

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.С. Борисов, С.Г. Войнарович, А.Н. Кислица, Е.К. Кузьмич-Янчук, С.Н. Калужный

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено исследование вольт-амперных характеристик и определен термический КПД плазмотрона МП-04 установки микроплазменного напыления МПН-004 в условиях формирования ламинарной аргоновой микроплазменной струи. Была определена область рабочих напряжений плазмотрона и построено семейство вольт-амперных характеристик, каждая из которых была снята при неизменных составе и расходе рабочего газа, длине открытого участка дуги и неизменных конструктивных размерах плазмотрона. Анализ результатов эксперимента показывает, что вольт-амперные характеристики плазмотрона МП-04 являются восходящими и имеют линейный вид. Установлено, что при рабочих значениях силы тока и расхода плазмообразующего газа напряжение находится в пределах 22...32 В. Методом проточного калориметрирования теплового потока были определены термический КПД плазмотрона, среднемассовая начальная энтальпия и температура плазменной струи в зависимости от тока дуги и расхода плазмообразующего газа. Было установлено, что в условиях процесса микроплазменного порошкового напыления термический КПД плазмотрона находится в диапазоне 30...55 % и при расходах газа, превышающих 40 л/ч, практически не изменяется с изменением силы тока. Библиогр. 16, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: микроплазменное напыление, аргоновая плазменная струя, вольт-амперная характеристика плазмотрона, температура и энтальпия плазменной струи, термический КПД, напряжение и сила тока плазменной дуги, расход плазмообразующего газа

В настоящее время в промышленности все шире применяются процессы газотермического нанесения покрытий. Одним из основных методов газотермического нанесения покрытий является плазменное напыление. Наиболее часто для этой цели используются плазмотроны, генерирующие турбулентную плазменную струю с электрической мощностью до 200 кВт и диаметром пятна напыляемого материала 15...30 мм. Применение таких плазмотронов для напыления деталей малых размеров или тонкостенных деталей может привести к их перегреву и короблению в виду высокой тепловой мощности плазменной струи. Кроме того, в случае напыления малоразмерных деталей или локальных участков поверхности (5...10 мм и менее) возникают большие потери напыляемого материала, а также возникает необходимость в дополнительной операции по маскированию участков, не подлежащих напылению. Эти обстоятельства привели к разработке в ИЭС им. Е.О. Патона нового способа газотермического нанесения покрытий — микроплазменного напыления (МПН) [1, 2].

Для реализации метода микроплазменного напыления в ИЭС им. Е.О. Патона был разработан и запатентован микроплазмотрон с выносным, непосредственно охлаждаемым анодом с эрозион-

но-стойкой вставкой [3]. Мощность разработанного микроплазмотрона МП-04 до 2,5 кВт.

Особенностью процесса микроплазменного напыления в случае нанесения покрытия из порошковых материалов является ламинарный режим истечения струи с использованием соосного обдува плазменной струи аргоном для ее стабилизации.

При разработке технологии микроплазменного напыления покрытий с использованием в качестве напыляемого материала порошка необходимо было исследовать как характеристики микроплазмотрона МП-04, так и параметры генерируемой им микроплазменной струи. В работе исследовали такие энергетические характеристики как тепловой КПД плазмотрона (η), зависимость напряжения дугового разряда от тока при изменении расходов газа — вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги, энтальпия (ΔH) и температура плазмы.

Методика проведения исследований. Методика проточного калориметрирования теплового потока, использованная для определения характеристик микроплазмотрона МП-04 применительно к условиям МПН из проволоочных материалов, изложена в работе [4]. Главное отличие в работе плазмотрона для напыления порошковых материалов состоит в режиме истечения плазмен-

Ю.С. Борисов — <http://orcid.org/0000-0002-6019-8456>

© Ю.С. Борисов, С.Г. Войнарович, А.Н. Кислица, Е.К. Кузьмич-Янчук, С.Н. Калужный, 2019

ной струи. Известно, что напряжение плазменной дуги зависит от конструкции плазмотрона, тока дуги, состава и расхода рабочего газа. В связи с этим снятие ВАХ проводили при неизменных составе и расходе рабочего газа, длине открытого участка дуги и неизменных конструктивных размерах плазмотрона: диаметре канала плазмоформирующего сопла 1,0 мм, диаметре электрода 1,5 мм, расстоянии от конца электрода до торца сопла 1,0 мм, расстоянии от торца сопла до анода 1,5 мм. В качестве плазмообразующего и защитного газа использовали аргон. Расход плазмообразующего газа изменяли в пределах 40...120 л/ч, расход защитного газа во всех опытах поддерживали равным 240 л/ч.

Основными тепловыми характеристиками плазмотрона являются его термический КПД ($\eta_{тр}$), энтальпия (ΔH) и температура плазменной струи.

Измерение ВАХ микроплазмотрона МП-04 при напылении порошковых материалов. ВАХ позволяет установить диапазон устойчивой работы источника питания при изменении режимов работы плазмотрона. Для определения области рабочих напряжений плазмотрона МП-04 было построено семейство ВАХ (рис. 1).

Обработка результатов эксперимента показывает, что ВАХ плазмотрона МП-04 являются восходящими и имеют линейный вид. Подобные ВАХ также были получены и при исследовании ламинарного плазмотрона в работе [5]. Из работы [6] следует, что восходящие ВАХ в большинстве случаев являются более энергетически выгодными, так как при использовании источников питания не требуют введения в цепь дополнительного балластного сопротивления, падение напряжения на котором может достигать 50 %. Таким образом, восходящие ВАХ микроплазмотрона МП-04 позволяют использовать с ним источники питания как с крутопадающей внешней ВАХ, так и с жесткой внешней ВАХ [7].

Установлено, что при неизменном расстоянии катод-анод и неизменном составе газа напряжение повышается с увеличением силы тока и расходом плазмообразующего газа (рис. 1, 2), тем са-

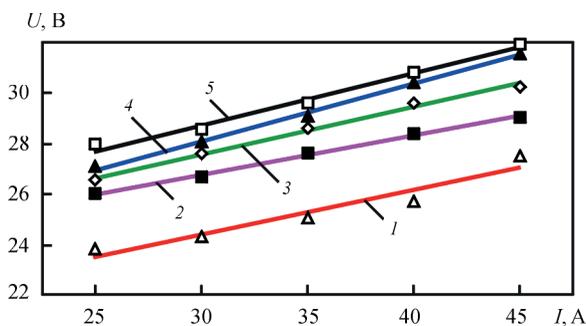


Рис. 1. ВАХ плазмотрона МП-04. Расход плазмообразующего газа: 1 — 40 л/ч; 2 — 60; 3 — 80; 4 — 100; 5 — 120

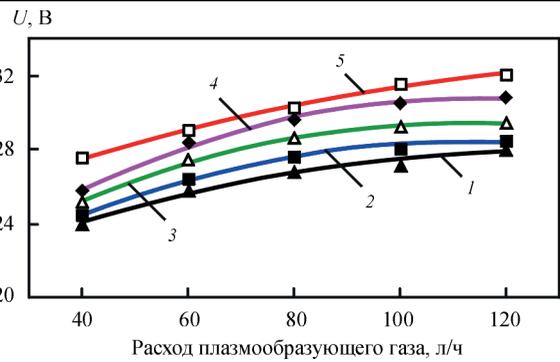


Рис. 2. Изменение напряжения столба дуги плазмотрона МП-04 в зависимости от расхода газа для разных значений силы тока: 1 — 25 А; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45

мым увеличивается мощность плазмотрона. Рост напряжения при увеличении расхода рабочего газа можно объяснить увеличением степени сжатия столба дуги. При обдуве дугового разряда на его границе за счет интенсивного теплообмена между газом и столбом дуги происходит процесс деионизации, что приводит к сокращению диаметра разряда и росту напряженности электрического поля в нем. Чем интенсивнее обжата дуга, тем при меньшем значении тока ее ВАХ переходит в возрастающую.

Из ВАХ (рис. 1) видно, что для рабочих значений силы тока и расхода плазмообразующего газа напряжение находится в пределах 22...32 В. Используя зависимость, приведенную в работе [8], можно принять, что источник питания для возбуждения дуги и устойчивой работы плазмотрона МП-04 должен обеспечивать возможность плавного регулирования тока в диапазоне 20...60 А и напряжение холостого хода не менее 60 В.

Определение термического КПД плазмотрона, мощности, энтальпии и температуры аргоновой плазменной струи при микроплазменном напылении. Рост напряжения при увеличении расхода плазмообразующего газа приводит к линейному увеличению как мощности дуги (рис. 3), так и термического КПД плазмотрона (рис. 4), определяемого согласно [4].

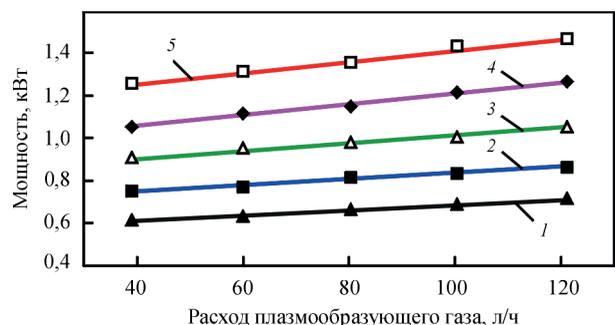


Рис. 3. Изменение мощности плазмотрона МП-04 в зависимости от расхода газа для разных значений силы тока: 1 — 25 А; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45

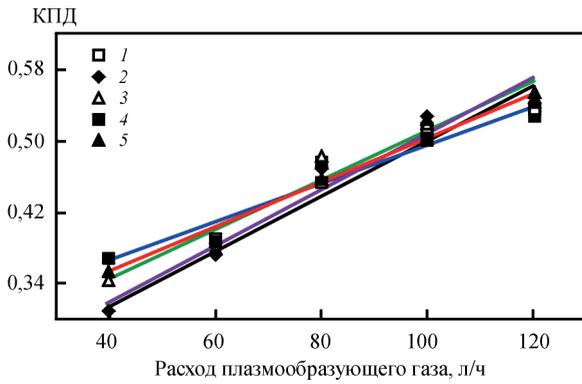


Рис. 4. Изменение термического КПД плазматрона МП-04 в зависимости от расхода газа для разных значений силы тока: 1 — 45 А; 2 — 40; 3 — 35; 4 — 30; 5 — 25

Полученный термический КПД микроплазматрона МП-04 при данных параметрах работы находится в диапазоне 30...55 %. Термический КПД плазматронов без межэлектродной вставки, применяемой при традиционном плазменном напылении с использованием аргона, по литературным данным и рассчитанный с помощью пакета прикладных программ для компьютерного моделирования процесса плазменного напыления CASPSP составляет 50...70 % [9].

Рост КПД микроплазматрона МП-04 при увеличении расхода плазмообразующего газа объясняется уменьшением потерь тепла из столба дуги в стенки сопла в результате повышения степени сжатия столба дуги и, как следствие, улучшения тепловой изоляции их от столба дуги, а также за счет более интенсивного охлаждения газовым потоком анода. Таким образом, чем больше расход газа, тем меньше тепловая нагрузка на сопло, а следовательно выше ресурс работы сопла.

Однако так как рост напряжения, а следовательно, и мощности струи, происходит менее интенсивно, чем рост расхода газа, то значения энтальпии и температуры снижаются с повышением расхода газа (рис. 5). При этом максимальная расчетная энтальпия 32000 Дж/л наблюдается при минимальном расходе газа (40 л/ч) и максимальной

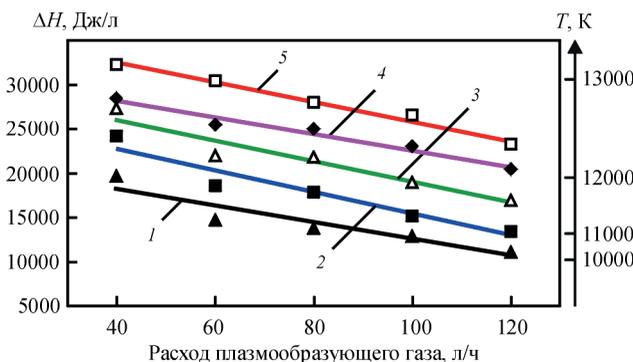


Рис. 5. Изменение энтальпии в зависимости от расхода газа для разных значений силы тока: 1 — 25 А; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45

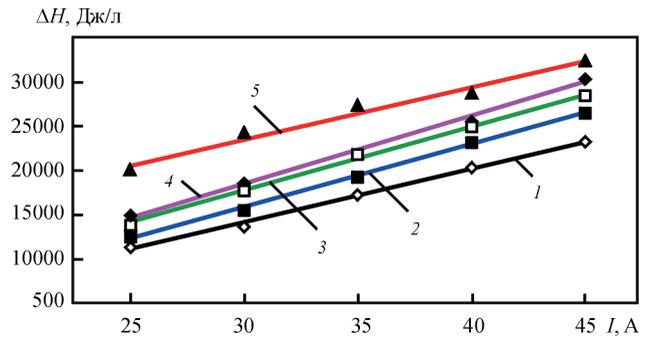


Рис. 6. Изменение энтальпии в зависимости от силы тока при разных значениях расхода плазмообразующего газа: 1 — 25 А; 2 — 30; 3 — 35; 4 — 40; 5 — 45

ной силе тока (45 А), а минимальная расчетная энтальпия 11000 Дж/л наблюдается при максимальном расходе газа (120 л/ч) и минимальной силе тока (25 А).

Исходя из данных о зависимости температуры аргона от энтальпии [10], температура микроплазменной струи составляет 10000...13500 К. По литературным данным и расчетам, проведенным с помощью CASPSP для традиционного плазменного напыления, начальная температура аргоновой плазмы, выходящей из сопла, составляет 7000...13000 К [7, 11–15].

При фиксированном напряжении мощность дуги можно регулировать более гибким параметром — силой тока дуги. Энтальпия струи с увеличением силы тока, а следовательно и мощность дуги, возрастает линейно при всех расходах газа (рис. 6).

Поскольку напряжение в основном определяется конструкцией плазматрона и составом плазмообразующего газа, то при напылении покрытия из порошкового материала выбор режима работы плазматрона заключается в установлении оптимальной комбинации силы тока и расхода плазмообразующего газа. Нижний и верхний уровень расхода плазмообразующего газа связан с условиями работы микроплазматрона (тепловой нагрузкой на стенки сопла, стойкостью анода, стабильностью процесса).

Проведенные исследования показали, что КПД плазматрона МП-04 практически не изменяется с изменением силы тока при расходах газа, превышающих 40 л/ч (рис. 7). Снижение КПД плазматрона при увеличении силы тока в случае расхода газа 40 л/ч связано с увеличением потерь в стенки сопла вследствие недостаточного сжатия дуги.

Оценка потерь мощности на излучение открытым участком столба микроплазменной дуги была проведена с использованием формулы (3) [4].

Результаты расчетной оценки величины объемных потерь мощности аргоновой плазмы атмосферного давления на излучение приведены в таблице.

Величины объемных потерь мощности аргоновой плазмы атмосферного давления на излучение

(\bar{T}) , кК	10	11	12	13	14	15	16
$\Psi, \cdot 10^{10}$ Вт/м ³	0,0033	0,011	0,030	0,062	0,096	0,118	0,124

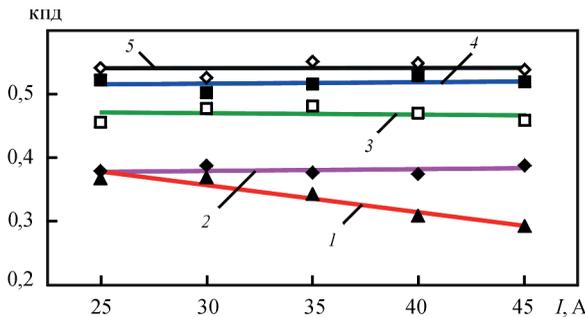


Рис. 7. Изменение термического КПД плазматрона МП-004 в зависимости от силы тока при разных значениях расхода плазмообразующего газа. Расход плазмообразующего газа: 1 — 40 л/ч; 2 — 60; 3 — 80; 4 — 100; 5 — 120

В случае, когда длина открытого участка — 3 мм, диаметр столба плазмы струи — 1 мм, среднемассовая температура плазмы $(\bar{T}) = 13$ кК, потери мощности на излучение составят 1,46 Вт, что соответствует приблизительно 0,1 % мощности дуги.

Данные результатов экспериментов по измерению излучения аргоновой плазмы, приведенные в [16], показывают, что при температуре около 13500 К поправка на излучение составляет около 2 %.

Выводы

1. В результате измерения электрических и тепловых характеристик ламинарной микроплазменной аргоновой струи, применяемой при микроплазменном напылении порошковыми материалами, были определены вольт-амперные характеристики плазматрона МП-04. Показано, что они имеют линейный вид и являются восходящими, при этом рабочее напряжение дуги в диапазоне токов 25...45 А составляет 22...32 В.

2. Установлено, что термический КПД микроплазматрона МП-04 в диапазоне токов 25...45 А возрастает с увеличением расхода плазмообразующего газа. Максимальный КПД достигает 55 % при расходе газа 120 л/ч. КПД плазматрона практически не изменяется с изменением силы тока при расходах газа, превышающих 40 л/ч. Увеличение силы тока при расходе газа 40 л/ч приводит к снижению КПД плазматрона, что связано с увеличением потерь в стенке сопла вследствие недостаточного сжатия дуги.

3. Установлено, что расчетная величина энтальпии плазменной струи в этих условиях достигает 32 кДж/л, а максимальная расчетная темпе-

ратура микроплазменной струи аргона в рабочем диапазоне микроплазматрона МП-04 составляет 13500 К. Таким образом, за счет увеличенного отношения мощности дуги к расходу плазмообразующего газа в случае микроплазменного напыления (порядка 2 кВт), по сравнению с традиционным плазменным напылением (порядка 1 кВт), температура микроплазменной струи мощностью 1,5 кВт во многих случаях оказывается выше температуры плазменной струи, генерируемой традиционными плазматронами мощностью 10...40 кВт.

Список литературы

1. Borisov Yu., Borisova A., Pereverzev Yu., Ramaekers P.P.J. (1997) Microplasma spraying. *Proc. of the 5th Europ. Conf. on Advanced Material and Processes – Netherlands*, сс. 237–241.
2. Борисов Ю.С., Переверзев Ю.Н., Бобрик В.Г., Войнарович С.Г. (1999) Нанесение узкополосных покрытий способом микроплазменного напыления. *Автоматическая сварка*, 6, 53–55.
3. Борисов Ю.С., Войнарович С.Г. та ін. (2002). *Плазмотрон для напылення покриттів*, Україна, Пат. № 2002076032UA, B23K10/00.
4. Борисов Ю.С., Войнарович С.Г., Кислица А.Н. и др. (2018) Исследование электрических и энергетических характеристик плазматрона при микроплазменном напылении проволочными материалами. *Автоматическая сварка*, 9, 23–28.
5. Жеенбаев Ж., Энгельшт В. С. (1975) *Ламинарный плазмотрон*. Фрунзе, Илим.
6. Коротеев А.С. (1980) *Электродуговые плазмтроны*. Москва, Машиностроение.
7. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А. и др. (1987) *Газотермические покрытия из порошковых материалов*. Киев, Наукова думка.
8. Патон Б.Е., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. и др. (1979) *Микроплазменная сварка*. Киев, Наукова думка.
9. (2007) Программное обеспечение CASPSP-3.12 для компьютерного моделирования процесса плазменного напыления. *Автоматическая сварка*, 5, 5-6.
10. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. (1990) *Теория столба электрической дуги. Низкотемпературная плазма*. Т.1. Новосибирск, Наука. Сиб. Отд-ние.
11. Грей Дж., Джекобс П. (1964) *Ракетная техника и космонавтика*, 3, 25.
12. Ельяшевич М.А. (1970) *Вопросы физики низкотемпературной плазмы*. Минск, Наука и техника.
13. Абдразаков А., Жеенбаев Ж., Карих Ф.Г. (1968) *Исследование электрической дуги и плазматрона*. Фрунзе, Илим.
14. Краснов А.Н., Зильберберг В.Т., Шаривкер С.Ю. (1970) *Низкотемпературная плазма в металлургии*. Металлургия.
15. Моренов А.И., Петров А.В. (1967.) Определение скоростей и пульсаций струи в плазматронах для нанесения покрытий. *Сварочное производство*, 2, 3–6.
16. Tankin R.S., Berry J.M. (1964) Experimental investigation of radiation from an argon. *Phys. of Fluids.*, 7, 1620–1624.

References

1. Borisov, Yu., Borisova, A., Pereverzev, Yu., Ramaekers, P.P.J. (1997) Microplasma spraying. *In: Proc. of 5th Europ. Conf. on Advanced Material and Processes. Netherlands*, 237-241.
2. Borisov, Yu.S., Pereverzev, Yu.N., Bobrik, V.G., Vojnarovich, S.G. (1999) Deposition of narrow-strip coatings by microplasma spraying method. *Avtomatich. Svarka*, 6, 53-55 [in Russian].

3. Borisov, Yu.S., Voinarovych, S.G. et al. (2002) *Plasmatron for coating deposition*. Pat. Ukraine 2002076032UA, Int. Cl. B23K10/00 [in Ukrainian].
4. Borisov, Yu.S., Kyslytsia, O.M., Voinarovych, S.G. et al. (2018) Investigation of plasmatron electric and energy characteristics in microplasma spraying with wire materials. *The Paton Welding J.*, **9**, 18-22.
5. Zheenbaev, Zh., Engelsht, V.S. (1975) *Laminar plasmatron*. Frunze, Ilim [in Russian].
6. Koroteev, A.S. (1980) *Electric arc plasmatrons*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Borisov, Yu.S., Kharlamov, Yu.A. et al. (1987) *Thermal coatings of powder materials*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
8. Paton, B.E., Gvozdetsky, V.S., Dudko, D.A. et al. (1979) *Microplasma welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
9. (2007) Software CASPSP-3.12 for computer modeling of plasma spraying process. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 5-6.
10. Engelsht, V.S., Gurovich, V.Ts., Desyatkov, G.A. et al. (1990) *Theory of electric arc column. Low-temperature plasma*. Vol. 1. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
11. Grey, J., Jekobs, P. (1964) *Rocket technique and cosmonautics*, **3**, 25.
12. Elyashevich, M.A. (1970) *Problems of physics of low-temperature plasma*. Minsk, Nauka i Tekhnika [in Russian].
13. Abdrazakov, A., Zheenbaev, Zh., Karikh, F.G. (1968) *Investigation of electric arc and plasmatron*. Frunze, Ilim [in Russian].
14. Krasnov, A.N., Zilberberg, V.T., Sharivker, S.Yu. (1970) *Low-temperature plasma in metallurgy*. Metallurgiya [in Russian].
15. Morenov, A.I., Petrov, A.V. (1967) Determination of velocities and pulsations of jet in plasmatrons for coating deposition. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 3-6 [in Russian].
16. Tankin, R.S., Berry, J.M. (1964) Experimental investigation of radiation from an argon. *Phys. of Fluids*, **7**, 1620-1624.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Ю.С. Борисов, С.Г. Войнарович, А.Н. Кислиця, Є.К. Кузьмич-Янчук, С.Н. Калужний

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведено дослідження вольт-амперних характеристик і визначено термічний ККД плазматрона МП-04 установки мікроплазмового напилення МПН-004 в умовах формування ламінарного аргонного мікроплазмового струменя. Була визначена область робочих напруг плазматрона і побудовані вольт-амперні характеристики, кожна з яких була знята при незмінних складі та витраті робочого газу, довжині відкритої ділянки дуги і незмінних конструктивних розмірах плазматрона. Аналіз результатів експерименту показує, що вольт-амперні характеристики плазматрона МП-04 є висхідними і мають лінійний вигляд. Встановлено, що при робочих значеннях сили струму і витрати плазмоутворюючого газу напруга знаходиться в межах 22...32 В. Методом проточного калориметрування теплового потоку були визначені термічний ККД плазматрона, середньомасова початкова ентальпія і температура плазмового струменя в залежності від струму дуги і витрати плазмообразуючого газу. Було встановлено, що в умовах процесу мікроплазмового порошкового напилення термічний ККД плазматрона знаходиться в діапазоні 30...55 % і при витратах газу, що перевищують 40 л/год, практично не змінюється зі зміною сили струму. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: мікроплазмове напилення, аргонний плазмовий струмінь, вольт-амперна характеристика плазматрона, температура і ентальпія плазмового струменя, термічний ККД, напруга і сила струму плазмової дуги, витрата плазмоутворюючого газу

INVESTIGATION OF ELECTRICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF PLASMATRON FOR MICROPLASMA SPRAYING OF COATINGS FROM POWDER MATERIALS

Yu.S. Borisov, S.G. Voinarovych, A.N. Kyslytsa, E.K. Kuzmich-Yanchuk, S.N. Kalyuzhny

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The volt-ampere characteristics were studied and the coefficient of thermal efficiency of the MP-04 plasmatron for the installation of microplasma spraying MPN-004 was determined under the conditions of formation of a laminar argon microplasma jet. The region of operating voltages of the plasmatron was determined and a family of volt-ampere characteristics was plotted, each of which was taken at the constant composition and flow rate of working gas, length of open region of the arc and constant design dimensions of the plasmatron. Analysis of the experimental results shows that the volt-ampere characteristics of the MP-04 plasmatron are ascending and linear. It was established that at operating values of current and flow rate of plasma-forming gas, the voltage is in the range of 22...32 V. The coefficient of thermal efficiency of the plasmatron, the bulk mean initial enthalpy and the temperature of plasma jet were determined depending on the arc current by flow calorimetry of the heat flux. It was found that under the conditions of microplasma powder spraying process, the coefficient of thermal efficiency of the plasmatron is in the range of 30...55 % and at gas flow rates, exceeding 40 l/h practically does not change with the current. 16 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: microplasma spraying, argon plasma jet, volt-ampere characteristics of plasmatron, temperature and enthalpy of plasma jet, coefficient of thermal efficiency, voltage and current of plasma arc, plasma-forming gas flow rate

Поступила в редакцію 23.07.2019