

УДК 621.791.01

Исследование процесса управления пространственным положением сварочной дуги за счёт изменения параметров её собственного магнитного поля
Managerial process research by spatial position a welding arc at the expense change parameters of its own magnetic field

В.П. Сидоров, И.В. Смирнов, А.И. Захаренко, В.Г. Добровольский, Э.С. Гилязов

ООО «Сварочные машины и технологии», 445004, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Толстого, д. 7, оф. 306, тел./факс (8482) 28-87-26, 8-9272-68-64-67, e-mail: smt-tlt@rambler.ru

Работа выполнена в рамках Государственного контракта №16.516.11.6018 по программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы»

Развитие современной атомной энергетики требует постоянного увеличения объёмов применения современных высокотехнологичных материалов для изготовления узлов и агрегатов атомных установок. К числу таких материалов относятся высоколегированные коррозионностойкие, жаропрочные и жаростойкие стали, высокотехнологичные цветные металлы и их сплавы: алюминий, титан, цирконий и т.п. Вследствие разнообразия применяемых металлов и сплавов, часто возникает необходимость сварки между собой разнородных материалов, например, стали с алюминием или титаном.

Сварка разнородных материалов, существенно отличающихся своими физико-химическими свойствами и свариваемостью, остаётся достаточно сложной, трудоёмкой и дорогостоящей задачей. Одним из современных подходов, направленных на решение этой задачи, является применение способа аргонодуговой сварки неплавящимся электродом с управляемым тепловложением. Суть предлагаемого подхода достаточно подробно описана в работах [1 - 4]. Способ автоматической аргонодуговой сварки с управляемым тепловложением основан на практическом применении принципа пространственно-параметрического управления тепловложением. Указанный принцип основан на сочетании управления положением сварочной дуги в пространстве с синхронным управлением параметрами процесса сварки (силой тока, напряжением дуги, временем горения дуги).

Применение пространственно-параметрического управления тепловложением при сварке разнородных материалов позволяет отдельно управлять количеством тепла, вводимым в процессе сварки в каждый из свариваемых металлов. Это в свою очередь позволяет управлять направлением и скоростью протекания химических реакций в зоне формирования сварного соединения и влиять на структуру и свойства сварных соединений разнородных металлов.

Основным новшеством, применяемым в способе сварки с управляемым тепловложением, является управление пространственным положением сварочной дуги за счёт изменения параметров её собственного магнитного поля [5,6]. Предлагаемый подход основан на том, что изменение положения сварочной дуги в пространстве происходит не под воздействием внешних магнитных полей, а за счёт изменения напряжённости магнитного поля образующегося вокруг сварочной дуги в процессе сварки, и называемого собственным магнитным полем сварочной дуги. Данный эффект основан на том, что при нарушении симметричности собственного магнитного поля сварочной дуги, в нём возникает область в которой плотность линий магнитной индукции увеличивается, и область в которой плотность линий магнитной индукции уменьшается. В результате дуга отклоняется от своей оси в сторону области магнитного поля, в которой плотность линий магнитной индукции уменьшается (рис. 1) [7]. В технике данный эффект получил название «магнитное дутьё».

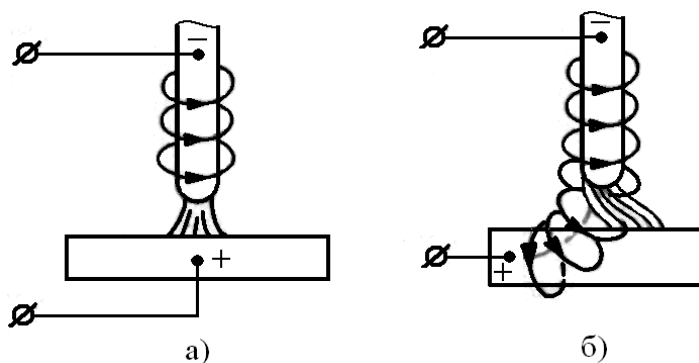


Рисунок 1 – Действие собственного магнитного поля на дугу

а – при отсутствии искривления магнитного поля; б – при наличии искривления собственного магнитного поля дуги (т.е. «магнитного дутья»)

В работах [1,2] приведено достаточно подробное описание исследований процесса изменения пространственного положения сварочной дуги за счёт изменения параметров её собственного магнитного поля. На основе проведённых экспериментальных исследований установлены основные закономерности данного процесса. В частности отмечено, что основным параметром, влияющим на величину угла отклонения сварочной дуги от оси неплавящегося электрода является расстояние от оси электрода до контакта устройства для подвода тока к изделию. Отмечена общая закономерность, выраженная в том, что с увеличением этого расстояния величина угла отклонения сварочной дуги уменьшается. При величине сварочного тока 200А эффект отклонения сварочной дуги полностью исчезает при расстоянии от оси электрода до контакта токоподвода более 90 мм.

Несмотря на ценность представленных в работах [1,2] исследований, следует отметить справедливость их результатов для достаточно узких условий проведения сварочного процесса, а именно для сварки углеродистых сталей на токах до 200А. Проведённые исследования дают

достаточно чёткие понятия о количественных закономерностях процесса сварки с управляемым тепловложением углеродистых сталей, и практически не раскрывают физических механизмов возникновения эффекта отклонения дуги, и, главное, физического описания механизмов влияния параметров процесса сварки на величину угла отклонения сварочной дуги.

Для дальнейшего развития способа сварки с управляемым тепловложением, и его применения для сварки разнородных материалов, необходимо чёткое понимание механизмов влияния параметров процесса сварки на величину угла отклонения сварочной дуги. Как отмечено выше, основное влияние на величину угла отклонения сварочной дуги от оси неплавящегося электрода оказывает расстояние от оси неплавящегося электрода до контакта устройства для подвода тока к изделию. Данная работа посвящена обзору исследований, целью которых являлось выявление закономерностей влияния расстояния от оси неплавящегося электрода до контакта токоподвода, на величину угла отклонения сварочной дуги.

В работе [3] авторами предложена гипотеза, согласно которой возникновение отклонения сварочной дуги от оси электрода под действием эффекта «магнитного дутья» вызвано взаимодействием двух магнитных полей – магнитного поля тока протекающего по электроду и дуге, а также магнитного поля тока протекающего по изделию (см. рис. 2).

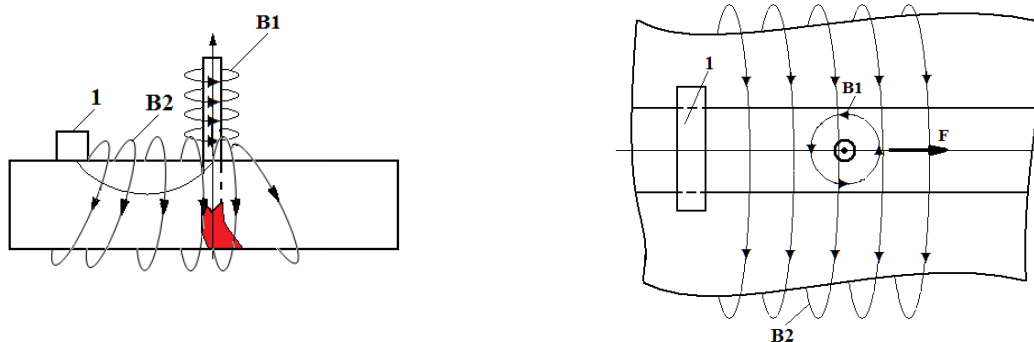


Рисунок 2 – Влияние тока, протекающего по изделию на пространственное положение дуги: B1 – линии магнитной индукции собственного магнитного поля дуги; B2 – линии магнитной индукции магнитного поля тока протекающее по изделию; 1 – контакт подвода тока к изделию; F – сила, действующая на сварочную дугу, и возникающая при взаимодействии магнитных полей с индукцией B1 и B2

Сварочная дуга при этом рассматривается как гибкий проводник с током, внесенный в магнитное поле тока, протекающего по изделию, а отклонение дуги от оси электрода будет вызвано действием на сварочную дугу силы Ампера. При этом индукция магнитного поля тока в изделии определяется следующим выражением [3]:

$$B_2 = \frac{\mu_0}{2} \int_0^{\delta} j(x) dx \quad (1)$$

где: B_2 – магнитная индукция поля изделия; μ_0 – магнитная постоянная равная $1,256637 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; $j(x)$ – линейная плотность тока в плоскости параллельной поверхности изделия, А; δ - толщина пластины (изделия), м.

Величина силы Ампера, действующей на сварочную дугу, как на гибкий проводник с током, и находящийся в магнитном поле с индуктивностью B_2 , будет определяться выражением (2):

$$dF = \frac{\mu_0}{2} \cdot dl \cdot I \cdot \sin \alpha \cdot \int_0^{\delta} j(x) \cdot dx \quad (2)$$

где: dl – длина проводника с током (в данном случае это будет длина дуги), I – сила сварочного тока, протекающая по дуге, А; $\sin \alpha$ – угол, образующийся между изделием и дугой.

Из выражения (2) видно, что сила Ампера будет прямо пропорциональна длине сварочной дуги, силе тока, протекающего по сварочной дуге и плотности тока в изделии, с учётом её интегрирования по толщине изделия. При неизменных энергетических характеристиках процесса сварки (т.е. силе тока в сварочной цепи) изменение расстояния от оси неплавящегося электрода до контакта токоподвода не оказывает существенного влияния на длину сварочной дуги и величину сварочного тока в ней. Существенное влияние изменение расстояния должно оказывать только на плотность тока в изделии, и следовательно на величину индукции магнитного поля тока в изделии.

Из выражений 1 и 2 явно вытекает, что основным фактором, оказывающим влияние на величину отклонения дуги является величина сварочного тока, протекающего по сварочной дуге и плотность тока в изделии. Если высказывания относительно влияния величины тока на угол отклонения дуги достаточно хорошо соответствуют известным физическим принципам и не вызывают сомнений, то высказывания относительно изменения плотности тока в изделии с изменением расстояния от дуги до токоподвода не находят прямого подтверждения в известных физических постулатах и проводимых ранее исследованиях. Поэтому основным направлением исследований, результаты которых изложены в данной статье, являлось направление по исследованию картины растекания тока по изделию с изменением расстояния от дуги до изделия.

Непосредственное определение картины растекания сварочного тока по изделию в процессе сварки является сложно решаемой задачей, поэтому было принято решение о проведении исследований изменения картины растекания тока по изделию с изменением расстояния от дуги до изделия с помощью имитационного моделирования, используя для этого метод электромоделирования. Для метода электромоделирования использовали плоские физические модели реальных объектов.

Распределение плотности тока изучали на электрической модели сечения по известной методике [8]. Метод электро моделирования за счёт измерения падения напряжения в различных точках модели (как правило, в нескольких равноотстоящих сечениях модели) позволяет, применительно к нашей цели, построить эквипотенциальные поверхности в исследуемом сечении. Измеренные значения падений напряжения будут пропорциональны плотности тока в данной точке сечения [188 - 192]. Линии эквипотенциальных поверхностей падений напряжения будут эквивалентно отражать картину распределения плотности тока в исследуемом сечении.

Для выполнения исследований с помощью электро моделирования были изготовлены физические модели, имитирующие процесс подвода напряжения к дуге и токоподводу в процессе сварки. Эксперименты проводились для имитируемой толщины изделия – 10 мм.

Все исследуемые модели 1 (рис. 3) вырезали из листа стали 08X18H10T толщиной 0,1 мм в масштабе 5:1 и наклеивали её на текстолитовую пластину. На модель 1 наносили систему продольных и поперечных рисок (сечений характерных зон), с шагом 2 мм (с учётом масштаба 10 мм). С торцов модели равномерно припаивали провода 2 и 3, которыми модель соединялась с источником тока Орион РW 415. Один из проводов имитировал сварочную дугу, а второй – контакт токоподвода к изделию. Для модели имитирующей поверхность изделия контакты изготавливали из листовой стали толщиной 0,4 мм и на них напаяли провода от источника питания (см. рис. 4). Имитируемый радиус пятна нагрева дуги приняли равным 10 мм. Размеры контакта, для подвода тока к изделию приняли 10×10 мм.

Через модель пропускали ток силой 9А при напряжении 24 В. Милливольтметром 5 с помощью щупа 6 с двумя электродами 7 и 8 измеряли падение напряжения в точках пересечения продольных и поперечных рисок. База измерений (расстояние между осями электродов 7 щупа 8) составляла 5 мм, измерения производили при горизонтальном положении щупа.

Исследование состояло из двух экспериментов: 1 – исследование растекания тока по поперечному сечению изделия толщиной 10 мм; 2 – исследование растекания тока по поверхности изделия.

Эксперименты состояли из серии опытов, каждый из которых проводился при фиксированном значении расстояния от дуги до токоподвода. От опыта к опыту расстояние от дуги до токоподвода изменяли с шагом 10 мм. В каждом эксперименте расстояние изменяли по следующему плану: 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 мм.

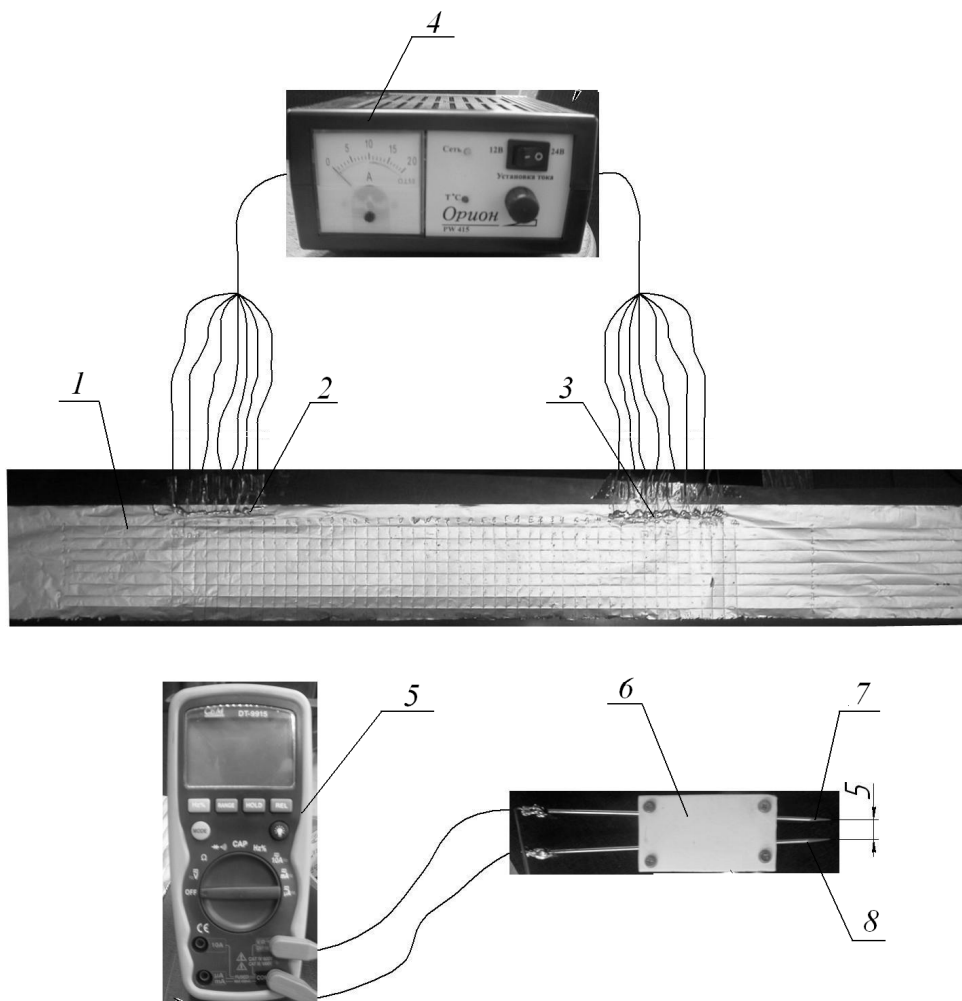


Рисунок 3 – Схема модели по толщине для проведения исследований

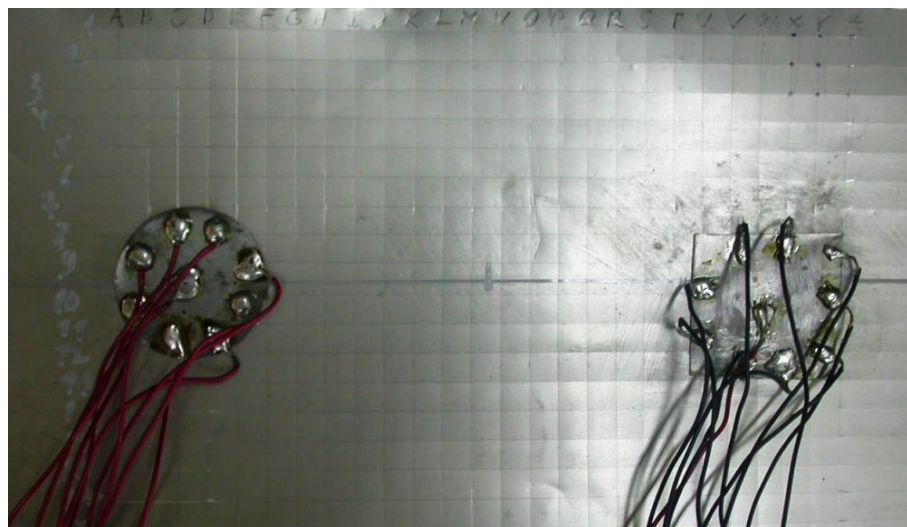
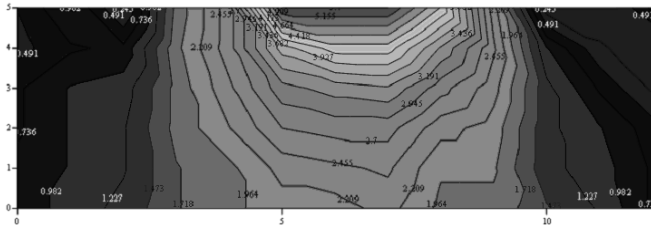
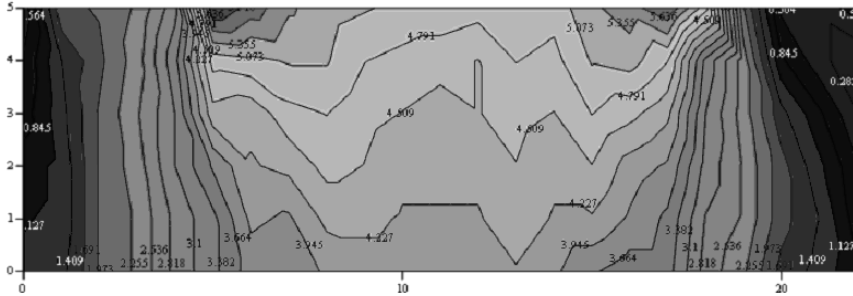


Рисунок 4 – Схема модели поверхности изделия для проведения исследований

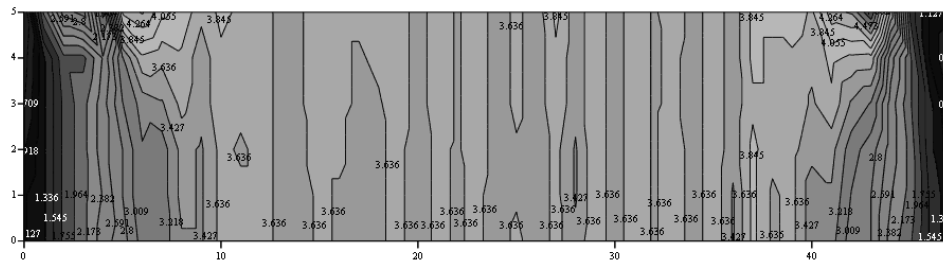
По описанной выше методике были проведены исследования, выборочные результаты которых представлены на рисунках 5 и 6.



а)

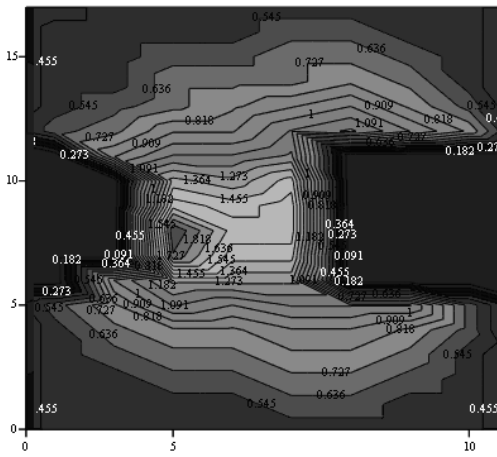


б)

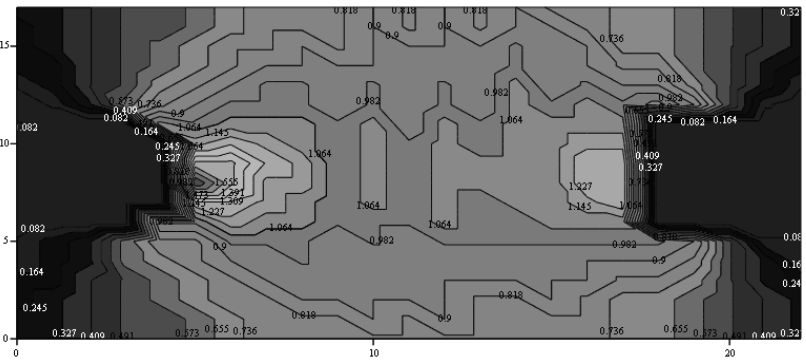


в)

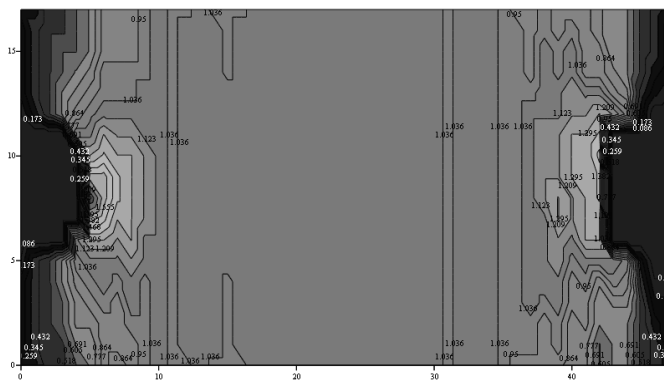
Рисунок 5 – Картина поля эквипотенциальных поверхностей, мВ в экспериментах по изучению распределения плотности тока по сечению изделия толщиной 10 мм. Исследуемые расстояния: а – 10 мм; б – 30 мм, в – 80 мм.



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Картина поля эквипотенциальных поверхностей, мВ в экспериментах по изучению распределения плотности тока по поверхности изделия. Исследуемые расстояния: а – 10 мм; б – 30 мм, в – 80 мм.

Выводы и обсуждение

1. Анализ экспериментальных данных показывает, что увеличение расстояния от оси электрода до контакта токоподвода приводит к уменьшению плотности тока в изделии и перераспределению тока по толщине изделия. При небольших расстояниях в пределах 10-30 мм большая часть тока сосредоточена в приповерхностных слоях изделия, что вызывает значительное локальное повышение плотности тока в приповерхностных слоях. С дальнейшим увеличением расстояния происходит постепенное выравнивание плотности тока по толщине, и уменьшение величины плотности тока.
2. Анализ данных по распределению плотности тока на поверхности изделия, также свидетельствует об увеличении зоны растекания и уменьшении плотности тока с увеличением расстояния. Однако динамика изменения плотности тока на поверхности, с изменением расстояния, значительно меньше динамики изменения плотности тока по сечению, что свидетельствует о более значительном влиянии на динамику изменения картины плотности тока толщины изделия.
3. На величину отклонения сварочной дуги (т.е. на угол отклонения) наиболее существенное влияние оказывает величина плотности тока на участке между электродами, т.к. в местах, непосредственно примыкающих к электродам величина местной зональной плотности тока (и напряжённости поля) остаётся практически постоянной и не претерпевает существенных изменений с изменением расстояния между электродами модели.

Обобщая сделанные выводы можно сформулировать обобщённую картину влияния расстояния от оси электрода до контакта токоподвода на процесс сварки с управляемым тепловложением. При расположении токоподвода достаточно близко от дуги, ток протекает в приповерхностных слоях изделия, не успевая рассеяться по всей толщине изделия, при этом плотность тока в поверхностных слоях будет максимальна. Поэтому индукция поля тока изделия тоже будет максимальной, что будет вызывать отклонение сварочной дуги на максимальный угол от оси электрода. Чем дальше токоподвод будет расположен от дуги, тем равномернее ток растекается по изделию (захватывая постепенно всю толщину изделия), а также увеличивается ширина зоны растекания тока. При неизменной силе тока, увеличение расстояния приводит к уменьшению плотности тока в изделии, и соответственно, уменьшению величины магнитной индукции поля этого тока изделия, что приводит к уменьшению силы Ампера действующей на дугу, и уменьшению угла её отклонения от оси электрода.

Заключение

Результаты проведённых исследований позволяют детально понять и сформулировать механизм влияния расстояния от оси электрода до контакта токоподвода на величину угла

отклонения сварочной дуги при сварке с управляемым тепловложением. Полученные результаты позволят разрабатывать адекватные физические и математические модели процесса сварки, используемые при разработке и внедрении новых технологических процессов, с применением способа сварки с управляемым тепловложением, используемых при изготовлении узлов оборудования для атомной энергетики, в частности, при разработке технологии сварки разнородных металлов.

Список литературы

- 1.Смирнов И.В., Захаренко А.И. Управление тепловложением в свариваемые кромки при дуговой сварке неплавящимся электродом // Сварочное производство. 2009. №12. С. 32-36.
- 2.Смирнов И.В., Сидоров В.П., Захаренко А.И. Специфические аспекты описания процесса автоматической аргонодуговой сварки дугой, отклоняемой собственным магнитным полем // Сварочное производство. 2010. №1. С. 3-6.
- 3.Смирнов И.В., Захаренко А.И., Фюссель У. Уменьшение влияния магнитного дутья на пространственное положение дуги при сварке // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, №4. С. 257-261.
- 4.Патент на изобретение №2401726 Российская Федерация МПК В23К9/08. Способ сварки в защитном газе неплавящимся электродом магнитоуправляемой дугой / Смирнов И.В., Сидоров В.П., Захаренко А.И. // Бюл. №29. опубл. 20.10.2010.
- 5.Сидоров В.П., Смирнов И.В., Машнин Н.Е. и др. Управление пространственным положением дуги в процессе сварки корня шва за счет ее собственного магнитного поля // Сб. ст. по докладам Всероссийской научно-технической конференции 15-17 ноября. – Тольятти: ТГУ. 2006. Ч.1, С. 144-147.
- 6.Сидоров В.П., Смирнов И.В., Машнин Н.Е. и др. Повышение пространственной устойчивости дуги на кромках при сварке корня шва // Сб. ст. по докладам Всероссийской научно-технической конференции 15-17 ноября. – Тольятти: ТГУ. 2006. Ч.1, С. 141-144.
- 7.Думов С.И. Технология электрической сварки плавлением. Л.: «Машиностроение», Ленинградское отделение, 1987.
- 8.Раппопорт Е.А. Исследование поля тока на плоских моделях / В сб. «Сварка в приборостроении и радиоэлектронике» - Л.: ЛДНТП. 1969. Ч. 2, С. 61-68.