

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

УДК 621.791.75.053

**ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА В ДУГЕ НА
СТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ ДУГИ**

© 2017 В.Ф. Кубарев*, А.М. Рыбачук**, Ю.В. Доронин***

* Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

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

*** ООО «Аттестационный центр городского хозяйства» (АЦГХ), Москва

В статье проведён анализ статической составляющей силы давления дуги на поверхность металла при дуговой сварке. Показано, что силовое воздействие на сварочную ванну от статического давления дуги не зависит от распределения плотности тока по поперечному сечению дуги.

Ключевые слова: дуговая сварка, давление дуги, сварочная ванна.

Поступила в редакцию: 15.08.2017

Несмотря на появление новых способов сварки, дуговая сварка продолжает сохранять ведущее положение в производстве в связи с тем, что нет еще способа, который по простоте и универсальности может конкурировать с дуговой сваркой. Развитие автоматической дуговой сварки обуславливает необходимость изучения физических процессов при воздействии сварочной дуги на металл. Эти исследования продолжают в связи с разработкой новых способов дуговой сварки.

Качество сварного соединения при дуговой сварке во многом определяется формированием сварного шва. Глубина проплавления и форма сварного шва зависит от условий, в которых образуется и кристаллизуется сварочная ванна. Силовое воздействие дуги определяет движение жидкого металла в сварочной ванне и может вызвать появление таких дефектов, как подрезы, грубая чешуйчатость, полости внутри шва и другие.

Для анализа возможности регулирования сил давления дуги важно изучение природы, величины и характера распределения сил в дуговом промежутке, описание физических процессов в сварочной ванне. Силовое воздействие дуги на сварочную ванну характеризуется такими параметрами процесса, как давление, сила, диаметр пятна давления (диаметр силового пятна), коэффициент сосредоточенности дуги.

Взаимодействие собственного магнитного поля дуги с током в дуге создает собственные электромагнитные силы, сжимающие плазму и разгоняющие ее в направлении к изделию. В расширяющемся столбе дуги сварочный ток в каждом элементарном объеме плазмы имеет две составляющие: радиальную и вертикальную (осевую).

При взаимодействии радиальной составляющей тока с собственным магнитным полем в соответствии с законом Ампера возникают осевые электромагнитные силы, действующие на элемент плазмы в осевом направлении:

$$\vec{f}_z = \vec{j}_r \times \vec{B}$$

где B – индукция собственного магнитного поля дуги

Они разгоняют плазму в направлении от электрода к изделию.

При взаимодействии осевой составляющей тока с собственным магнитным полем на каждый элементарный объем плазмы действует радиальная электромагнитная сила, направленная к оси дуги:

$$\vec{f}_r = \vec{j}_z \times \vec{B}$$

В результате дуга сжимается. Сжатие плазмы проходящим по ней током называют пинч-эффектом. Радиальные электромагнитные силы создают статическое давление в дуге, которое характеризует степень сжатия элемента объема плазмы. Под действием этих сил плазма дуги разгоняется в направлении от электрода к изделию.

Анализу силового воздействия электрической дуги на сварочную ванну посвящено большое количество работ [1–11].

Давление дуги на сварочную ванну определяется суммой составляющих статического (газокинетического) и динамического давлений в каждой точке объема дуги:

$$P = P_{cm} + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (1)$$

где P_{cm} – статическое давление.

Статическое давление в точке столба на расстоянии r от оси дуги определяется суммарным давлением элементарных объемов внешних слоев плазмы:

$$P_{cm} = \int_r^{r_c} \mu j_z H dr \quad (2)$$

где r_c – радиус столба дуги;

μ – магнитная проницаемость плазмы;

H – напряжённость магнитного поля.

Ток, охватываемый контуром радиусом r , определяется суммированием значений токов, проходящих через элементарные кольца:

$$I = \int_0^r j_z 2\pi r dr$$

В соответствии с законом полного тока:

$$H 2\pi r = \int_0^r j_z 2\pi r dr$$

Отсюда можно определить напряженность магнитного поля в произвольной точке столба дуги, находящейся на расстоянии r :

$$H = \frac{1}{r} \int_0^r j_z r dr \quad (3)$$

Для случая равномерного распределения тока по сечению дуги ($j_z = \text{const}$) напряженность магнитного поля в столбе дуги:

$$H = \frac{j_z r}{2} = \frac{I_\partial r}{2\pi r_c^2} \quad (4)$$

где I_∂ – полный ток дуги,

r_c – радиус столба дуги.

Учитывая напряженность магнитного поля в столбе дуги (3), получим формулу для определения давления в произвольной точке столба

$$p_{cm} = \int_r^{r_c} \mu \frac{j_z}{r} dr \int_0^r j_z r dr \quad (5)$$

При равномерном распределении тока по сечению столба дуги, подставив в формулу значения j_z и H и проинтегрировав, получим

$$p_{cm} = \frac{\mu \cdot I_d^2}{4\pi^2 \cdot r_c^4} (r_c^2 - r^2) \quad (6)$$

Давление на оси дуги при $r = 0$ максимально. Оно равно

$$p_{cm} = \frac{\mu \cdot I_d^2}{4\pi^2 \cdot r_c^2} = \frac{\mu \cdot I_d^2}{4\pi \cdot S} \quad (7)$$

где $S = \pi r_c^2$ – площадь сечения дуги.

Давление на поверхности столба (при $r = r_c$) равно нулю.

Распределение электромагнитного давления, созданного взаимодействием осевой составляющей тока с собственным магнитным полем, имеет параболическую форму с максимумом на оси дуги (рис.1).

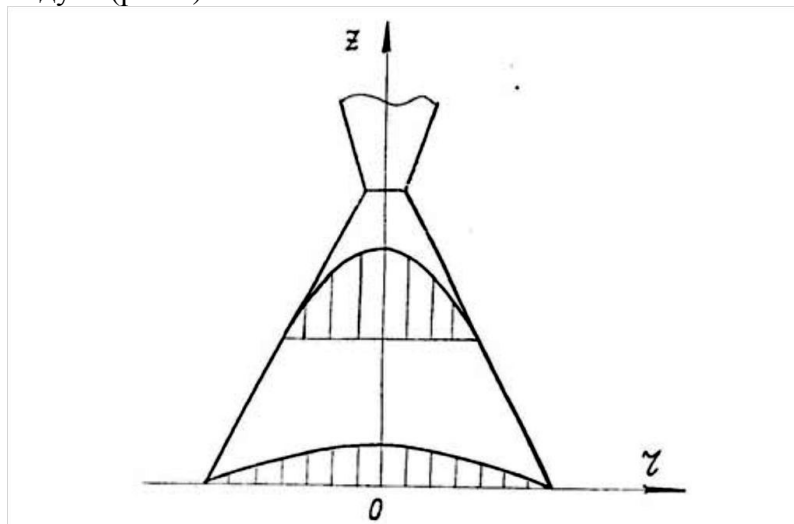


Рис. 1. – Распределение статического давления в дуге, созданного радиальной составляющей собственных электромагнитных сил

Давление на оси дуги согласно формуле (7) обратно пропорционально площади сечения дуги. Причём давление вблизи поверхности электрода максимально и убывает в направлении к изделию.

Экспериментально определить давление дуги на оси можно, используя катод с маленьким отверстием, которое не мешает разряду. Данные практических измерений, выполненных на дуге с угольным катодом, и расчета, сделанного по формуле (7) с учетом наличия отверстия на катоде, подтверждают достаточную точность оценки давления по формуле (7) /1/.

Если столб дуги - конус с углом γ между образующей и осью, то $r_c = z \cdot \operatorname{tg} \gamma$ и $S = \pi \cdot z^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma$.

Градиент давлений в осевом направлении на оси дуги:

$$\text{grad}_z p_{cm} = \frac{\mu \cdot I_0^2}{2\pi^2 \cdot z_c^3 \cdot \text{tg}^2 \gamma}$$

Вследствие этого градиента давлений в центральной части столба дуги плазма перемещается от электрода к изделию и разгоняется до значительных скоростей. Такой перепад давлений воздействует на каждый элементарный объём плазмы и создаёт направленное движение плазмы к основанию дуги. Расчётные оценки показывают, что за счёт перепада давлений в дуге, горящей при токах в несколько сот ампер, плазма может разгоняться до скорости в сотни метров в секунду / 1, 4 /. Воздействие плазмы на дугу и капли расплавленного электродного металла определяет технологические свойства дуги, силовое воздействие дуги на сварочную ванну, глубину проплавления, форму шва и образование дефектов.

Определим воздействие статического давления, созданного пинч-эффектом, на изделие. Сила, действующая на элементарную кольцевую площадку радиусом r и толщиной dr ,

$$dF = p_{cm} 2\pi r dr$$

Сила, действующая на все сечение

$$F_r = \int_0^{r_c} p_{cm} 2\pi r dr \quad (8)$$

При равномерном распределении тока по сечению столба, используя формулу (4), получим

$$F_r = \int_0^{r_c} \frac{\mu I_0^2}{4\pi^2 r_c^4} (r_c^2 - r^2) 2\pi \cdot r dr = \frac{\mu \cdot I_0^2}{8\pi} \quad (9)$$

Следовательно, сила, действующая на изделие и вызванная пинч-эффектом, пропорциональна квадрату сварочного тока и не зависит от сечения дуги (координаты z).

Данное выражение статической составляющей силы давления дуги получено при равномерном распределении тока по сечению дуги.

Такое приближение часто используют в различных работах [1, 2, 4, 9, 11].

Распределение плотности тока не является однозначным и может изменяться по различным причинам. Оно зависит от формы конца электрода, эмиссионных свойств катода, размеров электрода, химического состава электрода, свариваемого металла, теплофизических свойств среды, в которой горит дуга, и других условий [6–8].

Докажем, что данная составляющая не зависит от закона распределения плотности тока.

Известно, что разное распределение плотности тока по радиусу столба дуги (активного пятна) можно описать функцией

$$j(r) = j_0 \left(1 - \frac{r^n}{r_c^n}\right) \quad (10)$$

где n – параметр закона распределения тока, изменяя который можно менять вид распределения $j(r)$. Графическое изображение этой функции приведено на рисунке 2.

Напряжённость магнитного поля, соответствующее заданному распределению плотности тока (10), можно определить, используя выражение (2)

$$H = j_0 \left[\frac{r}{2} - \frac{r^{n+1}}{r_c^n(n+2)} \right] \tag{11}$$

Плотность тока на оси проводника выражается через полный ток дуги I_δ из равенства:

$$I_\delta = 2\pi \int_0^{r_c} j(r)rdr \tag{12}$$

и равна по величине:

$$j_0 = \frac{I_\delta(n+2)}{\pi r_c^2 n} \tag{13}$$

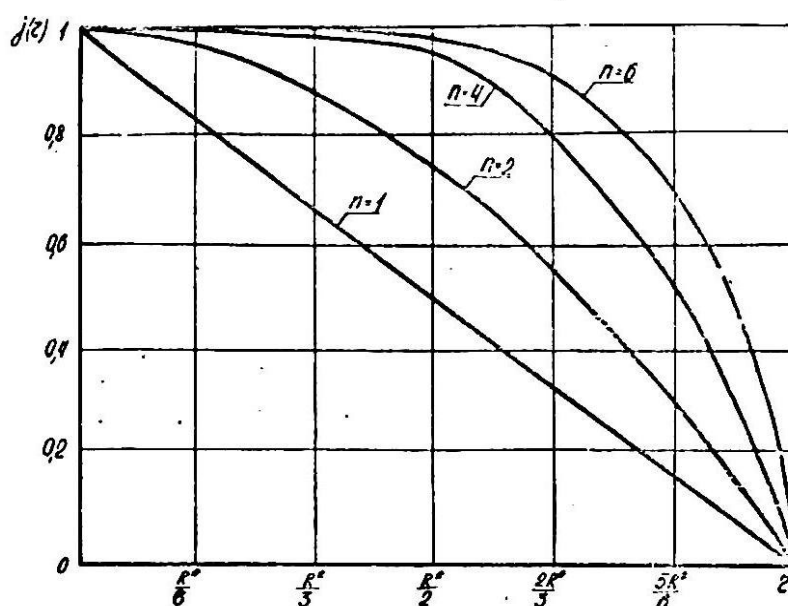


Рис. 2. – Обобщённый вид распределения плотности тока по радиусу столба дуги

Учитывая (11), найдем:

$$P_{cm}(r) = \mu j_0^2 \left[\left(-\frac{r^2}{4} + \frac{r^{n+2}}{2r_c^2(n+2)} + \frac{r^{n+2}}{r_c^n(n+2)^2} - \frac{r^2}{2r_c^{2n}(n+2)(n+1)} \right) + \left(\frac{r_c^2}{4} - \frac{r_c^2}{2(n+2)} - \frac{r_c^2}{(n+2)^2} + \frac{r_c^2}{2(n+2)(n+1)} \right) \right] \tag{14}$$

Подставим значение $P_{cm}(r)$ в формулу (8) и проведем интегрирование. Опуская преобразования, приведем окончательное выражение силы F_r :

$$F_r = \frac{\mu I_\delta^2}{\pi n^2} (n+2)^2 Q(n),$$

где:

$$Q(n) = \left[\frac{1}{8} - \frac{1}{(n+2)^2} - \frac{1}{2(n+1)(n+2)^2} - \frac{1}{2(n+2)} + \frac{2}{(n+4)(n+2)^2} - \frac{1}{2(n+1)(n+2)} + \frac{1}{(n+2)(n+4)} \right] \tag{15}$$

Проведя алгебраическое преобразование в (15) можно показать, что выражение:

$$\frac{(n+2)^2}{n^2} Q(n) \equiv \frac{1}{8}$$

является тождеством относительно n . Отсюда можно заключить, что часть силы давления дуги, а именно сила статического (газокинетического) давления на поверхность анода не зависят ни от закона распределения плотности тока $j(r)$ по сечению дуги и активного пятна, ни от размеров столба и активного пятна. Ее численное значение всегда равно:

$$F_r = \frac{\mu I_0^2}{8\pi}$$

Изменение длины дуги или радиуса активного пятна дуги приведет лишь к изменению площади, на которой приложена сила F_r , а ее значение останется постоянным.

ВЫВОДЫ

1. Силовое воздействие на сварочную ванну от статического давления дуги не зависит от распределения плотности тока по поперечному сечению дуги.

2. Изменение длины дуги или радиуса активного пятна на ванне приводит к изменению площади, на которую приложена эта сила, а её величина остаётся неизменной, равной $\frac{\mu I_0^2}{8\pi}$.

3. С изменением закона распределения тока по сечению дуги меняется распределение статического давления по сечению дуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Финкельбург, В. и др.* Электрические дуги и термическая плазма [Текст] / В. Финкельбург, Г. Меккер. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 370 с.
2. Maecker H. Plasmastromunqen in Lichtbogen infolge der eigenmagnetischer Kompression. Zeitschrift fur Physik, 1955, Bd.141, pp. 198–216.
3. *Мечев, В.С. и др.* Электромагнитные силы в сварочной дуге [Текст] / В.С. Мечев, В.С. Слободянюк, М.А. Самсонов, В.С. Энгельшт // Автоматическая сварка. – 1980. – №8. – С. 17–20.
4. *Лесков, Г.И.* Электрическая сварочная дуга [Текст] / Г.И.Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
5. *Кубарев, В.Ф. и др.* Газодинамические характеристики аргоновой сварочной дуги с нерасходуемым катодом [Текст] / В.Ф. Кубарев, М.М. Крутянский, Г.Г. Чернышов // Физика и химия обработки материалов. – 1982. – №3. – С. 39–45.
6. *Ерохин, А.А.* Силовое воздействие дуги на расплавляемый металл [Текст] / А.А. Ерохин // Автоматическая сварка. – 1979. – №7. – С. 21–26.
7. *Селянников, В.Н.* Распределение давления сварочной дуги постоянного тока [Текст] / В.Н. Селянников // Сварочное производство. – 1974. – №7. – С. 4–6.
8. *Руссо, В.Д. и др.* Влияние напряжения дуги и заточки неплавящегося электрода на силовое воздействие дуги [Текст] / В.Д. Руссо, И.В. Суздальев. Э.И. Явно // Сварочное производство. – 1977. – №7. – С. 6–7.
9. *Рыбачук, А.М. и др.* Математическое моделирование физических процессов в дуге и сварочной ванне [Текст] / А.М. Рыбачук, Г.Г. Чернышов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 76 с.
10. *Лебедев, В.К. и др.* Силовое воздействие сварочной дуги [Текст] / В.К. Лебедев, И.В. Пентегов // Автоматическая сварка. – 1981. – №1. – С. 7–15.
11. *Рыбачук, А.М. и др.* Силовое воздействие конусной дуги на электрод и сварочную ванну [Текст] / А.М. Рыбачук, Г.Г. Чернышов // Сварка и диагностика. – 2010. – №5. – С. 6–8.

REFERENCES

- [1] Finkelburg V., Mekker G. Ehlektricheskie dugi i termicheskaja plazma [Electric Arcs and Thermal Plasma]. M. Pub. Izdatelstvo inostrannoj literatury [Foreign Literature Publishing House], 1961, 370 p. (in Russian)
- [2] Maecker H. Plasmastromungen in Lichtbogen infolge der eigenmagnetischer Kompression. Zeitschrift fur Physik, 1955, Bd.141, pp. 198–216. (in German)
- [3] Mechev V.S., Slobodjanjuk V.S., Samsonov M.A., Ehngel'sht V.S. Ehlektromagnitnye sily v svarochnoj duge [Electromagnetic Forces in Welding Arc]. Avtomaticheskaja svarka [Automatic Welding], 1980, №8, ISSN 0005-111X, pp. 17–20. (in Russian)
- [4] Leskov G.I. Ehlektricheskaja svarohnaja duga [Electric Welding Arc]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1970, 335 p. (in Russian)
- [5] Kubarev V.F., Krutjanskij M.M., Chernyshov G.G. Gazodinamicheskie kharakteristiki argonovoj svarochnoj dugi s neraskhoduemym katodom [Gas Dynamic Characteristics of Argon Arc with Non-Consumable Cathode]. Fizika i khimija obrabotki materialov [Physics and Chemistry of Material Processing], 1982, №3, pp. 39–45. (in Russian)
- [6] Erokhin A.A. Silovoe vozdejjstvie dugi na rasplavljaemyj metal [Force Arc Action on Molten Metal]. Avtomaticheskaja svarka [Automatic Welding], 1979, №7, ISSN 0005-111X, pp. 21–26. (in Russian)
- [7] Seljanenkov V.N. Raspredelenie davlenija svarochnoj dugi postojannogo toka [Welding Arc Pressure Distribution]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production], 1974, №7, ISSN 0491-6441, pp.4-6. (in Russian)
- [8] Russo V.D., Suzdalev I.V., Javno Eh.I. Vlijanie naprjazhenija dugi i zatochki neplavjashhegosja ehlektroda na silovoe vozdejjstvie dugi [The influence of Arc Voltage and Non-Consumable Electrode Sharpening on the Arc Force Action]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production], 1977, №7, ISSN 0491-6441, pp. 6–7. (in Russian)
- [9] Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh processov v duge i svarochnoj vanne [Mathematical Modeling of Physical Processes in the Arc and Weld Pool]. M. Pub. MGTU im. N.Eh. Baumana [Bauman MSTU], 2007, 76 p. (in Russian)
- [10] Lebedev V.K., Pentegov I.V. Silovoe vozdejjstvie svarochnoj dugi [Welding Arc Force]. Avtomaticheskaja svarka [Automatic Welding], 1981, №1, ISSN 0005-111X, pp. 7–15. (in Russian)
- [11] Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Silovoe vozdejjstvie konusnoj dugi na ehlektrod i svarochnuju vannu [Conical Arc Force Action on the Electrode And Weld Pool]. Svarka i diagnostika [Welding and Diagnostics], 2010, №5, ISSN 2071-5234, pp. 6–8. (in Russian)

Influence of Current Density Distribution on the Static Arc Pressure

V.F. Cubarew*, A.M. Rybachuk, Yu.V. Doronin*****

* *National Research University «MPEI»,
Krasnokazarmennaya St., 17, Moscow, Russia, 111250
e-mail: doronin-45@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8493-8933
WoS ResearcherID: J-5424-2017*

** *Bauman Moscow State Technical University
2-Baumanskaya St., 5, build. 1, Moscow, Russia 105005
e-mail: amrybachuk@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9078-2653
WoS ResearcherID: O-6229-2017*

*** *LTD «Certification Center of municipal services»,
Office 36, Tkatskaya St., 46, Moscow, Russia 105187
e-mail: doronin-45@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3294-882X
WoS ResearcherID: O-6190-2017*

Abstract – The article analyzes the static component of the arc pressure force on the metal surface during arc welding. It is shown that the force action on the weld pool from the static pressure of the arc does not depend on the distribution of the current density over the cross section of the arc.

Keywords: arc welding, pressure of the arc, weld pool.