

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 621.793

Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-274-278

For citation: Mikheev A. E., Girn A. V., Yakubovich I. O., Rudenko M. S. Plasmotron for coating internal surfaces of component parts. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 274–278. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-274-278.

Для цитирования: Плазмотрон для нанесения покрытий на внутренние поверхности изделий / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 2. С. 274–278. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-274-278.

ПЛАЗМОТРОН ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: michla@mail.ru

Плазменное напыление является одним из технологичных, производительных и эффективных способов нанесения защитных покрытий на изделия аэрокосмической, металлургической и других отраслей промышленности, подвергаемых воздействию высоких температур, динамических нагрузок, агрессивных сред и т. д. Плазменным напылением практически можно наносить любые материалы, такие как металлы, оксиды, карбиды, нитриды и т.п. на различные поверхности. Но существуют проблемы по нанесению защитных покрытий на внутренние поверхности цилиндрических деталей и деталей сложной формы с небольшими размерами (до 100 мм). Эти сложности связаны с габаритами самих плазмотронов. Малогабаритные плазмотроны в России не производят, а импортируются из зарубежных стран, что причиняет ряд неудобств, связанных с поставками и очень высокой коммерческой ценой. Одним из путей решения этой проблемы является разработка малогабаритных плазмотронов, которые позволят наносить качественные покрытия на внутренние поверхности деталей с ограниченными размерами и существенно снизить их цену за счет импортозамещения.

В результате использования предлагаемого устройства стало возможным наносить качественные покрытия на внутренние поверхности отверстий с минимальным диаметром 60 мм за счет уменьшения габаритов плазмотрона, а также существенно снизить его стоимость за счет собственного производства. Предварительные расчёты показывают, что цена плазмотрона не превышает 0,5 млн руб.

Ключевые слова: плазмотрон, плазменное напыление, напыление на внутренние поверхности.

PLASMOTRON FOR APPLICATION OF COATINGS ON INTERNAL SURFACES OF PRODUCTS

A. E. Mikheev, A. V. Girn, I. O. Yakubovich, M. S. Rudenko

Reshetnev Siberian State University of Science and Technolog
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: michla@mail.ru

Plasma spraying is one of the technological, productive and effective methods of applying protective coatings to aerospace, metallurgical and other industries exposed to high temperatures, dynamic loads, aggressive environments, etc. Using plasma spraying it is possible to apply any materials such as metals, oxides, carbides, nitrides, etc. on various surfaces. However, there are problems in applying protective coatings on the inner surfaces of cylindrical parts and complex shape parts with small sizes (up to 100 mm). The problem is the plasmatron dimensions. Russia does not produce small-sized plasmatrons, but imports from abroad, which causes a number of inconveniences associated with deliveries and a very high commercial price. One of the ways to solve this problem is to develop small-sized plasmatrons that will make it possible to apply high-quality coatings to the internal surfaces of parts with limited dimensions and significantly reduce their price due to import substitution.

The effectiveness of the proposed device is the applying high-quality coatings on the inner surfaces of the holes with a minimum diameter of 60 mm by reducing the dimensions of the plasmatron, as well as a significant reduction in its cost due to its own production. Preliminary calculations show that the price of the plasmatron does not exceed 0.5 million rubles.

Keywords: plasmatron, plasma spraying, spraying on internal surfaces.

Введение. Во многих отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, металлургическая, нефтедобывающая и др. повышаются требования по надежности, долговечности и безопасности изделий, эксплуатируемых в экстремальных условиях (воздействие высоких температур, динамических нагрузок, коррозионных сред и т.д.). Для обеспечения этих требований возникает необходимость применения специальных защитных покрытий. Одним из наиболее эффективных способов нанесения таких покрытий является плазменное напыление, применение которого с каждым годом возрастает [1–17]. При нанесении защитных покрытий на внутренние поверхности цилиндрических деталей и деталей сложной формы с небольшими размерами (до 100 мм) возникают проблемы, связанные с габаритами самих плазмотронов, которые не позволяют размещать их в напыляемой зоне. Малогабаритные плазмотроны в России не производят, а импортируются из зарубежных стран, что причиняет ряд неудобств, связанных с поставками и очень высокой коммерческой ценой. Одним из путей решения этой проблемы является разработка малогабаритных плазмотронов, которые позволят наносить качественные покрытия на внутренние поверхности деталей с ограниченными размерами и существенно снизить их цену за счет импортозамещения.

В настоящее время широко применяется плазмотрон F1, который предназначен для нанесения качественных покрытий различного назначения методом плазменно-порошкового напыления на внутренние поверхности отверстий с минимальным диаметром 70 мм [18]. Изготовители – компания Innatech (Dinse – www.dinse.eu, АМТ – www.amt-ag.net). К недостаткам можно отнести небольшую длительность работы плазмотрона (не более 50 ч) и высокую стоимость плазмотрона, которая составляет более 1,5 млн руб. В данной работе представлены результаты сравнения возможностей плазмотрона F1 и разработанного

малогабаритного плазмотрона ПМ-2, который позволяет наносить покрытия на внутренние поверхности отверстий с минимальным диаметром 60 мм.

Экспериментальная часть. Плазмотрон содержит соосно и последовательно установленные катодный узел, электроизоляционную втулку, анодный узел, системы ввода рабочего (плазмообразующего) газа и охлаждающей воды, инжектор для подачи порошка под срез сопла. В разработанной конструкции плазмотрона из анодного узла убрано сопло с уплотняющими прокладками, а роль сопла выполняет водоохлаждаемый анодный узел, в который для повышения стойкости запрессована вольфрамовая вставка. Катодный и анодный узлы имеют раздельные системы охлаждения. Каналы охлаждения образованы крышками, припаянными к катодному и анодному узлам, что позволяет обойтись без уплотняющих прокладок, которые часто выходят из строя. Все это позволяет уменьшить габариты плазмотрона. Между катодным и анодным узлами устанавливается электроизолирующая втулка, а сборка их осуществляется тремя винтами, заключенными в электроизолирующие кожухи.

На рис. 1 представлен предлагаемый плазмотрон в разрезе. На рис. 2 представлены объемные изображения катодного 1 и анодного 3 узлов с охлаждающими каналами 6 и 7.

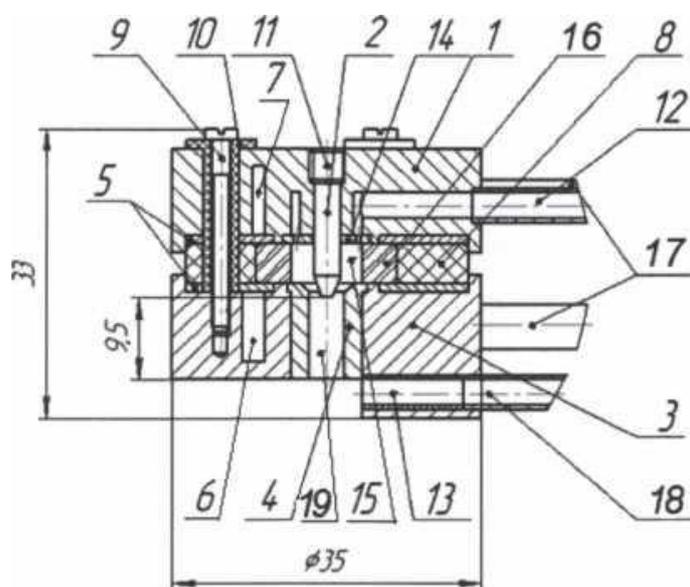


Рис. 1. Плазмотрон ПМ-2
Fig. 1. Plasmotron PM-2

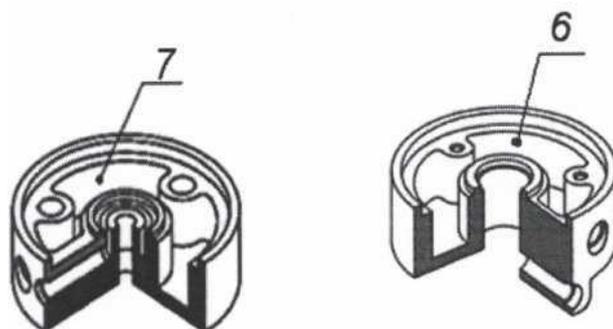


Рис. 2. Катодный и анодный узел
Fig. 2. Cathode and anode assemblies

Предлагаемая конструкция плазматрона состоит из катодного узла 1 с катодом 2 и анодного узла 3, выполняющего роль сопла, в который запрессована вольфрамовая вставка 4 для повышения стойкости, к катодному и анодному узлам припаяны крышки 5 для образования охлаждающих каналов 6 и 7, электроизолирующей втулки 8, разделяющей катодный и анодный узлы, вольфрамового катода 8, трех винтов 9 в электроизолирующих кожухах 8, соединяющих катодный и анодный узлы между собой, пробки 11 для фиксации катода, трубки 12 для подачи рабочего (плазмообразующего) газа в канал 13 в корпусе катодного узла и газораспределительное кольцо 14, установленное перед разрядной камерой 15, образованной катодным узлом 1, керамическим кольцом 16 и анодным узлом 3, и обеспечивающее равномерное распределение в ней газа, трубок 17 для подачи охлаждающей воды в каналы 6 и 7, инжектора 18 для подачи напыляемого порошка и отверстия 19 во вставке 4 для выхода струи плазмы.

Плазмотрон работает следующим образом. В трубки 16 для охлаждения подается вода. В трубку 12 подается плазмообразующий газ и между катодом 2 и вольфрамовой вставкой 4, запрессованной в анодный узел, возбуждают электрическую дугу. Рабочий (плазмообразующий) газ через канал ввода 13 и газораспределительное кольцо 14 подается в разрядную камеру 15 плазматрона (рис. 1), образованную катодным узлом 1, керамическим кольцом 16 и анодным узлом 3, ионизируется и с большой скоростью выходит из отверстия 18 вставки 6, образуя струю плазмы, в которую подается порошковый материал через инжектор 11, закрепленный в анодном узле 3.

В разработанной конструкции плазматрона (ПМ-2) максимально уменьшены габаритные размеры: высота 33 мм, диаметр 35 мм. Плазмотрон позволяет наносить покрытия в отверстиях меньшего размера (минимальный диаметр отверстия 60 мм). Длина погружения при напылении в разработанной конструкции может быть отрегулирована удлинением патрубков.

Сравнительные характеристики малогабаритных плазматронов представлены в таблице.

Сравнительные характеристики плазматронов

Характеристика	Плазмотрон F1 (GTV)	Плазмотрон ПМ-2
Мах мощность, кВт	25	20
Рабочий ток дуги, А	до 500	до 400
Мах длина погружения при напылении, мм	500	600
Min диаметр напыляемого отверстия, мм	70	60
Мах габаритный размер плазматрона, мм	50	35
Ресурс работы на среднем токе, ч	50 и более	50 и более
Тип охлаждения	Водяное	Водяное
Применяемые порошки	Металлические, композитные, керамические	Металлические, композитные, керамические

Были проведены испытания на прочность сцепления покрытий, нанесенных на максимальных мощностях представленных плазматронов. Величину прочности сцепления покрытия с подложкой определяли методом отрыва (клеевая методика, клей ВК-9) согласно ГОСТ 209-75, при помощи универсальной испытательной машины Eurotest T-50. Полученные данные показали, что прочность сцепления покрытий из оксида алюминия, нанесенных на стальные образцы экспериментальным плазмотроном ПМ-2 находятся в пределах 8–10 МПа, что соизмеримо с результатами напыленных покрытий плазмотроном F1

(GTV), которые составляет 9–10,5 МПа. Но min диаметр напыляемого отверстия для плазмотрона F1 составляет 70 мм, что ограничивается габаритами плазмотрона (см. таблицу).

Заключение. Эффективность от использования предлагаемого устройства следует рассматривать как результат, позволяющий наносить качественные покрытия на внутренние поверхности отверстий с минимальным диаметром 60 мм за счет уменьшения габаритов плазмотрона, а также существенного снижения его стоимости. Предварительные расчёты показывают, что цена плазмотрона не превышает 0,5 млн руб.

Библиографические ссылки

1. Хасуй А. Техника напыления. М. : Машиностроение, 1975. 288 с.
2. Кудинов В. В Плазменные покрытия. М. : Наука, 1977. 270 с.
3. Кудинов В. В, Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М. : Машиностроение. 1981. 212 с.
4. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская, Ю. С. Борисов. Киев : Наукова думка, 1987. 544 с.
5. Шатинский В. Ф., Копылов В. И. Исследование процессов в контактной зоне при плазменном напылении и оценка их параметров // Неорганические и органосиликатные покрытия. Л. : Наука, 1975. С. 96–106.
6. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 235 с.
7. Харламов Ю. А. Факторы, влияющие на адгезионную прочность газотермических покрытий // Защитные покрытия на металлах. 1988. Вып. 22. С. 30–34.
8. Суров Н. С., Полак Л. С.. Исследование взаимодействия частиц порошка с потоком плазмы в сопле // Физика и химия обработки материалов. 1969. № 2. С. 19–29.
9. Михеев А. Е., Колмыков В. А. Повышение эксплуатационных характеристик поверхностей элементов конструкций летательных аппаратов. Автоматизация процессов обработки. М. : МАКС Пресс, 2002. 224 с.
10. Михеев А. Е., Стацура В. В., Никушкин Н. В. Оборудование для нанесения качественных газотермических покрытий // Применение газотермических покрытий в машиностроении : III отраслевая науч.-техн. конф. Москва, 1990. С. 84–87.
11. Обработка тугоплавких оксидов в низкотемпературной плазме / В. В. Стацура, С. С. Ивасев, А. В. Гирн, А. Е. Михеев // Материалы и технологии XXI в. : сб. науч. тр. Всероссийско науч.-техн. конф. Пенза, 2001. С. 123–125.
12. Донской А. В., Клубникин В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л. : Машиностроение, 1979. 221 с.
13. Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков Б. А. Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны). М. : Наука, 1973. 232 с.
14. Явления переноса в низкотемпературной плазме / под ред. А. В. Лыкова и др. Минск : Наука и техника, 1969. 248 с.
15. Патент России RU 2276840, МКИ H05H1/26, C23C4/00, 20.05.2006. Электродуговой плазмотрон Саунина / Саунин В. Н. Заявл. 07.07.2004 ; Опубл. 20.05.2006. Заявка № 2004120804/06.
16. Патент № 2009027 Способ нанесения покрытий на внутренние поверхности цилиндрических изделий и устройство для его осуществления / Иванченко А. Ф., Лавриненко М. З., Мельник Б. И. и др. Заявл. 18.10.1991 ; опубл. 15.03.1994.
17. ВУ 8930 U 2013.02.28 Плазмотрон для нанесения покрытия на внутренние поверхности деталей.

18. Плазмотрон F1 компании innatech.ru (производители: Dinse – www.dinse.eu, АМТ – www.amt-ag.net).

References

1. Khasuy A. *Tekhnika napyleniya* [Spraying technique]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975, 288 p.
2. Kudinov V. V. *Plazmennye pokrytiya* [Plasma coatings]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 270 p.
3. Kudinov V. V., Ivanov V. M. *Naneseniye plazmoy tugoplavkikh pokrytiy* [Plasma application of refractory coatings]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981, 212 p.
4. Borisov Yu. S., KHarlamov Yu. A., Sidorenko S. L., Ardatovskaya E. N. *Gazotermicheskiyye pokrytiya iz poroshkovykh materialov: Spravochnik* [Gasothermic coating with powder materials: Reference book]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987, 544 p.
5. Kopylov V. I., Shatinskiy V. F. [Investigation of processes in plasma spraying contact zone and estimation of their parameters]. *Neorganicheskiye i organosilikatnyye pokrytiya*. 1975, P. 96–106 (In Russ.).
6. Puzryakov A. F. *Teoreticheskiyye osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya* [Theoretical Foundations of the Technology of Plasma Sputtering]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2008, 235 p.
7. Kharlamov Yu. A. [Factors influencing the adhesion strength of gas-thermal coatings]. *Zashchitnye pokrytiya na metallakh*. 1988, No. 22, P. 30–34 (In Russ.).
8. Polak L. S., Surov N. S. [Investigation of the interaction of powder particles with plasma flow in the nozzle]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 1969, No. 2, P. 19–29 (In Russ.).
9. Mikheev A. E., Kolmykov V. A. *Povysheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik poverkhnostey elementov konstruktivnykh letatel'nykh apparatov. Avtomatizatsiya protsessov obrabotki* [Upgrading of operational characteristics of aircraft components' surfaces. Automation of treatment processes]. Moscow, MAKS Press Publ., 2002, 224 p.
10. Mikheev A. E., Statsura V. V., Nikushkin N. V. [Equipment for high-quality gas-thermal coating application]. *III otraslevaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Primeneniyye gazotermicheskikh pokrytiy v mashinostroyenii"* [III Industry science and technology conference "Application of gas-thermal coatings in mechanical engineering"]. Moscow, 1990, P. 84–87 (In Russ.).
11. Mikheyev A. E., Statsura V. V., Ivasev S. S., Gim A. V. [Processing of refractory oxides in low-temperature plasma]. *Sb. nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Materialy i tekhnologii XXI veka"* [Proceedings of Russian science and technical conference "Materials and technologies of the XXI century"]. Penza, 2001, P. 123–125 (In Russ.).
12. Donskoy A. V., Klubnikin V. S. *Elektroplazmennyye protsessy i ustanovki v mashinostroyenii* [Electroplasma processes and equipment in mechanical engineering], Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1979, 221 p.
13. Zhukov M. F., Smolyakov V. Ya, Uryukov B. A. *Elektrodugovye nagrevateli gaza (plazmotrony)* [Electric arc gas heaters (plasmotrons)]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 232 p.
14. *Yavleniya perenosa v nizkotemperaturno-y plazme* [Transference phenomena in low-temperature plasma]. Ed. A.V. Lykova et al. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1969, 248 p.
15. Saunin V. N. *Elektrodugovoy plazmotron Saunina* [Saunin electric arc plasmatron]. Patent RF, No. 2276840, 2006.
16. Ivanchenko A. F., Lavrinenko M. Z., Mel'nik B. I., Prisevok A. F., Sannikov V. A., Solovey A. I., Fedortsev V. A. *Sposob naneseniya pokrytiy na vnutrennie poverkhnosti tsilindricheskikh izdeliy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of coating inner surfaces of cylinders and device for the coating application]. Patent No. 2009027, 1994.
17. BY 8930 U 2013.02.28 Plasmatron for coating internal surfaces of component parts.

18. FI plasma torch of innatech.ru (manufacturers: Dinse – www.dinse.eu, АМТ www.amt-ag.net).

© А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко, 2020

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: gim007@gmail.com.

Якубович Иван Олегович – аспирант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: flversin@mail.ru.

Руденко Михаил Сергеевич – инженер; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com.

Miheev Anatolii Egorovich – D. Sc., Professor, head of the Department of Flying vehicles; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.

Girn Aleksei Vasilyevich – Cand. Sc., associate professor, associate professor of the Department of Flying vehicles; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: gim007@gmail.com.

Yakubovich Ivan Olegovich – postgraduate student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: flversin@mail.ru.

Rudenko Mikhail Sergeevich – engineer; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: mister.m.rudenko@gmail.com.