Величина провисания сварного шва при сварке металла толщиной $\delta = 0,8 - 1,2$ мм без образования прожога теоретически находится в пределах 1,8 — 3 мм, при эксперименте 1,9 — 2,3 мм (рис. 2).

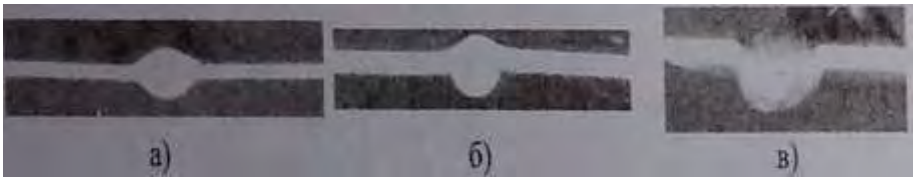


Рис. 2 - Сварные швы с разной величиной провисания: а - $h = 1,5$ мм; б - $h = 1,9$ мм; в — соединение с прожогом, $h = 2,3$ мм

Применение колебаний электрода позволило устранить прожоги и чрезмерное провисание сварного шва, а также регулировать теплораспределение.

При сварке без колебаний электрода нагрев изделия с развитой поверхностью описывается моделью линейного источника теплоты. При перемещении дуги вдоль оси шва с наложением на ее движение дополнительных поперечных перемещений плотность теплового потока изменяется сложным образом. По принципу наложения элементарных решений процесс нагрева источником, перемещающимся по сложной траектории, нами в работе представлен комбинацией линейных и нормально-круговых источников: подвижного линейного источника мощностью $q/2$ и двух поверхностных нормально-круговых источников мощностью $q/4$ каждый. При совместном действии источников температура в любой точке нами определялась как сумма температур от действия каждого из источников /9/.

Уменьшение размеров зоны термического влияния, ширины шва, времени пребывания металла при температуре разупрочнения является основным направлением повышения механических свойств сварного соединения,

имеющего аустенитную структуру. Уменьшение ширины разупрочненной зоны достигалось изменением концентрации теплового потока источника нагрева за счет регулирования параметров режима сварки.

Сварные швы на сталях 10X17H13M2ГЮ и 12X18H10Т, упрочненные холодной пластической деформацией, обладают пониженной прочностью. Повышение прочности и стойкости сварных соединений против образования горячих трещин в работе достигнуто за счет изменения тепловложения в основной металл.

Сравнение результатов определения размеров зоны разупрочнения проводилось при односторонней и двусторонней микроплазменной сварке. Показано, что в первом случае размеры этой зоны больше на 35 - 40%, а время пребывания металла при температуре выше 420 °С больше в 1,5 раза /8/.

Для одностороннего соединения установлено, что разупрочненная зона составляет 1,2 - 1,4 мм при погонной энергии сварки 0,3 - 0,4 кДж/м, микротвердость металла шва в среднем составляет 2058 МПа, а твердость околошовной зоны выше на 100 - 150 МПа. При двусторонней сварке с погонной энергией 0,35 кДж/м ширина разупрочненной зоны не превышает 1,1-1,2 мм.

В начальный период сварки процессы рекристаллизации и возврата успевают произойти достаточно полно и твердость соединения снижается до 2156 - 2254 МПа. Твердость металла шва при двусторонней сварке также близка к этим значениям.

Таким образом, изменение плотности теплового потока источника нагрева позволяет влиять на условия образования сварочной ванны и управлять тепловложением.

В третьей главе представлены результаты исследований влияния перераспределения теплового потока источника нагрева на структуру сварного соединения из прокаливающихся сталей.

Расчет максимальных температур вдоль оси шва для двух вариантов (сварка с прямолинейным движением источника теплоты и сварка с движением источника по траектории части окружности) позволил установить, что при одинаковых скоростях сварки участок, нагреваемый выше 1500 °С, с использованием колебаний электрода составляет 0,9 см, без колебаний - 1,3 см. С уменьшением скорости сварки размер нагреваемой зоны увеличивается.

Проведенный нами расчет термического цикла сварки позволил установить пределы параметров режимов сварки /3/, при которых не происходят существенные изменения свойств металла в ЗТВ среднеуглеродистых и высоколегированных сталей.

Термические циклы, построенные при действии одного линейного источника теплоты и действии трех источников теплоты, показали, что при одинаковой скорости сварки $V_{св} = 35$ м/ч использование колебаний электрода позволяет нагревать тонколистовой металл на расстоянии 1 мм от линии плавления до меньшей температуры (880 °С), чем при сварке без колебаний (1150 °С). Уменьшение скорости сварки с 35 м/ч до 25 м/ч приводит к увеличению температуры до 1185 °С.

По времени пребывания зоны термического влияния выше заданной

температуры определен поперечник зерна, до которого оно успеет вырасти. С использованием диаграмм, предложенных М.Х.Шоршоровым (рис.3), для стали 45 определен размер зерна и показано, что пребывание металла выше температур роста зерна менее 3 с не приводит к заметному увеличению среднего диаметра зерна.

Построенные на диаграмме анизотермического превращения аустенита стали 45 (рис. 4) линии 1, 2, 3 показывают скорость охлаждения точек, расположенных на расстоянии 1 мм от поверхности плавления (1 - в точке при сварке без колебаний электрода $V_{св} = 35$ м/ч; 2 - в точке при сварке с колебаниями электрода $V_{св} = 25$ м/ч; и 3 - в точке при сварке с колебаниями электрода $V_{св} = 15$ м/ч).

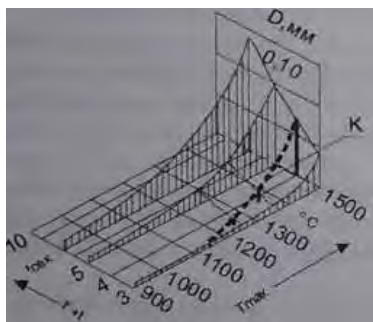


Рис. 3 - Диаграмма изменения среднего диаметра D зерна стали

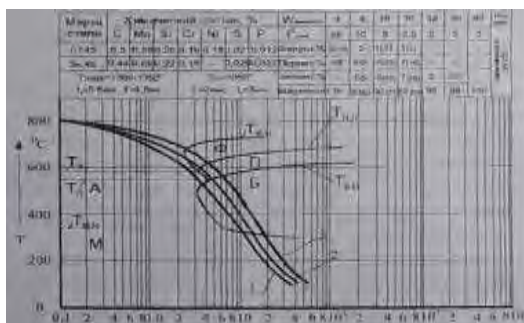


Рис. 4 - Диаграмма анизотермического превращения аустенита

Линия 1 соответствует скорости охлаждения, при которой образуется 98% М+Б, что приводит к хрупкому разрушению и образованию холодных трещин. Уменьшение скорости сварки приводит к снижению скорости охлаждения. Линии 2 и 3 являются более пологопадающими, следовательно, металл будет охлаждаться медленнее, и в результате образуется перлито-ферритная структура металла, отличающаяся большей пластичностью, чем мартенсит. При скорости сварки 25 м/ч происходит образование 90 - 93%М + (Ф+П), при $V_{св}=15$ м/ч образуется 88-91 %М + (Ф+П+Б) /6,11/.

Установлено, что использование колебаний электрода дает возможность влиять на изменение структуры металла зоны термического влияния.

При проведении экспериментальных исследований амплитуда колебаний электрода менялась с шагом 0,5мм.

Перемещение электрода с амплитудой $A = (0,5 - 1,0) \delta$ не привело к изменению тепловложения по сравнению с прямолинейным движением электрода. При более высокой амплитуде колебаний $A = (1,5 - 2) \delta$ нагрев кромок металла дугой увеличивается, в то время как по центру стыка максимальные температуры нагрева уменьшаются. При возрастании амплитуды до значений $(2,5 - 3) \delta$ и более тепловложение в основной металл неравномерно вследствие горения дуги за пределами основной области формирова-

ния сварного шва. Это снижает вероятность образования качественного сварного шва.

Шов, выполненный при амплитуде $A=(3 - 4) \delta$, получается качественным, с хорошим перекрытием зазора. Провисание не превышает 0,9 мм.

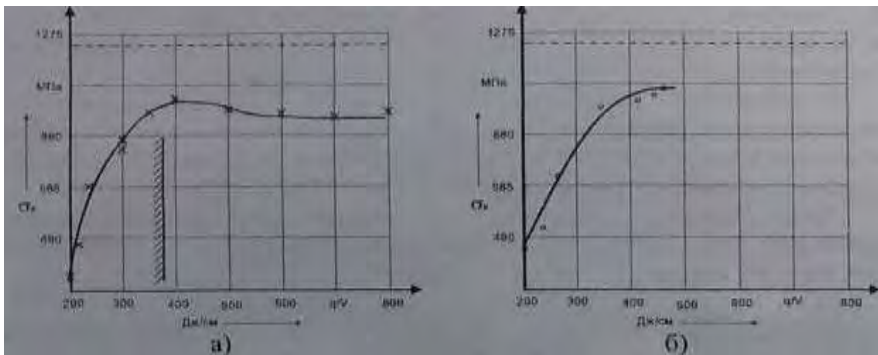
В четвертой главе приведены результаты исследований по разработке технологии сварки стыковых соединений из тонколистового металла.

Исследования по сварке аустенитных сталей проводились на механизированной установке, в комплект которой входили устройства для микроплазменной сварки МПУ-4 и перемещения горелки по линии стыка, позволяющие сваривать продольные швы.

Выбор вида сварного соединения и режимов микроплазменной сварки производился на основании экспериментальных исследований различных вариантов сварки: односторонней и двусторонней. Сравнение вариантов нами осуществлялось с учетом особенностей формирования шва, размеров ЗТВ и прочностных свойств сварного соединения.

Характер изменения прочности сварных соединений, выполненных односторонней сваркой, имеет вид кривой с максимумом значения погонной энергии около 400 Дж/см (рис. 5, а).

Восходящая ветвь кривой соответствует области режимов, при которых наблюдается неполный провар. Нисходящая ветвь кривой указывает на



стопорное соединение, б – двустороннее соединение, в – основной металл, и граница полного провара

уменьшение прочности соединения, связанное с увеличением зоны разупрочнения и ростом времени пребывания металла при температурах выше температуры рекристаллизации.

На графике (рис.5, б) показана зависимость прочности двухстороннего сварного соединения от погонной энергии сварки. Прочность сварных соединений, выполненных двусторонней сваркой, несколько выше прочности односторонних соединений. Это связано с меньшими размерами зоны термического влияния и меньшим временем пребывания металла при температурах рекристаллизации.

Определены оптимальные параметры режимов сварки двустороннего шва, при которых обеспечивается качественное формирование шва, полное

проплавление металла с небольшим перекрытием проходов. Повышение скорости охлаждения металла привело к подавлению дендритной ликвации и уменьшению среднего поперечника дендритов и размеров их друз. Соответственно улучшились условия кристаллизации сварочной ванны и срастания кристаллитов. При этом произошло существенное измельчение их структуры /1,7/, что положительно сказалось на повышении пластичности металла в температурном интервале хрупкости.

В результате проведенных исследований нами разработана технология сварки тонколистовых аустенитных сталей, упрочненных холодной пластической деформацией.

При разработке технологии механизированной сварки тонколистовых сталей исследовалась устойчивость жидкого металла ванны на весу.

Показано, что область устойчивого равновесия жидкой сварочной ванны, её способность обрабатывать силовые возмущения без нарушения равновесия и образования прожогов расширяется при использовании колебаний электрода. По этому направлению предотвращению прожогов разрабатывались технологии механизированной и роботизированной сварки тонколистового металла с зазорами, возникающими в результате неточной сборки и упругопластического деформирования от нагрева сварочной дугой.

На основании проведенных исследований нами была разработана специальная конструкция горелки, обеспечивающая колебания электрода поперек оси шва с частотой 0 -12 Гц и амплитудой колебаний 0-7 мм. На разработанную горелку получен патент № ВУ 6962 С1 /14/.

Исследования при сварке пластин толщиной 0,5 - 2 мм показали положительное влияние колебаний электрода на устойчивость сварочной ванны (рис. 6), связанное с перераспределением теплового потока и давления дуги.

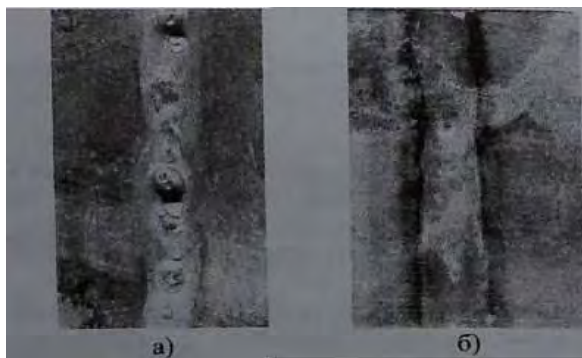


Рис. 6 - Обратная сторона швов, выполненных на металле толщиной 1мм: а-без колебаний электрода; б - с колебаниями электрода.

Для стали толщиной $\delta = 1$ мм при зазоре, равном $0,5 \delta$, и при прямолинейном движении электрода шов формируется без прожогов, но с провисанием, превышающим значения, допустимые по стандарту. Увеличение зазора до величины $h = \delta$ приводит к появлению прожогов. Уменьшить провисание шва и избежать прожогов удалось, применив при сварке колебания электрода /4/.

При сварке с прямолинейным движением электрода появляются дефекты в виде прожогов и больших (до 2 мм) провисаний шва (рис. 6а). При использовании колебаний электрода по части дуги окружности с амплитудой

колебаний 4 мм и частотой 3 Гц (рис. 6б) прожоги устраняются, остается незначительно провисание обратной стороны шва.

Обеспечение необходимой точности сборки при сварке металла малой толщины затруднено даже с использованием частых прихваток. Из-за сварочных деформаций возникают смещения кромок.

При сварке без колебаний электрода смещения кромок величиной до 0,3 - 0,45 не препятствуют качественному формированию шва [12]. При дальнейшем увеличении смещения возникают прожоги и провисания обратной стороны шва, превышающие допустимые стандартом значения. Эти дефекты устраняются при сварке с колебаниями электрода по оптимизированной траектории. Такие швы представлены на рис.7. Швы формировались с провисанием не более 0,3 мм, шириной 4,5 - 5,0 мм и высотой 0,6 - 0,7 мм. Величина смещения кромок k , превышающая толщину металла, не позволяет получать качественные соединения даже с применением колебаний [13].

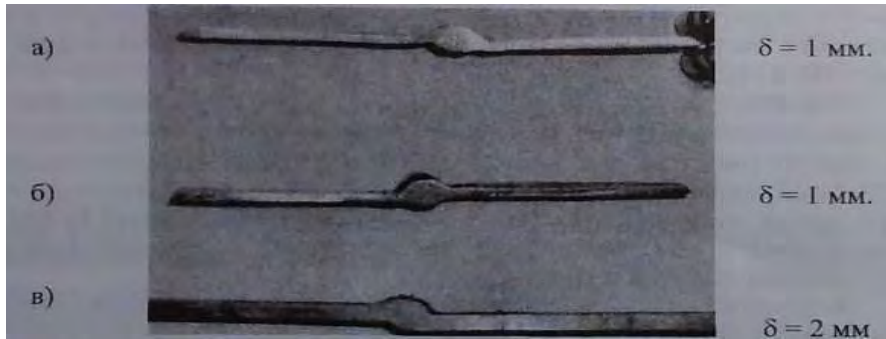


Рис. 7 - Сварные соединения с технологическими смещениями кромок: а) $k = 0,5\delta$; б) $k = 1,0\delta$; в) $k = 0,8\delta$

Полученные результаты послужили основанием для разработки технологии роботизированной сварки, реализованной на робототехническом комплексе РМ-01. Сварные швы выполнялись без колебаний (рис. 8 участок А) и с колебаниями электрода поперек оси шва (участок В). Автоматизация процесса перемещения электрода позволила улучшить условия формирования и внешний вид сварного шва.

Внедрение в производство технологии сварки тонколистовой стали с колебаниями электрода осуществлено при изготовлении бортов полуприцепа, изготавливаемого из листовой стали 08пс, и квадратной трубы из стали 20, $\delta = 1,2$ мм, толщина стенки трубы 2 мм. Механизированная сварка производилась в среде защитных газов с поперечными колебаниями электрода.

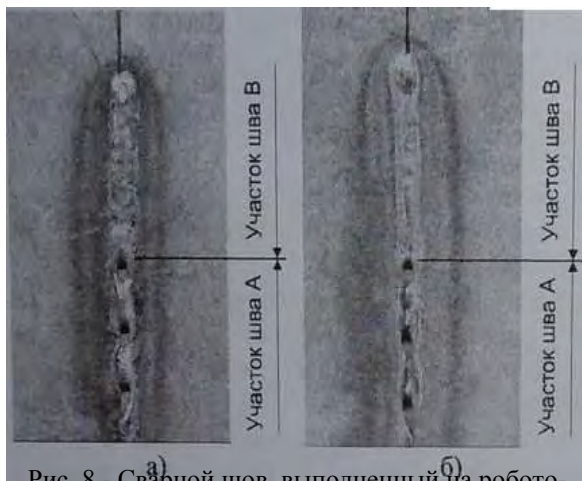


Рис. 8 - Сварной шов, выполненный на робототехническом комплексе РМ-01: а) лицевая сторона шва; б) обратная сторона шва

Выполнялись стыковые швы борта полуприцепа №9397-8502010-12 с повышенными технологическими зазорами на участке сборки и сварки бортов заготовительно-сварочного цеха. Результаты отражены в технологическом процессе ТП-04608862.02291.0023 7 на сборку и сварку бортов полуприцепа.

Оптимизированы параметры режимов сварки, позволяющие выполнять соединения без дополнительных операций сборки и за-

чистки. Наилучшие результаты достигнуты при сварке металла толщиной 1 мм проволокой диаметром 0,8 мм с амплитудой колебаний 4 мм и частотой 3 Гц.

Разработанная технология сварки тонколистового металла также прошла производственные испытания и внедрена в производство при изготовлении сварных тонкостенных форм для получения композиционных панелей на ЗАО «Завод полимерных труб», а также внедрены в учебный процесс на кафедре «Оборудование и технология сварочного производства» ГУВПО «Белорусско-Российский университет» при проведении лабораторных работ по курсу «Теория сварочных процессов».

Экономический эффект от внедрения результатов работы в ценах 2005 года составил 19594337 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа равновесия сил, действующих на жидкую сварочную ванну при сварке на весу тонколистового металла, определены условия, при которых происходит устойчивое формирование сварочной ванны и образование шва без прожогов. Получены математические зависимости провисания сварочной ванны от силы поверхностного натяжения и установлено, что максимально допустимая величина провисания жидкого металла при толщине изделия 0,8 - 1,2 мм составляет 2,5 - 3,5 мм. При сварке с зазором существуют критические значения ширины шва (6-7 мм) и зазора (2-3 мм), при превышении которых сварочная ванна не формируется и образуются

прожоги. Устойчивое формирование сварного шва при линейном движении источника нагрева происходит при ширине шва 3-4 мм. /2,5,10/

2. При исследованиях с использованием математической модели процесса нагрева сварного соединения выявлены дополнительные пути регулирования скорости охлаждения ЗТВ, предотвращения образования мартенсита и сопутствующих холодных трещин для сталей, чувствительных к термическому циклу сварки, за счет перераспределения теплового потока, достигающиеся колебаниями электрода перпендикулярно оси сварного шва. Показано, что при сварке на оптимальном режиме с колебаниями электрода (амплитуда 1,5-2 мм, частота 3 Гц) скорость охлаждения стали 45 толщиной 1,0 мм составляет 18 и 30 °С/с, при этом образуется 90 - 93 % М и 88 - 91 %М соответственно, что существенно меньше, чем при сварке без колебаний (48°С/с), при которой образуется 97 - 99 % М. /3,6,9,11/

3. Впервые определено влияние смещения кромок соединяемых деталей на процесс сварки металла толщиной 1-2 мм и установлены максимально допустимые смещения и зазоры между кромками стыковых соединений. Установлены оптимальные параметры поперечных колебаний электрода (амплитуда - 2 мм, частота - 3 Гц), предотвращающие образование прожогов и позволяющие сваривать соединения с зазором. Использование указанных параметров обеспечивает устойчивое формирование сварочной ванны при начальных зазорах и смещениях кромок, равных 0,1 - 1 мм толщины металла, что существенно больше, чем при сварке без колебаний. /12,13/

4. Показана целесообразность использования концентрированного источника энергии для ограничения размеров зоны разупрочнения предварительно упрочненных холодной пластической деформацией тонколистовых аустенитных сталей (10X17H13M2TЮ, 12X18H10T) и уменьшения времени роста зерна вблизи шва в диапазоне температур 1500 - 400 °С до 2 — 5 с. Выявлено, что работоспособным типом сварного соединения является двусторонний шов, выполняемый микроплазменной сваркой. Высокая дисперсность дендритной структуры шва при сварке на рекомендуемых режимах приводит к повышению его прочности в 1,4 раза по сравнению с прочностью шва, выполненного неплавящимся электродом в среде аргона и имеющего грубодендритную структуру. /1,7,8/

5. Разработана технология механизированной и роботизированной сварки тонколистовых сталей 0,8 — 1,2 мм с зазором между стыкуемыми кромками, равным толщине металла, и определены оптимальные параметры режимов сварки, позволяющие выполнять сварное соединение при силе сварочного тока 60 - 80 А, напряжении на дуге 17 - 20 В, амплитуде колебаний электрода 2мм и частоте 3 Гц. Спроектирована и испытана новая конструкция сварочной горелки для механизированной сварки в защитных газах плавящимся электродом, позволяющая механизировать поперечные перемещения электрода (патент на изобретение ВУ 6962 С1). Результаты работы прошли производственные испытания и внедрены в производство при изготовлении бортов полуприцепа на филиале РУП «МАЗ» завод «Могилевтрансмаш» и при производстве сварных тонкостенных форм для изготовления компози-

ционных панелей на ЗАО «Завод полимерных труб» с экономическим эффектом 19594337 руб. /4,14/

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Якубович Д.И., Павлук С.К. Лупачев А.Г. Повышение сопротивления разрушению тонколистовых соединений из хромоникелевых аустенитных сталей, упрочненных холодной пластической деформацией // Сварка и родственные технологии / Республиканский межведомственный сборник научных трудов,- Минск, 1998.- с. 46-49.

2. Якубович Д.И. К вопросу о роли поверхностного натяжения в процессе формирования сварочной ванны при сварке металла малой толщины // Сварка и родственные технологии / Республиканский межведомственный сборник научных трудов - Минск, 2001 г. - с.40-41.

3. Якубович Д.И. Влияние поперечных колебаний электрода на формирование сварного шва и структуру зоны термического влияния: Вестник МГТУ Прогрессивные технологии оборудование инструменты и материалы в машиностроении, Могилев, № 1,2004 г. - с.200-204.

4. Якубович Д.И. Влияние точности сборки на геометрические размеры и форму шва при сварке стали малой толщины // Сварочные технологии и оборудование. Журнал для специалистов сварочного производства. - 2004.-№3. - с. 13-15.

5. Якубович Д.И. Влияние поверхностного натяжения на формирование сварочной ванны при сварке не весу тонколистового металла // Сварочное производство / Ежемесячный научно-технический и производственный журнал,- Москва, 2004 г.- №10. - с.17-20.

6. Якубович Д.И. Влияние поперечных колебаний электрода на термический цикл сварки, структуру металла шва и околошовной зоны: Сб. на-уч. трудов. Перспективные технологии, материалы и системы. Могилев, 2005. - с. 422-425.

7. Якубович Д.И., Павлук С.К. Оптимизация процесса изготовления лент литьевых машин: Сб. тезисов, Минск, 1999 г.// Материалы международной научно-технической конференции профессоров, преподавателей, на-уч. работников и аспирантов БГПА.- Минск, 1999. - с.173.

8. Якубович Д.И., Павлук С.К. Работоспособность зоны соединения теплостойких сталей перлитного класса и жаропрочных сталей аустенитно-гокласса при теплосменах // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: Материалы междунар. научн.-техн. конференции. - Могилев, 1999 г. - с. 361.

9. Якубович Д.И. Особенности нагрева тонких пластин при сварке с колебаниями электрода // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: Материалы научн.-техн. конференции. - Могилев, 2000. - с.229.

10. Якубович Д.И. Влияние формы расплавленного металла на образование сварного шва // Прогрессивные технологии, технологические про-

цессы и оборудование: Материалы междунар. научн.-техн. конференции,-Могилев, 2003 .- С. 269.

11. Якубович Д.И., Павлюк С.К. Регулирование структуры зоны термического влияния при сварке тонколистовой прокаливающейся стали // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: Материалы международной научно-технической конференции. - Могилев, 2004. - с. 258-259.

12. Якубович Д.И. Влияние перекоса кромок на формирование шва при сварке металла малой толщины: Материалы международной научно-технической конференции, часть 1. / Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии.- Могилев, 2005. - с. 223.

13. Якубович Д.И. Исследование влияния перекоса кромок на устойчивость горения дуги при сварке с колебаниями электрода: Материалы международной научно-технической конференции, часть 1 / Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии,- Могилев, 2005. - с. 224

14. Пат. ВУ 6962 С1, В 23К9/12, 9/30. Устройство для дуговой сварки с колебаниями электрода / Павлюк С.К., Якубович Д.И.- №20001091; Заявл. 12.08.2000; Опубл. 12.14.2004.

РЕЗЮМЕ

ЯКУБОВИЧ ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ

Разработка процесса сварки тонколистовых сталей, чувствительных к термическому циклу, с управлением тепловым потоком источника нагрева

Ключевые слова: сварка, тонколистовой металл, прожоги, смещение кромок, перераспределение тепловложения, поперечные колебания электрода, зона термического влияния, холодные трещины.

Объект исследований: сварные соединения, выполненные из тонколистового металла.

Цель работы: Разработка процесса сварки тонколистовых сталей, чувствительных к термическому циклу, обеспечивающего условия устойчивого равновесия сварочной ванны и бездефектного образования сварного соединения за счет управления тепловым потоком источника нагрева.

Проанализировано влияние перераспределения тепловложения в изделие на процесс перекрытия зазоров и смещения кромок. Для сталей, чувствительных к термическому циклу сварки, выявлены дополнительные возможности регулирования скорости охлаждения зоны термического влияния, предотвращения образования мартенсита и сопутствующих холодных трещин за счет перераспределения теплового потока при колебаниях электрода.

На основе теоретических и экспериментальных исследований определено влияние смещения кромок соединяемых деталей на процесс сварки и установлены максимально допустимые смещения и зазоры между кромками стыковых соединений металла малой толщины 0,1 - 2,0 мм. Показана эффективность использования поперечных колебаний электрода для повышения качества формирования сварного шва и предотвращения образования прожогов.

Показана целесообразность использования более концентрированного источника энергии для ограничения размеров зоны разупрочнения предварительно наклепанной стали в диапазоне температур 1500 - 400 °С и уменьшения времени роста зерна вблизи шва до 2 - 5 с.

Разработана технология роботизированной сварки стали толщиной 0,8 — 1,2 мм и определены оптимальные режимы, позволяющие получать* качественное сварное соединение при силе сварочного тока 60 — 80 А, напряжении 17 - 20 В, амплитуде 4 мм и частоте 3 Гц. Результаты исследований сварки в защитных газах стыковых тонколистовых соединений с колебаниями электрода внедрены в производство.

РЭЗЮМЕ

ЯКУБОВІЧ ДЗМІТРЫЙ ІВАНАВІЧ

Распрацоўка працэса зваркі тонкаліставых сталяў, адчувальных да тэрмічнага цыклу, з кіраваннем цеплавым патокам крыніцы нагрэва

Ключавыя словы: зварка, тонкаліставы метал, прапал, змяшчэнне кантаў, пераразмеркаванне цеплаўкладання, папярочныя ваганні электродна, зона тэрмічнага ўздзеяння, халодныя трэшчыны.

Аб'ект даследаванняў: зварныя злучэнні, выкананыя з тонкалісгавога металу.

Мэта работы: Распрацоўка працэса зваркі тонкаліставых сталяў, адчувальных да тэрмічнага цыклу, забяспечваюога умовы устойлівай раўнавагі зварочнай ванны і бездефектнага утварэння зварных злучэнняў за кошт кіравання патокам крыніцы нагрэва.

Прааналізавана ўздзеянне пераразмеркавання цеплаўкладання ў выраб на працэс перакрыцця зазораў і змяшчэння кантаў. Для сталяў, адчувальных да тэрмічнага цыкпу зваркі, выяўлены дадатковыя магчымасці рэгулявання хуткасці ахаладжэння ЗТУ, прадухілення ўтварэння мартэнсіту і халодных трэшчын за кошт пераразмеркавання цеплавога патоку пры ваганнях электродна.

Даследавана ўздзеянне змяшчэння кантаў злучаемых дэталей на працэс зваркі і вызначаны максімальна дапушчальныя змяшчэнні і зазоры паміж кантамі стыкавых злучэнняў метала малой таўшчыні 0,1-0,2 мм. Паказана эфектыўнасць ужывання папярочных ваганняў электродна для павышэння якасці фарміравання зварнога шва і прадухілення ўтварэння прапалаў.

Паказана мэтазгоднасць ужывання больш канцэнтраванай крыніцы энергіі, для абмежавання памераў зоны разумацавання папярэдне наклепанай сталі ў дыяпазоне тэмператур 1500-400 °С і памяншэння часу росту зярняці паблізу шва да 2-5 с.

Разработана тэхналогія робатызаванай зваркі сталі таўшчынёй 1 мм, і знойдзены ашымальныя рэжымы, якія дазваляюць атрымаваць якаснае зварное злучэнне пры сіле зварачнага тока 60-80 А, напружанні 17-20 В, амплітудзе 4 мм і частаце 3 Гц. Вынікі даследаванняў зваркі стыкавых злучэнняў таўшчынёй 1,2 мм у абаронных газах з ваганнямі электродна ўкораны ў вытворчасць.

RESUME

Yakubovich Dmitri Ivanovich

Development of welding process of heat affectable thin-sheet steels by heat source flow control

Key words: welding, thin-sheet metal, burnings-through, welding edges displacement, heat input redistribution, transversal electrode oscillations, heat-affected zone, cold cracks.

Research object: Elaboration of heat-a (Tec table thin-sheet sleds welding process, such that should ensure welding pool stable equilibrium and good weldment formation, by heat input redistribution

Heat redistribution influence on clearances filling and welding edge* displacement has been analysed. For heat-affected steel*, there have been found the additional ways of velocity regulation heat-affected zone cooling, martensite and attendant cold cracks formation prevention by heat redistribution at electrode oscillation*.

Welding edges displacement influence on welding process has been investigated into and maximum displacements and clearances for butt welds of thin-sheet (0,1-0,2 mm) metal have been found. Transversal electrode oscillations affectivity for weld formation quality increase and burnings-through formation prevention has been shown.

More concentrated energy source application expediency has been shown in order to limit preliminarily riveted steel unstrengthened zone dimensions at temperature diapason of 1500-400 °C and decrease grit size grow time near the seam to 2-5 sec.

Robot welding technology for 1 mm steel has been worked out. Optimum schedules that allow to obtain quality welds at welding current of 60-80 A, voltage of 17-20 V, amplitude of 4 mm and frequency of 3 Hz have been found. Results of research of gas-shielded, butt welding of 1.2 mm steel with electrode oscillations have been introduced in production.



Якубович Дмитрий Иванович

Разработка процесса сварки тонколистовых сталей, чувствительных к термическому циклу, с управлением тепловым потоком источника нагрева

05.03.06 Технологии и машины сварочного производства

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 17.11.2006 Формат 60x84/16 Бумага офсетная. Гарнитура Таймс

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1.4. Уч.-изд. л. 1.54. Тираж 75 экз. Заказ № 671

Издатель и по полиграфическое исполнение
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»
ЛИ №02330/375 от 29.06.2006г.
212005, г. Могилев», пр. Мира, 43

© ГУВПО «Белорусско-Российский»
университет, 2006