ВОПРОСЫ СВАРКИ, МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ, ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.791

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-10-257-60-63

*А. В. Савинов, О. А. Полесский, А. А. Чудин, П. П. Красиков
Л. С. Красикова, Д. А. Муругов*

ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДУГИ НА МЕТАЛЛ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ ПРИ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ (ОБЗОР)*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: svarka-nv@vstu.ru

В работе на основе анализа литературных данных показано влияние состава защитного газа, величины напряжения на дуге, силы тока на силовое (газодинамическое) воздействие дугового разряда с неплавящимся электродом, толщину жидкой прослойки расплавленного металла, глубину кратера сварочной ванны.

Ключевые слова: дуга с неплавящимся электродом, газодинамическое воздействие.

A. V. Savinov, O. A. Polesskiy, A. A. Chudin, P. P. Krasikov, L. S. Krasikova, D. A. Murugov

GAS-DYNAMIC EFFECT OF THE ARC ON THE METAL OF THE WELD POOL DURING NON-CONSUMABLE ELECTRODE WELDING (REVIEW)

Volgograd State Technical University

Based on the analysis of the literature data, the influence of the composition of the shielding gas, the voltage across the arc, the current strength on the power (gas-dynamic) effect of an arc discharge with a non-consumable electrode, the thickness of the liquid layer of the molten metal, and the depth of the crater of the weld pool are shown.

Keywords: arc with a non-consumable electrode, gas-dynamic effect.

В балансе сил, действующих на сварочную ванну, силовое (газодинамическое) воздействие дугового разряда играет важную роль, следовательно, его изучение и понимание способов его регулирования, представляют значительный интерес. Действие дуги на металл сварочной ванны в значительной степени обуславливает такие важные технологические параметры, как глубина проплавления, интенсивность перемешивания металла в ванне, и, как следствие, качество формирования валика и сварного соединения в целом [1].

Несмотря на большое количество работ, посвященных данной проблеме [1–13], влияние силового воздействия дуги на сварочную ванну изучено недостаточно полно. При изучении такого воздействия исследователи, в большинстве случаев, отказываясь от наведения сварочной ванны (ее заменяют твердым охлаждаемым

анодом), пренебрегают эффектами, связанными с наличием паровой фазы, а, следовательно, с изменением потенциала ионизации, влиянием парового потока и т. п. [2]. Поэтому, рассматривая различные процессы сварки, не всегда можно достоверно выделить роль силового воздействия разряда в получаемом проплавлении. Именно по этой причине остается дискуссионным вопрос о достоверном измерении силового воздействия дугового разряда.

А. В. Петров [3] первым заметил, что силовое воздействие дуги сохраняется и при коротком замыкании дугового промежутка (т. е. при прохождении тока в отсутствии дуги) и объяснил это электромагнитной силой, «стремящейся расширить контур цепи». Исходя из этого, он сделал вывод, что силовое воздействие сварочного разряда определяется динамическим напором потока газов, обусловленным пинч-

© Савинов А. В., Полесский О. А., Чудин А. А., Красиков П. П., Красикова Л. С., Муругов Д. А., 2021.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0637-2020-0006)

эффектом, и равным разности между общим усилием и усилием в опыте с коротким замыканием дуги.

В тоже время, по мнению А. А. Ерохина [1] такая оценка неправомерна, затрудняет или делает невозможным сравнение результатов различных исследователей и приводит к ошибочным выводам. При этом вместо силы «расширения контура» им предложено использовать силу взаимодействия тока с собственным магнитным полем. Электромагнитная сила в опытах с коротким замыканием и при горении дуги может быть одинакова только при условии равенства порождаемых в обоих случаях магнитных полей, что на практике недостижимо. Еще менее вероятным А. А. Ерохин считает подобие электромагнитной объемной силы в осесимметричной неподвижной сварочной ванне и силы в реальной сварочной ванне вследствие еще большего различия магнитных полей [1]. Он приходит к выводу, что силовое воздействие дуги на сварочную ванну складывается из скоростного напора газового потока и объемных электромагнитных сил, действующих на металл ванны.

В работе [4] рассмотрено силовое воздействие дуги на свариваемый металл, исходя из каналовой модели дугового разряда. Однако данная модель имеет ряд существенных допущений, что приводит к искажению численных результатов. В частности, принято равномерное распределение плотности тока j по площади поперечного сечения дуги, не учитываются газо- и гидродинамические процессы. Авторы сами отмечают необходимость дальнейшего уточнения результатов, а также исследования

неканаловой модели дуги с плотностью тока, изменяющейся вдоль радиуса дуги по определенному закону.

Изыскания в этом направлении были продолжены в работе [5] и позволили получить зависимости плотности тока $j(r)$ для неканаловой модели дугового разряда (рис. 1), результатом которых явились более точные численные решения и учет факторов, которые невозможно выявить при каналовой модели дуги. Однако и в этой работе не были учтены силы поверхностного натяжения и динамического давления газовых и плазменных потоков, в связи с чем результаты, полученные автором, также требуют дополнений и уточнений.

Обращает на себя внимание тот факт, что в литературе часто силовое воздействие дугового разряда на всю поверхность сварочной ванны называют давлением (или интегральным давлением) дуги, что является как минимум неточным, т. к. оно имеет размерность силы (Н), а не давления (Па) [1].

Таким образом, можно утверждать, что суммарное силовое воздействие дуги F на сварочную ванну, обусловленное процессами в дуге и наличием электромагнитного поля, складывается из двух сил [6]:

$$F = F_d + F_{эм},$$

где F_d – сила, обусловленная газодинамическим воздействием дуги на свариваемый металл; $F_{эм}$ – электромагнитная сила сварочного контура.

При этом следует учитывать только ту электромагнитную силу сварочного контура, которая действует непосредственно в месте расположения сварочной ванны.

Авторами [7–10] проведены исследования, позволившие зафиксировать толщину жидкой прослойки $\delta_{ж}$ металла под сварочной дугой (рис. 2). Из анализа зависимостей следует, что глубина кратера пропорциональна току дуги, а, следовательно, и силовому воздействию на расплавленный металл, в то время как толщина жидкой прослойки остается практически неизменной. Прогиб ванны принимает существенную величину при $I_d > 200A$, в противном случае толщина жидкой прослойки превышает глубину кратера, что также говорит о значительном влиянии сварочного тока на процесс образования и форму кратера. Однако приведенные данные позволяют лишь констатировать факт увеличения глубины проплавления с ростом сварочного тока.

Рис. 1. Схема к расчету силового воздействия разряда на металл сварочной ванны для неканаловой модели дуги [5]

Рис. 2. Зависимость толщины жидкой прослойки $\delta_{жс}$, глубины кратера $H_{кр}$ и проплавления H_{np} от силы тока [8]:
а – аргон; б – гелий

Авторами [8] исследовано влияние величины напряжения на дуговом промежутке на параметры сварочной ванны (рис. 3). При этом с увеличением напряжения наблюдается рост глубины кратера и проплавления. Неоднозначно влияние величины напряжения дугового разряда на толщину прослойки жидкого металла сварочной ванны под дугой. Из рис. 3 видно,

что этот показатель возрастает с ростом напряжения на дуге, горящей в аргоне, и практически не изменяется для дуги в гелии. В тоже время, анализ работы [10] позволяет говорить об обратном: $\delta_{жс}$ увеличивается с уменьшением напряжения на межэлектродном промежутке при сварке в аргоне.

Рис. 3. Зависимость толщины жидкой прослойки $\delta_{жс}$, глубины кратера $H_{кр}$ и проплавления H_{np} от величины напряжения дуги [8]:
а – аргон; б – гелий

Следует отметить зависимость параметров сварочной ванны не только от силы сварочного тока и напряжения на дуге, но и от состава защитного газа, которая более подробно будет рассмотрена ниже.

Анализ [9–12] не позволил однозначно ответить на вопрос о степени влияния роста мощности дуги и ее силового воздействия на изменение параметров проплавления и процессы образования кратера. Кроме того, исследователи, обладая точным инструментом, не уделили достаточного внимания построению зависи-

мостей толщины прослойки расплавленного металла по мере перехода от оси сварочной ванны к ее границе с основным металлом, ограничившись изучением $\delta_{жс}$ непосредственно под дугой. Вместе с тем, именно эти зависимости дают более полную картину о характере процессов, протекающих в объеме сварочной ванны, и влиянии на них силового воздействия дугового разряда при сварке.

Правильность вывода об уменьшении силового воздействия дугового разряда с увеличением его длины подтверждают зависимости

(рис. 4), приведенные в работе [13]. При изменении напряжения дуги с 10 до 30 В силовое воздействие разряда уменьшается на $(0,2 \div 0,9) \times 10^{-2} \text{ Н}$ в диапазоне токов от 150 до 350 А, причем это снижение тем сильнее, чем больше ток дуги.

Рис. 4. Зависимость силового воздействия дуги F_d от напряжения U_d и величины тока I_d [13]:
1 — $I_d=150 \text{ А}$; 2 — $I_d=200 \text{ А}$; 3 — $I_d=250 \text{ А}$; 4 — $I_d=300 \text{ А}$;
5 — $I_d=350 \text{ А}$; 6 — 10 В; 7 — 30 В; $d_{\text{пр}}=1,5 \text{ мм}$; $\alpha=15^\circ$

В то же время, силовое воздействие дугового разряда прямо пропорционально квадрату силы тока при любой величине межэлектродного расстояния. При этом коэффициент k уменьшается на 14 % с $6,15 \times 10^{-7}$ до $5,39 \times 10^{-7} \text{ Н/А}^2$. Таким образом, увеличение длины дуги приводит к снижению ее силового воздействия в среднем на 12–14 %, что согласуется с результатами работы [12].

Таким образом, воздействие дуги на свариваемый металл в значительной степени определяется интенсивностью катодного потока плазмы. Изменение геометрии не только конической заточки, но и формы рабочего участка неплавящегося электрода в целом, является эффективным инструментом управления дуговым разрядом.

Выводы

1. Силовое воздействие дуги на сварочную ванну складывается из скоростного напора газового потока и объемных электромагнитных сил, действующих на металл ванны.

2. Воздействие дуги на свариваемый металл в значительной степени определяется интенсивностью катодного потока плазмы. Изменение геометрии не только конической заточки, но и формы рабочего участка неплавящегося электрода в целом, является эффективным инструментом управления дуговым разрядом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ерохин, А. А. Определение величины силового воздействия дуги на расплавляемый металл / А. А. Ерохин // Автоматическая сварка. — 1971. — № 11. — С. 62–64.
2. Симоник, А. Г. Исследование силового воздействия дугового разряда при сварке легких сплавов / А. Г. Симоник, С. И. Верещагин, Н. Д. Маслова // Автоматическая сварка. — 1991. — № 7. — С. 35–36, 51.
3. Петров, А. В. О методике измерения силового воздействия дуги / А. В. Петров // Автоматическая сварка. — 1979. — № 9. — С. 36–37.
4. Лебедев, В. К. Силовое воздействие сварочной дуги / В. К. Лебедев, И. В. Пентегов // Автоматическая сварка. — 1981. — № 1. — С. 7–15.
5. Пентегов, И. В. Силовое воздействие сварочной дуги (неканаловая модель) / И. В. Пентегов // Автоматическая сварка. — 1987. — № 1. — С. 23–27.
6. Алекин, Л. Е. Давление малоамперной дуги в аргоне на сварочную ванну / Л. Е. Алекин, Н. А. Ильенко, В. В. Гума // Автоматическая сварка. — 1965. — № 10. — С. 38–40.
7. Размышляев, А. Д. Распределение толщины прослойки жидкого металла по длине кратера сварочной ванны / А. Д. Размышляев, Л. К. Лещинский, А. К. Нестеренко // Автоматическая сварка. — 1975. — № 12. — С. 62–63.
8. Суздалев, И. В. Влияние параметров режима сварки на форму и размеры кратера сварочной ванны и толщину жидкой прослойки под дугой / И. В. Суздалев, Б. М. Березовский, В. К. Прохоров // Сварочное производство. — 1988. — № 8. — С. 35–36.
9. Березовский, Б. М. Влияние давления дуги и ширины шва на форму поверхности и глубину кратера сварочной ванны / Б. М. Березовский, И. В. Суздалев, О. В. Сажин // Сварочное производство. — 1990. — № 2. — С. 2–5.
10. Буки, А. А. Определение формы кратера при автоматической сварке / А. А. Буки, В. П. Лавренюк // Автоматическая сварка. — 1978. — № 6. — С. 6–7.
11. Селяненок, В. Н. Зависимость давления сварочной дуги от параметров вольфрамового электрода / В. Н. Селяненок, В. В. Степанов, Р. З. Сайфиев // Сварочное производство. — 1980. — № 5. — С. 5–7.
12. Шиганов, Н. В. Измерение давления дуги при сварке в среде аргона и под флюсом / Н. В. Шиганов, Э. Д. Реймонд // Сварочное производство. — 1957. — № 12. — С. 13.
13. Руссо, В. Л. Влияние напряжения дуги и геометрии неплавящегося электрода на силовое воздействие дуги / В. Л. Руссо, И. В. Суздалев, Э. И. Явно // Сварочное производство. — 1977. — № 7. — С. 6–8.