УДК 621.791.763.2

А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. П. Долячко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАЩИТНОЙ АТМОСФЕРЕ ДУГИ ПРИ СВАРКЕ В СМЕСИ КОАКСИАЛЬНО ПОДАВАЕМЫХ ГАЗОВ

UDC 621.791.763.2

A. O. Koroteyev, V. P. Kulikov, V. P. Dolyachko

MODELING OF GAS-DYNAMIC PROCESSES IN PROTECTIVE ATMOSPHERE AROUND THE ARC DURING WELDING IN THE MIXTURE OF COAXIALLY SUPPLIED GASES

Аннотация

На основании математического моделирования газодинамических процессов и экспериментальных исследований установлен физический механизм формирования защитной атмосферы при сварке с двухструйной коаксиальной подачей газов в зону горения дуги. Исследованы закономерности изменения концентрации углекислого газа в различных областях газовой защиты.

Ключевые слова:

моделирование газодинамических процессов при сварке, двухструйная газовая защита, коаксиальная подача газов в зону сварки, газовые смеси.

Abstract

Based on the mathematical modeling of gas-dynamic processes and experimental studies, a physical mechanism was established for the formation of protective atmosphere during welding with a two-jet coaxial supply of gases to the arc zone. The changes in the concentration of carbon dioxide in different areas of gas shield were studied.

Key words:

simulation of gas- dynamic processes during welding, two-jet protective gas shield, coaxial gas supply to the welding zone, gas mixtures.

Традиционно для защиты зоны горения дуги от воздуха при сварке используется струйная газовая защита, при которой расплавленный металл сварочной ванны защищается однородной струёй газа, истекающей из сопла сварочной горелки.

В предлагаемой авторами технологии сварки защита осуществляется потоками двух газов, коаксиально истекающими из сопла сварочной горелки и выполняющими различные функции [1, 2]. При таком способе углекислый газ поступает в зону сварки по внешнему кольцевому каналу и выполняет защитную функцию, аргон подаётся по центральному каналу и его удельный расход определяет состав защитной атмосферы (рис. 1).

Особенности защиты сварочной ванны такими потоками почти не изучены. В литературе отсутствуют сведения о параметрах газовых потоков, рекомендуемых расходах газов, конструкциях и размерах горелок и другие сведения, позволяющие обеспечить оптимальное качество газовой защиты.

Исследования процессов формирования защитной газовой атмосферы при сварке, а также газодинамического взаимодействия компонентов защитных газовых смесей вызывают существен-

© Коротеев А. О., Куликов В. П., Долячко В. П., 2017

ные затруднения. Основные причины этому – высокая температура в области горения дуги, «прозрачность» защитных газов и ряд других факторов. Наиболее информативным в этом случае являются методы компьютерного моделирования газодинамических процессов.

Авторами было проведено численное моделирование процесса истечения коаксиальных потоков двух газов в среде SOLIDWORKS Flow Simulation. Целью данного моделирования являлось определение оптимальных значений основных параметров газовой защиты: расход аргона, расход углекислого газа, расстояние от сопла до поверхности изделия. От расхода газа зависит скорость газового потока. В свою очередь, от соотношения скоростей потоков зависят взаимная инжекция газов и степень их смешивания.

Расход углекислого газа при моделировании выбирали с учетом надежной газовой защиты области горения дуги от воздуха по разработанной авторами номограмме (рис. 2) [3].

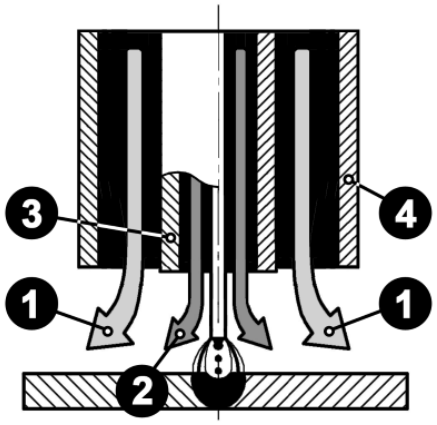


Рис. 1. Принципиальная схема двухструйной коаксиальной подачи защитных газов в зону сварки: 1 – кольцевой поток углекислого газа; 2 – центральный струйный поток аргона; 3 – внутренний трубчатый канал сопла горелки; 4 – внешний кольцевой канал сопла горелки

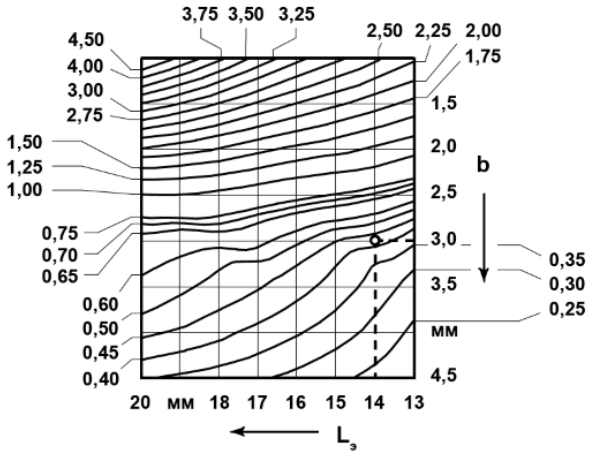


Рис. 2. Номограмма для определения минимально допустимой скорости кольцевого потока газа V_{min} на выходе из сопла сварочной горелки, обеспечивающей надежную газовую защиту области горения дуги

Математическое моделирование включает в себя следующие этапы.

1. Создание геометрии в SOLIDWORKS. На данном этапе формируется и дискретизируется геометрия модели, формулируются необходимые физические условия.

2. Создание и настройка расчетной области в Flow Simulation. На данном этапе формулируются необходимые физические условия, задаются начальные и граничные условия дифференциальных уравнений.

3. Создание расчетной элементной сетки.

4. Расчет. На данном этапе численно решаются основные уравнения с точки зрения базовых физических параметров (скорость, давление, плотность, температура, энтальпия и т. д.) с последующей записью результатов решения в память.

5. Визуализация и анализ полученного результата. Результаты решения отображаются в виде графиков, таблиц, а также контурных или вектор-

ных схем, привязанных к исходной геометрии.

6. Оценка точности и адекватности предлагаемой модели реальному физическому процессу.

Расчетная модель представляет собой сопло сварочной горелки с коаксиально истекающими из неё потоками двух газов. Внешний вид модели представлен на рис. 3. Площадки 1, 2 служат для генерации потоков аргона и углекислого газа с заданным объёмным расходом. Конический элемент 5, расположенный между торцом сварочной проволоки и поверхностью пластины 7, с температурой, близкой к температуре дуги, необходим для моделирования температурного воздействия сварочной дуги. В модели также учтены физические свойства материалов, из которых изготовлены элементы сопла. С целью сокращения времени расчета и облегчения анализа результатов использовалась расчетная область, ограниченная соплом сварочной горелки, поверхностью свариваемой пластины, осью сопла и границей модели 3. В этой области используется плоская система декартовых координат 6 с началом в точке О.

Для расчета используется метод конечных объёмов. В его основе лежит численный метод интегрирования систем дифференциальных уравнений в частных производных. Сущность метода заключается в дискретизации уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. При этом расчетная область разбивается на большое количество непересекающихся элементарных объемов таким образом, чтобы каждый объем содержал только одну расчетную узловую точку (рис. 4).

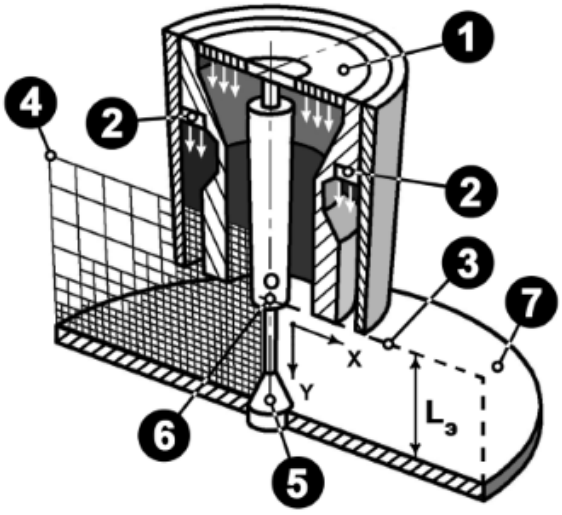


Рис. 3. Расчетная модель: 1 – зона генерации потока аргона; 2 – зона генерации потока углекислого газа; 3 – область построения графиков; 4 – расчетная сетка; 5 – зона генерации температуры; 6 – начало координат (исходная точка); 7 – поверхность, имитирующая свариваемую деталь

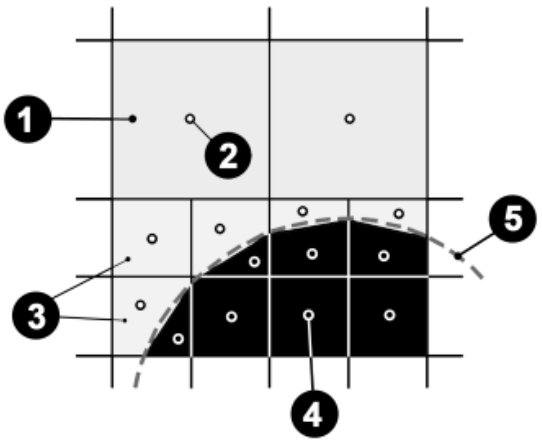


Рис. 4. Разбиение ячеек начальной сетки границей геометрии на дочерние многогранные ячейки: 1 – ячейки исходной сетки; 2 – центры для расчетов контрольных объемов текучей среды (газа); 3 – дискретизированные ячейки вблизи твердого тела; 4 – центры для расчетов контрольных объемов твердого тела; 5 – реальная форма границы между твердым телом и текучей средой

Совокупность элементарных объемов представляет собой расчетную сетку. Ячейки сетки могут иметь различную форму. Вычислительный подход в Flow Simulation основан на использовании прямоугольной сетки, адаптированной вблизи границ геометрии. Ячейки сетки представляют собой

прямоугольные параллелепипеды с гранями, перпендикулярными осям декартовой системы координат. Приграничные ячейки имеют более сложную форму. Они формируются в результате рассечения ячейки начальной сетки границами геометрии (см. рис. 4).

Интегрирование дифференциальных уравнений производится по каждому элементарному объему. Интегралы вычисляются с использованием интерполяционных формул, при помощи которых определяют значения искомых переменных между расчетными точками. В результате получают дискретный аналог исходных уравнений в узловых точках, который отражает закон сохранения изучаемых переменных в каждом конечном объеме.

Движение в газе моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии. Для декартовой системы координат, вращающейся с угловой скоростью вокруг оси, проходящей через начало координат, данные уравнения могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0; \\ \dfrac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \dfrac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) + \dfrac{\partial \rho}{\partial x_i} = \dfrac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i; \\ \dfrac{\partial \rho H}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \dfrac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \dfrac{\partial \rho}{\partial t} - \tau_{ij}^R \dfrac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho\varepsilon + S_i u_i + Q_H; \\ H = h + \dfrac{u^2}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

где u – скорость газа; ρ – плотность газа; S_i – внешние массовые силы, действующие на единичную массу среды; h – энтальпия; Q_H – тепло, выделяемое источником в единичном объеме; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_i – диффузионный тепловой поток.

Уравнение состояния для газовой среды

$$p = \rho(P, R, y), \quad (2)$$

где y – вектор концентраций компонентов потока, $y = (y_1, y_2, ..., y_N)$.

Для идеальных газов используется уравнение состояния идеального газа

$$p = \frac{P}{RT}, \quad (3)$$

где R – газовая постоянная моделируемого газа.

Диффузионный тепловой поток

$$q_i = \left(\frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1,\ 2,\ 3, \quad (4)$$

где P_r – число Прандтля; σ_c – константа, $\sigma_c = 0,9$.

Тензор вязких сдвиговых напряжений определяется следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right), \quad (5)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, $\mu = \mu_l + \mu_d$; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости; δ_{ij} – дельта-функция Кронекера; k – кинетическая энергия турбулентности.

По результатам численного моделирования были построены номограммы, позволяющие определить объемную

долю углекислого газа в зоне горения дуги в зависимости от расхода аргона и расстояния от сопла горелки до поверхности изделия (рис. 5).

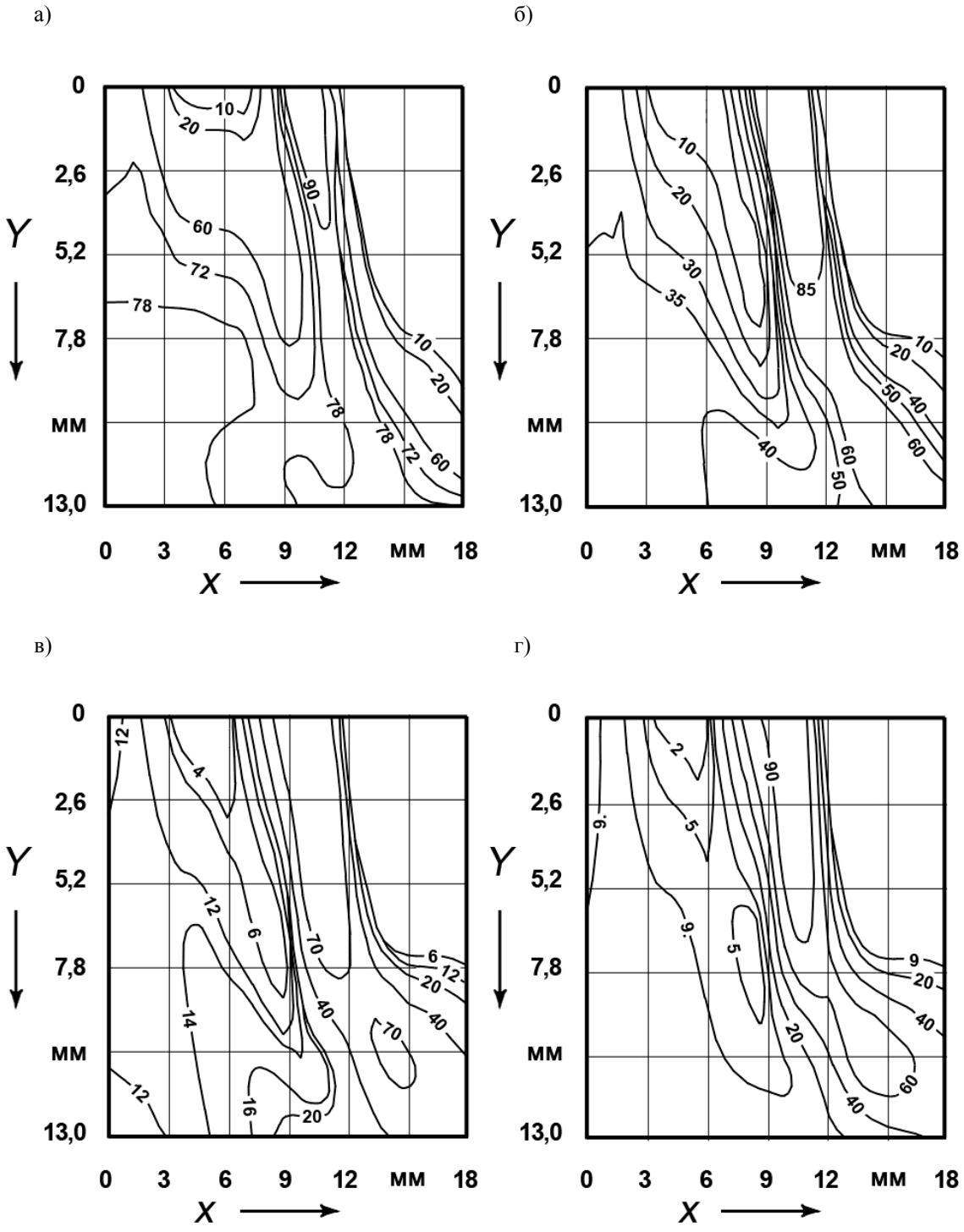


Рис. 5. Распределение массовой доли углекислого газа (CO_2) в образующейся в зоне сварки защитной газовой атмосфере: а – Q(Ar) = 1 л/мин; б – Q(Ar) = 2,125 л/мин; в – Q(Ar) = 3,25 л/мин; г – Q(Ar) = 4,5 л/мин (расстояние от сопла горелки до поверхности пластины $L_э$ = 13 мм; расход углекислого газа $Q(CO_2)$ = 8,3 л/мин)

Полученные данные свидетельствуют о смешивании газов в области сварки. Причем с увеличением расхода аргона количество углекислого газа, подмешиваемого из кольцевого потока в центральную область и участвующего в формировании защитной газовой атмосферы в непосредственной близости от сварочной дуги, снижается.

Следует также отметить, что окислительный потенциал защитной атмосферы, формируемой при коаксиальной двухструйной подаче газов, снижается по мере удаления от поверхности изделия. Это можно объяснить особенностью строения центральной струи аргона, характеризующейся потенциальным ядром, длина которого напрямую зависит от скорости истечения газа. При определенных условиях, когда величина ядра меньше расстояния от сопла до пластины, в области, расположенной вблизи изделия, происходит интенсивное подмешивание углекислого газа из кольцевого потока.

Анализ полученных данных позволил определить оптимальные расходы аргона с точки зрения получения в зоне сварки защитных газовых смесей требуемого состава.

Для удобства выбора расходов газов авторами была разработана номограмма. На рис. 6 приведен пример определения расходов газов для случая, когда расстояние от сопла до поверхности изделия составляет $L_э$ = 15 мм и необходимо получить в зоне горения дуги защитную газовую смесь 82 % Ar + 18 % CO_2.

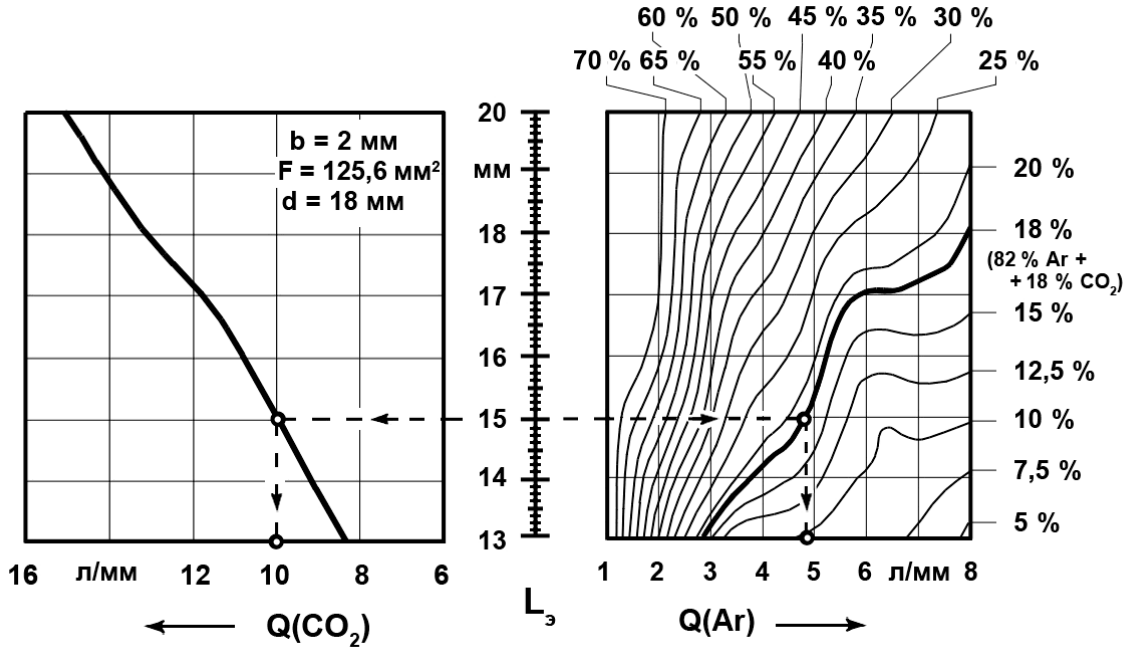


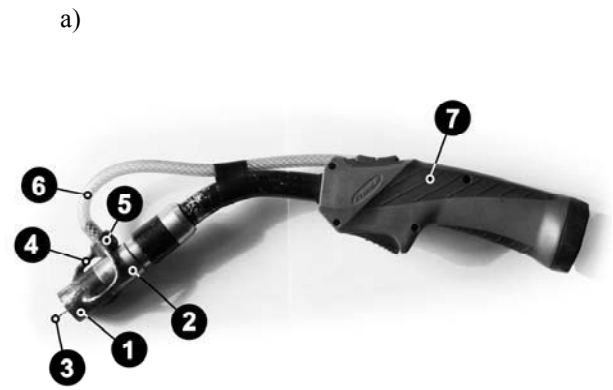
Рис. 6. Номограмма для определения расходов газов при двухструйной газовой защите зоны горения дуги

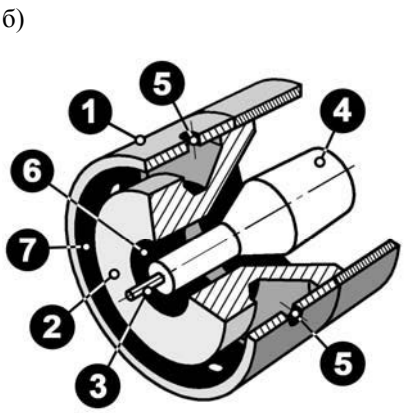
Сначала из точки на шкале значений расстояния от сопла до поверхности изделия (15 мм) проводятся горизонтальные линии в обе стороны до пересечений с соответствующими кривыми на графиках. В левой части номограммы расположена кривая для определения расхода углекислого газа, подаваемого по кольцевому каналу сопла. В правой части рисунка находится номограмма

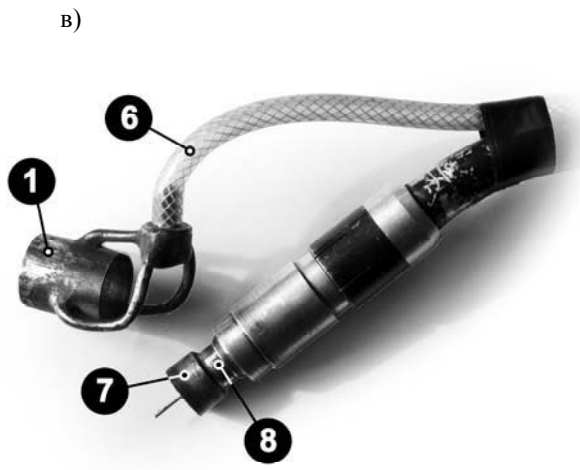
для определения расхода аргона в зависимости от необходимого состава защитной газовой смеси в зоне сварки. В данном случае рассматриваемый состав смеси выделен жирной линией (82 % Ar + 18 % CO_2). Из точек пересечения опускают вертикальные линии на горизонтальные оси, при этом получают необходимые расходы газов, которые составят Q(Ar) = 4,9 л/мин и Q(CO_2) = 10 л/мин.

Таким образом, в результате численного моделирования определены условия создания в зоне горения дуги защитной газовой смеси с заданным содержанием компонентов. В качестве параметров, определяющих состав защитной атмосферы, принимаются расход аргона, подаваемого по центральному каналу сопла, и расстояние от сопла сварочной горелки до поверхности пластины. Кольцевой поток углекислого газа при этом обеспечивает защиту зоны сварки от воздуха.

Для практической реализации двухструйной подачи защитных газов была разработана сварочная горелка (рис. 7 и 8) и схема подачи защитных газов (рис. 9).







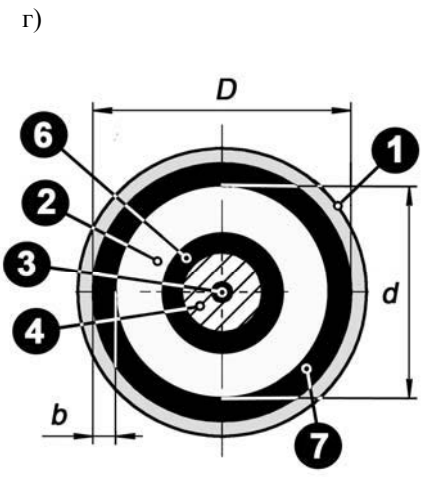


Рис. 7. Внешний вид сварочной горелки (а) и элементы сопла с коаксиальной двухструйной подачей защитных газов в зону сварки (б): 1 – внешняя съемная часть сопла; 2 – сопло сварочной горелки; 3 – электродная проволока; 4 – газоподводящие трубки; 5 – газораспределительный штуцер; 6 – шланги для подвода углекислого газа к кольцевому каналу сопла; 7 – сварочная горелка; 8 – полость для стабилизации потока газа

Рис. 8. Принципиальная схема (а) и геометрические параметры (б) сопла с двухструйной подачей компонентов газовой смеси в зону сварки: 1 – внешняя часть сопла; 2 – газоразделительный обтекатель; 3 – электродная проволока; 4 – токоподводящий наконечник; 5 – отверстия для подачи газа в кольцевой канал; 6 – центральный канал; 7 – кольцевой канал

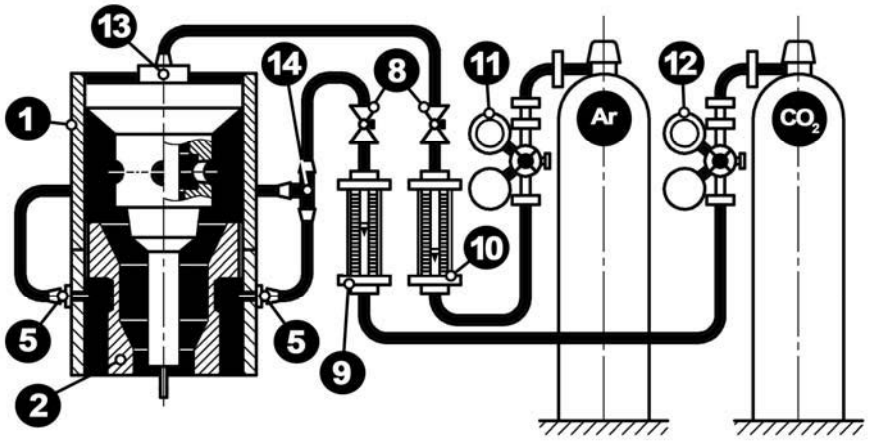


Рис. 9. Схема двухструйной независимой коаксиальной подачи защитных газов: 1 – внешняя часть сопла; 2 – газоразделительный обтекатель; 3 – электродная проволока; 4 – токоподводящий наконечник; 5 – отверстия для подачи газа в кольцевой канал; 6 – центральный канал; 7 – кольцевой канал; 8 – дросселирующие вентили для регулирования расхода газа; 9, 10 – ротаметр для контроля расхода газа; 11, 12 – газовые редукторы; 13 – подвод аргона; 14 – газораспределительный штуцер

Для оценки адекватности математического моделирования авторами предлагается косвенное сравнение химических составов наплавки, выполненной в готовой газовой смеси (полученной с помощью газового смесителя), и наплавки с использованием разработанной двухструйной подачи газов с расходами, обеспечивающими, согласно моделированию, аналогичный состав защитной атмосферы в зоне сварки.

Наплавка осуществлялась на сталь Ruukki Optim 700QL (S690QL EN 10025-6) в автоматическом режиме с целью обеспечения постоянства значений параметров режима. Фиксация горелки сварочного полуавтомата на тракторе сварочного автомата позволила существенно снизить колебания силы сварочного тока, обеспечить постоянный вылет электродной проволоки и угол наклона горелки по отношению к наплавляемой поверхности.

Для проведения экспериментов авторами использовалась проволока ESAB OK Aristorod 69, предназначенная для сварки низкоуглеродистых низколегированных высокопрочных сталей, легированная незначительным количеством хрома, никеля и молибдена. Применение такой проволоки позволило также оценить влияние состава защитной атмосферы на потерю легирующих элементов при переходе через дуговой промежуток.

Для создания смесей с традиционной защитой зоны сварки сплошным потоком газа использовали однопостовой газовый смеситель WITT BM-2M. Выбор расходов газов для наплавки в условиях двухструйной газовой защиты осуществлялся согласно номограмме, представленной на рис. 5. Внешний вид образцов до и после проведения анализа представлен на рис. 10. Для определения массовой доли химических элементов в металле наплавки на её поверхности фрезеровалась плоская площадка (рис. 10, б).

Измерение массовой доли химических элементов производилось на оптико-эмиссионном спектрометре Solaris GNR-SCP не менее чем в десяти точках на поверхности наплавленного металла.

Результаты анализа в виде графиков зависимости массовой доли углерода, кремния и марганца от объемной концентрации углекислого газа в защитной газовой атмосфере представлены на рис. 11.

Из графиков видно, что повышение содержания углекислого газа в за-

щитной атмосфере приводит к снижению количества рассматриваемых элементов (C, Si, Mn) в наплавленном металле, что связано с реакциями раскисления, интенсивно протекающими в сварочной ванне. В то же время массовая доля легирующих элементов (Cr, Ni, Mo) в наплавке почти не изменяет своего значения в диапазоне изменения состава защитной атмосферы дуги при проведении экспериментов, что объясняется меньшим сродством этих элементов к кислороду.

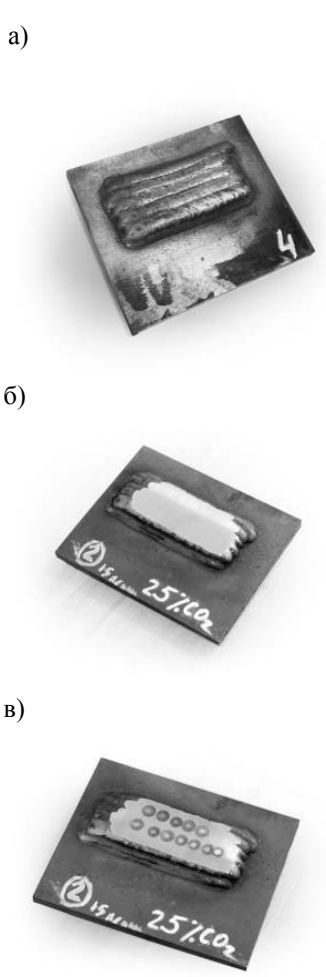


Рис. 10. Образцы для проведения спектрального оптико-эмиссионного анализа: а – внешний вид наплавки; б – образец с подготовленной поверхностью; в – внешний вид образца после проведения спектрального анализа

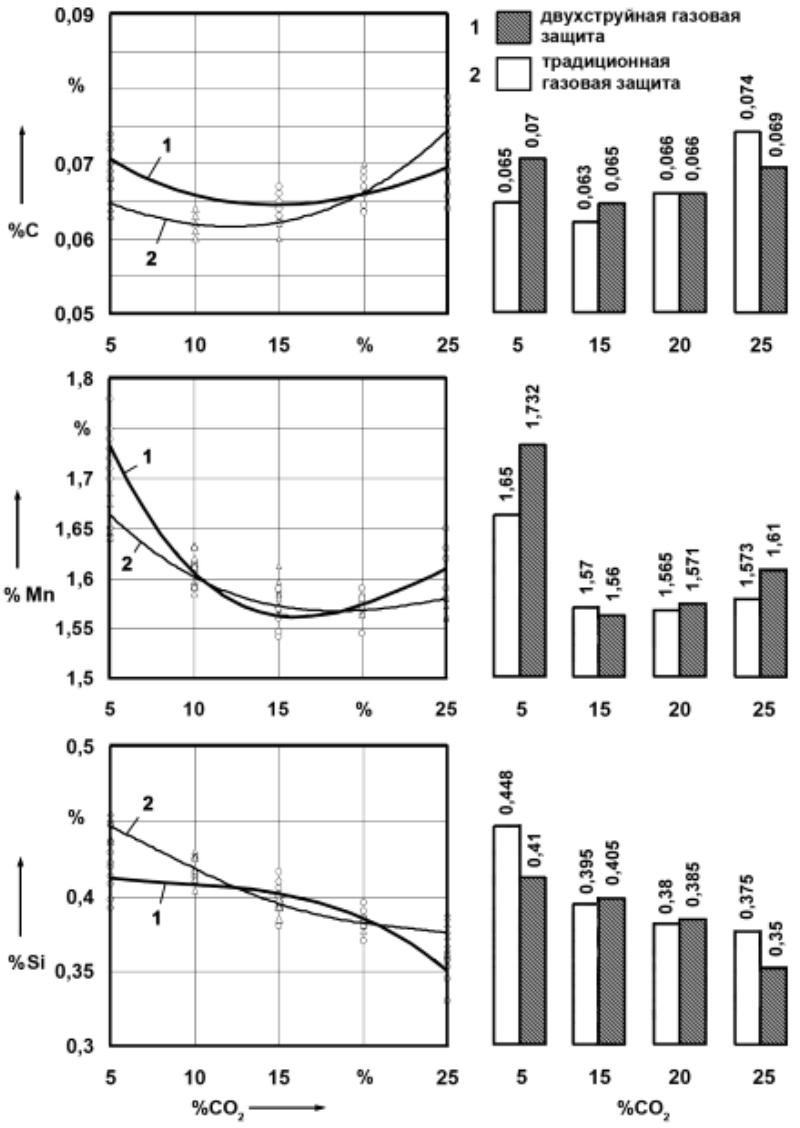


Рис. 11. Содержание C, Mn и Si в наплавленном металле при различных способах формирования защитной атмосферы дуги

Анализ полученных данных показал достаточную сходимость (см. рис. 9) значений в обоих вариантах реализации газовой защиты.

Наплавка с традиционной газовой защитой и с двухструйной подачей газов осуществлялась при одинаковых значениях параметров режима сварки. Сходимость результатов свидетельствует об аналогичных условиях с точки зрения состава атмосферы зоны горения дуги, что с некоторыми допущениями косвенно подтверждает результаты моделирования процесса смеши-

вания газов в зоне сварки.

Полученные отклонения можно объяснить погрешностью измерений химического состава наплавленного металла, а также тем, что при моделировании не учитывались некоторые факторы, способные повлиять на характер формирования защитной атмосферы. Наиболее важными из них являются термическая и фотоионизация компонентов защитной газовой атмосферы, наличие плазменных потоков вблизи столба дуги, а также некоторое перераспределение кислорода под действием магнитного поля.

Таким образом, разработанная авторами методика по выбору расходов газов при их двухструйной подаче в зону сварки позволяет с достаточной точностью получать защитные газовые смеси необходимого состава (в исследованном диапазоне) непосредственно в зоне горения дуги. При этом важным преимуществом по сравнению с традиционной газовой защитой является существенная экономия аргона при сохранении качества газовой защиты.

Выводы

1. Разработана конечно-элементная модель процесса газовой защиты сварочной ванны при коаксиальной схеме подачи в сварочную горелку двух газов, один из которых (обычно CO_2) подается в виде наружного кольцевого потока и выполняет функцию вытеснения воздуха, другой (обычно Ar) – в виде центрального струйного потока, который создает газовую атмосферу в зоне расплавленного металла. Математические расчеты показывают возможность получения при такой схеме надежной защиты зоны сварки при значительном снижении (с 8…10 до 3…4 л/мин) расхода дорогостоящего газа аргона. Адекватность модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

2. Раздельная подача газов двумя потоками позволяет реализовать механизм формирования требуемой защитной смеси непосредственно в зоне сварки, не насыщая аргоном периферийные области газовой защиты, а сосредоточив его в зоне расплавленного металла. При этом процентное соотношение Ar и CO_2 над сварочной ванной, а следовательно, степень её окисления и термодинамические характеристики дуги можно регулировать скоростью подачи аргона, от которой зависит турбулентное взаимодействие газов и степень их смешивания. Определены условия создания различных смесей в зоне сварки. Для получения стандартной смеси 82 % Ar + 18 % CO_2 в области сварочной ванны расход аргона должен быть 3…4 л/мин.

3. Установлено, что при использовании предлагаемой схемы подачи в зону сварки защитных газов распределение аргона в столбе дуги неравномерно. Максимальное его количество (до 90 %) наблюдается в верхней анодной части дуги в зоне сварочной проволоки. Это создает отличные от сварки по традиционной технологии условия образования и отрыва капли расплавленного металла, оказывает влияние на перенос в сварочную ванну и переход в шов химических элементов из проволоки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коротеев, А. О.** О потерях электродного металла при дуговой сварке в условиях комбинированной газовой защиты / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3 (44). – С. 25–34.

2. **Коротеев, А. О.** О потерях электродного металла при дуговой сварке с комбинированной подачей защитного газа / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. В. Липков // Материалы, оборудование и ре-

сурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 187–188.

3. **Коротеев, А. О.** Дуговая сварка в условиях кольцевого потока защитного газа : в 2 ч. / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – Ч. 1. – С. 176–177.

Статья сдана в редакцию 20 апреля 2017 года

Артур Олегович Коротеев, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-029-845-49-70.
Валерий Петрович Куликов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-022-227-37-43.
Валерий Петрович Долячко, инженер, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-022-227-37-43.

Artur Olegovich Koroteyev, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: 8-029-845-49-70.
Valery Petrovich Kulikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-022-227-37-43.
Valery Petrovich Dolyachko, engineer, Belarusian-Russian University. Phone: 8-022-227-37-43.