

УДК 621.791.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ СВАРОЧНОЙ ДУГИ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЕЕ СОБСТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

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

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-tilt@rambler.ru

Заключение совета рецензентов: 29.09.11 Заключение совета экспертов: 03.10.11 Принято к публикации: 08.10.11

В статье приводятся результаты исследований, направленных на установление причин и механизма возникновения эффекта изменения угла отклонения сварочной дуги от оси неплавящегося электрода при изменении расстояния от оси электрода до контакта токоподвода. Данный эффект используется для реализации нового способа сварки с управляемым тепловложением, применяемым для соединения разнородных металлов в узлах и агрегатах оборудования атомных установок.

Ключевые слова: сварка, управление тепловложением, разнородные материалы.

STUDY OF CONTROL PROCESS OF WELDING ARC ATTITUDE BY ITS OWN MAGNETIC FIELD PARAMETERS CHANGE

V.P. Sidorov, I.V. Smirnov, A.I. Zakharenko, V.G. Dobrovolsky, E.S. Gilyazev

“Welding Machines and Technologies” Ltd.
7-306 Tolstogo str., Tolyatty, Samara region, 445004, Russia
Tel./fax (8482) 28-87-26, 8-9272-68-64-67, e-mail: smt-tilt@rambler.ru

Referred: 29.09.11 Expertise: 03.10.11 Accepted: 08.10.11

The paper presents investigation results aimed at understanding reasons and mechanisms of a welding arc angle deviation from an axis of nonconsumable electrode at a distance change from the electrode axis to a current conductor contact. This effect is used for realization of new welding method based on controllable heat input used for connection of manifold metals in units and assemblies of nuclear facilities equipment.

Keywords: welding, heat input control, manifold materials.

Введение

Развитие современной атомной энергетики требует постоянного увеличения объемов применения современных высокотехнологичных материалов для изготовления узлов и агрегатов атомных установок. К числу таких материалов относятся высоколегированные коррозионно-стойкие, 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, остается достаточно сложной, трудоемкой 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 положе-

нием 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.

Теоретический анализ

Основным новшеством, применяемым в способе сварки с управляемым тепловложением, является управление пространственным положением сварочной дуги за счет изменения параметров ее 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 счет изменения напряженности 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 нем 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 дутье».

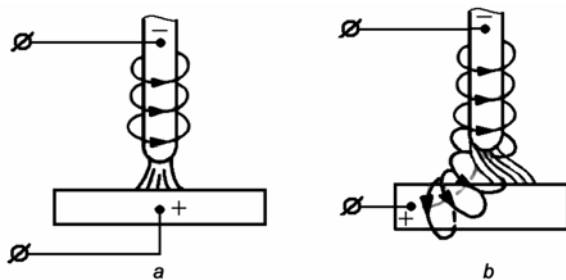


Рис. 1. Действие собственного магнитного поля на дугу: а – при отсутствии искривления магнитного поля; б – при наличии искривления собственного магнитного поля дуги (т.е. «магнитного дутья»)

Fig. 1. Influence of own magnetic field on arc: а – without bending of the magnetic field; б – with bending of own magnetic field of the arc (i.e. "magnetic arc blow")

В работах [1, 2] приведено достаточно подробное описание исследований процесса изменения пространственного положения сварочной дуги за счет изменения параметров ее собственного магнитного поля. На основе проведенных 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 200 А 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 200 А. Проведенные исследования дают достаточно четкие 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 четкое 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, и магнитного поля тока, протекающего по изделию (рис. 2).

Сварочная дуга при этом рассматривается как гибкий проводник с током, внесенный в магнитное поле тока, протекающего по изделию, а отклонение ее 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, A ; δ – толщина пластины (изделия), м.

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

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

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

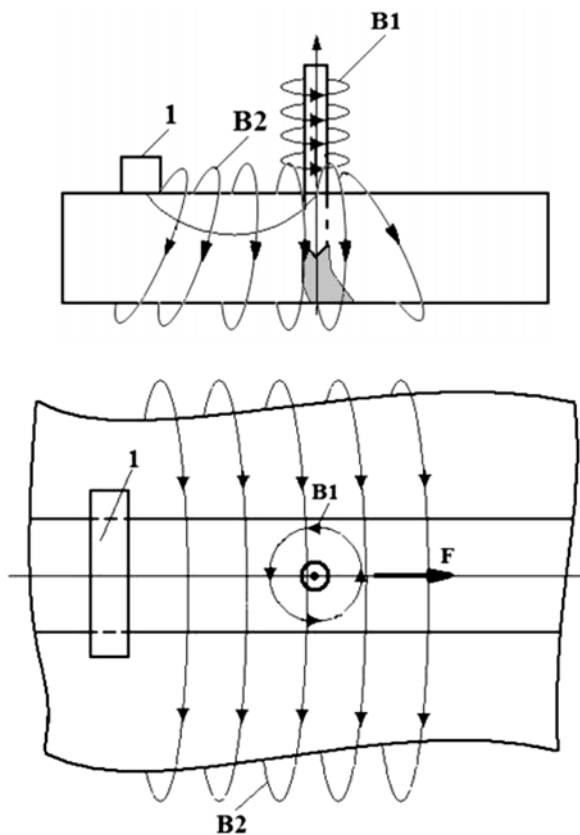


Рис. 2. Влияние тока, протекающего по изделию, на пространственное положение дуги: B_1 – линии магнитной индукции собственного магнитного поля дуги; B_2 – линии магнитной индукции магнитного поля тока, протекающего по изделию; 1 – контакт подвода тока к изделию; F – сила, действующая на сварочную дугу и возникающая при взаимодействии магнитных полей с индукцией B_1 и B_2
Fig. 2. Influence of the current, flowing on the item, on the arc attitude: B_1 – magnetic inductance lines of own magnetic field of the arc; B_2 – magnetic inductance lines of the magnetic field of the current, flowing on the item; 1 – current conductor contact to the item; F – force influencing on the welding arc and appearing at the magnetic field interaction with inductance B_1 and B_2

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 учетом ее 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 токоподвода.

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 токоподвода с помощью имитационного моделирования, используя для этого метод электромоделирования.

Методика эксперимента

Распределение плотности тока изучали на плоской электрической модели по известной методике [8]. Метод электромоделирования за счет 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 [8]. Линии эквипотенциальных поверхностей падений напряжения будут эквивалентно отражать картину распределения плотности тока в исследуемом сечении.

Для выполнения исследований с помощью электромоделирования 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 08Х18Н10Т толщиной 0,1 мм в масштабе 5:1 и наклеивали на текстолитовую пластину. На модель 1 наносили систему продольных и поперечных рисок (сечений характерных зон) с шагом 1 мм (с учетом масштаба 5 мм). С торцов модели равномерно припаивали провода 2 и 3, которыми модель соединялась с источником тока Орион РВ 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 напаивали 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.

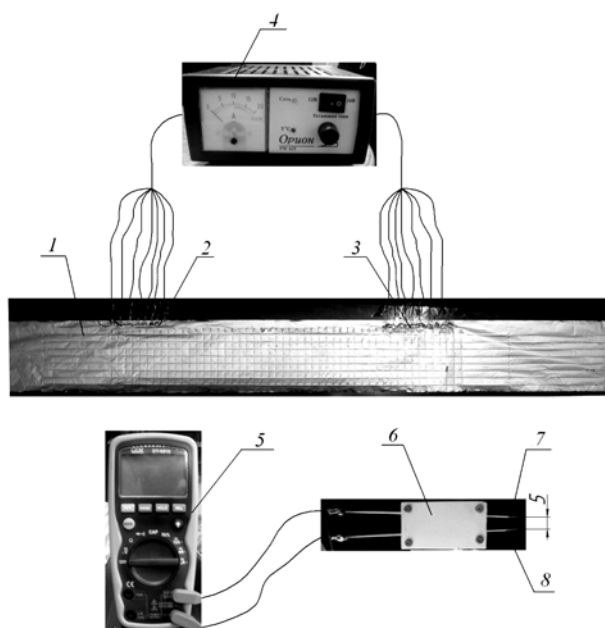


Рис. 3. Схема модели по толщине для проведения исследований
Fig. 3. Thickness model scheme for research



Рис. 4. Схема модели поверхности изделия для проведения исследований
Fig. 4. Scheme of the model of item surface for research

Через модель пропускали ток силой 9 А 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.

Результаты и их обсуждение

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

Анализ результатов экспериментов позволил сделать следующие выводы:

1. 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 прилегающих к электродам, величина местной зональной плотности тока (и напряженности поля) остается практически постоянной и не претерпевает существенных изменений с изменением расстояния между электродами модели.

Обобщая сделанные выводы, можно сформулировать 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 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 в изделии, что приводит к уменьшению силы Ампера, действующей на дугу, и уменьшению угла ее отклонения от оси электрода.

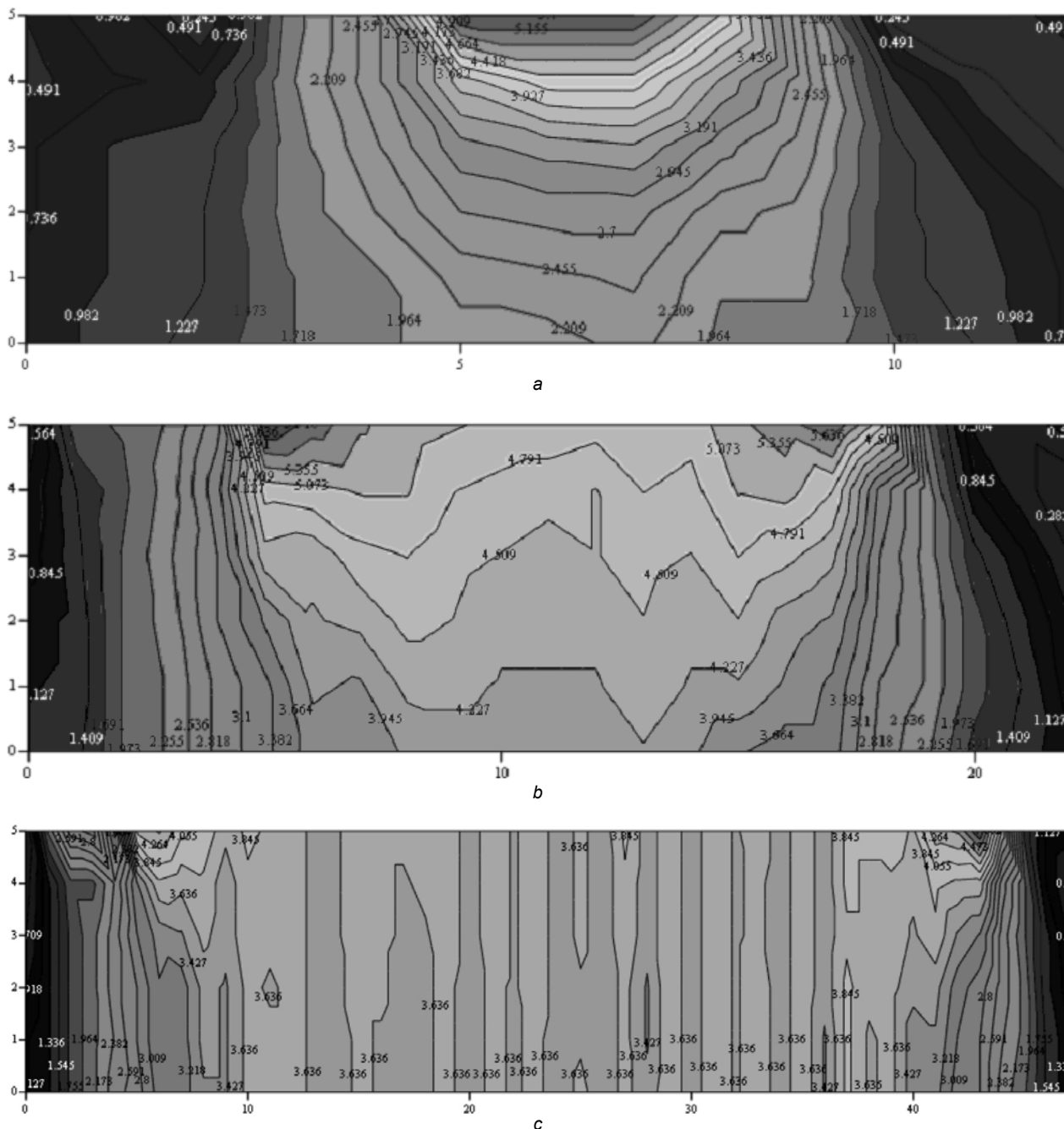


Рис. 5. Картина поля эквипотенциальных поверхностей, мВ, в экспериментах по изучению распределения плотности тока по сечению изделия толщиной 10 мм. Исследуемые расстояния: а – 10 мм; б – 30 мм; с – 80 мм
Fig. 5. Field pattern of equipotential surfaces, mV, in the experiments on current density distribution on the item section of 10 mm thickness. Studied distances are: a – 10 mm, b – 30 mm, c – 80 mm

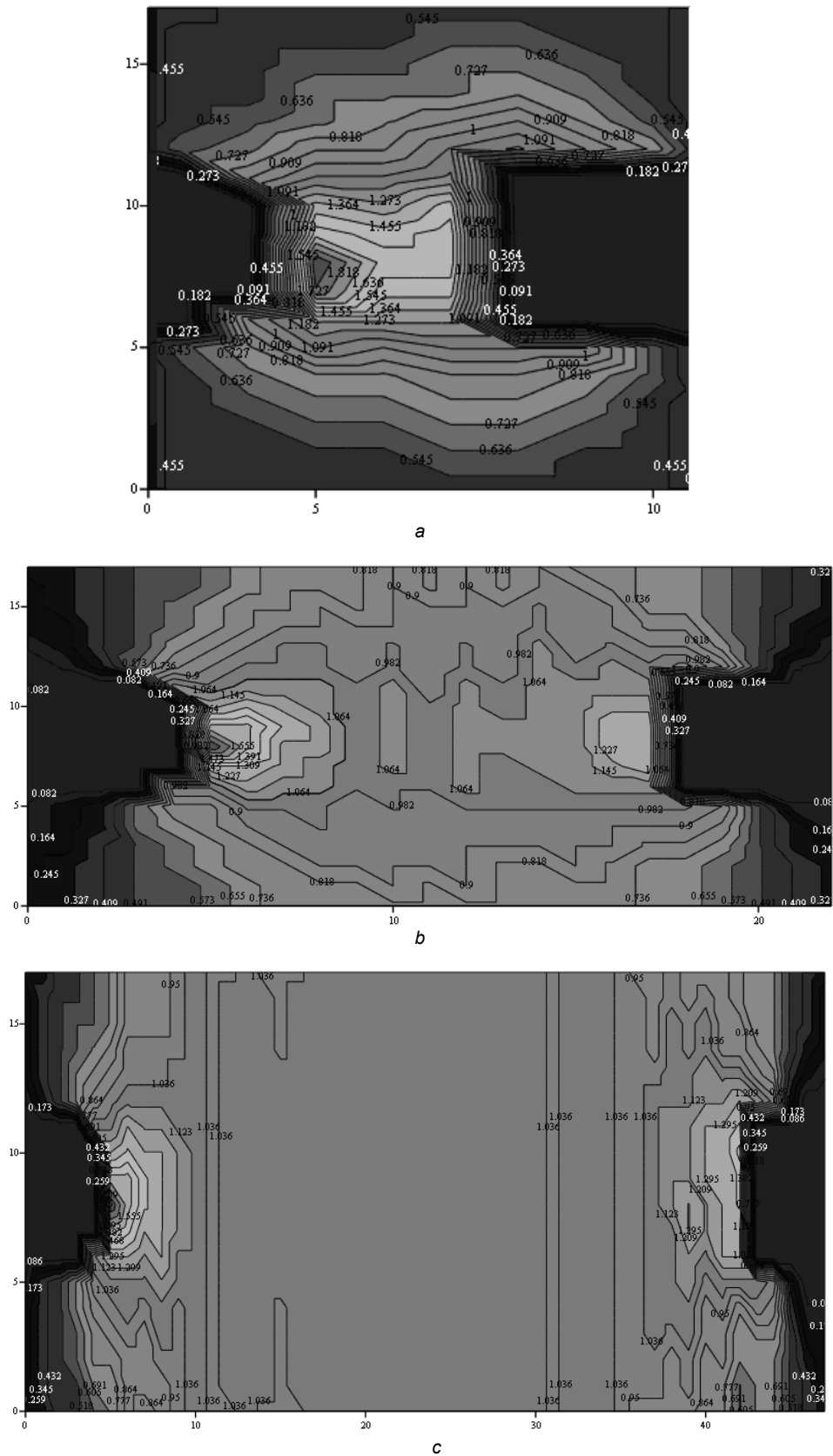


Рис. 6. Картина поля эквипотенциальных поверхностей, мВ, в экспериментах по изучению распределения плотности тока по поверхности изделия. Исследуемые расстояния: а – 10 мм; б – 30 мм; в – 80 мм
Fig. 6. Field pattern of equipotential surfaces, mV, in the experiments on current density distribution on the item surface. Studied distances are: a – 10 mm, b – 30 mm, c – 80 mm

Заключение

Результаты проведенных 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.

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»

Список литературы

1. Смирнов И.В., Захаренко А.И. Управление тепловложением в свариваемые кромок 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 // Изв. Самарского НЦ 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. // Бюлл. № 29. опублик. 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 кромок при сварке корня шва / Сб. ст. по докладам Всероссийской н/т 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.

