

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.791.75.053

**АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНОЙ  
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ**

© 2016 А.М. Рыбачук, Н.В. Крысько

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва*

В статье рассматривается характер распределения индукции магнитного поля четырехполюсной системы, применяемой для управления формированием сварного шва при дуговой сварке трубопроводов на объектах атомной энергетики. При работе изделий в агрессивных средах наличие концентрации напряжений в месте перехода от основного металла ко шву уменьшает коррозионную стойкость сварных соединений и приводит к коррозионному растрескиванию. В настоящем исследовании показаны результаты измерения индукции магнитного поля, в результате чего можно сказать, что в области горения дуги и зоне проплавления основного металла магнитное поле является гиперболическим.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, формирование шва в магнитном поле, четырехполюсная магнитная система, объекты атомной энергетики.

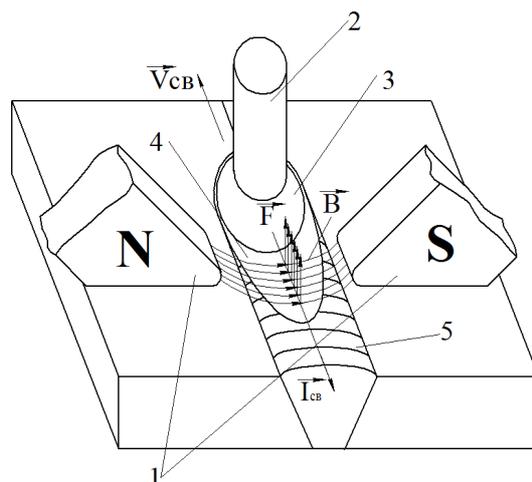
Поступила в редакцию 10.12.2016

Качественное формирование шва всегда являлась одной из основных проблем при автоматической дуговой сварке в защитных газах. 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. Место перехода от основного металла ко шву является концентратором напряжений и при сварке на весу с увеличением высоты выпуклости с обратной стороны уменьшается радиус перехода от основного металла ко шву и концентрация напряжений увеличивается.

При работе изделий в агрессивных средах наличие концентрации напряжений в месте перехода от основного металла ко шву уменьшает коррозионную стойкость сварных соединений и приводит к коррозионному растрескиванию. При сварке стыков трубопроводов, кроме уменьшения проходного сечения, является важным и то, что в месте перехода от основного металла ко шву скапливаются осадки продуктов, транспортируемых по трубопроводу, которые способствуют усиленной коррозии.

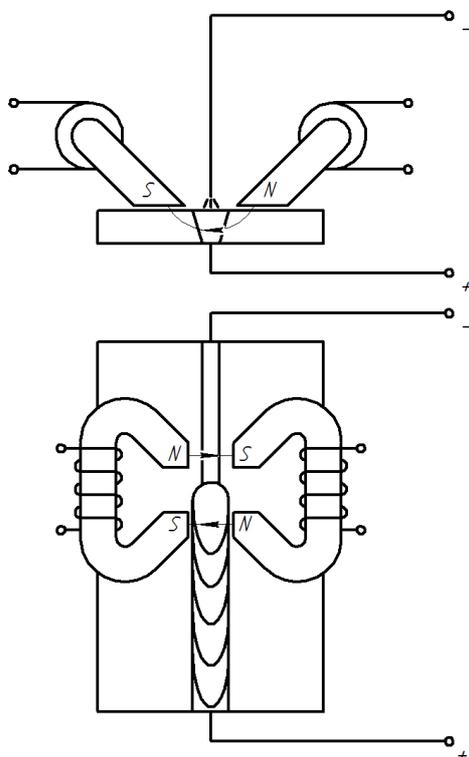
На изделиях для хранения, приготовления и перевозки пищевых продуктов по санитарным условиям не допускается наличие выпуклости с обратной стороны шва. После сварки таких изделий приходится механическим путем удалять выпуклость с обратной стороны и полировать поверхность шва.

Существует способ формирования шва во внешнем поперечном магнитном поле четырехполюсной магнитной системой при дуговой сварке (рис. 1), который позволяет формировать швы с нулевой выпуклостью с обратной стороны при однопроходной сварке изделий из немагнитных материалов [1]. На рисунке 1 показано направление магнитных полей при сварке на обратной полярности (плюс на электроде).



**Рис. 1.** – Удержание сварочной ванны поперечным магнитным полем при сварке на обратной полярности. 1 - полюса магнита; 2 - электрод; 3 - дуга; 4 - расплавленный металл; 5 - закристаллизовавшийся металл

При использовании симметричной четырёхполюсной магнитной системы (рис. 2) удаётся вводить в область сварочной ванны значительные по величине магнитные поля необходимые для формирования шва при сохранении устойчивости сварочной дуги.



**Рис. 2.** – Схема устройства для ввода в свариваемое изделие поперечных магнитных полей

При удержании сварочной ванны поперечным магнитным полем сварочная дуга растягивается вдоль направления сварки и сжимается в поперечном направлении (рис. 3).

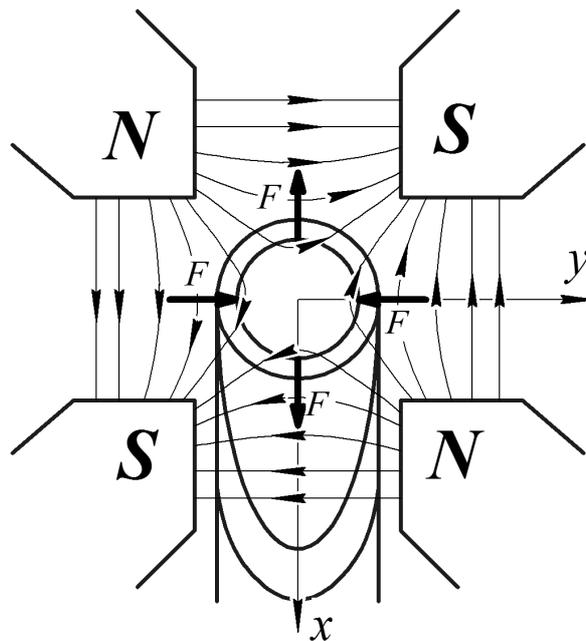


Рис. 3. – Дуга в четырехполюсном магнитном поле

Плотность тока сконцентрирована на острых концах дуги, имеющей эллиптическое основание, следовательно, в сварочной ванне создаются электромагнитные силы значительной величины. В этом случае при сварке стыковых швов с полным проплавлением можно получать требуемую форму обратной стороны шва (рис. 4).

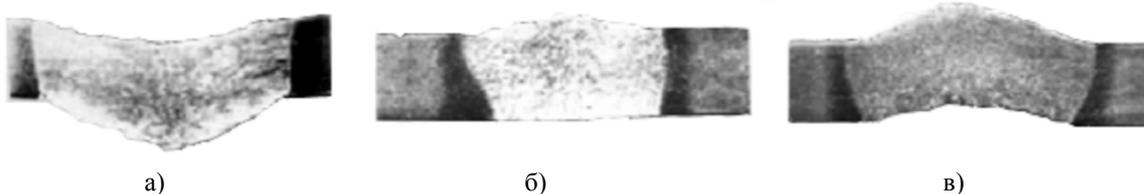


Рис. 4. – Макрошлифы швов, выполненных при индукции магнитного поля:  
а)  $B=0$ ; б)  $B=0,08\text{ T}$ ; в)  $B=0,1\text{ T}$ .

Форма полюсов, расположение полюсов относительно плоскостей симметрии магнитной системы, величина и форма рабочего и боковых зазоров определяет величину и конфигурацию магнитного поля в области дуги и сварочной ванны. Конфигурация магнитного поля в области дуги определяет характер и величину деформации дуги, которая влияет на проплавляющую способность дуги, распределение тока в сварочной ванне и, в конечном счёте, на получаемую форму шва.

Поэтому анализ магнитного поля, создаваемого четырёхполюсной магнитной системой, представляет практический интерес. Магнитное поле, создаваемое такой системой, имеет две взаимно перпендикулярные эквипотенциальные плоскости, проходящие через плоскости симметрии магнитной системы  $XOZ$  и  $YOZ$ . Две взаимно перпендикулярные эквипотенциальные плоскости образуют поле прямого угла [2], характеризующееся тем, что линии поля и эквипотенциальные линии являются гиперболами. Координатные оси  $OX$  и  $OY$  можно рассматривать как предельные гиперболы с бесконечной вогнутостью в начале координат. Если в поле прямого угла поместить полюс, имеющий гиперболическую форму, совпадающий с эквипотенциальной поверхностью, то поле останется гиперболическим. Используемая

четырёхполюсная магнитная система имеет полюса не гиперболического вида, расположенные асимметрично относительно биссектрисы прямого угла. Это связано с необходимостью создания максимального поля в рабочем зазоре. Поэтому магнитное поле, созданное такой системой, не будет гиперболическим во всех областях. В области, примыкающей к вертикальной оси магнитной системы, наиболее удалённой от полюсов и наиболее приближенной к взаимно перпендикулярным эквипотенциальным плоскостям характер поля будет больше определяться взаимно перпендикулярными эквипотенциальными плоскостями.

Уравнение потенциальных линий гиперболического поля в координатах  $x_0; y_0$ , совпадающих с биссектрисами прямого угла [3]:

$$x_0^2 - y_0^2 = \frac{2\varphi_M}{k} \text{ или } \varphi_M = \frac{k}{2}(x_0^2 - y_0^2), \quad (1)$$

где  $k = \frac{2\varphi_M}{a^2}$ ,

$a$  – расстояние от оси магнитной системы до эквипотенциальной линии с потенциалом  $\varphi_{M1}$ .

В координатах  $x; y$  распределение потенциала опишется уравнением:

$$\varphi_{M1} = kxy$$

Определим составляющие напряженности магнитного поля:

$$H_x = -\frac{\partial\varphi_M}{\partial x} = -ky; H_y = -\frac{\partial\varphi_M}{\partial y} = -kx \quad (2)$$

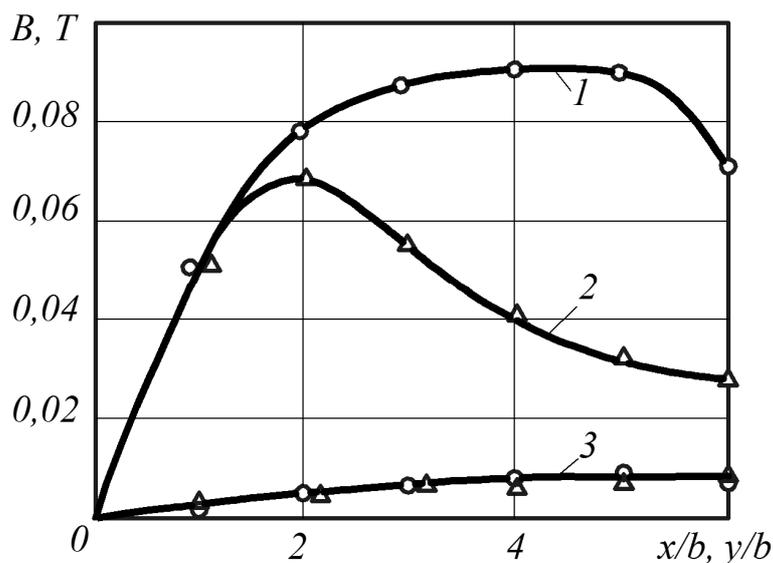
Из формул (2) видно, что для гиперболического поля составляющие напряженности магнитного поля  $H_x$  и  $H_y$  являются линейными функциями координат.

Т.к.  $B = \mu_a H$ , то градиенты поперечных составляющих индукции магнитного поля вдоль осей  $OX$  и  $OY$  постоянны:

$$\frac{\partial B_y}{\partial x} = -\mu_a k; \frac{\partial B_x}{\partial y} = -\mu_a k \quad (3)$$

Экспериментальные данные измерения магнитной индукции (рис. 5)

$B_y=f(x)$  и  $B_x=f(y)$  подтверждают, что в центральной области  $B_y$  и  $B_x$  являются линейными функциями координат.



**Рис. 5.** – Распределение индукции магнитного поля в рабочем и боковом зазорах: 1- в рабочем зазоре при  $z = 0$ ; 2 - в боковом зазоре при  $z = 0$ ; 3 – в рабочем и боковом зазорах при  $z = 5b$ . Здесь:  $b$  - половина ширины зазора.

Совпадение кривых индукции магнитного поля в рабочем и боковом зазорах центральной области свидетельствует о том, что в области горения дуги и зоне проплавления основного металла магнитное поле является гиперболическим. Причём, данные кривой 3 свидетельствуют об увеличении области гиперболического магнитного поля при удалении от нижних граней полюсов.

### ВЫВОДЫ

1) Магнитное поле четырёхполюсной магнитной системы в центральной области, зоне горения дуги и проплавления основного металла, является гиперболическим.

2) Зона гиперболического магнитного поля увеличивается при удалении от нижних граней полюсов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов, А.И. и др. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем [Текст] / А.И. Акулов, А.М. Рыбачук // Сварочное производство. – 1972. – №2. – С. 3–4.
2. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля [Текст] / В.А. Говорков. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 464 с.
3. Жигарев, А.А. и др. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы [Текст] / А.А. Жигарев, Г.Г. Шамаева. – М.: Высшая школа, 1982. – 463 с.

### REFERENCES

- [1] Akulov A.I., Rybachuk A.M. Uderzhanie zhidkogo metalla svarochnoi vannы poperechnym magnitnym polem [Deduction of liquid metal of a welding bathtub by cross magnetic field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding production], 1972, №2, ISSN 0491-6441, pp. 3–4. (in Russian)
- [2] Govorkov V.A. Elektricheskie i magnitnye polia [Electric and magnetic fields]. M. Leningrad: Pub. Gosenergoizdat [Gosenergoizdat], 1960, 464 p. (in Russian)
- [3] Zhigarev A.A., Shamaeva G.G. Elektronno-luchevye i fotoelektronnye pribory [Electron beam and photoelectronic devices]. M. Pub. Vysshaya shkola [Higher school], 1982, 463 p. (in Russian)

## The Analysis of Magnetic Field of Quadripolar Magnetic System for Arc Welding

**A.M. Rybachuk\*, N.V. Krysko\*\***

*Bauman Moscow State Technical University*

*2-Baumanskaya St., 5, build. 1, Moscow, Russia 105005*

*\* e-mail: amrybachuk@mail.ru ; \*\* e-mail: kryskonv@gmail.com*

**Abstract** – This article considers the nature of magnetic field density distribution from quadripolar magnetic system, applying to weld formation control during arc welding at nuclear power facilities is considered. Existence of concentration of tension in the transition from the main metal to a seam reduces corrosion resistance of welded connections and leads to corrosion cracking during the product work in hostile environment. In the following research measurement results of magnetic field induction are shown. Therefore magnetic field is hyperbolic in the field of burning of an arch and a zone of pro-melting of the main metal.

*Keywords:* arc welding, weld formation in magnetic field, quadripolar magnetic system, nuclear power facilities.