

**Влияние защитного газа на течение плазмы электрической дуги
и на каплю расплавленного металла в процессе сварки**

М. А. Кузнецов, С. А. Солодский, А. В. Крюков, Д. П. Ильященко, Е. В. Верхотурова

В работе рассмотрено изучение влияния защитного газа на течение плазмы электрической дуги и расплавленного металла. Представлено моделирование влияния защитного газа на течение плазмы электрической дуги расплавленного металла и разработана математическая модель, описывающая течение плазмообразующего газа внутри устройства, формирующего необходимые направления плазменных потоков для образования капли расплавленного электродного металла необходимых размеров. Установлено, что защитный газ и его давление влияют на скорость истечения газа, а также на формирование и размер капли электродного металла. При увеличении давления защитного газа изменяется время образования и отрыва капли: чем выше давление газа, тем капля имеет меньший объем. Аргон и углекислый газ по-разному оказывают влияние на течение плазмы электрической дуги, длину дуги, формирование и отрыв капли. Изменяя газовый состав, давление и скорость газа можно управлять процессом формирования капли. Определено, что с увеличением расхода газа с 10 до 30 л/мин происходит увеличение скорости истечения газа с 1,2 до 5,2 м/с и уменьшение объема капли расплавленного электродного металла. Объем капли может меняться в среднем на 65 % в зависимости от защитного газа.

Ключевые слова: моделирование, плазма дуги, защитный газ, капля расплавленного металла.

Ссылка: Кузнецов М. А., Солодский С. А., Крюков А. В., Ильященко Д. П., Верхотурова Е. В. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 11.

Reference: M. A. Kuznetsov, S. A. Solodsky, A. V. Kryukov, D. P. Ilyaschenko, and E. V. Verkhoturva, Applied Physics, No. 1, 11 (2020).

Введение

Математическое моделирование плодотворно развивается и в настоящее время рас-

сматривается как мощное средство теоретического исследования нелинейных проблем в различных областях науки. Оно применяется в ситуациях, когда постановка натурального эксперимента невозможна, очень сложна или очень дорога, например, при теплофизических процессах. Так, в работе [1] представлено подробное математическое моделирование процессов нагрева и плавления металлов.

Другим направлением, в котором сильно развито моделирование технических систем и технологических процессов, является сварочное производство. В работах [2, 3] рассмотрено моделирование влияния активного защитного газа на распределение тепла в зоне сварки. Авторами работы [4] представлено моделирование температурных полей и сопротивления деформации в цилиндрических заготовках при нагреве с горячего посада под прокатку. В области сварки рассмотрено ма-

Кузнецов Максим Александрович¹, старший преподаватель, к.т.н.

Солодский Сергей Анатольевич¹, доцент, к.т.н.

Крюков Артем Викторович¹, доцент, к.т.н.

Ильященко Дмитрий Павлович¹, доцент, к.т.н.

Верхотурова Елена Викторовна², н.с., к.х.н.

¹Юргинский технологический институт Томского политехнического университета.

Россия, 652055, г. Юрга, Кемеровская обл., ул. Ленинградская, 26.

Е-mail: mita8@rambler.ru

²Иркутский национальный исследовательский технический университет.

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2019 г.

© Кузнецов М. А., Солодский С. А., Крюков А. В., Ильященко Д. П., Верхотурова Е. В., 2020

тематическое моделирование и оптимизация параметров режима переплава вольфрам инертного газа с наномодификацией поверхностного слоя [5], а также математическая модель по характеристикам расплавленной ванны с V-образной разделкой при сварке плавящимся электродом в инертном защитном газе [6].

Проведено также моделирование влияния входных параметров на качество сварного шва при лазерной пропускающей сварке с использованием комбинированной поверхности отклика [7]. Компьютерное моделирование при разработке технологии сварки высокопрочных стальных листов представлено в работе [8].

Из приведенного литературного обзора [1–8] видно, что в настоящее время много работ посвящено моделированию различных технических систем при различных способах сварки. Однако имеется относительно малое количество работ по моделированию течения защитного газа в различных конфигурациях сварочных головок и плазмотронов и его влияния на каплю расплавленного металла. Заметим, что скорость защитного газа оказывает непосредственное влияние на образование и размер капли электродного металла, а каплеперенос электродного металла, в свою очередь, влияет на металлургические процессы, происходящие в жидкой сварочной ванне, а также на кристаллизационные процессы при формировании сварного шва и микроструктуры наплавленного металла.

Таким образом, перенос металла с электрода на изделие является одной из важнейших характеристик сварки плавящимся электродом в защитных газах, т. к. он определяет технологические характеристики и области применения процессов сварки. Поэтому проведение специальных теоретических и экспериментальных исследований по влиянию защитного газа на течение плазмы электрической дуги и расплавленного металла является важным и актуальным делом. Это и является основной целью данной работы.

Математическая постановка задачи

Моделирование влияния защитного газа на течение плазмы электрической дуги и каплю расплавленного электродного металла

производили в программе CONSOL Multiphysics, который предназначен для моделирования различных физических процессов, систем и их взаимосвязи. CONSOL – это гибкая платформа, позволяющая адаптировать модель к реальным условиям, добавляя или модифицируя те или иные физические процессы как описанные стандартными интерфейсами, так и на основе дифференциальных уравнений в частных производных, установленных пользователем. Все это дает возможность максимально точно приблизить полученную модель к реальности.

На первом этапе намеченных исследований было произведено моделирование формы устройства, формирующего необходимые направления плазменных потоков для образования капли расплавленного электродного металла необходимых размеров.

Изменение динамики защитного газа влечет за собой изменение процессов, протекающих в устройстве, формирующем необходимые направления плазменных потоков (образование и перенос капель, металлургические процессы в капле).

Для анализа работы устройства, формирующего необходимые направления плазменных потоков, была разработана математическая модель, описывающая течение плазмообразующего газа внутри данного устройства. Для построения компьютерной модели на программном комплексе CONSOL Multiphysics в качестве входных параметров используются параметры, представленные в таблице.

Таблица

Параметры входных данных для построения компьютерной модели

Вид газа	Расход газа, л/мин	Геометрические размеры выходного отверстия, мм
Углекислый газ	10–30	1–5
Аргон		

Расчетная модель, позволяющая определить влияние геометрических размеров устройства, формирующего необходимые направления плазменных потоков, на скорость истечения защитного газа u представлена на рис. 1.

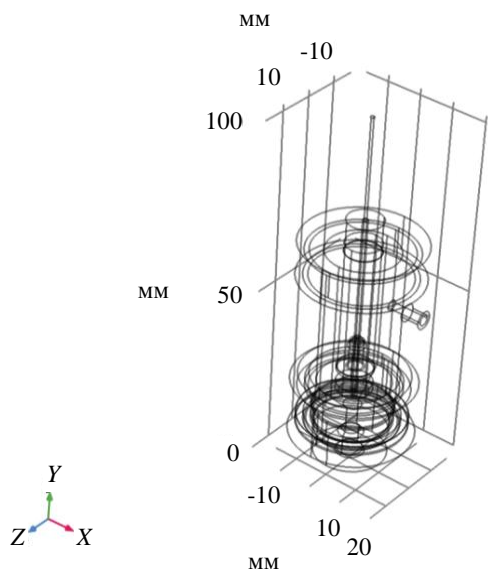


Рис. 1. Геометрия расчетной модели.

Для моделирования истечения газа использовались уравнения ламинарного течения несжимаемого вязкого газа в приближении постоянной температуры.

Для построения модели истечения газа были заданы следующие граничные условия: на входе $u = -U_0 n$, где U_0 задается на основе расхода газа (углекислый газ, аргон) и геометрических размеров выходного отверстия устройства; на выходе – условия нулевого давления и скорость истечения газа.

На рис. 2 представлена объемная модель, в которой происходит моделирование скорости истечения защитного газа в зависимости от расхода газа и геометрических размеров выходного отверстия устройства.

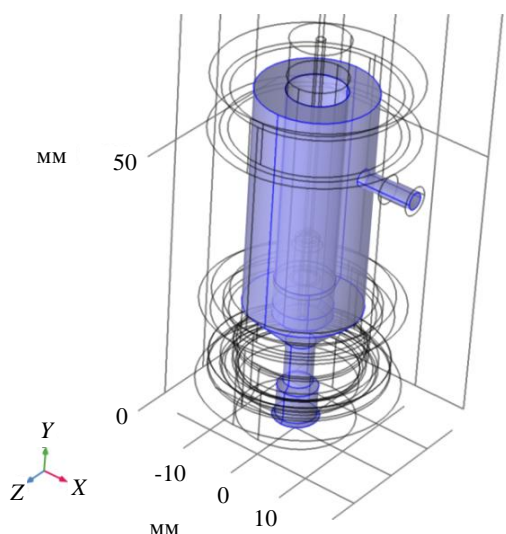


Рис. 2. Расчетная модель истечения защитного газа.

В рамках разработанной модели было исследовано влияние расхода газа (углекислый газ, аргон) в диапазоне от 10 до 30 л/мин на скорость истечения защитного газа.

По результатам моделирования истечения защитного газа оценивалось давление и вид газа на входе (inlet), а также давление газа и скорость газа к выходу (outlet). Результаты вычислений по расчетной модели представлены на рис. 3.

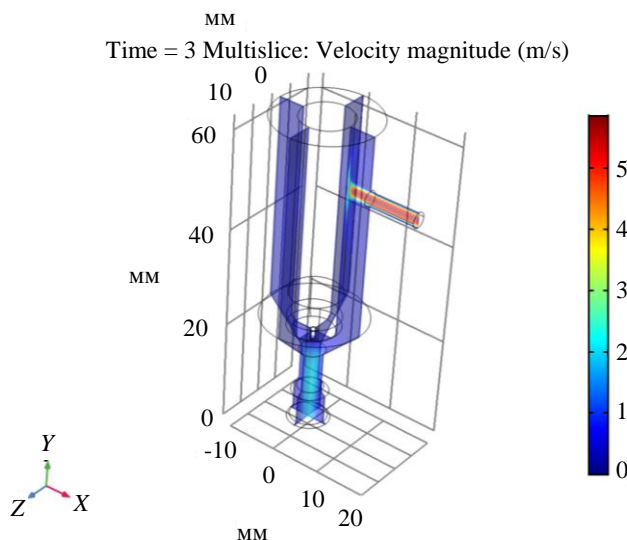


Рис. 3. Модель течения газа в устройстве.

Разработанная расчетная модель позволяет рассмотреть течение газа в устройстве, формирующем необходимые направления плазменных потоков, в зависимости от геометрических параметров выходного отверстия устройства и расхода газа. Это позволяет определить давление газа на входе устройства, распределение потока газа внутри данного устройства и скорость истечения газа, а также давление на выходе из данного устройства. Варьируя данными параметрами, можно определить влияния различного защитного газа (углекислый газ, аргон) на течение плазмы дуги, каплю электродного металла, а также влияние на расплавленный металл. Изменяя данные параметры, определяем оптимальное давление газа на входе и оптимальную скорость газа на выходе для получения капли расплавленного электродного металла необходимых размеров.

Экспериментальная часть

Изучение влияния защитного газа на течение плазмы электрической дуги и размер

капли расплавленного электродного металла проводили при помощи метода скоростной кино- и видеосъемки. Для исследования быстротекающих процессов при течении плазмы электрической дуги, а также влияния

газа на размер капли электродного расплавленного металла была разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 4.

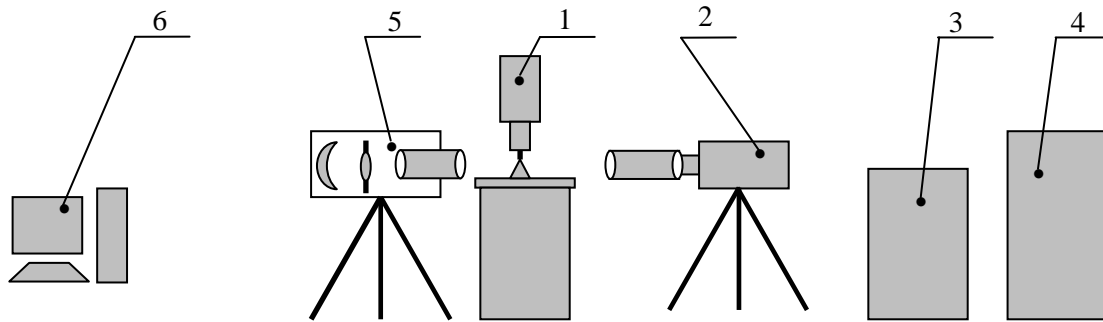


Рис. 4. Экспериментальная установка для регистрации процесса течения плазмы электрической дуги: 1 – сварочная горелка; 2 – скоростная цифровая камера; 3 – источник питания постоянного тока; 4 – установка автоматической регулировки процесса для автоматического регулирования параметров процесса (расход газа); 5 – прожектор (пересвет); 6 – компьютер со специализированным программным обеспечением.

При создании установки использована система автоматизированного проектирования в виде компьютерной программы «Компас 3D-V16» фирмы «АСКОН», которая максимально настроена под российские стандарты, а также предъявляет минимальные требования к компьютеру, причем быстро устанавливается и отличается высокой эффективностью и производительностью.

Запуск установки осуществляется в следующем порядке:

- запускаются компьютер, цифровая камера, установка автоматической регулировки процесса сварки, источники питания дуги;
- выставляются необходимые режимы сварки и параметры видеофиксации;
- возбуждается сварочная дуга;
- в процессе сварки производится регистрация;
- прекращается подача энергии на сварочную дугу;
- происходит обработка видеозображения в ЭВМ;
- после обработки видеозображения файл сохраняется, изменяются параметры режима, процесс повторяется.

Обработка результатов исследования:

- обработка видеозображения осуществляется при помощи специального про-

граммного обеспечения, причем производится «раскадровка» видеофайлов с целью установления поведения изучаемой системы в определенный момент времени;

- обработка данных цифрового регистратора параметров сварки осуществляется при помощи MS Office Excel.

Положение источника света дуги и видеокамеры должно быть на одной оси. Поэтому целесообразно применять неподвижную сварочную горелку, а сварку производить при поступательном движении деталей.

Экспериментальные исследования производились сваркой плавящимся электродом в среде защитных газов. В качестве сварочной проволоки использовали Св-08Г2с и Св-12Х18Н9Т диаметром 1,2 мм, а в качестве защитного газа – углекислый газ и аргон. Задавали расход газа от 10 до 30 л/мин с шагом 5 л/мин на входе, а на выходе измеряли скорость истечения газа специальным прибором.

Определение размера капли электродного металла производилось путем измерения ее объема. При обработке экспериментальных данных получали капли объемом от 10 до 20 мм³. Построение модели и непосредственно модель капли электродного металла представлены на рис. 5.

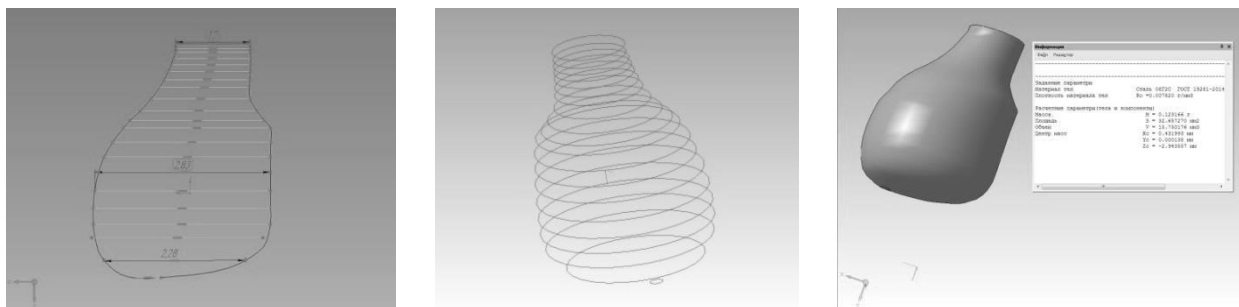


Рис. 5. Модель капли электродного металла.

Результаты и обсуждение

Анализ экспериментальных результатов показал, что при различном расходе газа, который варьировался от 10 до 30 л/мин с шагом 5 л/мин, скорость истечения защитного газа и размер капли электродного расплавленного металла изменяются. Изменение размеров капель электродного металла можно объяснить тем, что при различных защитных газах (углекислый газ, аргон) меняется и состав плазмы дуги, поскольку она горит не в однородном газе, а в смеси газов и паров различных металлов. При этом и химический состав сварочных проволок, применяющих в данных экспериментальных исследованиях, также различен.

На рис. 6 представлена зависимость среднего размера капли расплавленного электродного металла от скорости истечения газа.

Из данных, представленных на рис. 6, видно, что скорость истечения защитного газа оказывает непосредственное влияние на размер и форму капли расплавленного электродного металла. Когда скорость истечения защитного газа 1–3 м/с, капля расплавленного электродного металла уменьшается в диаметре и увеличивается в длине, приобретая форму эллипса. При увеличении скорости истечения защитного газа до 3,5 м/с и выше капля расплавленного электродного металла начинает уменьшаться, быстрее отрывается с торца электродной проволоки и принимает форму, близкую к каплевидной.

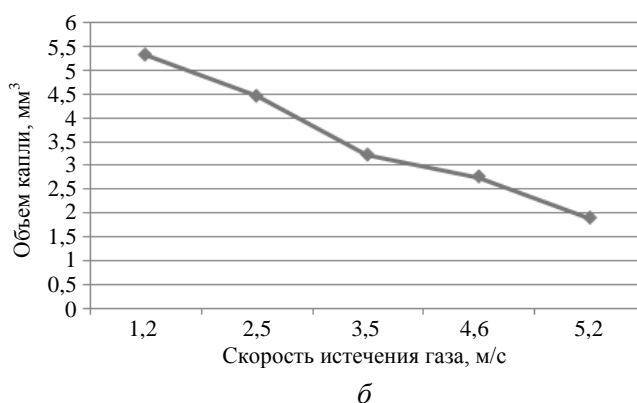
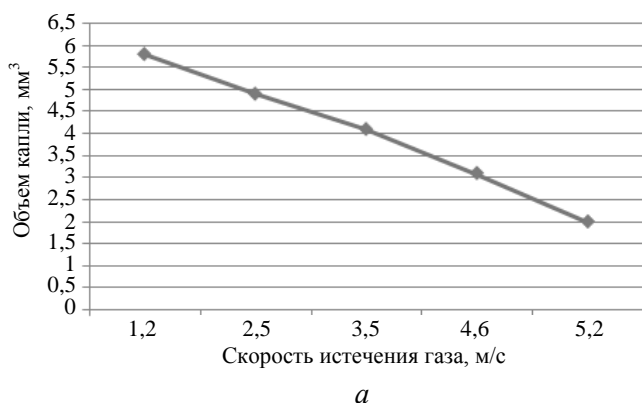


Рис. 6. Зависимость объема капли от скорости истечения газа: а – углекислый газ / СВ-08Г2С; б – аргон / Св-12Х18Н9Т

Заключение

Основные результаты работы можно представить в следующем виде.

1. Установлено, что защитный газ и его

давление влияют на скорость истечения газа, а также на формирование и размер капли электродного металла. При увеличении давления защитного газа изменяется время образования

и отрыва капли: чем выше давление газа, тем капля имеет меньший объем. Аргон и углекислый газ по-разному оказывают влияние на течение плазмы электрической дуги, длину дуги, на формирование и отрыв капли. Изменяя газовый состав, давление и скорость газа, можно управлять процессом формирования капли.

2. Определено, что с увеличением расхода газа с 10 до 30 л/мин происходит увеличение скорости истечения газа с 1,2 до 5,2 м/с и уменьшение объема капли расплавленного электродного металла. Объем капли в среднем в зависимости от защитного газа может меняться до 65 %.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 18-79-10035).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Mazhukin V. I., Shapranov A. V., Perezhigin V. E. / X International Seminar «Mathematical Models & Modeling in Laser-Plasma Processes & Advanced Science Technologies». 2012. Vol. XXIV. P. 47.
2. Chinakhov D. A., Vorobjev A. V., Tomchik A. A. // Materials Science Forum. 2013. Vol. 762. P. 717.
3. Chinakhov D. A., Vorobjev A. V., Gotovshchik Y. M. // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 682. P. 91.
4. Темлянцев М. В., Стариков В. С., Кондратьев В. Г. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2000. Т. 6. С. 51.
5. Tashev P., Koprinkova-Hristova P., Petrov T., Kirilov L., Lukarski Y. // J. Mater. Sci. Technol. 2016. Vol. 24 (4). P. 230.
6. Peng J., Yang L. // CIESC J. 2016. Vol. 67 (S1). P. 117.
7. Kumar N., Bandyopadhyay A. // Lasers in Engineering. 2017. Vol. 36. P. 225.
8. Bilenko G. A., Khaibrakhmanov R. U., Korobov Y. S. // Metallurgist. 2017. Vol. 61. P. 265.

PACS: 51,50.+V

Study of the effect of shielding gas on the plasma flow of an electric arc and on the drop of a molten metal

*M. A. Kuznetsov¹, S. A. Solodsky¹, A. V. Kryukov¹, D. P. Ilyaschenko¹,
and E. V. Verkhoturva²*

¹ Yurga Institute of Technology National Research Tomsk Polytechnic University
26 Leningrad st., Yurga, 652055, Russia
E-mail: mita8@rambler.ru

² Irkutsk National Research Technical University
83 Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russia

Received November 28, 2019

The study examines the effect of a protective gas on the plasma flow of an electric arc and molten metal. A simulation of the influence of a protective gas on the plasma flow of an electric arc of a molten metal is presented, and a mathematical model is developed that describes the flow of a plasma-forming gas inside a device that forms the necessary directions of plasma flows to form a drop of molten electrode metal of the required size. It has been established that shielding gas and its pressure affect the rate of gas outflow and the formation and size of a drop of electrode metal. With an increase in the pressure of the protective gas, the time of formation and separation of the droplet changes, the higher the gas pressure, the droplet has a smaller volume. Argon and carbon dioxide have different effects on the plasma flow of an electric arc, the length of the arc, the formation and separation of a drop. By changing the

gas composition, pressure and gas velocity, one can control the process of droplet formation. It was determined that with an increase in gas flow from 10 to 30 l / min, there is an increase in the gas flow rate from 1.2 to 5.2 m / s and a decrease in the volume of a drop of molten electrode metal. The drop volume on average can be changed on 65 % depending on the protective gas.

Keywords: modeling, arc plasma, shielding gas, drop, molten metal.

REFERENCES

1. V. I. Mazhukin, A. V. Shapranov, and V. E. Perezhigin, in *Proc. X International Seminar «Mathematical Models & Modeling in Laser-Plasma Processes & Advanced Science Technologies»*. **XXIV**, 47 (2012).
2. D. A. Chinakhov, A. V. Vorobjev, and A. A. Tomchik, *Materials Science Forum* **762**, 717 (2013).
3. D. A. Chinakhov, A. V. Vorobjev, and Y. M. Gotovshchik, *Applied Mechanics and Materials* **682**, 91 (2014).
4. M. V. Temliblin, V. S. Starikov, and V. G. Kondratiev, *News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy* **6**, 51 (2000).
5. P. Tashev, P. Koprinkova-Hristova, T. Petrov, L. Kirilov, and Y. Lukarski, *J. Mater. Sci. Technol.* **24** (4), 230 (2016).
6. J. Peng and L. Yang, *CIESC J.* **67** (S1), 117 (2016).
7. N. Kumar and A. Bandyopadhyay, *Lasers in Engineering* **36**, 225 (2017).
8. G. A. Bilenko, R. U. Khaibrakhmanov, and Y. S. Korobov, *Metallurgist* **61**, 265 (2017).