

УДК 621.793

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-194-200

Для цитирования: Напыление покрытий плазмотроном с подачей порошка спутно плазменному потоку / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, И. О. Якубович, М. С. Руденко // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. С. 194–200. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-194-200.

For citation: Mikheev A. E., Girn A. V., Yakubovich I. O., Rudenko M. S. Spraying plasmatron coatings with powder supply to plasma flow // Siberian Aerospace Journal. 2021, Vol. 22, No. 1, P. 194–200. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-194-200.

Напыление покрытий плазмотроном с подачей порошка спутно плазменному потоку

А. Е. Михеев¹, А. В. Гирн¹, И. О. Якубович², М. С. Руденко¹

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²АО «Красмаш»

Российская Федерация, 660123 г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 29

E-mail:michla@mail.ru

Эффективность использования энергии плазмы при нанесении покрытий во многом определяется конструкцией плазмотрона. Основное отличие разработанного плазмотрона ПМ-1 заключается в подаче транспортирующего газа с порошком спутно плазменному потоку, что позволяет обеспечить более эффективный и равномерный прогрев напыляемого материала. В данной работе представлены результаты измерения коэффициента использования материала (КИМ), являющегося важной и показательной характеристикой плазмотронов, показывающей их экономичность и производительность, рассчитаны затраты на электроэнергию и проведены исследования напыленных образцов на термоудар.

Ключевые слова: плазмотрон, технологический режим, теплозащитное покрытие, образцы, напыление, плазменная струя, коэффициент использования материала.

Spraying plasmatron coatings with powder supply to plasma flow

A. E. Mikheev¹, A. V. Girn¹, I. O. Yakubovich², M. S. Rudenko¹

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii Rabochi Prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²JSC “Krasmach”

29, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660123, Russian Federation

E-mail:michla@mail.ru

The efficiency of using plasma energy when applying coatings is largely determined by the design of the plasmatron. The main difference of the developed plasmatron PM-1 is the supply of transporting gas with powder to the plasma flow, which allows for a more efficient and even heating of the sprayed material. This paper presents the results of measuring the efficiency of the use of material, which is an important and indicative characteristic of plasmatrons, showing their economy and productivity, calculated the cost of electricity and conducted studies of sprayed samples for thermal shock.

Keywords: plasmatron, process mode, heat-protective coating, samples, spraying, plasma jet, material usage factor.

Введение. Целью данной работы является отработка технологических режимов нанесения теплозащитных покрытий с применением плазмотрона ПМ-1 и сравнение характеристик нанесенных покрытий с показателями, полученными на плазмотроне F4. Применение покрытий, защищающих от воздействия высоких температур, эрозионного и абразивного износов, воздействия нейтронных потоков, позволяют в большей мере сохранять конструкции от разрушений. Для этой цели многие предприятия аэрокосмической отрасли широко используют плазменное напыление покрытий [1–13].

К достоинствам метода плазменного напыления можно отнести следующие характеристики: высокую температуру струи, позволяющую наносить тугоплавкие материалы; значительную производительность, простоту технологии, относительно низкую себестоимость, хорошие показатели прочности сцепления покрытия с подложкой, возможность обработки деталей различной конфигурации и габаритов. Процесс является многофакторным и позволяет в широких пределах управлять качеством покрытий на основе оптимизации режимов напыления.

Экспериментальная часть. Эффективность использования энергии плазмы при нанесении покрытий во многом определяется конструкцией плазмотрона. Конструкция плазмотрона ПМ-1 со схемой подачи транспортирующего газа с порошком спутно плазменному потоку представлена в работе [1]. Предварительно проведенные исследования на плазмотроне ПМ-1 показали его некоторые преимущества по сравнению со стандартным плазмотроном F4. Но для плазмотрона ПМ-1 не были определены основные технологические параметры его эксплуатации и не все характеристики нанесенных покрытий исследованы.

В табл. 1 представлена подводимая мощность к плазмотрону F-4, которая находится в пределах от 20 до 52 кВт.

Таблица 1

Рассчитанные значения мощности

Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Мощность, кВт
200	113,221	22,6442
300	100,254	30,0762
400	91,964	36,7856
550	83,585	45,97175
650	79,499	51,67435

Так как плазмотрон ПМ-1 является не до конца изученным на энергетические параметры, была поставлена задача проверить его при более низких плотностях тока (до 200 А). Основное отличие плазмотрона ПМ-1 – это подача транспортирующего газа с порошком спутно плазменному потоку, что позволяет обеспечить более эффективный и равномерный прогрев напыляемого материала. У плазмотрона F-4 подача порошка осуществляется под срез сопла. В качестве напыляемого материала применяли оксид алюминия, материал образцов сталь 45. Для сглаживания коэффициентов термического расширения использовали подслои следующего состава (40% Al_2O_3 + 60% NiCr).

Основные параметры напыления на плазмотроне ПМ-1 и F4 представлены в табл. 2 и 3.

Плазмотроны устанавливались на шестиосный манипулятор KUKA. Движение плазмотронов осуществлялось по рассчитанной траектории, представленной на рис. 1.

Для исключения повторных переверотов образцов была рассчитана и подобрана схема с возвратным движением плазмотрона. Таким способом покрытие наносится ровным слоем.

Таблица 2

Входные параметры напыления плазмотроном ПМ-1

Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Расход аргона, л/мин	Расход водорода, л/м	Скорость перемещения плазмотрона, м/с	Давление в порошковом питателе, Бар	Расстояние от среза сопла до поверхности образца, мм
200	150	40	4	0,2	4	90

Таблица 3

Входные параметры напыления плазмотроном F-4

Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Расход аргона, л/мин	Расход водорода, л/м	Скорость перемещения плазмотрона, м/с	Давление в порошковом питателе, Бар	Расстояние от среза сопла до поверхности образца, мм
650	150	30	6	0,2	4	90

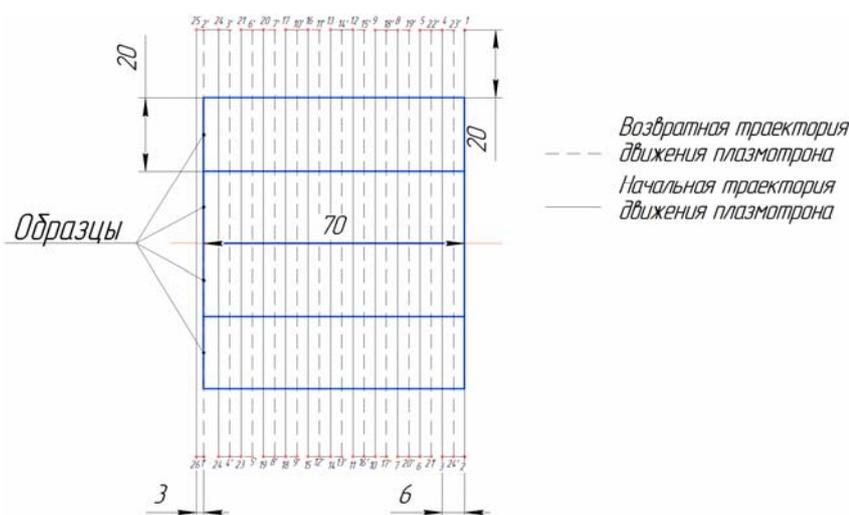


Рис. 1. Оптимальная траектория плазмотрона

Fig. 1. Optimal trajectory of the plasmotron

Ранее проводимые сравнения качества получаемых покрытий, напыляемых разными плазмотронами, проводили по трём основным свойствам, характеризующим качество покрытий, а именно: прочности сцепления с основой, толщине и пористости [1].

В данной работе представлены результаты измерения коэффициента использования материала (КИМ), являющегося важной и показательной характеристикой плазмотронов, показывающей их экономичность и производительность.

При сравнении двух плазмотронов ПМ-1 и F-4, по результатам исследований, полученных ранее, было принято решение плазмотрон ПМ-1 испытывать на низких энергетических параметрах (до 200 А), а F-4 на высокоэнергетических (до 550 А). Плазмотрон ПМ-1, благодаря своей конструкции и способу подачи порошка, показывает хорошие результаты, даже на небольших мощностях.

Время напыления на каждый образец – 60 с. Зная начальный вес образца и его конечный после напыления определяем количество нанесенного материала на образец. Сравнивая с общим весом расхода порошка при разных режимах работы порошкового питателя определяем КИМ.

Расчёт КИМ производился по формуле

$$\text{КИМ} = ((m_2 - m_1) / m_2) \cdot 100 \%,$$

где m_1 – масса образца до плазменного напыления; m_2 – масса образца после плазменного напыления.

Для определения зависимости расхода порошка при разных значениях скорости вращения диска в питателе были проведены специальные эксперименты, результаты которых представлены на рис. 2.



Рис. 2. График зависимости расхода порошка от частоты вращения диска

Fig. 2. Graph of powder consumption versus disk rotation frequency

Были выбраны 6 образцов, 3 из которых использовались для напыления «горок» плазмотроном ПМ-1, другие 3 – плазмотроном F-4. Для напыления на образцы плазмотроном ПМ-1 был выбран технологический режим, который представлен в табл. 2. При определении КИМ подслои на образцы не напылялись.

В плазмотроне F4 при 200 А порошок не проплавляется, и, соответственно, результаты сравнения будут не адекватными, поэтому для плазмотрона F4 мы подбирали режимы, указанные в табл. 4, а для ПМ-1 – 200 А (табл. 5).

Таблица 4

Полученные результаты КИМ для плазмотрона F4

Номер образца	Сила тока, А	Вес, гр		Обороты диска, об/мин	Разница напыленного оксида алюминия, гр	Коэффициент использования материала, %
		После абразивной обработки	С напыленным слоем оксида алюминия			
1	550	143,6	147,61	2	4,01	21,22
2	550	157,63	167,13	3	9,5	29,87
3	550	143,28	158,56	4	15,28	37,54

Таблица 5

Полученные результаты КИМ для плазмотрона ПМ-1

Номер образца	Сила тока, А	Вес, гр		Обороты диска, об/мин	Разница напыленного оксида алюминия, гр	Коэффициент использования материала, %
		После абразивной обработки	С напыленным слоем оксида алюминия			
4	200	157,54	166,03	2	8,49	44,92
5	200	159,05	176,15	3	17,1	53,77
6	200	163,13	185,96	4	22,83	56,09

Результаты измерения КИМ представлены на рис. 3. Как видно из графика, КИМ при напылении плазматроном ПМ-1 в среднем на 15–18 % больше, чем у F4. Результаты расчета затрат на электроэнергию при напылении плазматроном ПМ-1 показали, что они примерно в 2 раза меньше затрат на F-4 (табл. 6).

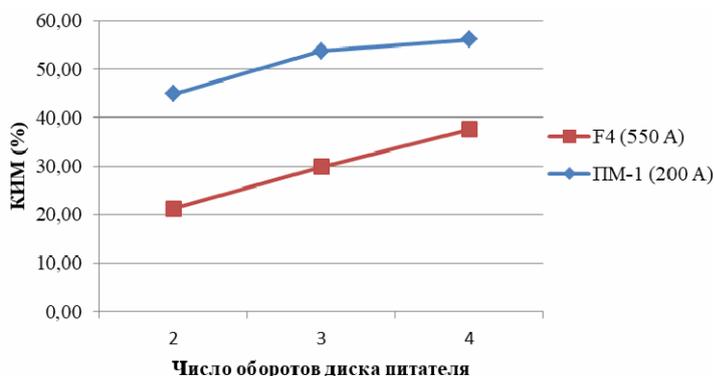


Рис. 3. График зависимости КИМ от числа оборотов питателя

Fig. 3. Graph of dependence of MUR rate on the number of revolutions of the feeder

Таблица 6

Затраты на электроэнергию

Стоимость 1 кВт/ч принята равной 4 руб.				
Плазматрон	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Мощность, кВт	Экономические затраты за 1 час работы плазматронов, руб.
ПМ-1	200	150	30	120
	300	150	45	180
F-4	550	150	82,5	330
	650	150	97,5	390

Также были проведены исследования напыленных образцов на термоудар. Температура, требуемая для прогрева покрытия и самого образца, – не менее 700 °С. Было проведено 10 циклов нагрев – охлаждение. Нагрев производился в электропечи. По исходам каждого цикла покрытия проверялись на дефекты и общее состояние. В ходе проделанной работы обнаружили небольшие сколы (рис. 4) покрытия по кромкам и изменение цвета покрытия. В целом все образцы F-4 и ПМ-1 выдержали испытания на жаропрочность, при этом дефекты были минимальны.



Рис. 4. Дефекты при испытаниях на жаропрочность

Fig. 4. Defects in heat resistance tests

Заключение. Результаты данной работы дополняют преимущества плазматрона ПМ-1 в сравнении с F4, а именно повышенный на 15–18 % КИМ, примерно в 2 раза меньше затраты на электроэнергию при одинаковой стойкости покрытий на термоудар.

Библиографические ссылки

1. Михеев А. Е., Гирн А. В., Раводина Д. В., Якубович И. О. Плазматрон для нанесения покрытий из тугоплавких дисперсных материалов // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 2. С. 365–372.
2. Патент России RU 2672054, МПК H05N 1/26, C23C 4/ 00, 09.11. 2018. Электродуговой плазматрон для нанесения покрытий из тугоплавких дисперсных материалов / Михеев А. Е., Гирн А. В., Амельченко Н. А. Заявл. 10.01.2018. Опубл. 09.11.2018. Заявка: 2018100953.
3. Хасуй А. Техника напыления. М. : Машиностроение, 1975. 288 с.
4. Кудинов В. В, Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М. : Машиностроение. 1981. 212 с.
5. Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардаговская, Ю. С. Борисов. Киев : Наук. думка, 1987. 544 с.
6. Пузряков А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления : учеб. пособие по курсу технология конструкций из металлокомпозитов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 235 с.
7. Харламов Ю. А. Факторы, влияющие на адгезионную прочность газотермических покрытий // Защитные покрытия на металлах. Киев, 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 : материалы III Отраслевой науч.-техн. конф. М., 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 века : сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. Пенза, 2001. С. 123–125.
12. Донской А. В., Клубник В. С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л. : Машиностроение, Ленингр. от-ние., 1979. 221 с.
13. Жуков М. Ф., Смоляков В. Я., Урюков Б. А. Электродуговые нагреватели газа (плазматроны). М. : Наука, 1973. 232 с.

References

1. Mikheev A. E., Girn A. V., Ravodina D. V., Yakubovich I. O. Plasmatron for coating with refractory dispersed materials // Siberian Journal of Science and Technology. 2018. T. 19, No. 2. P. 365–372.
2. RU 2672054 patent of Russia, MPK N05N 1/26, S23S 4/00, 09.11. 2018. Electrode-head plasmatron for coating with refractory dispersed materials / Mihei A. E., Girn A. V., Amelchenko N. A. 10.01.2018. Publ. 09.11.2018. Application: 2018100953.
3. Khasuy A. Spraying technique. Moscow, Engineering, 1975. 288 p.
4. Kudinov V. V, Ivanov V. M. Plasma application of refractory coatings. Moscow, Engineering. 1981. 212 s.

5. Gas-thermal coverings from powder materials : reference book / Yu. A. Kharlamov, S. L. Sidorenko, E. N. Ardatovskaya, Yu. S. Borisov. Kiev, Naukova Duma, 1987. 544 p.
6. Pusryakov A. F. Theoretical foundations of plasma sputtering technology: Training manual on the course technology of metal composite structures. 2nd edition, redesign. and additional / A. F. Puzyakov. Moscow, Publishing House MSTU named after N. E. Bauman, 2008. 235 p.
7. Kharlamov Yu. A. Factors affecting the adhesion strength of gas-thermal coatings / Yu. A. Kharlamov // Protective coatings on metals. Kiev, 1988. Out. 22. P. 30–34.
8. Surov N. S., Polak L. S. Study of the interaction of powder particles with plasma flow in the nozzle // Physics and chemistry of materials processing. 1969, № 2. P. 19–29.
9. Mikheev A. E., Kolmykov V. A. Improving the operational characteristics of aircraft structural elements. Automation of processing processes / A. E. Mikheev, V. A. Kolmykov. Moscow, MAKS Press, 2002. 224 s.
10. Mikheev A. E., Statsura V. V., Nikushkin N. V. Equipment for the application of quality gas-thermal coatings // Application of gas-thermal coatings in mechanical engineering : III branch scientific and technical conference. Moscow, 1990. P. 84–87.
11. Treatment of refractory oxides in low-temperature plasma / V. V. Statsura, S. S. Ivasev, A. V. Girn, A. E. Mikheev // Materials and Technologies of the 21st Century : Sat. scientific works of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Penza, 2001. P. 123–125.
12. Donskoy A. V., Klubnikin V. S. Electropasm processes and installations in mechanical engineering. Leningrad, Engineering, Leningr. from., 1979. 221 p.
13. Electric arc gas heaters (plasmatrons) / M. F. Zhukov, V. Ya. Smolyakov, B. A. Uryukov. Moscow, Science, 1973. 232 p.

© Михеев А. Е., Гирн А. В., Якубович И. О., Руденко М. С., 2021

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

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: girn007@gmail.com.

Якубович Иван Олегович – главный метролог; АО «Красмаш».

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

Mikheev Anatoly Yegorovich – Dr. Sc., Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: michla@mail.ru.

Alexey Vassilyevich Girn – Cand. Sc., Associate Professor; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: girn007@gmail.com.

Yakubovich Ivan Olegovich – Chief metrologist; JSC “Krasmach”.

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