

УДК 621.791.03

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРИТИЧЕСКОГО
ОБЪЕМА КАПЛИ, СПОСОБНОГО ПЕРЕЙТИ В
СВАРОЧНУЮ ВАННУ ПРИ СВАРКЕ
С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ**

Н.В. Павлов, А.В. Крюков, А.М. Жуков

Юргинский технологический институт (филиал) ТПУ
E-mail: pavlin123@rambler.ru**Павлов Николай Викторович**, ст. препод. кафедры сварочного производства Юргинского технологического института (филиал) ТПУ.E-mail: pavlin123@rambler.ru
Область научных интересов: сварка с управляемым каплепереносом электродного металла.**Крюков Артем Викторович**, канд. техн. наук, доцент кафедры сварочного производства Юргинского технологического института (филиал) ТПУ.E-mail: earendill@mail.ru
Область научных интересов: системы автоматизированного проектирования технологического процесса сборки и сварки металлоконструкций.**Жуков Александр Михайлович**, студент кафедры сварочного производства Юргинского технологического института (филиал) ТПУ.E-mail: pavlin123@rambler.ru
Область научных интересов: дуговая сварка плавящимся электродом.

В результате исследования способа сварки с управляемым каплепереносом электродного металла, была разработана математическая модель критического объема капли, способного перейти в сварочную ванну при сварке с короткими замыканиями. Вследствие высокой сложности и многофакторности полученной физической зависимости, была создана линейная мультипликативная регрессионная модель, описывающая зависимость изменения величины объема капли от входных параметров режима процесса сварки. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показало адекватность созданных моделей.

Ключевые слова:

Сварка, смесь газов, математическая модель.

При производстве сварных металлоконструкций все более широкое применение находят способы сварки с управляемым каплепереносом электродного металла [1]. Данный способ позволяет [2]:

- управлять процессами плавления, переноса и кристаллизации металла независимо от пространственного положения сварочной ванны при значительно меньших средних значениях основных технологических параметров;
- управлять скоростью кристаллизации сварочной ванны вследствие нестационарного энергетического

воздействия источника нагрева на сварочную ванну;

- уменьшать степень деформационных процессов в сварных конструкциях.

Дальнейшее совершенствование способов сварки с управляемым каплепереносом электродного металла заключается в использовании в качестве защитного газа смеси аргона и двуокиси углерода ($Ar+CO_2$), активно применяемой на производстве [3].

Сварка в смеси газов положительно сказывается на технологических свойствах сварочной дуги (повышая стабильность ее горения), происходит снижение размеров брызг и уменьшение потерь на разбрызгивание, уменьшается выпуклость шва [4].

Экспериментально было установлено, что наименьшие потери электродного металла на угар и разбрызгивание достигаются при содержании 70 % Ar + 30 % CO_2 и не превышают 2 % [5].

Основываясь на данных, описанных в работе Н.М. Новожилова, полученное соотношение обусловлено тем, что добавление к аргону углекислого газа до 70 % Ar + 30 % CO_2 сопровождается уменьшением размера электродных капель и соответствующим увеличением их количества. Повышение содержания углекислого газа в аргоне сверх этого предела при одних условиях сопровождается резким, а при других условиях плавным уменьшением количества капель, образующихся в единицу времени [6].

При дальнейшем исследовании рассматриваемого способа сварки целесообразно применение математических методов и математического моделирования технологических параметров процесса сварки. Применение данных методов превратилось в мощный инструментарий исследований и познания процессов, происходящих в сложных технологических системах, позволяющих не только получить формализованное описание их основных закономерностей, но и эффективно управлять ими.

Математическое моделирование позволяет оптимизировать условия протекания процесса образования сварного соединения, предотвратить появление недопустимых дефектов сварных швов, соединений, конструкций и одновременно повысить производительность сварочных операций [7].

Основным технологическим параметром, существенно влияющим на эффективность процесса, является характер плавления и переноса электродного металла. Определение закономерностей процесса образования и величины капли на торце электрода позволяет создавать методы управления формой и размерами капель, выбирать оптимальные варианты реализации технологического процесса и служит основой для решения широкого круга практических задач.

На основании всего вышеизложенного была поставлена цель – разработать математическую модель изменения объема капли расплавленного металла для процессов сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси газов.

На первоначальном этапе для разрабатываемой модели были определены входные параметры, оказывающие существенное воздействие на искомые значения (среднее значение тока I , напряжение на дуге U_d , скорость сварки $V_{св}$, частота переноса электродного металла f).

Определение величины изменения объема капли расплавленного металла следует рассматривать на основе сил, действующих на каплю в процессе каплепереноса электродного металла

$$F_{эо} + F_о = F_p + F_{mn}, \quad H, \quad (1)$$

где $F_{эо}$ – электродинамическая сила, H ; $F_о$ – динамическая сила, H , которая является суммой силы тяжести и силы инерции, полученной при движении капли; F_p – сила давления плазменных потоков, H ; F_{mn} – сила поверхностного натяжения, H .

Для решения данного уравнения необходимо определить значения сил и некоторые коэффициенты.

Электродинамическая сила определяется из выражения [8]:

$$F_{эо} = \frac{\mu\mu_0 i^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r}, \quad H,$$

где μ – относительная магнитная проницаемость стали, $\mu = 200$; μ_0 – магнитная постоянная; i – плазменный ток дуги, A ; R – радиус капли, мм; r – радиус проволоки, мм.

Динамическая сила, зависящая от ускорения:

$$F_о = m(g + a), \quad H,$$

где m – масса капли, кг; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; a – ускорение капли, возникающее при остановке проволоки, m/c^2 .

Сила давления плазменных потоков:

$$F_p = A \frac{I^2}{S_a}, \quad H,$$

где A – коэффициент, зависящий от материала электрода и параметров приэлектродных областей; I – сила сварочного тока, A ; S_a – площадь анодного пятна, mm^2 ;

Определение коэффициента A основывается на экспериментальных исследованиях формы сварочной ванны по методике описанной в [9]. На основе полученных данных построим график зависимости (рис. 1) коэффициента A от величины сварочного тока.

Сила поверхностного натяжения между каплей и сварочной ванной, зависящая от диаметра проволоки:

$$F_{mn} = 2\pi r\sigma, \quad H,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, H/m .

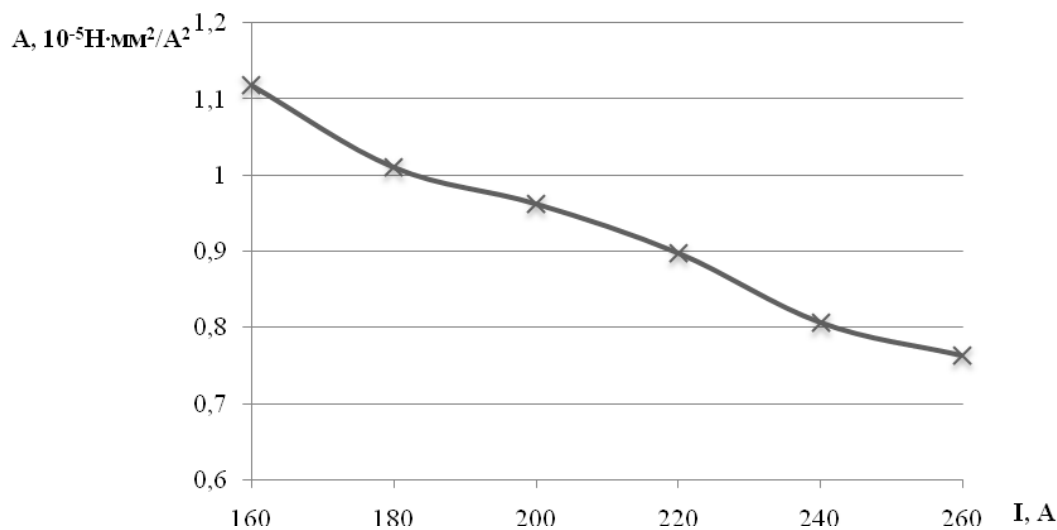


Рис. 1. Зависимость коэффициента A от величины сварочного тока

Определив значение указанных выше сил вводим их в выражение (1) и определяем массу капли, которую возможно перенести в сварочную ванную:

$$m = \frac{2R_1\sigma\pi + \frac{AI^2}{S} - \frac{\mu\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}}{g}, \text{ м}^3, \quad (2)$$

где μ , μ_0 – абсолютная и относительная магнитная проницаемость стали, Гн/м; R_2 – радиус столба дуги, м; R_1 – радиус электрода, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; A – коэффициент, зависящий от материала электрода и параметров приэлектродных областей, $A = 0,963 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{А}^2$, (данное значение определено экспериментально для сварки с управляемым каплепереносом электродного металла в смеси газов ($\text{Ar} + \text{CO}_2$)).

Разделив полученную зависимость (2) на плотность металла, определяется критический объем капли, способный перейти в сварочную ванну при сварке с короткими замыканиями:

$$V = \frac{2R_1\sigma\pi + \frac{AI^2}{S} - \frac{\mu\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}}{\rho g}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³.

Вследствие высокой сложности и многофакторности полученной физической зависимости (3) был использован метод многофакторного планирования эксперимента и с помощью него получена линейная мультипликативная регрессионная модель, описывающая зависимость изменения величины объема капли от входных параметров режима процесса сварки:

$$V = 0,015 \times I^{0,03} \times U_{\phi}^{8,33} \times V_{\text{св}}^{0,17} \times f^{0,1}, \text{ м}^3.$$

Проверка адекватности моделей выполнена при сварке серии образцов. В состав экспериментальной установки входили: автоматическая сварочная головка ГСП-2, укомплектованная механизмом импульсной подачи электродной проволоки [10], источник питания ВС-300Б, газосмеситель ВИТТ ВМ-2М.

Для исследования использовались пластины из стали Ст3 (толщиной 6 мм). Сварка проводилась проволокой Св-08ГСМТО (диаметром 1,2 мм). Режимы сварки изменялись в следующих пределах: сварочный ток – 180...260 А, напряжение сварки – 23...28 В, скорость сварки – 2,55...4,77 мм/с, частота переноса электродного металла – 62...100 Гц.

Для регистрации процесса каплепереноса электродного металла был спроектирован экспериментальный комплекс, представленный на рис. 2.

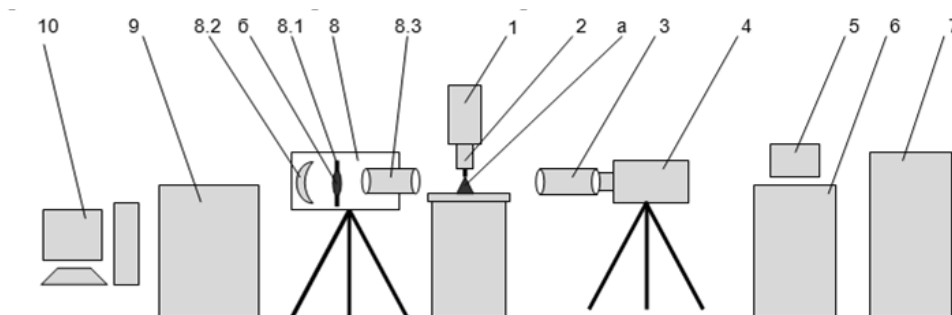


Рис. 2. Экспериментальный комплекс

Он включает в себя: 1) подвесная сварочная головка ГСП-2 для автоматической сварки плавящимся электродом в защитных газах; 2) сменное газоподводящее сопло (промышленное или двухструйное) для изменения условий истечения защитного газа; 3) система линз для фокусировки цифровой скоростной видеокамеры на объекте исследования; 4) цифровая скоростная видеокамера «Видео Спринт» с возможностью регистрации быстропротекающих процессов (частота 52000 кадров в секунду); 5) цифровой регистратор параметров сварки AWR-524 для регистрации энергетических параметров сварочного процесса; 6) инверторный источник питания постоянного тока ВС-300Б для питания сварочной дуги; 7) блок автоматического регулирования сварки БАРС-2В для автоматического регулирования параметров сварки (ток, напряжение, скорость сварки, расход газа и т. д.), возбуждения и гашения дуги; 8) прожектор для создания «теневого» эффекта (включает в себя: 8.1) угольные электроды для создания мощного источника света; 8.2) сферическое зеркало для отражения светового потока; 8.3) систему линз для фокусировки светового потока на сварочной дуге); 9) источник питания ТИР-315 для возбуждения и питания дуги между угольными электродами; 10) персональный компьютер со специальным программным обеспечением (ПО) для управления параметрами цифровой скоростной видеокамеры, обработки и хранения полученной видео информации.

Результаты расчетных и экспериментальных данных представлены на рис. 3.

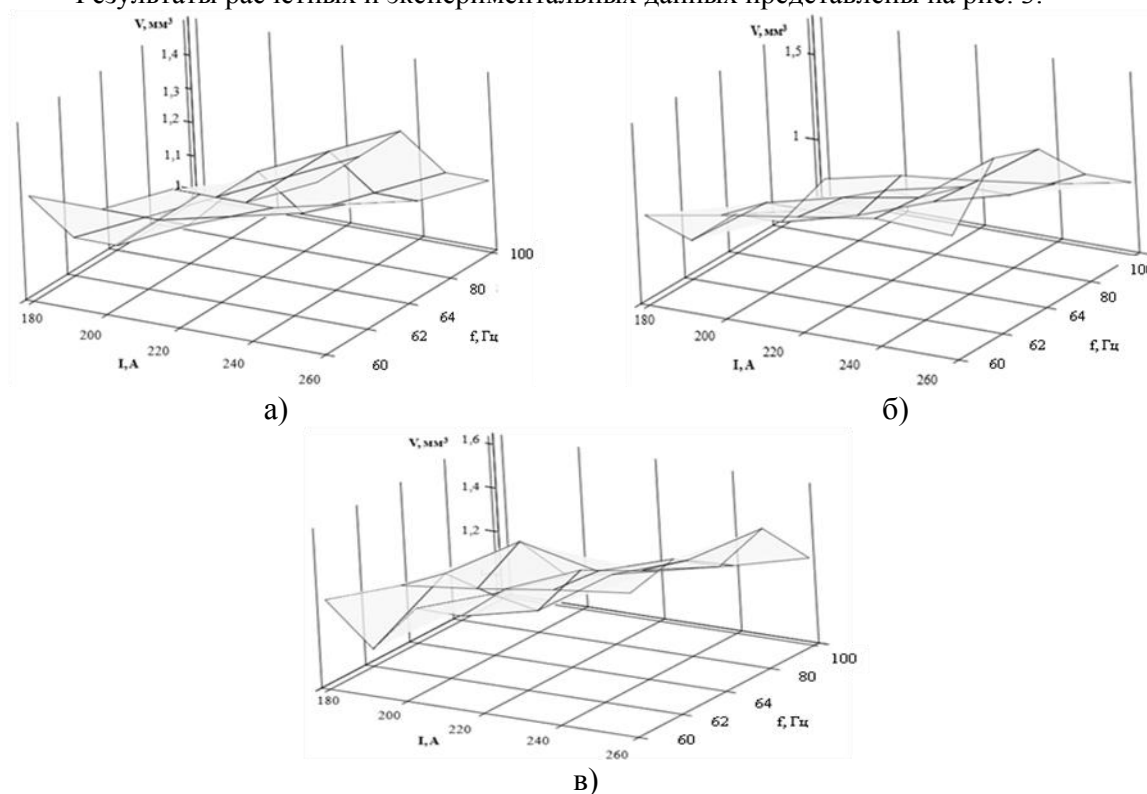


Рис. 3. Номограммы а) экспериментальных и б, в) расчетных значений изменения объема капли – V от силы сварочного тока – I и частоты переноса электродного металла – f

Сравнение экспериментальных и расчетных значений показало адекватность модели при 8 %-ом уровне значимости (по критерию Фишера).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федыко В.Т., Брунов О.Г., Соколов П.Д. Сварка с импульсной подачей сварочной проволоки как частный случай импульсно-дуговой сварки // Сварочное производство. – 2006. – № 7. – С. 6–8.
2. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А. Распределение температурных полей при сварке в смеси газов с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. – 2011. – № 1. – С. 35–36.
3. Языков Ю.Ф., Алексина И.В. Преимущества сварки в защитных газовых смесях // Сварочное производство. – 2008. – № 9. – С. 29–30.
4. Карасев М.В., Работинский Д.Н., Головин С.В., Ладыжанский А.П., Павленко Г.В., Розерт Р., Stein D., Зинченко А.В. Влияние режима механизированной сварки в смесях газов на служебные свойства наплавленного металла // Сварщик в России. – 2007. – № 6. – С. 35–40.
5. Павлов Н.В., Крюков А.В., Зернин Е.А. Сварка с импульсной подачей электродной проволоки в смеси газов // Сварочное производство. – 2010. – № 4. – С. 27–28.
6. Новожилов Н.М. Основы металлургии дуговой сварки в газах. М.: Машиностроение, 1979. – 231 с.
7. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: Т. 1: Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной ванны и формирования шва. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 585 с.
8. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М.: Машиностроение. – 1974. – 240 с.
9. Солодский С.А. Разработка автоматизированной системы для сварки в CO_2 с импульсной подачей проволоки и модуляцией сварочного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 2010. – 20 с.
10. Механизм импульсной подачи сварочной проволоки: пат. 2254969 Рос. Федерация. Заявл. 15.03.2004; опуб. 27.06. 05, Бюл. № 18. – 5 с.

Поступила 30.01.2012 г.