

На правах рукописи

Гу Цзэжэнь

**ФОРМИРОВАНИЕ ШВОВ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ПРИ ДУГОВОЙ  
СВАРКЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.10 –  
Сварка, родственные процессы и технологии

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре технологий сварки и диагностики  
МГТУ имени. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**РЫБАЧУК Александр Михайлович**

МГТУ имени. Н.Э. Баумана, доцент

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
**ЩЕРБАКОВ Алексей Владимирович**  
НИУ «МЭИ», профессор

кандидат технических наук, доцент  
**АНТОНОВ Алексей Алексеевич**  
РГУ нефти и газа имени И.М.Губкина, доцент

Ведущая организация: **Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого**

Защита состоится «26» сентября 2019 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: +7 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета  
к.т.н.



Прилуцкий М.А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность проблемы.** Дуговая сварка находит наиболее широкое использование в сварочных технологиях. Качественное формирование шва всегда являлось одной из основных проблем при дуговой сварке ферромагнитных материалов. При расплавлении свариваемых кромок во время сварки стыковых швов с полным проплавлением под действием сил давления дуги, тяжести, электромагнитных и поверхностного натяжения жидкий металл формируется, образуя шов с выпуклостью с обратной стороны. Для управления качеством металла сварного шва при сварке и пайке с использованием дуги перспективно использование магнитных полей, взаимодействующих с дугой или с жидким металлом сварочной ванны.

Использование магнитных полей позволяет бесконтактно и оперативно управлять качеством сварочных процессов. Поэтому постоянно проводятся исследования возможностей эффективного использования магнитных полей при дуговой сварке и наплавке.

При дуговой сварке широко применяются внешние магнитные поля, взаимодействующие со сварочным током в жидком металле сварочной ванны, для управления качеством металла и формы шва.

На этом принципе основаны способы управления кристаллизацией и формой шва продольным относительно оси дуги магнитным полем и способы формирования шва поперечным магнитным полем. При дуговой сварке неплавящимся электродом в защитных газах немагнитных материалов существует способ формирования шва во внешнем поперечном магнитном поле квадрупольной магнитной системы. Этот способ позволяет формировать сварные швы с нулевой выпуклостью с обратной стороны. Но пока ещё нет исследования о формировании швов квадрупольным магнитным полем при сварке ферромагнитных материалов. Основной сложностью данного способа является наличие деформации магнитного поля при сварке ферромагнитных материалов. Для эффективного использования этих способов необходимо уметь рассчитывать силовое воздействие дуги на сварочную ванну и знать распределение электрического поля и квадрупольного магнитного поля в сварочной ванне и изделии.

**Цель работы:** получение требуемой геометрической формы сварного шва при дуговой сварке ферромагнитных материалов воздействием магнитного поля.

**Задачи работы:**

1. Литературный и патентный анализ использования магнитных полей при дуговой сварке ферромагнитных материалов;
2. Экспериментальные исследования деформации формирующего магнитного поля свариваемым ферромагнитным материалом;
3. Изучение взаимосвязи электрических и тепловых полей при сварке;
4. Выяснение требований к конструкции оптимальной магнитной системы для формирования швов при сварке ферромагнитных материалов.

**Методы исследований.** Результаты диссертации были получены после проведения экспериментальных и расчетных исследований. Измерения индукции магнитного поля проводились Гауссметром GM2. Расчетное исследование магнитного поля проводилось с использованием ANSYS Maxwell и SOLIDWORKS.

Расчеты распределения плотности тока в изделии проводились с использованием программы MATLAB. Эксперименты проводились с использованием источника питания Kemppi PSS5000.

**Ценность выполненных исследований.** Показана практическая возможность получения сварных швов с нулевой выпуклостью с обратной стороны при дуговой сварке неплавящимся электродом в среде аргона изделий из магнитных сталей толщиной до 6 мм за счет использования внешнего магнитного поля. Определена взаимосвязь режимов сварки с конструкцией магнитной системы.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

Установлено, что для нормально-кругового источника плотность тока пропорциональна тепловому потоку и отношению коэффициента сосредоточенности электрического тока к коэффициенту сосредоточенности теплового потока дуги, в виде  $\bar{j} = \frac{K_3 \bar{q}}{\eta_u K_T U_d}$ .

Установлено, что для нормально-эллиптического источника плотность тока пропорционально тепловому потоку и отношению произведения коэффициента формы теплового источника к коэффициенту формы источника электрического

тока, в виде  $\bar{j} = \frac{K \bar{q}}{\eta_u U_d}$ , где  $K = \frac{a_t b_t \operatorname{arctg} \frac{a_t}{b_t}}{a_s b_s \operatorname{arctg} \frac{a_s}{b_s}}$ , здесь  $a$  и  $b$  - полуоси основания дуги.

Установлена взаимосвязь требуемой величины магнитного поля для удержания сварочной ванны с размерами немагнитной зоны и режимом сварки, определяющим длину сварочной ванны и конструкцией магнитной системы, в виде:  $B_{mp} = \frac{\rho g \eta_u U_d}{K q}$ .

**Практическая значимость** работы. Показана возможность использования квадрупольного магнитного поля для удержания сварочной ванны при сварке ферромагнитных материалов. Разработаны технологические рекомендации по сварке неплавящимся электродом в среде аргона ферромагнитных материалов с помощью квадрупольной магнитной системы. Результаты работы использованы в разработке конструкции сварочной головки и магнитной системы.

**Достоверность результатов и выводов** подтверждается использованием апробированных методик определения параметров, современного аттестованного оборудования, согласованием экспериментальных данных с расчетными данными.

**На защиту выносятся:**

1. Влияние немагнитной зоны изделия на деформацию магнитного поля при сварке ферромагнитных материалов с помощью квадрупольной магнитной системы.

2. Влияние деформации дуги на плотность тока в изделии при сварке с помощью квадрупольной магнитной системы.

3. Взаимосвязь требуемой величины магнитного поля для удержания сварочной ванны с толщиной свариваемого металла и режимом сварки при сварке ферромагнитных материалов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на научном семинаре кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана (г.

Москва, 2019) и на международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики» (г. Волгодонск, 2015 и 2018).

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии в исследовательской работе по теме диссертации на всех этапах. Работа выполнялась в лаборатории кафедры технологий сварки и диагностики МГТУ имени Н.Э. Баумана. Автором был выполнен литературный и патентный обзор по теме диссертации, выполнены теоретические и экспериментальные исследования магнитного поля и плотности тока при сварке ферромагнитных материалов с помощью магнитной системы, произведена обработка результатов исследований, подготовлены и сделаны доклады на конференциях.

**Публикации по теме диссертации.** Основные материалы диссертации отражены в 7 научных работах из них 4 в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключений, списка литературы. Она изложена на 119 страницах, содержит 69 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 95 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены практическая значимость, научная новизна полученных результатов, личный вклад автора, защищаемые положения, краткое содержание глав диссертации.

**В первой главе** проведен литературный обзор и рассмотрены особенности воздействия внешними магнитными полями различной ориентации как на сварочную дугу, так и на сварочную ванну. В литературе широко описывается использование внешних магнитных полей для управления процессом сварки такими учеными, как Гвоздецкий В.С., Мечев В.С., Тиходеев Г.В., Леваков В.С., Любавский К.В., Завьялов В.Е., Зворона Я.П., Матяш В.И., Черныш В.П., Биржев В.А., Болдырев А.М., Абрагалов М.А., Абдурахманов Р.У., Бардокин Е.В., Рыжов Р.Н., Кожухарь В.А., Рыбачук А.М., Акулов А.И., Брискман А.Н. и др.

В настоящее время еще не разработано применение квадрупольной магнитной системы для формирования швов при дуговой сварке ферромагнитных материалов. Основной трудностью является наличие деформации магнитного поля из-за шунтирования магнитного поля в ферромагнитном изделии. В этом случае электромагнитные силы, действующие на сварочную дугу, образуются несимметрично, что приводит к ухудшению стабильности горения дуги. Для решения этих проблем требуется изучить распределение квадрупольного магнитного поля и найти оптимальную конструкцию квадрупольной магнитной системы и соответствующее положение электрода в магнитной системе.

В главе поставлены цели исследования.

**Во второй главе** произведено экспериментальное и расчетное исследование конфигурации магнитных полей квадрупольной магнитной системы в зависимости от ее геометрических и электрических параметров.

При дуговой сварке ферромагнитных материалов в свариваемой детали возникает немагнитная область, ограниченная изотермой Кюри (Рис. 1).

В этом случае поперечные магнитные поля, образуемые квадрупольной магнитной системой, шунтирует ферромагнитный металл свариваемой детали, что приводит к уменьшению индукции магнитного поля в сварочной ванне. Из-за этого при сварке ферромагнитных материалов нужен больший ток в катушках квадрупольной магнитной системы для образования требуемой величины индукции магнитного поля. Боковые шунтирующие магнитные потоки  $\Phi_{шб}$  равны, а шунтирующий магнитный поток перед дугой  $\Phi_{шп}$  отличается от потока за дугой  $\Phi_{шз}$  из-за несимметричной немагнитной зоны относительно оси дуги в направлении сварки. В результате при совпадении оси электрода с осью магнитной системы происходит смещение оси магнитного поля в направлении сварки.

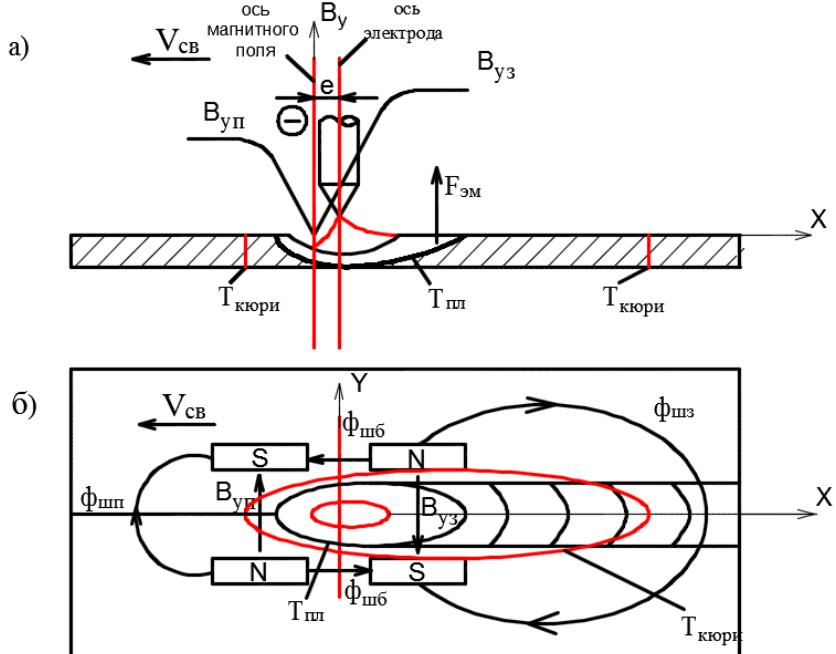


Рис.1. Дуга в квадрупольном магнитном поле при сварке ферромагнитных металлов на прямой полярности при удержании сварочной ванны: а) вид сбоку; б) вид сверху

Индукция магнитного поля за дугой оказывается больше индукции магнитного поля перед дугой. Большее магнитное поле за дугой воздействует на большую часть столба дуги, что приводит к отклонению дуги в сторону сварочной ванны при удержании жидкого металла.

В работе выполнено экспериментальное исследование распределения магнитных полей в сварочной ванне с помощью гауссметра GM2.

В результате получены значения индукции магнитных полей при разных токах в катушках магнитной системы и разных толщинах пластины (Рис. 2). Видно, что без магнитной пластины магнитное поле распределено симметрично из-за отсутствия шунтирования магнитного поля. Магнитное поле увеличивается с увеличением тока в катушках, и уменьшается по толщине свариваемого изделия.

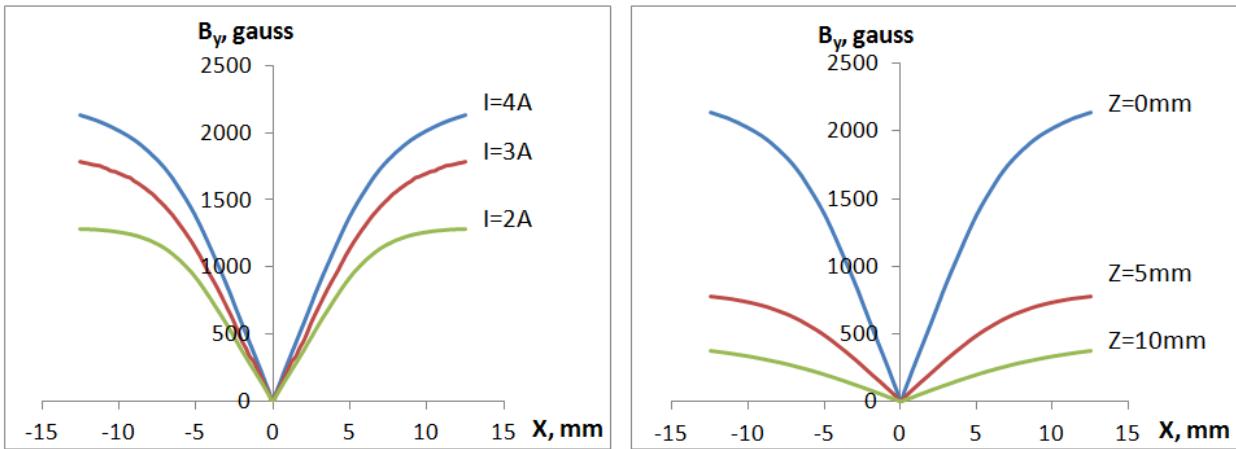


Рис. 2. Влияние тока в катушках магнитной системы и толщины пластины на величину магнитного поля без магнитной пластины

При сварке ферромагнитных материалов поперечное магнитное поле деформируется из-за шунтирования магнитного поля. В работе выполнено экспериментальное измерение величины индукции магнитного поля в зоне горения дуги при сварке низкоуглеродистой стали толщиной 10 мм.

Для учёта искажения магнитного поля магнитным материалом был выполнен расчёт немагнитной зоны, ограниченной изотермой Кюри.

В результате получены данные распределения магнитного поля с ферромагнитной пластиной при различных токах в катушках магнитной системы и различных толщинах пластины.

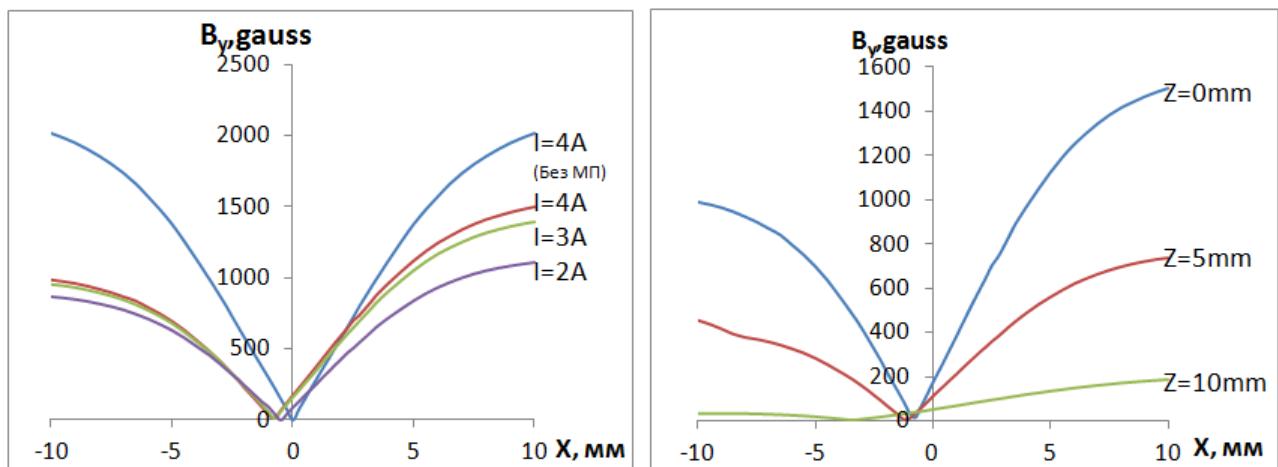


Рис. 3. Влияние тока в катушках магнитной системы и толщины пластины на величину магнитного поля с магнитной пластиной

На Рис. 3 показано влияние тока в катушках магнитной системы на величину магнитного поля. С повышением тока в катушках величина магнитного поля увеличивается. Отличием от распределения магнитного поля без ферромагнитной пластины является деформация симметричного магнитного поля и смещения оси магнитного поля в направлении сварки из-за несимметричной в направлении сварки немагнитной зоны. При одной и той же величине тока в катушках магнитное поле в области сварочной ванны уменьшается за счет шунтирования магнитного поля. Магнитное поле сильно уменьшается при увеличении толщины пластины. При сварке толстой ферромагнитной пластины большая часть

магнитного поля шунтируется.

Из-за несимметричности немагнитной зоны вдоль линии сварки относительно оси электрода ось магнитного поля смещается перед дугой в направлении сварки (Рис. 4).



Рис. 4. Схема смещения оси магнитного поля в магнитной пластине

На Рис. 5. показана экспериментальная зависимость величины смещения от токов в катушках квадрупольной магнитной системы и расстояния от поверхности пластины. При увеличении тока в катушках смещение оси магнитного поля увеличивается. При токе более 3А смещение почти не меняется из-за электромагнитного насыщения в ферромагнитной пластине, и по толщине пластины смещение оси магнитного поля увеличивается.

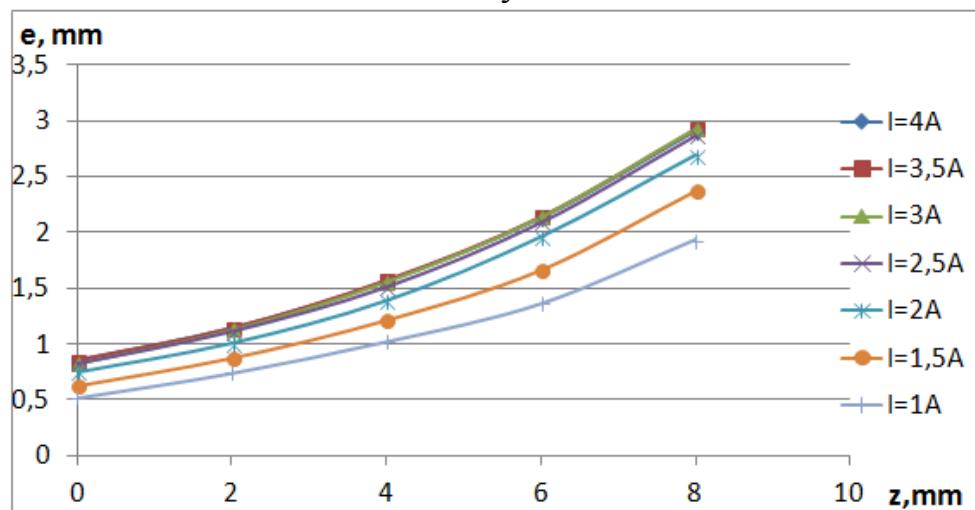


Рис. 5. Смещение оси магнитного поля

В программе ANSYS Maxwell проведен анализ индукции магнитного поля при сварке ферромагнитного металла толщиной 6 мм с кромкой. (Рис. 6) Исследовано влияние конструкции и расположения полюсов магнитной системы на магнитное поле.

На Рис. 7 показано влияние длины полюсов и расстояния полюсов от пластины на величину магнитного поля. Видно, что максимальная индукция магнитного поля не зависит от длины полюсов системы. Но диапазон максимальной индукции магнитного поля увеличивается с увеличением длины полюсов. При сварке ферромагнитного металла можно выбрать короткие полюсы, совпадающие с длиной ванны, чтобы уменьшать силу притяжения между полюсами и пластиной, и одновременно обеспечивать требуемую индукцию магнитного поля для удержания сварочной ванны. При увеличении расстояния

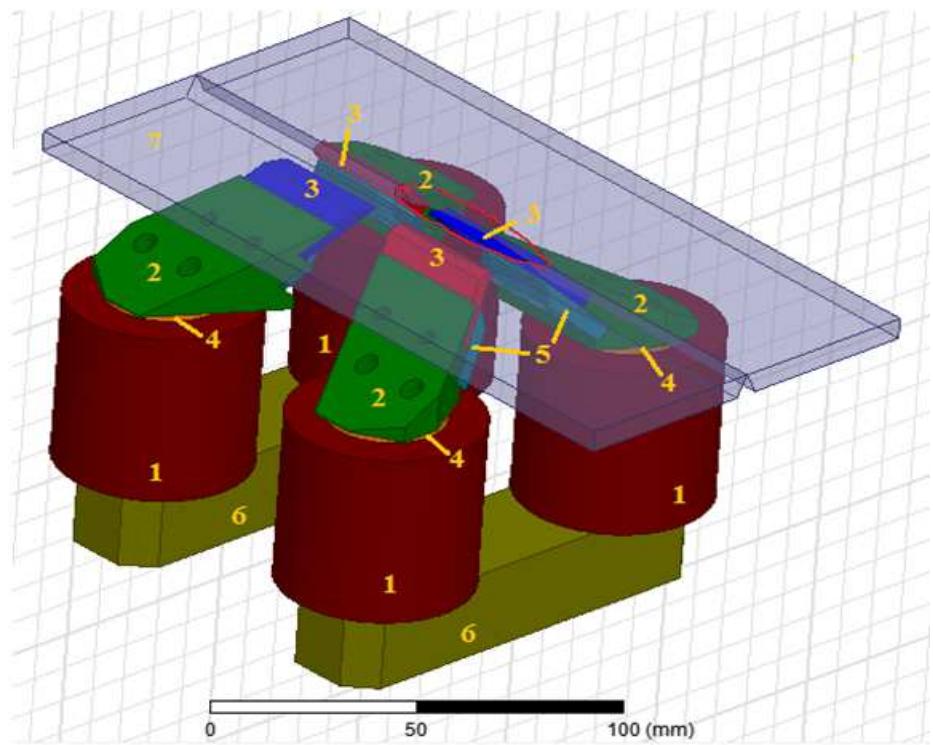


Рис. 6. Схема квадрупольной магнитной системы с ферромагнитной пластины: 1- катушка; 2 - манитопровод; 3 - полюс; 4 - сердечник; 5 - планка на полюсе; 6 - планка на сердечнике; 7 - пластина

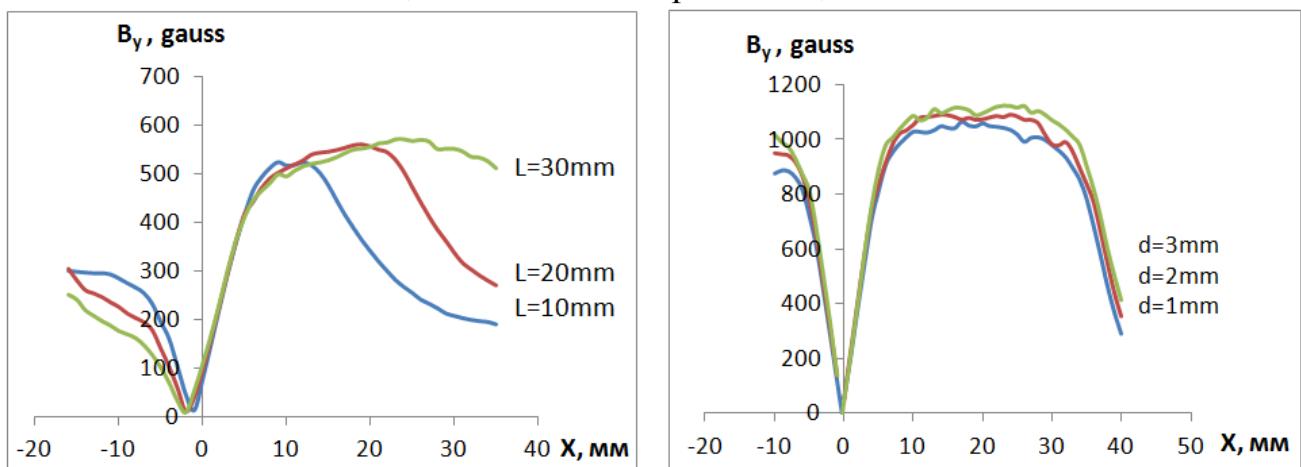


Рис. 7. Влияние длины полюсов и расстояния полюсов от пластины на величину индукции магнитного поля

полюсов от пластины индукция магнитного поля почти не меняется. Но сила притяжения между полюсами и пластиной уменьшается. Таким образом при сварке ферромагнитного металла с магнитным полем следует располагать полюса на расстоянии от пластины для уменьшения силы притяжения, что приводит к ровному перемещению изделия.

**В третьей главе** произведено определение выражения, связывающего плотность тока с плотностью теплового потока, при нормально-круговом источнике и нормально-эллиптическом источнике.

Ранее получено общее решение дифференциального уравнения, выражающее связь потенциала и температуры в изделии при дуговой сварке:

$$U = c_1 T^2 + c_2 \quad (1)$$

Это выражение справедливо при аналогичных граничных условиях для электрического и температурного полей в случае, если не применяется ориентированный токоподвод к свариваемому изделию, расположенный вблизи сварочной ванны. В этой работе поверхность контакта дуги с жидким металлом была принята эквипотенциальной и одновременно изотермической с температурой, равной температуре кипения жидкого металла, при пренебрежении влиянием теплоотвода через наружные поверхности свариваемого изделия.

Найдем частное решение дифференциального уравнения (1). Определим граничные условия на поверхности контакта дуги с жидким металлом, на которой температура достигает температуры кипения металла. Зададим на ней потенциал  $U = U_1$ . Найдем значение  $dU/dT$  на этой поверхности:

$$\frac{dU}{dT} = LT_{\text{кип}} \frac{j}{q}.$$

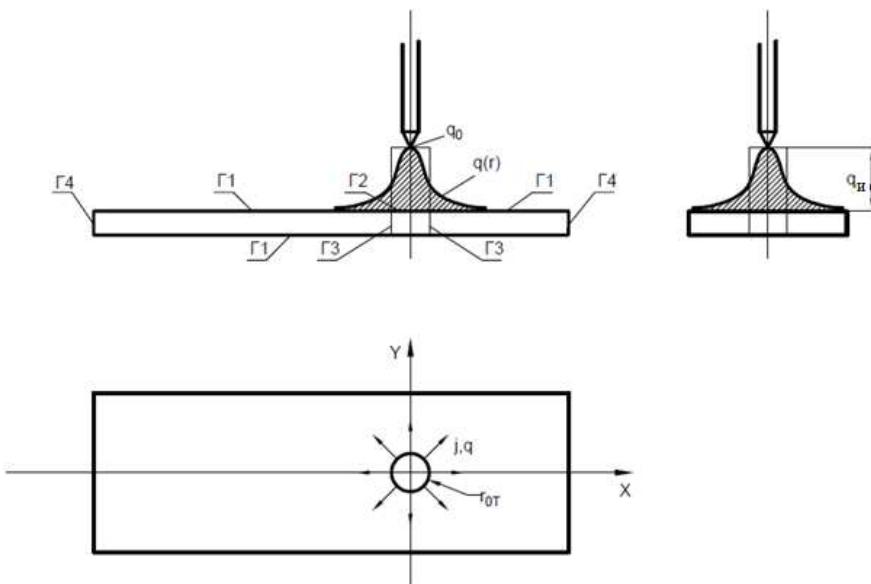


Рис. 8. Нормально-круговое распределение теплового потока

Для нормально-кругового распределения теплового потока (Рис. 8) удельный тепловой поток дуги

$$q(r) = q_0 e^{-K_T r^2},$$

где  $q_0$  – наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева,

$$q_0 = \frac{K_T}{\pi} q_u$$

$K_T$  – коэффициент сосредоточенности теплового потока дуги;  $q_u$  – эффективная тепловая мощность нагрева изделия дугой

$$q_u = \eta_u U_d I,$$

где  $\eta_u$  – эффективный КПД дуги;  $U_d$ ,  $I$  – напряжение на дуге и сварочный ток.

Плотность тока при нормально-круговом распределении сварочного тока на поверхности контакта дуги с жидким металлом описывается выражением

$$j(r) = j_0 e^{-K_\vartheta r^2},$$

где  $j_0$  – значение плотности тока в центре дуги,

$$j_0 = \frac{K_\vartheta I}{\pi};$$

$K_{\vartheta}$  – коэффициент сосредоточенности тока.

Исходя из найденных граничных условий на поверхности контакта дуги с жидким металлом при:  $T = T_{\text{кун}}$ ,  $U = U_1$ ,  $\frac{dU}{dT} = \frac{LT_{\text{кун}}K_{\vartheta}}{\eta_u U_D K_T}$ ,

из системы уравнений

$$\begin{cases} C_1 T_{\text{кун}}^2 + C_2 = U_1 \\ 2C_1 T_{\text{кун}} = \frac{LT_{\text{кун}}K_{\vartheta}}{\eta_u U_D K_T} \end{cases}$$

определим произвольные постоянные уравнения

$$C_1 = \frac{LK_{\vartheta}}{2\eta_u U_D K_T};$$

$$C_2 = \frac{-LT_{\text{кун}}^2 K_{\vartheta}}{2\eta_u U_D K_T} + U_1.$$

Подставив  $C_1$  и  $C_2$  в уравнение (1), получим уравнение распределения потенциала при дуговой сварке

$$U = \frac{LK_{\vartheta}(T^2 - T_{\text{кун}}^2)}{2\eta_u U_D K_T} + U_1.$$

Определим распределение плотности тока в свариваемом изделии:

$$\bar{j} = -\sigma \text{grad}U.$$

Подставив значение градиента электрического потенциала в это выражение, найдем

$$\bar{j} = -\sigma \frac{dU}{dT} \text{grad}T.$$

Из уравнения (1) найдем производную потенциала по температуре

$$\frac{dU}{dT} = 2C_1 T$$

и, подставив ее в предыдущее уравнение, получим

$$\bar{j} = -2C_1 \sigma T \text{grad}T.$$

С учетом значения  $C_1$  запишем формулу, определяющую распределение тока в изделии:

$$\bar{j} = \frac{K_{\vartheta} \bar{q}}{\eta_u K_T U_D}.$$

По полученному выражению можно рассчитывать плотность сварочного тока в изделии по известному температурному полю при указанных граничных условиях.

При сварке с применением магнитной системы дуга растягивается вдоль направления сварки. Дуга из осесимметричной конусной превращается в эллиптическую. Поэтому нужно исследовать распределение плотности тока при сварке эллиптической дугой.

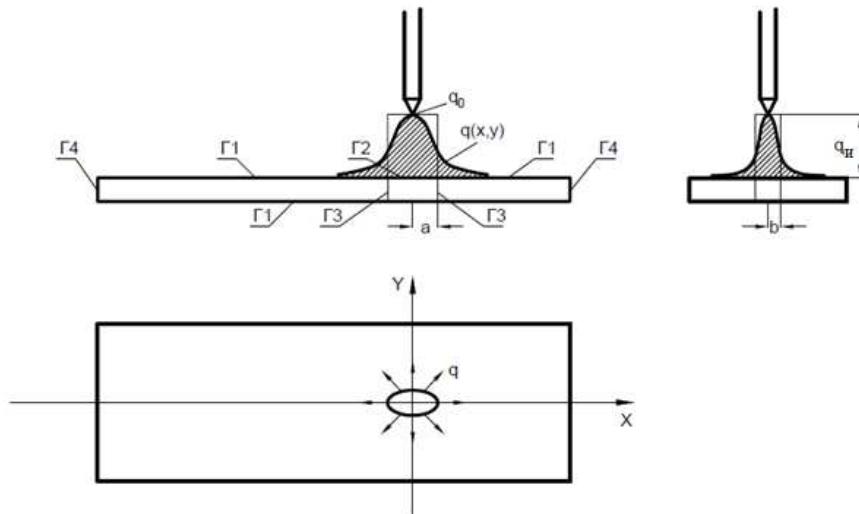


Рис. 9. Нормально-эллиптическое распределение теплового потока

Для нормально-эллиптического распределения теплового потока (Рис. 9) удельный тепловой поток дуги

$$q(x, y) = q_0 e^{-\left(\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b_r^2}\right)},$$

где  $q_0$  – наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева;  $a_m$  – большая полуось эллипса;  $b_m$  – малая полуось эллипса.

Плотность тока при нормально-эллиптическом распределении сварочного тока на поверхности контакта дуги с жидким металлом описывается выражением

$$j(x, y) = j_0 e^{-\left(\frac{x^2}{a_s^2} + \frac{y^2}{b_s^2}\right)},$$

где  $j_0$  – значение плотности тока в центре дуги;  $a_s$  – большая полуось эллипса;  $b_s$  – малая полуось эллипса.

Для нормально-эллиптического источника плотность тока пропорционально тепловому потоку и отношению произведения коэффициента формы теплового источника к коэффициенту формы источника электрического тока, в виде  $\bar{j} = \frac{K \bar{q}}{\eta_u U_d}$ ,

$$\text{где } K = \frac{a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}}{a_s b_s \operatorname{arctg} \frac{a_s}{b_s}}.$$

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментов по деформации дуги в магнитном поле квадрупольной магнитной системы. Показано применение методики управления конфигурацией магнитных полей при сварке вольфрамовым электродом в среде аргона. Выданы рекомендации по выбору режимов при сварке вольфрамовым электродом с удержанием шва поперечным магнитным полем.

При наложении поперечного магнитного поля неизбежно возникают продольное относительно шва магнитное поле. В результате получена комбинация квадрупольных магнитных полей. В этом случае поперек шва действуют на дугу сжимающие силы, а вдоль оси шва – растягивающие силы. Растигиваясь вдоль шва, сварочная дуга превращается из концентрической в эллиптическую (Рис. 10). При увеличении величины индукции магнитного поля электромагнитные силы,

действующие на сварочную дугу, увеличиваются и дуга растягивается сильнее.

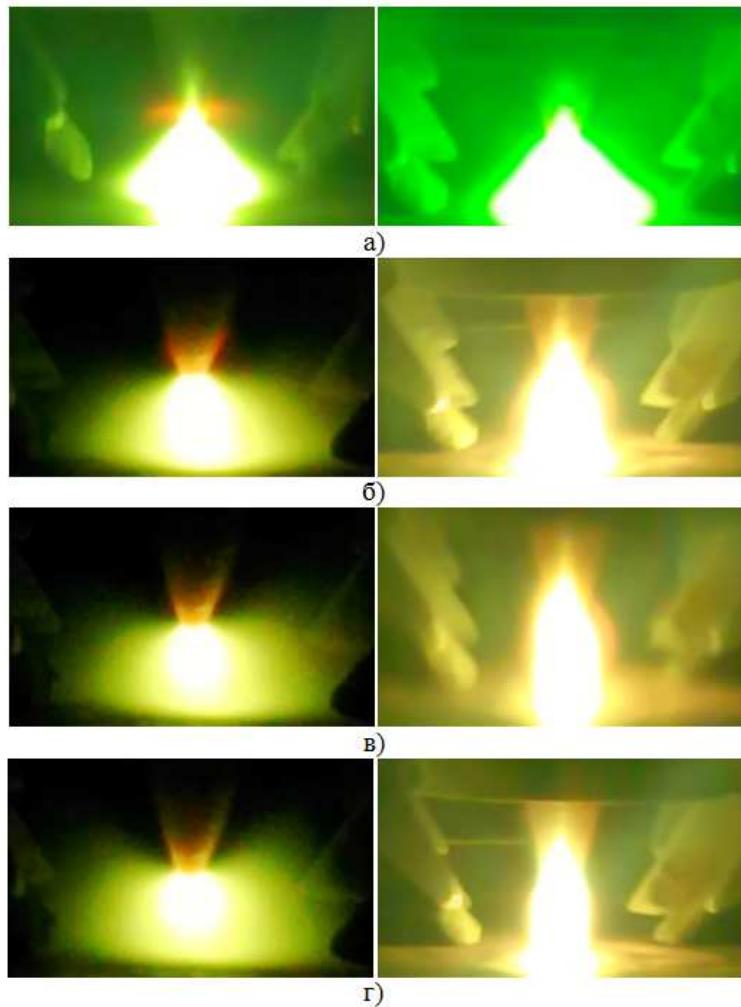


Рис. 10. Формы дуги с разных сторон при различных токах в катушках магнитной системы: а)  $I=0\text{A}$ ; б)  $I=0,5\text{A}$ ; в)  $I=0,75\text{A}$ ; г)  $I=1\text{A}$

Для удержания сварочной ванны необходимо создать требуемую индукцию магнитного поля. При дуговой сварке ферромагнитных материалов в свариваемой детали наличие немагнитной области, ограниченной изотермой Кюри, влияет на распределение индукции магнитного поля в детали. При уменьшении немагнитной области магнитное поле сильнее шунтируется магнитным металлом свариваемой детали, что приводит к уменьшению индукции магнитного поля в сварочной ванне. Немагнитная область, ограниченная изотермой Кюри зависит от режима сварки, например эффективной мощности  $q$  и скорости сварки  $v$ .

В работе рассмотрено влияние параметров режима сварки, т. е. эффективной мощности источника  $q$  и скорости  $v$  его перемещения, на температурное поле предельного состояния.

При сварке ферромагнитного металла с применением магнитной системы необходимо определить немагнитную зону, которая зависит от режимов сварки. С увеличением скорости сварки длина и ширина немагнитной зоны уменьшаются. С увеличением эффективной мощности источника длина и ширина немагнитной зоны увеличиваются. Размеры немагнитной зоны больше зависят от эффективной мощности источника. Нужно выбирать оптимальные режимы сварки ферромагнитного металла, при которых возникает большая немагнитная зона,

чтобы обеспечить требуемую индукцию магнитного поля для удержании сварочной ванны.

С целью определения возможности получения шва с нулевой выпуклостью с обратной стороны при сварке ферромагнитных материалов неплавящимся электродом при формировании шва квадрупольным магнитным полем проводились эксперименты по сварке сталей различной толщины.

При сварке пластин толщиной 1 мм из стали Ст3 вольфрамовым электродом в среде аргона получены следующие сварные швы (Рис. 11). Из Рис. 11, б видно, что при  $3600 \text{ A}^*$  в квадрупольной магнитной системе, при которых создана составляющая  $B_y$  индукции магнитных полей в рабочем зазоре на расстоянии 2 мм от поверхности полюсов магнитной системы удалось уменьшить высоту выпуклости с обратной стороны соединения и получить нулевой валик.

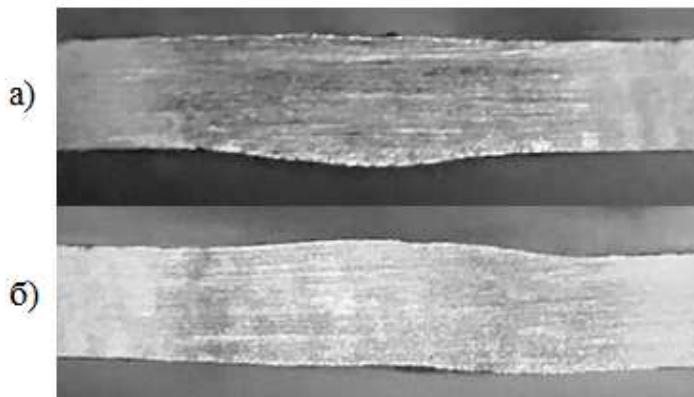


Рис. 11. Макрошлифы шовов при сварке пластин толщиной 1 мм:  
при отсутствии магнитного поля (а), при наличии квадрупольного  
поля (б)

При сварке пластин толщиной 2 мм из стали Ст3 вольфрамовым электродом в среде аргона получены следующие сварные швы (Рис. 12). Из Рис. 12, а видно, что при сварке неплавящимся электродом без магнитного поля получен сварной шов с подрезом, и с выпуклостью с обратной стороны. Из Рис. 12, б видно, что при  $1600 \text{ A}^*$  в квадрупольной магнитной системе, при которых создана составляющая  $B_y$  индукции магнитных полей в рабочем зазоре на расстоянии 2 мм от поверхности полюсов магнитной системы удалось получить нулевой валик с обратной стороны соединения. По сравнению со сваркой пластины толщиной 1 мм сварочный ток увеличивается почти в два раза, что приводит к увеличению величины плотности тока в сварочной ванне для создания массовой электромагнитной силы под действием магнитного поля, которая удерживает жидкий металл сварочной ванны. При этом для получения нулевого обратного валика ток в катушках квадрупольной магнитной системы уменьшается.

Далее проводились эксперименты по сварке пластин толщиной 6 мм со скосом кромок из стали Ст3 вольфрамовым электродом в среде аргона.

Исследовано влияние параметров режима сварки (сварочный ток, скорость сварки, индукция внешнего магнитного поля) на формирование швов при сварке ферромагнитных металлов вольфрамовым электродом в среде аргона. На Рис. 13 показаны макрошлифы швов при различных режимах сварки.

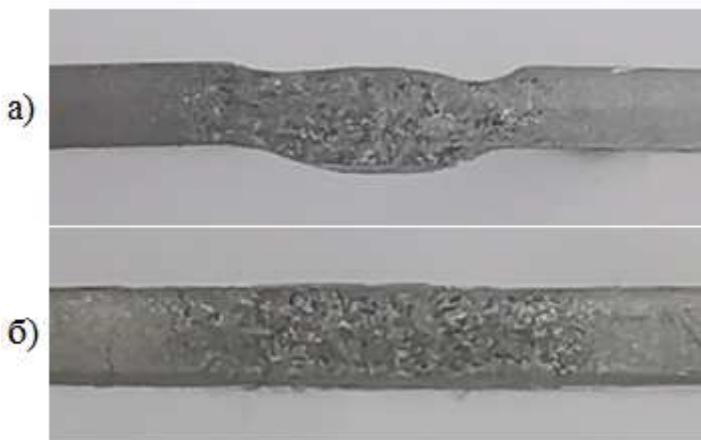


Рис. 12. Макрошлифы швов при сварке пластин толщиной 2 мм:  
при отсутствии магнитного поля (а), при наличии квадрупольного магнитного  
поля (б)

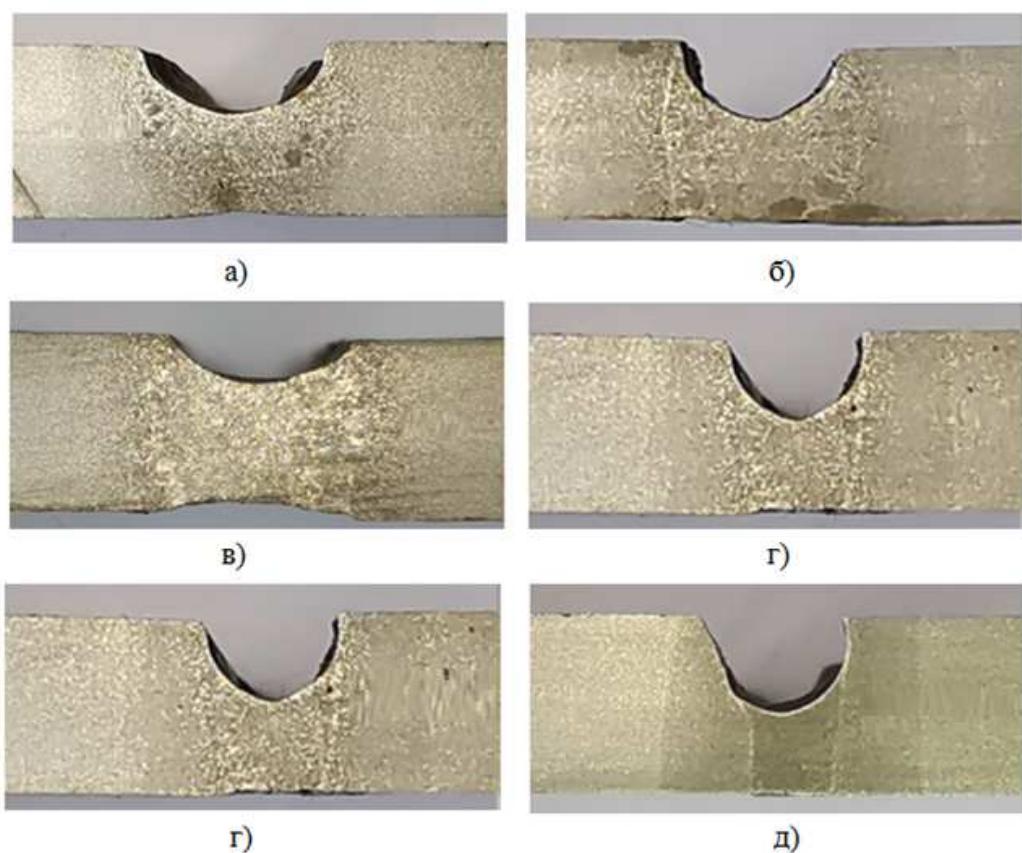


Рис. 13. Макрошлифы швов при сварке пластин толщиной 6 мм

Видно, что при увеличении толщины пластины для удержания сварочной ванны уменьшается ток, питающий квадрупольную магнитную систему, при котором создана составляющая  $B_y$  индукции магнитных полей в рабочем зазоре на расстоянии 1 мм от поверхности полюсов магнитной системы. При токе 3 А в катушках магнитной системы удалось получить нулевой обратный валик швов.

Из Рис. 13, а видно, что при сварочном токе 200 А, напряжении дуги 14 В, скорости сварки 3 мм/с возникает непровар в корне шва. Но при одинаковых режимах квадрупольного магнитного поля получен хороший корневой шов с нулевым обратным валиком (Рис. 13, б). Объясняется это обстоятельство тем, что

при сварке ферромагнитных материалов под воздействием квадрупольной магнитной системы сварочная дуга сжимается и преобразуется из осесимметричной конусной в эллиптическую. Это приводит к сжатию площади основания сварочной дуги и увеличению эффективной тепловой мощности сварочной дуги, и к увеличению глубины провара.

Режимы сварки шлифов в) и г) на Рис. 13 отличаются только скоростью сварки. По формуле распределения плотности тока, в виде  $\bar{j} = \frac{K \bar{q}}{\eta_u U_d}$ , определенной в 3-й главе получено одинаковое распределение плотности тока при одинаковом сварочном токе и напряжении дуги. Поэтому при одинаковом токе в катушках магнитной системы должна создаться одинаковая массовая электромагнитная сила, которая компенсирует гравитационную силу в сварочной ванне.

Но при сварке ферромагнитных материалов в свариваемой детали наличие немагнитной области, ограниченной изотермой Кюри, влияет на распределение индукции магнитного поля в детали. При увеличении скорости сварки немагнитная область уменьшается. Магнитное поле шунтируется магнитной зоной, что приводит к уменьшению индукции магнитного поля в сварочной ванне для создания массовой электромагнитной силы, которая компенсирует гравитационную силу в сварочной ванне. В результате вогнутность обратной стороны шва уменьшается (Рис. 13 г)).

Эксперименты показывают, что при сварке пластин из ферромагнитных материалов вольфрамовым электродом в среде защитных газов с увеличением толщины пластины уменьшается ток в катушках магнитной системы для получения нулевой выпуклости валика с обратной стороны швов. На Рис. 14 показано влияние толщины пластины на требуемую мощность магнитной системы.

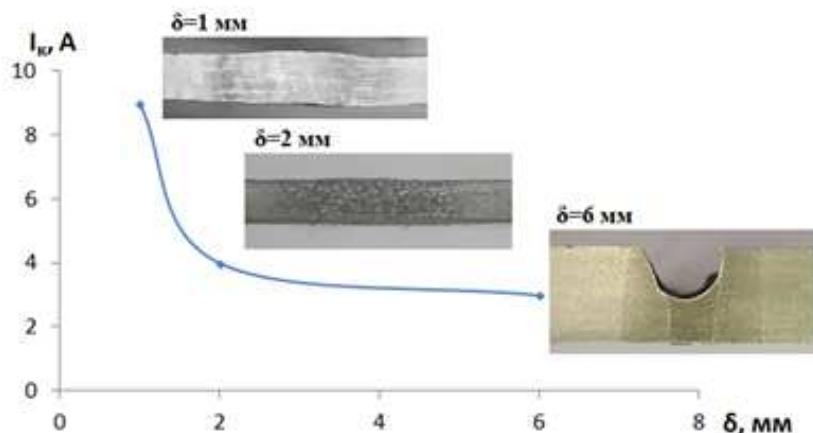


Рис. 14. Влияние толщины пластины на требующая мощность магнитной системы

Известно, что поле электромагнитных сил в изделии, и в том числе сварочной ванне определяется законом Ампера:

$$\vec{f}_{\text{эм}} = \bar{j} \times \vec{B}$$

Чтобы получить нулевую выпуклость валика с обратной стороны швов, нужно создать массовую электромагнитную силу под действием внешнего квадрупольного магнитного поля, которая компенсирует гравитационную силу в сварочной ванне:

$$\vec{f}_{\text{эм}} = \vec{j} \times \vec{B} = \rho \vec{g} .$$

Из этого уравнения определим требуемую индукцию магнитного поля, обеспечивающую удержание сварочной ванны:

$$B_{mp} = \frac{\rho g}{j} . \quad (2)$$

В 3-й главе определено распределение плотности тока для нормально-эллиптического источника при сварке с применением квадрупольной магнитной системы:

$$\vec{j} = \frac{K q}{\eta_u U_d} ,$$

$$\text{где } K = \frac{a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}}{a_s b_s \operatorname{arctg} \frac{a_s}{b_s}} .$$

Подставив распределение плотности тока в уравнение (2), получим выражение, связывающее требуемую индукцию магнитного поля, обеспечивающую удержание сварочной ванны с режимом сварки:

$$B_{mp} = \frac{\rho g \eta_u U_d}{K q} . \quad (3)$$

Известно, что при увеличении толщины свариваемого изделия тепловой поток увеличивается. Из выражения (3) требуемая индукция магнитного поля, обеспечивающая удержание сварочной ванны обратно пропорциональна тепловому потоку. Поэтому требуемая индукция магнитного поля уменьшается с увеличением толщины свариваемого изделия, что подтверждается экспериментальными данными (Рис. 14).

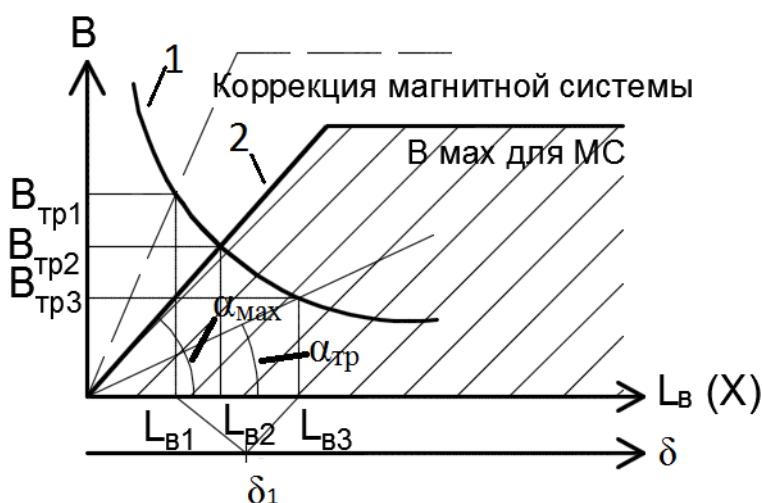


Рис. 15. Взаимосвязь режимов сварки с конструкцией квадрупольной магнитной системы

По результатам проведенных экспериментов и анализу квадрупольного магнитного поля получена взаимосвязь режимов сварки с конструкцией квадрупольной магнитной системы. На Рис. 15 показано качественное соотношение требуемой индукции магнитного поля, обеспечивающей удержание сварочной ванны с толщиной свариваемого изделия (линия 1), и распределение магнитного поля квадрупольной магнитной системы (линия 2).

При сварке ферромагнитных материалов толщиной  $\delta_1$  с применением магнитной системы можно использовать различные режимы сварки, что приводит к наличию диапазона длины сварочной ванны ( $L_{B1}$  -  $L_{B3}$ ). При длине сварочной ванны равна  $L_{B1}$  требуемая индукция магнитного поля  $B_{tp1}$ , обеспечивающая удержание сварочной ванны выше максимальной индукции магнитного поля данной магнитной системы. В этом случае недостаточности магнитного поля магнитной системы требуется изменение режима сварки в направлении увеличения тепловой мощности дуги или уменьшения скорости сварки, что приводит к увеличению длины сварочной ванны и уменьшению требуемой индукции магнитного поля.

Для сварки деталей конкретной толщины требуются конструкции магнитных систем, обеспечивающие градиент индукции магнитного поля в области сварочной ванны больше градиента требуемой индукции для удержания сварочной ванны:  $grad_x B_{max} \geq \frac{B_{mp}}{L_B}$ . В этом случае, максимальная индукция магнитного поля системы будет больше требуемой индукции для удержания сварочной ванны:  $B_{max} \geq B_{mp}$ .

### **Основные выводы и результаты**

1. Наличие ферромагнитного свариваемого металла уменьшает магнитное поле в сварочной ванне. Магнитное поле уменьшается пропорционально толщине свариваемого изделия.
2. При дуговой сварке ферромагнитных металлов несимметричная в направлении сварки немагнитная зона вызывает деформацию симметричного квадрупольного магнитного поля и искривление оси магнитного поля в направлении сварки.
3. Ось квадрупольного магнитного поля смещается в направлении сварки, сварочная ванна и дуга смещаются в зону большего удерживающего магнитного поля, что обеспечивает большие удерживающие силы.
4. При придавливании сварочной ванны дуга растягивается поперёк шва и отклоняется вперёд в область меньшего магнитного поля. Это приводит к уменьшению плотности тока в сварочной ванне.
5. Величина смещения оси магнитного поля увеличивается с увеличением тока в катушках магнитной системы и по глубине изделия.
6. Для нормально-кругового источника плотность тока пропорциональна тепловому потоку и отношению коэффициента сосредоточенности электрического тока к коэффициенту сосредоточенности теплового потока дуги, в виде  $\bar{j} = \frac{K \bar{q}}{\eta_u K_T U_D}$ .
7. Для нормально-эллиптического источника плотность тока пропорционально тепловому потоку и произведению коэффициента формы теплового источника к коэффициенту формы источника электрического тока, в виде  $\bar{j} = \frac{K \bar{q}}{\eta_u U_D}$ , где  $K = \frac{a_T b_T \operatorname{arctg} \frac{a_T}{b_T}}{a_s b_s \operatorname{arctg} \frac{a_s}{b_s}}$ , здесь  $a$  и  $b$  - полуоси основания дуги.

8. При уменьшении толщины свариваемого металла уменьшается длина ванны , уменьшается плотность тока на фронте кристаллизации , что требует большей величины индукции магнитного поля для удержания сварочной ванны.
9. В случае недостаточности максимального магнитного поля магнитной системы требуется изменение режима сварки в направлении увеличения тепловой мощности дуги или уменьшения скорости сварки.
10. Для сварки деталей конкретной толщины требуются конструкции магнитных систем, обеспечивающих градиент индукции магнитного поля в области сварочной ванны больше градиента требуемой индукции для удержания сварочной ванны:  $grad_x B_{max} \geq \frac{B_{mp}}{L_B}$  .

**Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Рыбачук А.М., Гу Ц. Распределение сварочного тока в изделии и ванне при дуговой сварке // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 6. С. 22-30. (1,5 п.л. / 0,75 п.л.)
2. Рыбачук А.М., Гу Ц., Крысько Н.В. Деформация дуги в квадрупольном магнитном поле // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 8-1. С. 73-78. (1 п.л. / 0,33 п.л.)
3. Рыбачук А.М., Гу Ц., Крысько Н.В. Электрическое поле в изделии при дуговой сварке конусной осесимметричной дугой // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 9-1. С. 69-73. (0,83 п.л. / 0,28 п.л.)
4. Гу Ц., Рыбачук А.М. Электрическое поле в изделии при дуговой сварке нормально-эллиптическим источником // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 4. С. 77-83. (1,17 п.л. / 0,59 п.л.)
5. Гу Ц., Крысько Н.В., Рыбачук А.М. Анализ магнитного поля квадрупольной магнитной системы численным моделированием // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 11-1. С. 74-79. (1 п.л. / 0,33 п.л.)
6. Гу Ц., Рыбачук А.М. Деформация внешнего магнитного поля при дуговой сварке магнитных металлов // Глобальная ядерная безопасность. 2017. № 4. С. 70-77. (1,33 п.л. / 0,67 п.л.)
7. Гу Ц., Рыбачук А.М., Козырев М.Е. Исследование деформации четырёхполюсного магнитного поля при дуговой сварке магнитного металла // Глобальная ядерная безопасность. 2018. № 3. С. 30-36. (1,17 п.л. / 0,39 п.л.)