

М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОМ НАПЫЛЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Разработана математическая модель тепловых, газодинамических, электромагнитных и диффузионных процессов в турбулентном потоке дуговой плазмы, генерируемой плазматроном с внешней проволокой-анодом. Данная модель была использована для численного анализа распределенных и интегральных характеристик плазменного потока в условиях плазменно-дугового напыления.

Ключевые слова: плазменно-дуговое напыление, плазматрон, проволока, плазменный поток, математическая модель

Плазменно-дуговое проволочное напыление является перспективным процессом газотермического нанесения покрытий, позволяющим получать высококачественные покрытия различного технологического назначения. От родственных процессов плазменного напыления и электродуговой металлизации оно отличается наличием внешнего участка дуги, горящей между катодом плазматрона и плавящейся проволокой-анодом, подаваемой за срезом сопла (рис. 1). При этом внешний участок дуги может обдуваться интенсивным спутным потоком газа (аргона или воздуха). В результате формируется обжатый высокотемпературный высокоскоростной плазменный поток, обеспечивается минимальное насыщение напыляемого материала кислородом и азотом воздуха, а возникающие при диспергировании расплавленного металла проволоки частицы получают лучшие условия для ускорения и нагрева. Дальнейшее развитие техники и технологии плазменно-дугового напыления невозможно без

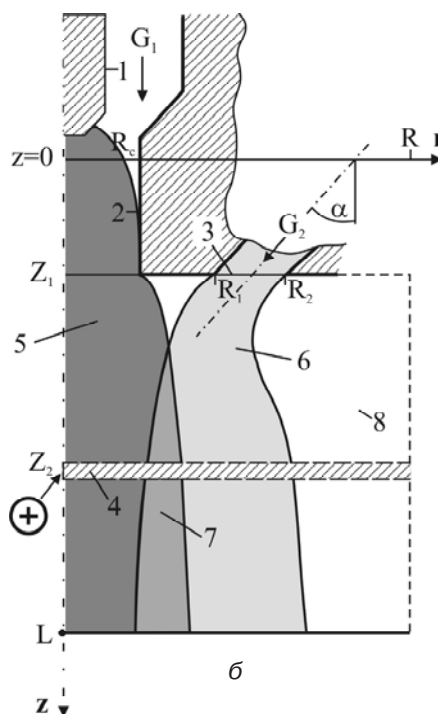
расширения теоретических представлений о протекающих в такой системе процессах. В частности, создание соответствующих математических моделей позволит прогнозировать характеристики формируемых плазменных и двухфазных потоков и, следовательно, более обоснованно подходить к дальнейшему совершенствованию конструкции плазматронов с токоведущей проволокой и выбору рациональных технологических режимов.

В настоящей работе описана унифицированная математическая модель, которая может быть использована для описания тепловых, газодинамических, электрических и диффузионных процессов в электродуговых плазматронах прямого и косвенного действия (включая истечение плазмы во внешнюю среду) и в полной мере учитывает особенности процесса плазменно-дугового проволочного напыления.

Моделирование процесса формирования плазменного потока проводилось при следующих условиях (рис. 1, б). Предполагается, что дуга по-



а



б

Рис. 1. Внешний вид (а) и расчетная схема (б) плазматрона с внешней проволокой-анодом: 1 – катод; 2 – сопло; 3 – канал подачи обдувающего газа; 4 – проволока-анод; 5 – дуговая плазма; 6 – обдувающий газ; 7 – область смешения; 8 – внешняя газовая среда

стоянного тока I горит между тугоплавким водоохлаждаемым катодом и токоведущей проволокой, находящейся за срезом сопла плазмотрона на расстоянии Z_2 от начального сечения ($z = 0$), расположенного вблизи рабочего конца катода. Далее (при $z > Z_2$) имеет место инерционное движение бестоковой плазмы. Подающийся в сопло плазмообразующий газ с объемным расходом G_1 нагревается электрической дугой и истекает из электродного сопла длиной Z_1 и радиусом во внешнюю среду. Открытый участок разряда может обдуваться потоком газа с объемным расходом G_2 . Этот газ подается через кольцевой канал $R_1 \leq r \leq R_2$ под углом α к оси плазмотрона. Давление во внешней среде полагается атмосферным.

Полное описание предлагаемой модели с граничными условиями и замыкающими соотношениями приведено в работах [1-3]. Основу модели составляет система магнитогидродинамических (МГД) уравнений в приближении турбулентного пограничного слоя. Для описания турбулентности использовалась $k-\epsilon$ модель. Учет смешения плазмообразующего газа с внешней газовой средой осуществлялся на основе уравнения диффузии, а описание электромагнитных характеристик дуги проводилось с использованием уравнения для напряженности магнитного поля. На основе предложенной математической модели было создано соответствующее программное обеспечение, которое было использовано для расчетов характеристик дуговой плазмы в условиях плазменно-дугового напыления.

При проведении всех расчетов полагалось, что радиус и длина канала сопла плазмотрона равны (соответственно 1,5 и 3,0 мм); проволока-анод расположена при $z = Z_2 = 9,3$ мм; кольцевой канал для подачи газа, обдувающего поток, в выходном сечении ($z = Z_1 = 3$ мм) имеет внутренний радиус 4,78 мм, внешний – 7,22 мм и наклонен под углом $37,5^\circ$ к оси симметрии плазмотрона (рис. 1, б); температура холодных стенок каналов и окружающего газа 300 К. Режим работы плазмотрона соответствовал току дуги 200 А, расходу плазмообразующего газа $G_1 = 1$ м³/ч, расходу обдувающего газа $G_2 = 20$ (0) м³/ч.

Результаты расчетов для обдуваемого потока и соответствующей затопленной струи представлены на рис. 2. Здесь кривые 1, 2 соответствуют распределению параметров плазменного потока при выходе из плазмформирующего канала, а также в область «проволока-анод». Параметры дугового потока на таком достаточно небольшом расстоянии от среза сопла плазмотрона (~ 6-7 мм), практически не зависят от условий обдува и в обоих случаях (с обдувом и без него) остаются практически идентичными. В дальнейшем поток газа, обдувающего плазменную струю, препятствует ее расширению и на расстоянии порядка 50 мм от среза сопла плазмотрона ширина ядра плазменного потока, не обдуваемого защитным газом, превышает ширину обдуваемой струи приблизительно в 2 раза (кривые 4 и 3 на

рис. 2). Расчеты [1] показали, что существенное снижение скорости и температуры затопленной струи начинается с расстояния 35-40 мм от среза сопла плазмотрона. Уже на расстоянии 150 мм такая струя практически полностью распадается вследствие ее неограниченного расширения, в то время как даже на расстоянии 250 мм от среза сопла обдуваемая струя имеет скорость ~ 400 м/с и температуру порядка 5500 К.

Результаты численного моделирования характеристик потока аргоновой плазмы при истечении в воздушную среду и в среду аргона как при наличии обдувающего газового потока, так и для соответствующей затопленной струи показаны на рис. 3-5. В частности, на рис. 3 представлены продольные распределения аксиальной компоненты скорости и температуры плазмы при истечении в каждую из рассматриваемых сред. Так, влияние состава окружающего газа не оказывает существенного влияния на скорость потока. На начальных этапах внешнего течения температура также изменяется незначительно. Однако, в дальнейшем, на расстоянии порядка 25-30 мм от среза сопла, струя, обдуваемая воздухом, в результате смешения

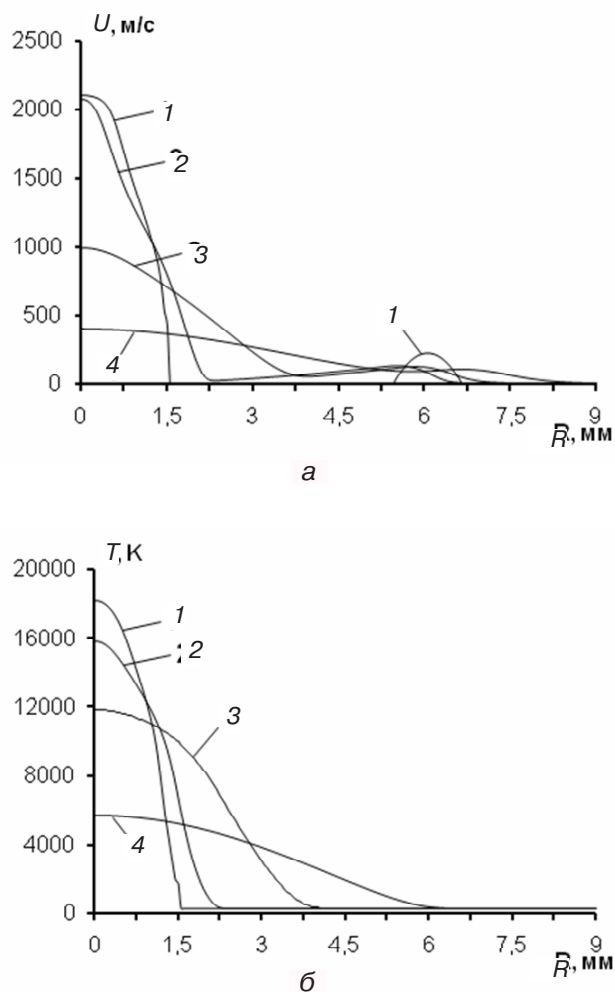


Рис. 2. Радиальные распределения скорости (а) и температуры (б) плазмы при $I = 200$ А, $G_1 = 1$ м³/ч, $G_2 = 20$ м³/ч (1-3) и $G_2 = 0$ м³/ч (1, 2, 4) в областях: 1 – срез сопла металллизатора ($z = 3$ мм), 2 – область проволоки анода ($z = 9,3$ мм), 3, 4)

начинает охлаждаться интенсивней струи, обдуваемой аргоном.

Влияние состава внешней среды на тепловые характеристики течения дуговой плазмы особенно заметно для затопленной струи, истекающей в воздушное пространство. В этом случае смешение аргоновой плазмы с воздухом интенсифицируется, теплопроводность смеси, ввиду существенно большей величины χ для воздуха увеличивается, что приводит к более быстрому снижению температуры струи (рис. 3).

Поля концентрации аргона и температуры плазмы для обдуваемой ламинарным потоком и затопленной турбулентной плазменной струи, соответствующие истечению в воздушную среду представлены на рис. 4, 5. Как следует из представленных на этих рисунках результатов моделирования, при обдувке струи спутным потоком воздуха наблюдается существенная перестройка течения по сравнению с затопленной струей. Струя, истекающая в покоящуюся среду, втягивает в столб дуги окружающий газ с периферии, достаточно быстро расширяется, при этом интенсивно смешиваясь с окружающей средой. Немалую роль в этом играют процессы турбулентного массопереноса и диффузии. Обдув же плазменной струи

кольцевым потоком холодного газа препятствует расширению плазменной струи, при этом турбулентность частично гасится окружающим струю кольцевым потоком. В результате формируется высокотемпературный след дуги, концентрация аргона в котором остается достаточно высокой. Так, например, на расстоянии порядка 50 мм от среза сопла содержание аргона в плазменной смеси превышает 80 %, а на расстоянии 100 мм – 60 % (рис. 5). Поперечное сечение обдуваемой струи с расстоянием увеличивается незначительно, а ядро струи имеет достаточно равномерное распределение характеристик.

Таким образом, обдув турбулентной плазменной струи спутным ламинарным потоком хо-

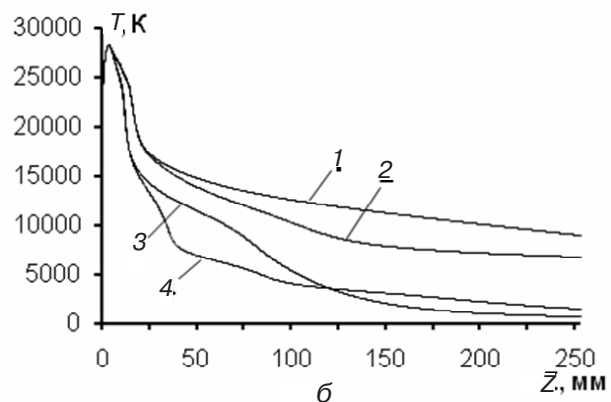
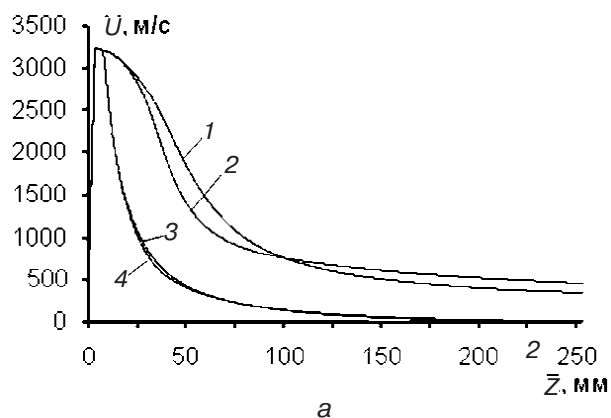


Рис. 3. Продольные изменения скорости (а) и температуры (б) плазмы в плазменной струе, истекающей в аргоновую (1, 3) и воздушную (2, 4) среду при различных режимах работы плазмотрона ($\text{м}^3/\text{ч}$): 1 – $G_2 = 20$ (Ar); 2 – $G_2 = 20$ (воздух); 3, 4 – $G_2 = 0$; $I = 200 \text{ A}$, $G_1 = 1$

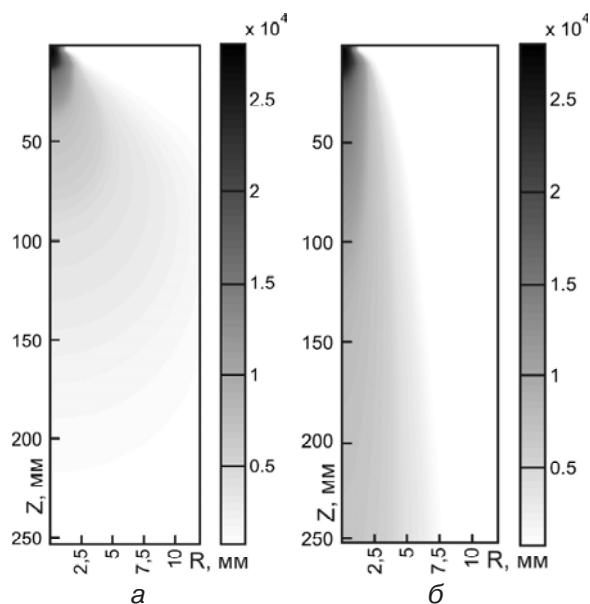


Рис. 4. Распределение температуры аргоновой плазменной струи, истекающей в воздушное пространство: а – без обдува, б – с обдувом

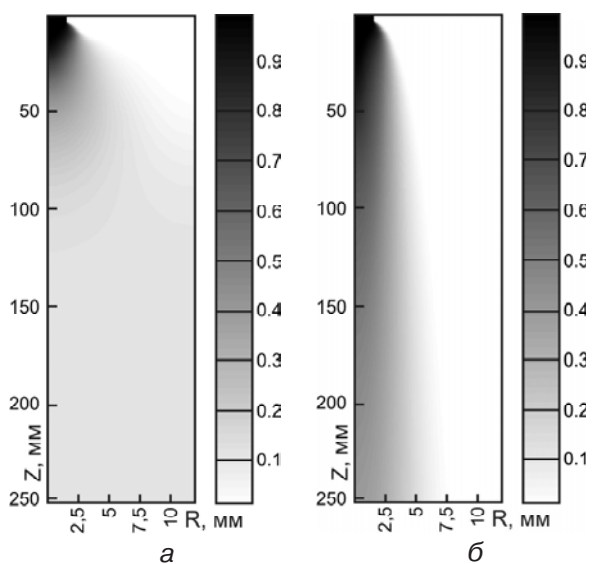


Рис. 5. Распределение относительной концентрации аргона в плазменной струе, истекающей в воздушное пространство: а – без обдува, б – с обдувом

лодного газа препятствует расширению струи и существенно увеличивает ее протяженность, по сравнению с затопленной струей. Затопленная струя аргоновой плазмы, истекающая в воздуш-

ную среду, достаточно быстро перемешивается с воздухом, охлаждаясь при этом интенсивнее, чем обдуваемая струя.



ЛИТЕРАТУРА

1. Математическая модель дуговой плазмы, генерируемой плазмотроном с проволокой-анодом / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик и др. // Автоматическая сварка. – 2007. – № 12. – С. 14-20.
2. Влияние рода газа спутного потока на характеристики дуговой плазмы, создаваемой плазмотроном с проволокой-анодом / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик и др. // Там же. – 2008. – № 6. – С. 19-24.
3. Об уточнении математической модели электрической дуги в плазмотроне с внешней токоведущей проволокой / М. Ю. Харламов, И. В. Кривцун, В. Н. Коржик и др. // Там же. – 2009. – № 1. – С. 53-56.

ХАРЛАМОВ М. Ю. , КРИВЦУН І. В. Характеристики плазмового струменя при плазмово-дуговому напилюванні покриттів

Розроблено математичну модель теплових, газодинамічних, електромагнітних і дифузійних процесів у турбулентному потоці дугової плазми, що генерується плазмотроном із зовнішнім дротом-анодом. Дана модель була використана для чисельного аналізу розподілених та інтегральних характеристик плазмового струменя в умовах плазмово-дугового напилювання.

Ключові слова: плазмово-дугове напилювання, плазмотрон, дріт, плазмовий струмінь, математична модель.

KHARLAMOV M., KRIVTSUN I. Plasma flow characteristics in plasma transferred arc spraying of coatings

A mathematical model of heat exchange, gas dynamics, electromagnetic and diffusion processes in a turbulent flow of arc plasma generated by the plasma torch with an external wire-anode was developed. This model was used for the numerical analysis of the plasma flow characteristics as applied to plasma-transferred arc spraying.

Keywords: plasma transferred arc spraying, plasma torch, wire, plasma flow, mathematical model.