



МАГНИТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССАХ НАНЕСЕНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

В. Н. ПАЩЕНКО, канд. техн. наук, **С. П. СОЛОДКИЙ**, инж. (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Исследована возможность управления пространственным расположением струи низкотемпературной плазмы путем наложения на начальный участок плазменного потока поперечного магнитного поля. Установлено, что основными параметрами, влияющими на угол отклонения струи, являются значения тока управляющего электромагнита и удельной энергии плазменной струи. Показано, что направление отклонения плазменного потока зависит от направлений магнитного потока в зоне взаимодействия и куртки газового потока.

Ключевые слова: газотермическое нанесение покрытий, низкотемпературная плазма, плазменный поток, магнитное управление, плазменная струя, угол отклонения

Потоки низкотемпературной плазмы широко используются в технологиях инженерии поверхности — при наплавке, напылении, закалке и др. Рациональная организация упомянутых технологических процессов невозможна без оперативного управления пространственным положением рабочего тела относительно объекта воздействия.

Особенно актуальна проблема взаимного пространственного размещения фаз (газообразной и твердой) в гетерофазном потоке при газотермическом нанесении покрытий. В настоящее время преимущественно используют газодинамические и механические способы формирования необходимой исходной структуры газопорошкового потока — подача порошка через систему каналов, манипулирование параметрами транспортирующего газа, варьирование местом и направлением ввода дисперсного материала, сдувание или отсасывание основной несущей струи потоком дополнительного вещества и пр. [1].

Между тем, наличие в потоке высокотемпературного газа определенного (часто довольно значительного) количества движущихся заряженных частиц позволяет (теоретически) для коррекции направления их движения использовать электромагнитные поля. Последние достаточно широко применяют в сварочных процессах с целью управления объектами, через которые протекает электрический ток. Работы в указанном направлении ведутся в ИЭС им. Е. О. Патона и НТУУ «Киевский политехнический институт».

Новой областью применения магнитного управления могут быть потоки низкотемпературной плазмы.

Содержание заряженных частиц в объеме высокотемпературного газа, в частности плазменной

струи, зависит от достигнутых температур. При этом в реальных условиях распределение температуры по сечениям потока низкотемпературной плазмы происходит неравномерно.

Температура на оси плазменной струи, как правило, в несколько раз превышает ее среднемассовую температуру. Так, при среднемассовой температуре струи 2000...4000 К температура в приосевой зоне может составлять $(9...20) \cdot 10^3$ К [2].

Косвенно это подтверждается результатами измерений распределения температуры и энтальпий по сечению плазменных струй воздуха и смеси воздуха с углеводородными газами [3]. Согласно проведенным измерениям температура на оси плазменной струи составляет $(3,5...4,0) \cdot 10^3$ К на дистанции 40 мм, а характер зависимости температуры от расстояния, измеряемого от среза сопла плазмотрона, позволяет считать, что осевая температура будет равна $(9...12) \cdot 10^3$ К.

Такой уровень температуры предполагает наличие значительного количества ионизированных компонентов плазмообразующего газа в пределах начального участка плазменной струи. Термодинамические расчеты зависимости состава воздушной плазмы и плазмы продуктов сгорания углеводородных газов от температуры [4] свидетельствуют о существенном возрастании содержания электронного газа при температуре более 7000 К. Например, при 9000 К оно составляет 1 об. %, а при 12000 К — 12 об. %. Одновременно увеличивается содержание положительных однократно ионизированных ионов N^+ , O^+ (воздушная плазма), C^+ , H^+ , N^+ , O^+ (плазма смеси воздуха с углеводородными газами).

Наличие движущихся заряженных компонентов плазмообразующей среды создает предпосылки для использования магнитных полей с целью управления траекторией движения определенной части потока низкотемпературной плазмы, а через

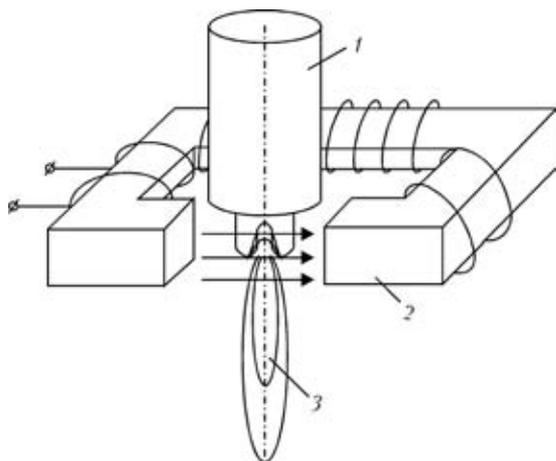


Рис. 1. Схема расположения генерирующей и управляющей систем экспериментальной установки: 1 — плазматрон; 2 — электромагнит; 3 — объект управления (струя низкотемпературной нетокочувствительной плазмы)

нее — для коррекции пространственного положения всей плазменной струи.

Исследование влияния магнитного поля на потоки низкотемпературной плазмы проводили на экспериментальной установке, состоящей из генератора низкотемпературной плазмы и магнитной системы, совмещенной с сопловой частью плазматрона (рис. 1).

Эксперименты проводили на дуговом генераторе плазмы линейной схемы с вихревой подачей плазмообразующего газа и автогазодинамической стабилизацией длины дуги, использующем в качестве плазмообразующего газа воздух или смесь воздуха с углеводородными газами. Ток дуги изменяли в диапазоне 130...200 А при общей мощности плазматрона 18...22 кВт. Расход плазмообразующего газа составлял 3,5...5,0 м³/ч.

Управляющая магнитная система представляла собой электромагнит постоянного тока в виде катушки, намотанной медным проводом на ферромагнитный П-образный сердечник. Электромагнит неподвижно зафиксирован относительно сопловой системы плазматрона таким образом, чтобы

начальный участок плазменной струи находился между полюсами электромагнита.

Направление потока и значение магнитной индукции задавали исходя из направления тока, его значения в катушке и изменяли по заданной циклограмме с помощью системы управления электромагнитом. Пространственное положение плазменной струи фиксировали цифровой видеокamerой с автоматической регулировкой яркости.

В качестве переменных параметров использовали ток в электромагните $I_{э.м}$, ток дуги $I_{д}$ и давление плазмообразующего газа $p_{п.г}$. Диапазон изменения этих параметров в процессе эксперимента определяли следующими факторами: возможностями магнитной системы — $5 < I_{э.м} \leq 15$ А; допустимым током термохимического катода плазматрона (верхний предел) и возможностями источника питания (нижний предел) — $130 \leq I_{д} \leq 200$ А; условиями устойчивого горения дуги в пределах дугового канала, зависящими от расхода плазмообразующего газа (2,5 м³/ч — нижний предел, соответствующий втягиванию дуги в узкую часть дугового канала, и 5 м³/ч — верхний предел, соответствующий выносу части дуги за пределы канала). Изменению расхода при обработке результатов поставлено в соответствие изменение давления плазмообразующего газа в диапазоне $0,3 \leq p_{п.г} \leq 0,5$ МПа.

Обработку результатов измерений (цифровые снимки потока плазмы) проводили с помощью пакета прикладных программ «Photoshop 7» путем наложения нескольких изображений и измерения угла отклонения оси плазменного потока при воздействии магнитного поля относительно оси потока плазмы в отсутствие поля.

На рис. 2, а представлено изображение струи плазматрона под действием магнитного поля с фиксированным направлением магнитной индукции. Изменение направления тока в электромагните управляющей системы приводит к отклонению струи плазматрона в противоположную

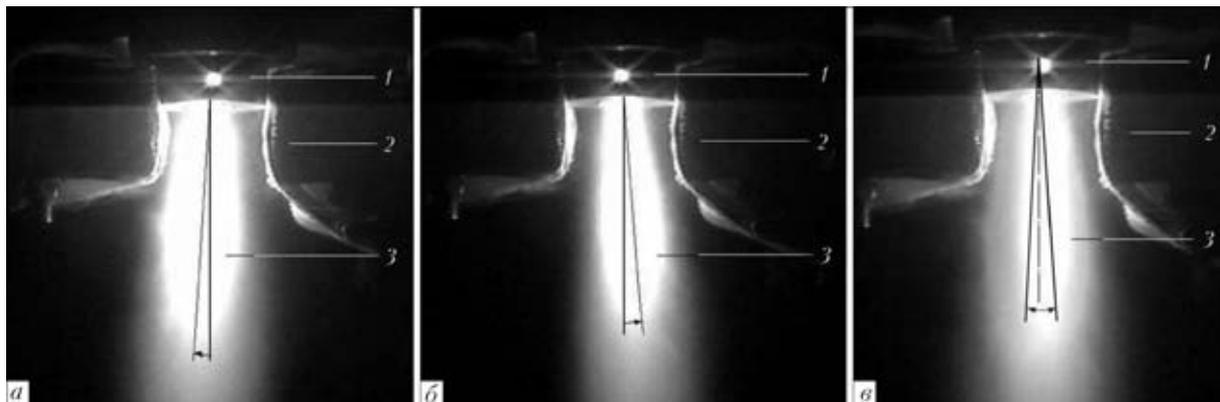


Рис. 2. Совмещенные снимки воздушной плазменной струи в отсутствие магнитного воздействия и при его наличии: а, б — направление магнитной индукции соответственно справа налево и слева направо; в — попеременное изменение направления постоянного тока в управляющем электромагните; 1 — выходной электрод плазматрона; 2 — полюса электромагнита; 3 — плазменная струя

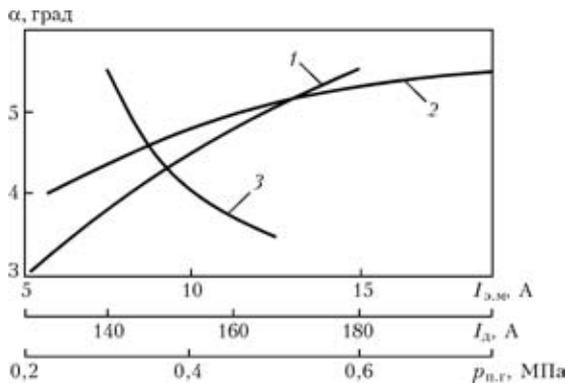


Рис. 3. Зависимость угла отклонения плазменной струи от параметров тока электромагнита (I), тока дуги (2) и давления плазмообразующего воздуха (3)

сторону, практически на такой же угол (рис. 2, б). На рис. 2, в представлен результат совмещения трех изображений в отсутствие и при наличии поля разной полярности.

Угол отклонения плазменной струи α (в одну сторону от исходного положения) увеличивался с повышением тока в электромагните и тока дуги и уменьшался при повышении расхода плазмообразующего газа (рис. 3).

Повышение тока электромагнита вызывает возрастание магнитной индукции в зоне взаимодействия и в соответствии с формулой Лоренца увеличение силы, которая действует на заряженную движущуюся частичку.

Увеличение тока дуги или уменьшение расхода плазмообразующего газа (а также их одновременное изменение) при неизменных других параметрах повышает удельную мощность на единицу объема плазмообразующего газа. Соответствующее этому повышение температуры плазмы приводит к увеличению содержания заряженных частиц и скорости их движения, а значит, и эффективности воздействия магнитного поля на плазменный поток.

В исследованном диапазоне изменения параметров режима работы плазмы суммарный угол отклонения плазменной струи (в обе стороны от среднего положения) составляет $11...12^\circ$.

Аппроксимация полученных экспериментальных кривых позволила получить эмпирическую зависимость угла отклонения плазменной струи α от упомянутых выше параметров режима работы генератора плазмы в исследованных диапазонах:

$$\alpha = 0,886 \frac{(I_{э.м.})^{0,41} (I_{д.} - 116,6)^{0,175}}{(27,14 p_{п.г.} - 7,14)^{0,24}}$$

В связи со сложностью и многофакторностью процессов, происходящих при магнитном воздействии на движущийся поток закрученного газа, трудно составить полную физическую картину характера движения частичек газового потока (в том числе и нейтральных). Необходимы дополнительные исследования поведения плазменных струй в поперечном магнитном поле при различных значениях крутки газового потока с учетом взаимного положения магнитной системы и токоведущих участков столба дуги, результаты которых позволят выявить природу экспериментально установленных фактов.

Экспериментальное подтверждение возможности магнитного управления пространственным положением плазменной струи наряду с альтернативными методами управления открывает дополнительные перспективы для организации, например, процессов модификации поверхностных слоев изделий или нанесения плазменных покрытий, в том числе сложной макроструктуры.

Выводы

1. Наложение на плазменную струю поперечного магнитного поля приводит к отклонению направления движения газового потока.
2. Угол отклонения плазменной струи определяется параметрами режима работы генератора плазмы и управляющей магнитной системы и составляет $5...6^\circ$.
3. Пространственная ориентация плоскости, в которой наблюдается отклонение плазменной струи, зависит от направлений магнитного потока и крутки газового потока.

1. Пащенко В. М. Обладнання для газотермічного нанесення покриттів: Навч. посіб. — К.: ІВЦ «Політехніка», 2001. — 416 с.
2. Суриц А. Л. Плазмохимические процессы и аппараты. — М.: Химия, 1989. — 304 с.
3. Пащенко В. М., Солодкий С. П. Дослідження впливу геометричних та режимних параметрів плазмотронів із комбінованим підведенням енергії на температурні та швидкісні поля плазмового струменя // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2005. — № 2 (40). — С. 72–79.
4. Карп И. Н., Марцевой Е. П., Пащенко В. Н. Математическое моделирование нагрева и движения частиц в плазменной струе // Хим. технология. — 1985. — № 6. — С. 27–33.

The paper studies the possibility of controlling the spatial position of a low-temperature plasma jet by superposition of a transverse magnetic field on the initial region of the plasma flow. It is established that the main parameters influencing the angle of the jet deviation, are the controlling electric magnet current and specific energy of the plasma jet. It is shown that the direction of plasma flow deviation depends on the directions of the magnetic flow in the interaction zone and direction of the gas flow twist.

Поступила в редакцию 15.12.2005, в окончательном варианте 06.02.2006