

УДК 621.791.753.042

©Чигарев В.В.<sup>1</sup>, Щетинина В.И.<sup>2</sup>, Щетинин С.В.<sup>3</sup>

### **МАГНИТНОЕ ДУТЬЕ ПРИ СВАРКЕ ТРУБ ДЛЯ ГАЗО- И НЕФТЕПРОВОДНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ**

*Установлены закономерности влияния формы изделия на магнитное поле сварочного тока и “эффект трубы”. Разработан способ односторонней высокоскоростной сварки, обеспечивающий качественное формирование швов путем регулирования магнитного поля и устранения магнитного дутья.*

**Ключевые слова:** Магнитное дутье, “эффект трубы”, трубы для газо- и нефтепроводных магистралей, односторонняя высокоскоростная сварка

**Чигарьов В.В., Щетиніна В.І., Щетинін С.В. Магнітне дуття при зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей.** *Встановлені закономірності впливу форми виробу на магнітне поле зварювального струму і “ефект труби”. Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання, який забезпечує якісне формування швів шляхом регулювання магнітного поля і запобігання магнітного дуття.*

**Ключеві слова:** Магнітне дуття, “ефект труби”, труби для газо- і нафтопровідних магістралей, одностороннє високошвидкісне зварювання

**V.V. Chigarev, V.I. Shchetinina, S.V. Shchetinin Magnetic blowing at welding of pipes for gas and oil pipelines.** *Regularities of the influence of part's shape upon the magnetic field of welding current and the “tube effect” were established. A method of one-side, high rate welding, ensuring high quality of welds formation, by means of regulation of magnetic field and elimination of magnetic blowing*

**Keywords:** Magnetic blowing, “tube effect”, gas- and oil pipelines, main pipe, one-side high speed welding

**Постановка проблемы.** Наиболее эффективным энерго- и материалосберегающим процессом при производстве труб для газо- и нефтепроводных магистралей является односторонняя высокоскоростная сварка, применение которой ограничено нарушением формирования швов в результате магнитного дутья. Поэтому разработка энерго- и материалосберегающих процессов односторонней высокоскоростной сварки является важной научно-технической проблемой.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Магнитное поле, возникающее при протекании тока по медному проводнику, являющемуся диамагнетиком, изучено на высоком научном уровне Н. Тесла, Р.М. Уайтом [1], Д. Маттисом [2], В. Гильбертом [3], Дж.Максвеллом [4]. Наличие сильного магнитного поля при сварке в области активного пятна подтверждается тем, что дуга действует как насос, который всасывает из окружающей среды воздух, являющийся диамагнетиком и втягивается в неоднородное магнитное поле, разогревает и выбрасывает его в сторону изделий в виде мощных плазменных потоков со скоростью до  $10^3$  м/с [5, 6]. Мощные плазменные потоки создают давление сварочной дуги, которое зависит от движения активного пятна по торцу электрода. Однако магнитное поле при сварке труб исследовано недостаточно [7, 8, 9, 10].

**Цель статьи** – изучение магнитного поля и разработка способа односторонней высокоскоростной сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей, обеспечивающей предотвращение магнитного дутья и качественное формирование швов.

**Изложение основного материала.** Односторонняя высокоскоростная сварка труб для газо- и нефтепроводных магистралей производится на медной подкладке или флюсовой подуш-

<sup>1</sup> д-р техн. наук, доцент, ГВУЗ “Приазовский государственный технический университет”, г. Мариуполь

<sup>2</sup> д-р техн. наук, доцент, ГВУЗ “Приазовский государственный технический университет”, г. Мариуполь

<sup>3</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ “Приазовский государственный технический университет”, г. Мариуполь

ке, расположенной в штанге, на которую надевается труба. Массивная ферромагнитная штанга, изготовленная из швеллеров, соединенных листом, выполняет функции несущей конструкции и токоведущего элемента, по которому протекает сварочный ток.

Для изучения магнитного поля и исследования влияния формы изделия на индукцию разработана специальная методика (рис.1), которая заключается в следующем. По валу диаметром  $25 \cdot 10^{-3}$  м пропускается ток (рис.1 а), и производятся измерения индукции магнитного поля на поверхности (рис.1) и внутри (рис.3) ферромагнитного вала тесламетром ЭМ4305. Аналогично производятся измерения индукции магнитного поля при протекании тока по трубе (рис.1 б) с внутренним диаметром  $25 \cdot 10^{-3}$  м и внешним диаметром  $40 \cdot 10^{-3}$  м и при протекании тока по валу, расположенному внутри трубы (рис.1 в).

Для адекватности модели реальным условиям сварки исследования магнитного поля производили при величине тока 2100 А. В качестве источника питания использовали сварочный выпрямитель ВМГ-5000.

В результате установлено (рис.2 а), что при протекании тока по ферромагнитному валу индукция магнитного поля на поверхности хорошо согласуется с расчетными данными, полученными по закону Био-Савара [10]  $B = \mu \frac{I}{2\pi R}$ , Т, согласно которому индукция прямо пропор-

циональна величине тока и обратно пропорциональна периметру. На оси вала индукция равна нулю, при приближении к поверхности возрастает и достигает максимального значения на поверхности 0,042 Т. При удалении от поверхности на  $9 \cdot 10^{-3}$  м индукция магнитного поля уменьшается до 0,027 Т. При переходе от одной поверхности к другой индукция изменяет направление на противоположное. Адекватность экспериментальных данных расчетным значениям подтверждает возможность использования расчетных значений для определения индукции магнитного поля сварочной дуги.

На поверхности вала обладающий большой магнитной проницаемостью ферромагнетик не изменяет магнитное поле.

Пропорционально индукции на поверхности электромагнитная сила  $F = IBL$  [11] достигает 0,1764 Н и максимальное магнитное давление  $P_M = \frac{B^2}{2\mu}$  [12] 702 Па. При удалении от по-

верхности электромагнитная сила снижается до 0,1134 Н и магнитное давление—до 290 Па.

При протекании тока по ферромагнитной трубе изменяется распределение магнитного поля (рис.1 б, 2 б). На оси трубы индукция магнитного поля равна нулю и остается равной нулю почти до внутренней поверхности трубы, где она достигает 0,02 Т. В ферромагнитной трубе индукция возрастает, и на внешней поверхности становится равной 0,08 Т. При удалении от поверхности индукция уменьшается до 0,04 Т.

Увеличение индукции магнитного поля на внешней поверхности ферромагнитной трубы является результатом концентрации силовых линий поля в обладающем большой магнитной проницаемостью ферромагнетике. Несмотря на большую площадь поперечного сечения трубы  $0,0766 \text{ м}^2$ , чем вала  $0,049 \text{ м}^2$ , индукция возрастает в результате принципа суперпозиции.

Пропорционально индукции при протекании тока по ферромагнитной трубе максимальное значение электромагнитной силы на поверхности увеличивается до 0,336 Н и в квадратичной зависимости возрастает магнитное давление до 2,548 КПа. В ферромагнитной трубе концентрируются силовые линии магнитного поля, поэтому при сварке труб резко возрастает магнитное дутье.

При протекании тока по валу, расположенному внутри трубы (рис.1 в, 2 в), несмотря на увеличение ферромагнитной массы, индукция на поверхности снизилась до 0,036 Т. Закономерность распределения индукции аналогична протеканию тока по валу. На оси трубы индукция равна нулю, при приближении к поверхности индукция возрастает и изменяет направление на противоположное при переходе от одной к другой поверхности. При удалении от поверхности индукция уменьшается до 0,018 Т. Снижение индукции является результатом концентрации силовых линий магнитного поля в ферромагнетике и уменьшения количества силовых линий, проходящих по воздуху с низкой магнитной проницаемостью. Индукция на поверхности вала с трубой 0,048 Т, что выше индукции при протекании тока только по валу.

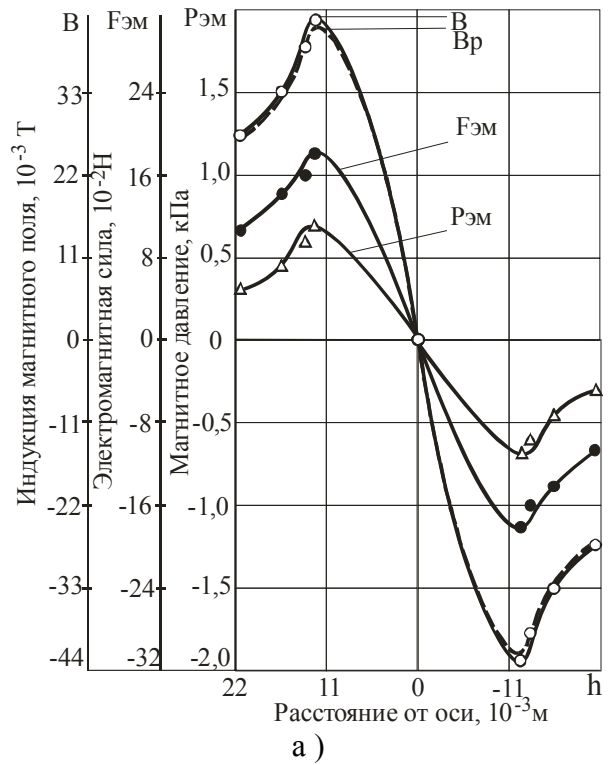
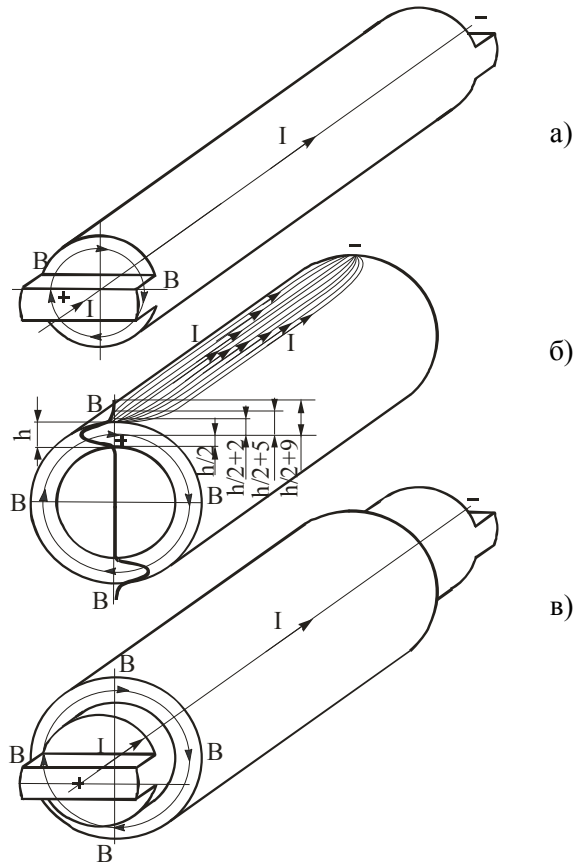


Рис.1 – Методика измерения магнитного поля на поверхности при протекании тока по валу (а), трубе (б) и валу внутри трубы (в)

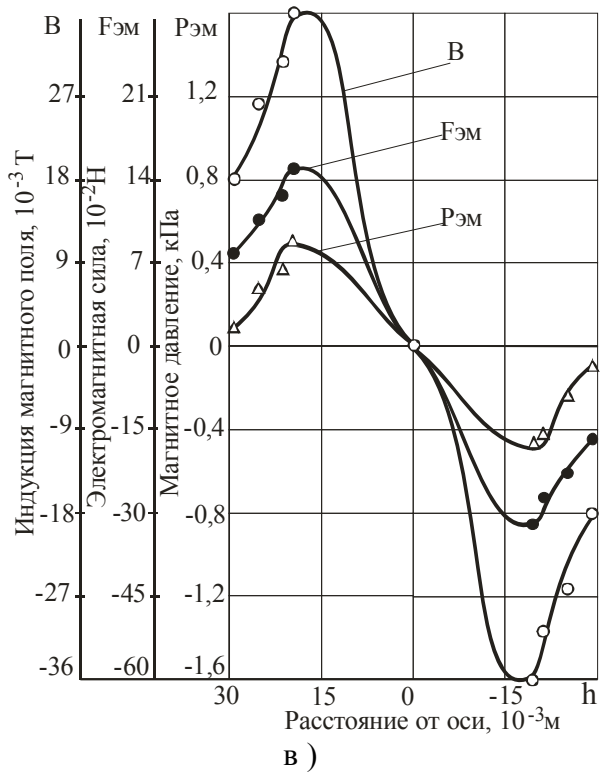
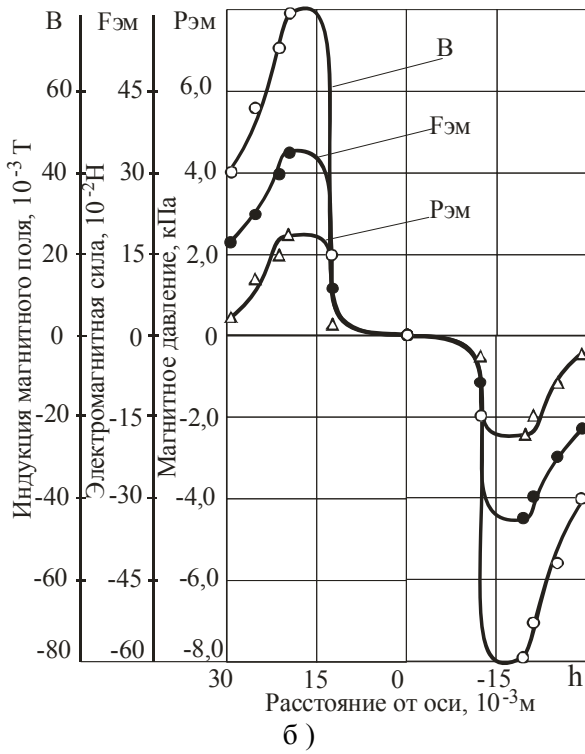


Рис.2 – Магнитное поле тока, протекающего по валу (а), трубе (б) и по валу внутри трубы (в), на поверхности

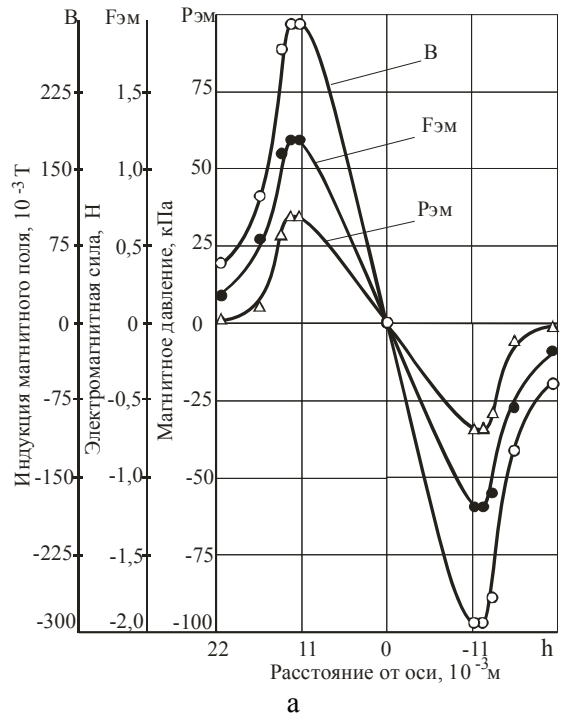
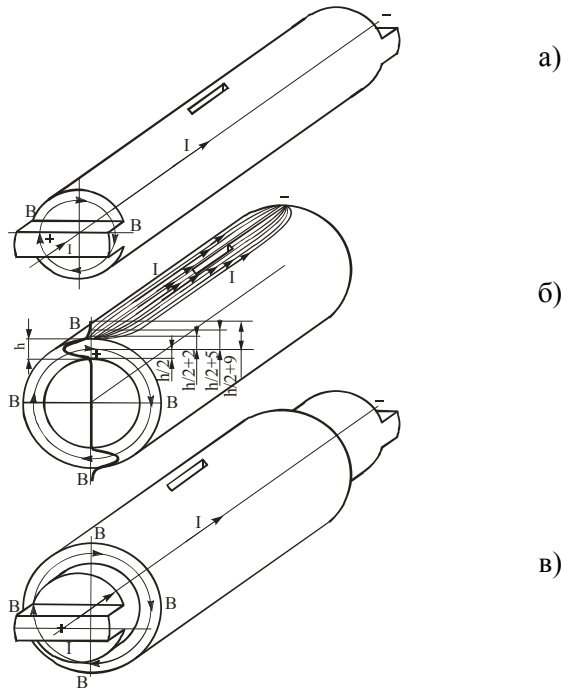


Рис.3 – Методика измерения магнитного поля тока, протекающего по ферромагнитным валу (а), трубе (б) и валу внутри трубы (в)

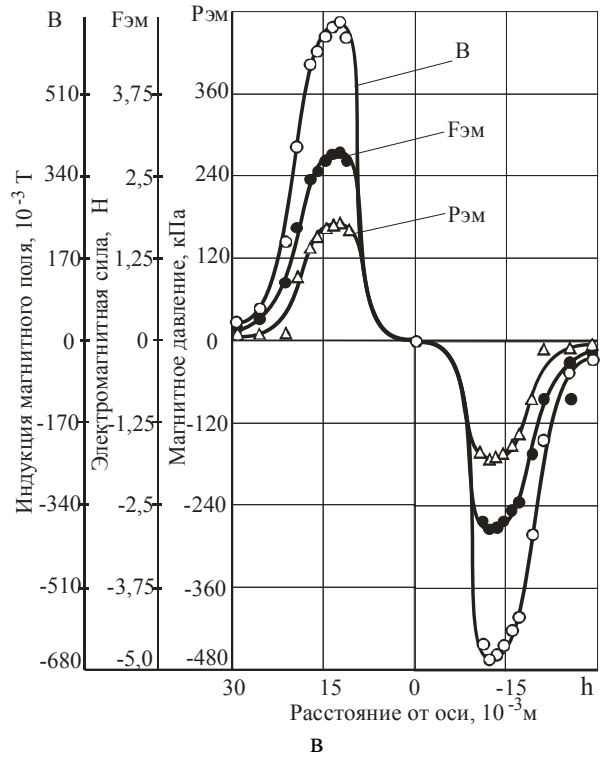
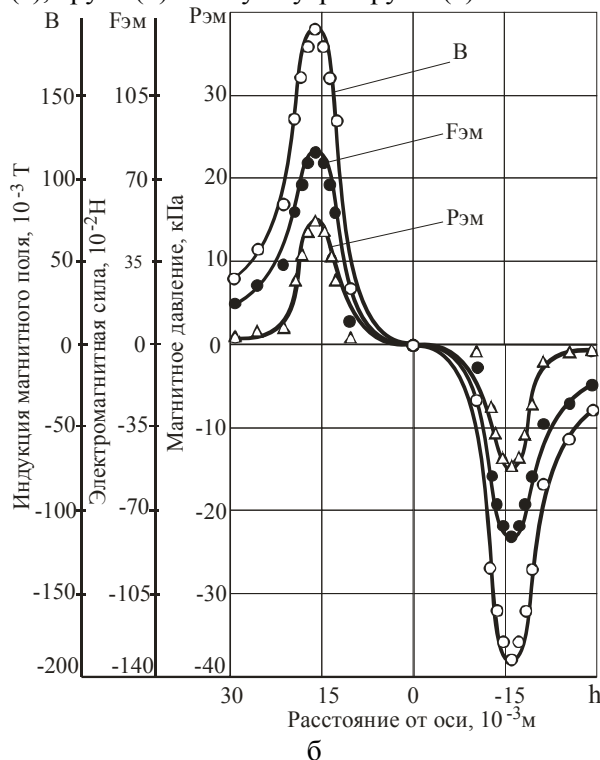


Рис.4 – Магнитное поле тока, протекающего по ферромагнитным валу (а), трубе (б) и валу внутри трубы (в)

Пропорционально индукции на поверхности трубы с валом электромагнитная сила уменьшилась до 0,1512 Н и в квадрате снизилось магнитное давление до 516 Па.

При сварке ток протекает по проволоке и изделию, которые усиливают магнитное поле сварочного тока. Измерение индукции на поверхности вала, трубы и вала с трубой не позволяет изучить природу магнитного поля, для изучения которой разработана модель (рис.3) с профрезерован-

ной канавкой, что позволяет измерить индукцию внутри ферромагнитных вала, трубы и вала с трубой.

Как установлено (рис.4 а), при протекании тока по валу индукция на поверхности увеличилась под действием ферромагнитной массы более чем в 7 раз и возросла до 0,29Т вследствие концентрации силовых линий магнитного поля в ферромагнетике. На оси вала индукция равна нулю и изменяет направление на противоположное на другой поверхности.

При протекании тока по трубе (рис.4.б) под действием ферромагнетика индукция увеличилась более чем в 2 раза до 0,19 Т, что является результатом суперпозиции.

По сравнению с валом максимальная индукция магнитного поля уменьшилось с 0,29 Т до 0,19 Т в результате увеличения площади поперечного сечения с 0,049 м<sup>2</sup> для вала до 0,0766 м<sup>2</sup> для трубы в 1,5 раза. Для увеличения индукции необходимо концентрировать проводники с током. При протекании тока по ферромагнитной трубе повысилась электромагнитная сила до 0,798 Н и магнитное давление до 14,371 кПа. Поэтому при сварке труб резко усиливается магнитное дутье, которое снижает стабильность процесса и нарушает формирование швов.

Адекватность модели реальным условиям подтверждена при измерении индукции магнитного поля сварочного тока в производственных условиях сварки труб для газо- и нефтепроводных магистралей диаметром 0,426 м с толщиной стенки 0,008 м.

Как установлено (рис.3 в, 4 в), особенно увеличивается индукция при протекании тока по валу внутри ферромагнитной трубы до 0,66 Т, что является результатом протекания тока внутри трубы и концентрации силовых линий магнитного поля в обладающей большой магнитной проницаемостью трубе. При этом изменяется распределение индукции магнитного поля. Максимум индукции располагается на границе вала и трубы, что свидетельствует о концентрации силовых линий в трубе. Индукция на границе больше, чем согласно принципу суперпозиции сумма индукции тока и микротоков в ферромагнитных вале и трубе 0,48 Т.

На оси вала индукция равна нулю и возрастает при приближении к границе вала и трубы. При переходе от верхней к нижней поверхности индукция изменяет направление на противоположное согласно направлению силовых линий магнитного поля. При приближении к внешней поверхности трубы индукция уменьшается до 0,57 Т вследствие выпучивания силовых линий в зазоре. За пределами трубы индукция в начале резко падает, а затем почти неизменна.

В соответствии с индукцией максимальная электромагнитная сила на границе раздела вала и трубы достигает 2,772 Н и магнитное давление 173,408 кПа. На внешней поверхности трубы электромагнитная сила снижается до 2,394 Н и магнитное давление до 129,339 кПа.

На основании установленных закономерностей разработан способ односторонней высокоскоростной сварки с двухсторонним токоподводом, обеспечивающим регулирование магнитного поля, равновесие действующих на дугу и жидкий металл электромагнитных сил, стабильность процесса и качественное формирование швов на флюсовой подушке, снижение материало- и энергоемкости процесса.

Установленные закономерности влияния формы изделия на магнитное поле тока и разработанный способ могут быть использованы при сварке котлов железнодорожных цистерн.

Дальнейшие исследования в данном направлении являются перспективными, так как позволяют разработать новые энерго- и материалосберегающие процессы односторонней высокоскоростной сварки котлов железнодорожных цистерн.

### **Выводы**

1. Расчетно-экспериментальным путем установлены закономерности воздействия формы изделия на магнитное поле сварочного тока на поверхности и внутри ферромагнитных вала, трубы и вала внутри трубы. Максимальное значение индукции достигается при протекании тока по валу внутри трубы на границе вала и трубы, как на поверхности проводника с током.
2. Сходимость экспериментальных и расчетных данных дает возможность использования расчетных значений для определения индукции магнитного поля сварочной дуги.
3. Установлен “эффект трубы”, при котором магнитное поле сварочного тока значительно возрастает при протекании тока внутри трубы вследствие концентрации силовых линий в обладающей большой магнитной проницаемостью ферромагнитной трубе.
4. Односторонняя высокоскоростная сварка с двухсторонним токоподводом обеспечивает равновесие действующих на дугу и жидкий металл электромагнитных сил, стабильность процесса

и качественное формирование швов на флюсовой подушке, снижение материало- и энергоемкости процесса.

**Список использованных источников:**

1. Уайт Р.М. Квантовая теория магнетизма / Р.М.Уайт.– М.: Мир, 1972. – 306 с.
2. Маттис Д. Теория магнетизма / Д. Маттис. – М.: Мир, 1967. – 400 с.
3. Гильберт В. О магните, магнитных полях и о большом магните – Земле /В. Гильберт. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 375 с.
4. Дж. Максвелл Избранные сочинения по теории электромагнитного поля /Дж. Максвелл. – М.: 1954. – 238 с.
5. Финкельбург В. Электрические дуги и термическая плазма /В. Финкельбург и Г. Меккер. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 369 с.
6. Шоек П.А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона / П.А. Шоек // Современные проблемы теплообмена. – М.: Энергия. – 1966. – С. 110 – 139.
7. Гаген Ю.Г. Сварка магнитоуправляемой дугой / Ю.Г. Гаген, В.Д. Таран. – М.: Машиностроение, 1970. – 157 с.
8. Мандельберг С.Л. Влияние магнитного поля сварочного контура на форму швов, свариваемых внутри трубы / С.Л. Мандельберг, В.Е. Лопата // Автоматическая сварка. – 1962. – № 3 – С. 1 – 6.
9. Патон Б.Е. Сварка под флюсом при изготовлении труб большого диаметра /Б.Е. Патон, С.Л. Мандельберг // Автоматическая сварка. – 1968. – № 3. – С.41 – 46.
10. Закономерности воздействия формы изделия на электромагнитное поле сварочного тока / В.В. Чигарев, В.И. Щетинина, С.В. Щетинин, В.И. Федун // Автоматическая сварка. – 2006. – №8. – С.16 – 21.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.
12. Абрамович Г.П. Прикладная газовая динамика /Г.П. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824с.

**Bibliography:**

1. Wait R.M. Magnetic quant theory / R.M.Wait.– М.: Peace, 1972. – 306 p. (Rus.)
2. Mattis D. Magnetizm theory / D. Mattis. – М.: Peace, 1967. – 400 p. (Rus.)
3. Gilbert V. About magnet, magnetic fields and big magnet – Earth /V. Gilbert. – М.: Publ. SA The USSR, 1956. – 375 p. (Rus.)
4. G. Maxwell Electromagnetic field theory selected work /G. Maxwell. – М.: Peace, 1954. – 238 p. (Rus.)
5. Finkelburg V. Electric arcs and thermal plasma /V. Finkelburg and G. Meccer. – М.: foreign lit. publishin, 1961. – 369 p. (Rus.)
6. Shoek P.A. Energy balance on anode of powerful arcs, blaze in argon atmosphere, research / P.A. Shoek // Thermoexchange modern problem Современные проблемы теплообмена. – М.: Energy. – 1966. – P. 110 – 139. (Rus.)
7. Gagen U.G. Magnetcontrol arc welding / U.G. Gagen, V.D. Taran. – М.: Machinebuilding, 1970. – 157 p. (Rus.)
8. Mandelberg S.L. Magnetic field of welding contour influence on form joints, welding pipe within / S.L. Mandelberg, V.E. Lopata // Automatic welding. – 1962. – № 3 – P. 1 – 6. (Rus.)
9. Paton B.E. Welding under flux at big diameter pipe manufacture /B.E. Paton, S.L. Mandelberg // Automatic welding. – 1968. – № 3. – S.41 – 46. (Rus.)
10. Good form influence on welding current electromagnetic field regularities / V.V.Chigarev, V.I. Shchetinina, S.V.Shchetinin, V.I. Fedun //Automatic welding. – 2006. – №8. – P.16 – 21.(Rus.)
11. Bessonov L.A. Electrotechnics basses theoretical. Electromagnetic field / L.A. Bessonov. – М.: Gardariky, 2001. – 317 p. (Rus.)
12. Abramovich G.P. Applied gas dynamic / G.P. Abramovich. – М.: Sience, 1969. – 824p. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самоутугин  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 24.11.2011