

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-10-16



УДК 621.793.74

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ, НАПЫЛЕННЫХ В РЕЖИМЕ МОДУЛЯЦИИ МОЩНОСТИ ДУГИ

✉¹**Кадырметов Анвар Минирович**
д.т.н., зав. кафедрой машиностроительных технологий Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ) e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Снятков Евгений Вячеславович
к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ)

Плахотин Александр Александрович
аспирант Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ)

Мандрыкин Игорь Александрович
Аспирант Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ)

Аннотация.

В работе показано, что с помощью модуляции плазменной дуги, а также использования воздушно-газовой смеси (воздух с пропан-бутаном) можно существенно повысить прочность связи покрытия с подложкой, коэффициент использования порошка, снизить газопроницаемость и повысить износостойкость плазменных порошковых покрытий.

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, ДВУХПОЛЯРНАЯ МОДУЛЯЦИЯ, ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВОЙ, ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ, СВОЙСТВА.

PROPERTIES OF PLASMA COATINGS SPRAYED IN ARC POWER MODULATION MODE

✉¹**Anvar M. Kadyrmetov**
Doctor of Tech. Sc., Professor Head. Department of Engineering Technologies, of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (RF) e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Evgeniy V. Snyatkov
Cand. of Tech. Sc., associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State Forestry Engineering University of G.F. Morozov, (RF)

Alexander A. Plahotin
graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (RF)

Igor A. Mandrykin
Graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (RF)

Annotation.

In this paper, it is shown that by modulating a plasma arc, as well as the use of an air-gas mixture (air with propane-butane), you can significantly increase the strength of the coating coating, the coefficient of use of the powder, reduce gas permeability and increase the wear resistance of plasma powder coatings.

Keywords: PLASMA SPRAYING, BIPOLAR MODULATION, COATING STRENGTH WITH BASE, GAS PERMEABILITY, PROPERTIES.

¹Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Влияние плазменной дуги, горящей в режиме модуляции тока, на энтальпийные и эрозионные характеристики плазмотрона освещено в работе [1]. Известно интенсифицирующее воздействие модулированного тока дуги плазмотрона на параметры процесса плазменного напыления [2-7]. В связи с этим представляет практический и теоретический интерес изучение влияния модулированного режима работы плазмотрона на физико-механические свойства порошковых покрытий. С точки зрения высокой податливости к внешним воздействиям наиболее приемлемым для этой цели является использование плазмотрона с самоустанавливающейся длиной дуги. Известно, что модуляция позволяет на определенных частотах увеличить длину дуги в 2 раза (с 40 до 59 мм) [1]. Поэтому длину анода выбрали равной 80 мм при диаметре отверстия 7 мм.

Известен эффективный метод повышения энтальпии плазмообразующего воздуха введением в него пропан-бутана. Этот метод имеет преимущества в сравнении с напылением в чистых газах (азоте, аргоне, водороде и т. д.), заключающиеся в высокой экономической эффективности; возможности повышения энтальпии плазменной струи на величину до 30 % без увеличения электрической мощности; возможности создания восстановительной плазменной среды, предотвращающей окисление напыляемых металлических частиц.

2 Материалы и методы

Для напыления покрытий был выбран порошок ПН55Т45 фракцией 40-63 мкм, а в качестве материала подложки – сталь 40. Прочность соединения покрытия с основой определялась методом отрыва конусного штифта по методике [8, 9]. Для измерения газовой проницаемости использовался метод перепада давления на исследуемом пористом материале [4]. Для этого в стальной цилиндр, перекрытый слоем напыленного покрытия толщиной h с площадью перекрытия S , подавался азот под давлением 0,5 МПа. Газопроницаемость θ определялась по падению давления ΔP в цилиндре за время t выражением

$$\theta = \frac{\Delta PS}{th}.$$

Скорость частиц оценивали экспериментально по фототрековой методике [8].

Эксперименты проводили с использованием плазмотрона ЭДП-104, имеющего непрофилированное цилиндрическое сопло-анод длиной 80 мм. Расход плазмообразующего воздуха составлял $1,5 \cdot 10^{-3}$ м³/с, электрическая мощность дуги – 30 кВт. Эффективный тепловой КПД нагрева воздушной плазмы составлял 65-70 %, что оценивалось с помощью калориметрирования воды, охлаждающей плазмотрон.

Напыление вели без модуляции на дистанции $H = 160$ мм в струе воздушной плазмы при расходе транспортирующего пропан-бутана $0,1 \cdot 10^{-3}$ м³/с, эжектирующего порошок на срезе сопла анода под углом 100° при скорости перемещения плазмотрона 0,015 м/с.

3 Результаты исследований

Измерения показали, что скорость напыляемых частиц в периферийной области плазменной струи составляет 20-50 м/с, а по оси струи – 70-100 м/с при расчетной средней скорости воздушной плазмы 400 м/с. Твердость покрытий HV при напылении на стандартном режиме составляла 560-640 кгс/мм², а при перегреве покрытий повышалась до 780-820 кгс/мм².

Введение $0,06 \cdot 10^{-3}$ м³/с пропан-бутана вместе с плазмообразующим воздухом в плазмотрон ЭДП-104 привело к дополнительному выделению 4-6 кВт тепловой мощности от сгорания углеводородов и росту скоростей напыляемых частиц на периферии до 50-100, а по оси струи – до 250-270 м/с. При этом расчетная скорость плазменной струи составила 600 м/с.

Сравнение данных рисунков 1 и 2, полученных без модуляции показывает, что добавление к плазмообразующему воздуху пропан-бутана с расходом $0,06 \cdot 10^{-3}$ м³/с приводит к ро-

сту адгезионной прочности покрытия с подложкой на отрыв σ от 19 до 30 МПа при $H = 160$ мм. Дальнейшее увеличение расхода пропан-бутана до $(0,08...0,1) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ приводит к снижению среднемассовой температуры струи на 25 % вследствие роста концентрации несгоревших непредельных углеводородов C_2H_4 и C_2H_2 , приводящего к снижению тепловыделения сгорания пропан-бутана и к падению прочности соединения покрытия с основой σ от 80-40 МПа до 12-8 МПа во всем интервале изменения H (рис. 1).

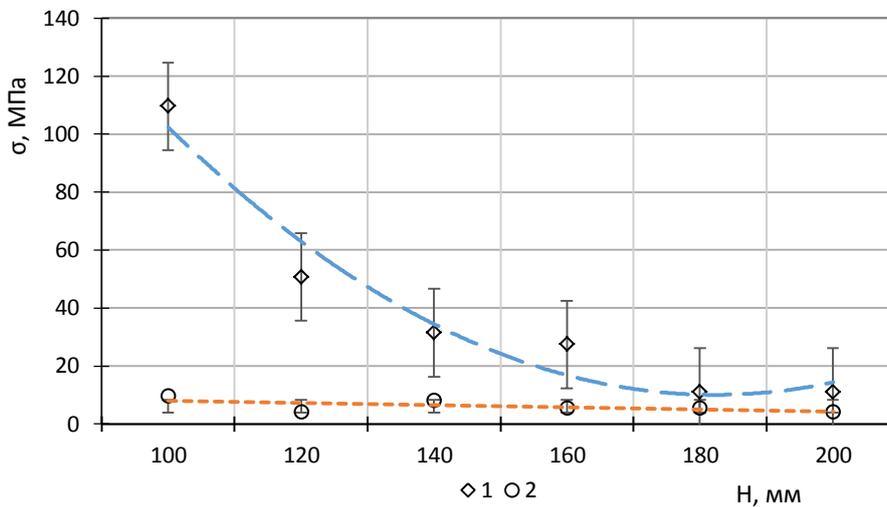
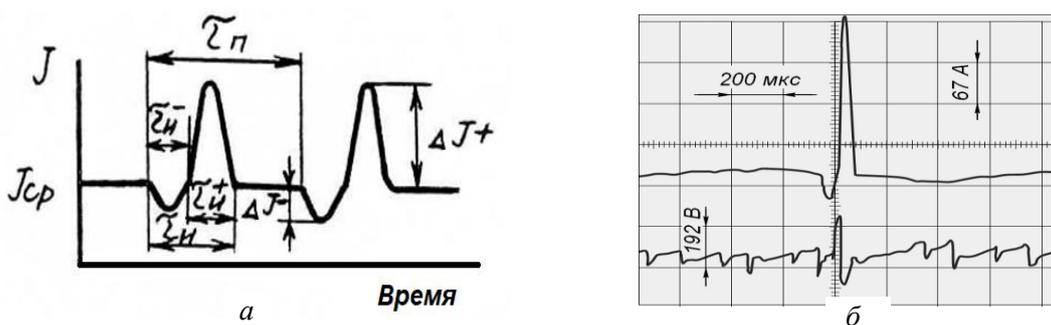


Рисунок 1 – Изменение прочности соединения покрытия с основой σ из порошка ПН55Т45 на стали 40 в зависимости от дистанции напыления H без модуляции при введении в плазмообразующий воздух ($1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) пропан-бутана: 1 – $0,06 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $(0,08-0,1) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

Модуляцию воздушной плазменной дуги осуществляли по двухполярной схеме комбинированными импульсами токов (рис. 2) с параметрами для первой и второй доли импульса соответственно $\Delta I^- = 120 \text{ А}$, $\tau^- = 60 \text{ мкс}$ и $\Delta I^+ = 500 \text{ А}$, $\tau^+ = 70 \text{ мкс}$.



$J_{\text{ср}}$ – средний ток дуги; t – время; τ_n – период пульсации тока; τ_n – суммарная длительность импульса тока

Рисунок 2 – Схема двухполярной модуляции тока дуги J плазмотрона (а) и пример осциллограммы тока и напряжения двухполярной модуляции (б)

Динамика изменения тока и напряжения комбинированного импульса характеризуется тем, что в момент возникновения импульса амплитуда импульса напряжения ΔU^- сначала в течение 5-10 мкс снижается на 150-190 В, после чего выходит на средний уровень 200 В, а затем после завершения импульса вычитания тока кратковременно в течение 5-10 мкс увеличивается на 250-300 В. Такое сложное поведение тока и напряжения в импульсе приводит к

тому, что в среднем комбинированный импульс мощности выделяет энергию в импульсе 3-4 Дж. Это в среднем добавляет выделение мощности в плазменной струе на величину от 4,2 кВт до 16,8 кВт в диапазоне частот модуляции от 1 кГц до 4 кГц.

Наряду с другими причинами такое добавление энергии, выражающееся в росте температуры и скорости частиц [3, 10], может объяснять влияние частоты модуляции ν на прочность соединения покрытия с основой σ и газопроницаемость θ (рис. 3 и 4).

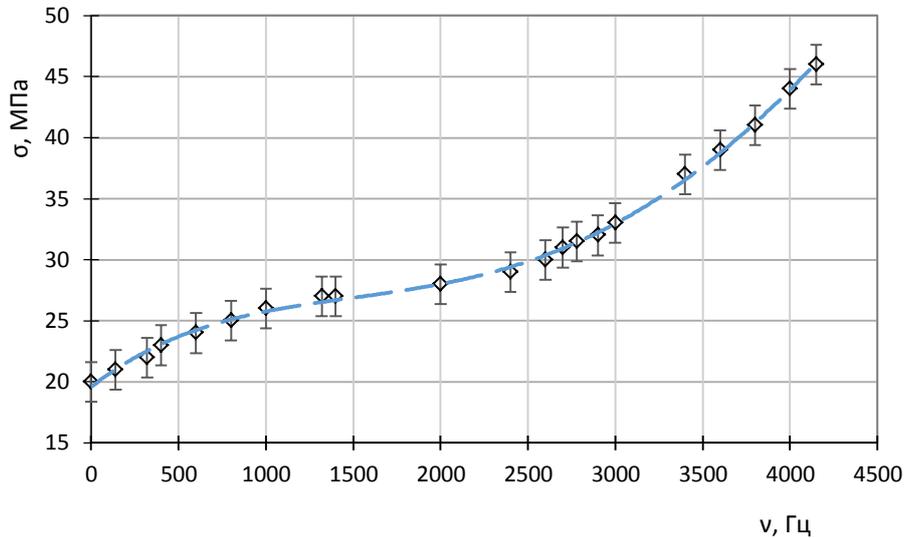


Рисунок 3 – Изменение прочности соединения покрытия с основой σ из порошка ПН55Т45 на стали 40 в зависимости от частоты модуляции ν при дистанции напыления $H = 160$ мм и плазмообразующем газе – воздухе

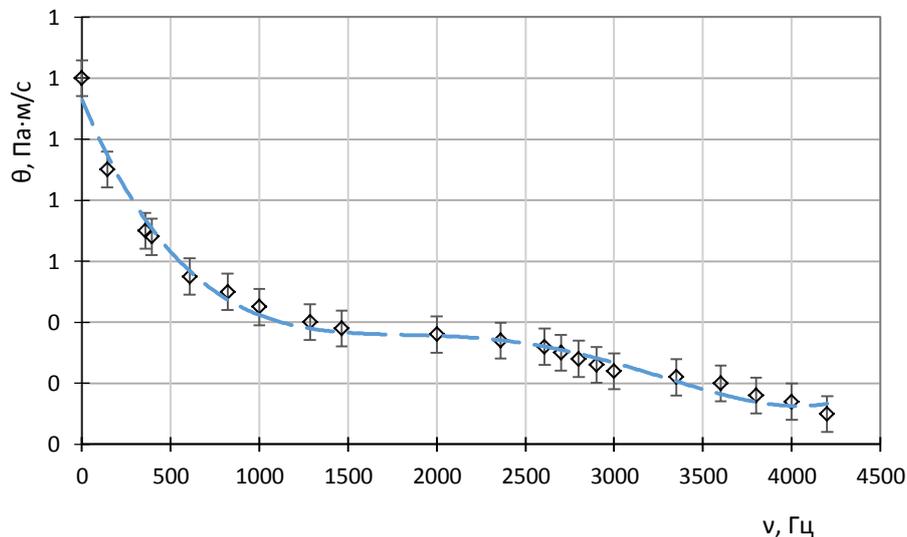


Рисунок 4 – Изменение газовой проницаемости θ покрытия из порошка ПН55Т45 на стали 40 в зависимости от частоты модуляции ν при дистанции напыления $H = 160$ мм и плазмообразующем газе – воздухе

4 Обсуждение и заключение

Добавление пропан-бутана также приводит к повышению температуры частиц и повышению скорости частиц до 250 м/с в сравнении со скоростями при использовании воздушной плазмы (100 м/с). Таким образом, сочетание модуляции с вводом в плазмообразую-

щий воздух пропан-бутана позволяет достигнуть прочность σ при детонационно-газовом напылении [11].

Полученные эффекты для прочности соединения покрытия с основой σ и газопроницаемости покрытия θ могут быть объяснены поведением расплавленной частицы в модулированной плазменной струе. Качественными предположениями этого для модулированной воздушной плазмы могут быть:

а) скорость частицы в воздушной струе с модуляцией составляет $V_{\text{ч}}$ более 10^2 м/с, а время пребывания ее в струе $t = H / V_{\text{ч}} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ с (для условий рис. 3 и 4);

б) плазменную струю и расплавленную частицу пронизывает поток ударных волн слабой интенсивности [3], возникающих с частотой, определяемой частотой модуляции плазменной дуги;

в) модуляция на вышеуказанных частотах приводит к существенному улучшению условий передачи энергии от источника питания к дуге и, как следствие этого, к росту импульса ударной волны;

г) вследствие разницы скоростей расплавленной частицы и ударной волны на поверхности частицы возникают большие градиенты давления, разрушающие каплю на множество мелких капель.

Прямые измерения диаметра частиц, распыленных в воду на режимах с модуляцией, показали уменьшение фракции частиц в интервале частот 650–4200 Гц более чем на порядок в сравнении с немодулированным режимом.

Уменьшение размеров частиц, с одной стороны, приводит к еще большему их разогреву и росту скорости, а с другой стороны, к уменьшению массы частиц. Это приводит к конкурирующим процессам изменения кинетической энергии расплавленных частиц, приводящим к нелинейному характеру изменения зависимостей на рисунках 3 и 4.

Повышение энтальпии плазменной струи на 30 % добавление пропан-бутана к плазмообразующему воздуху приводит к росту вязкости слоев плазмообразующего газа, вследствие чего режим истечения плазменной струи частично переходит из вихревого в ламинарный, способствует большей дальностью струи и равномерности параметров поперечного сечения струи [12, 13], обеспечивая высокий коэффициент использования порошка.

Таким образом, показано, что с помощью модуляции плазменной дуги, а также использования воздушно-пропан-бутановой смеси можно существенно повысить адгезию, коэффициент использования порошка и снизить газопроницаемость плазменных порошковых покрытий.

Список литературы

- 1 Гутман Б. Е. Влияние модуляции плазменной дуги на некоторые параметры технологии напыления. – Сварочное производство. – 1984. – № 9. – С. 17-19.
- 2 Kadyrmetov, A. M. Intensification of energy exchange in a heterogeneous plasma jet by modulation of the electric parameters of the plasma-spraying process / A. M. Kadyrmetov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – July. – Vol. 86. – №.4. – pp. 789-797 / (www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s10891-013-0896-x).
- 3 Кадырметов, А. М. Интенсификация энергообмена в гетерогенной плазменной струе при модуляции электрических параметров процесса плазменного напыления / А. М. Кадырметов // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86. – № 4. – С. 739-746.
- 4 Кадырметов, А. М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров : монография / А. М. Кадырметов. – Воронеж : Научная книга, 2013. – 260 с.
- 5 Асонов, А. Н. Устойчивость горения плазменной дуги в импульсном режиме / А. Н.

Асонов, А. В. Николаев, Н. Н. Рыкалин // Физика и химия обработки материалов. – 1969. – № 5. – С 140-143.

6 Рыкалин, Н. Н. Энергетические характеристики дугового плазматрона в импульсном режиме при модуляции тока / Н. Н. Рыкалин, А. В. Николаев, А. Н. Асонов // Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы : Тр. IV Всесоюз. конф. по физике и генераторам низкотемпературной плазмы. – Алма-Ата, 1970. – С. 500-504.

7 Алешин, Н. Ф. Двухрежимная модель течения в канале с электрической дугой : Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Минск, 1987. – 18 с.

8 Хасуй Х. Техника напыления. М. : Машиностроение, 1975, – с. 151.

9 Тушинский, Л. И. Методы исследования материалов : Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов, А. О. Токарев, В. И. Синдеев. – М. : Мир, 2004. – 384 с.

10 Кадырметов, А. М. Особенности процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 4(52) . – С. 25-28.

11 Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М. : Наука, 1978. – 234 с.

12 Карп, И. Н. Высокоэнтальпийные плазматроны на продуктах сгорания природного газа / И. Н. Карп, Н. Н. Гринценко, С. В. Петров // Плазма 77 : Материалы VII Всесоюз. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы : В 3 т. – Алма-Ата, 1977. – Т. 1. – С. 86-90.

13 Петров, С. В. Плазменное газозвушное напыление / С. В. Петров, И. Н. Карп. – Киев : Наукова думка, 1993. – 495 с.

References

1 Gutman B. E. Influence of the modulation of plasma arc to some spraying technology parameters. – Welding production. – 1984. – № 9. – P. 17-19.

2 Kadyrmetov, A. M. Intensification of energy exchange in a heterogeneous plasma jet by MODulation Of the Electric Paramers of the Plasma-Spraying Process / A. M. Kadyrmetov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2013. – JULY. – Vol. 86. – №.4. – PP. 789-797 / (www.springerlink.com/openurl.asp?Genre = Article & ID = DOI: 10.1007 / S10891-013-0896-X).

3 Kadyrmetov, A. M. Intensification of the energy exchange in a heterogeneous plasma jet when modulating the electrical parameters of the plasma spraying process / A. M. Kadyrmetov // Engineering and magazine. – 2013. – Т. 86. – №. 4. – P. 739-746.

4 Kadyrmetov, A. M. Technological support management of plasma coating processes in the modulation mode of electrical parameters : Monograph / A. M. Kadyrmetov. – Voronezh : Scientific book, 2013. – 260 s.

5 ASONS, A. N. Sustainability of the globe of plasma arc in impulse mode / A. N. Asonov, A. V. Nikolaev, N. N. Rykulin // Physics and chemistry of materials processing. – 1969. – № 5. – from 140-143.

6 Rykalin, N. N. Energy characteristics of arc plasma torus in pulse mode when modulating current / N. N. Rykalin, A. V. Nikolaev, A. N. Assonov // Physics, technique and the use of low-temperature plasma : Tr. IV All-Union. conf. In physics and low-temperature plasma generators. – Alma-Ata, 1970. – P. 500-504.

7 Aleshin, N. F. Twire-mode flow model in a channel with an electric arc : author. dish. ... Cand. Fiz.-floor science – Minsk, 1987. – 18 p.

8 Hasui H. Spraying technique. M. : Mechanical Engineering, 1975 – p. 151.

9 Tushinsky, L. I. Methods of research of materials: Structure, properties and processes of

application of inorganic coatings / L. I. Tushinsky, A. V. Plichov, A. O. Tokarev, V. I. Sindev. – M. : Mir, 2004. - 384 p.

10 Kadyrmetov, A. M. Features of the process of air-plasma application and hardening of coatings / A. M. Kadyrmetov, G. A. Drykohev // Strengthening technologies and coatings. – 2009. – № 4 (52). – P. 25-28.

11 Shorshorov M. Kh., Kharlamov Yu. A. The physico-chemical basis of the detonation-gas spraying of coatings. M. : Science, 1978. – 234 p.

12 Karp, I. N. Highlyenthalpy plasma jets on products of combustion of natural gas / I. N. Karp, N. N. Greensco, S. V. Petrov // Plasma 77 : Materials VII All-Union. conf. According to low-temperature plasma generators : in 3 tons – Alma-Ata, 1977. – Т. 1. – P. 86-90.

13 Petrov, S. V. Plasma gas-air spraying / S. V. Petrov, I. N. Karp. – Kiev : Nukova Dumka, 1993. - 495 p.

© Кадырметов А.М., Снятков Е.В., Плахотин А.А., Мандрыкин И.А., 2021