



УДК 621.793.74: 519.873

Г.И. Трифонов

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени
профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

г. Воронеж, Россия

E-mail: trifonov_gi@mail.ru

Дата поступления 22.05.2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ОТ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЛАЗМОТРОНА

Аннотация

Со стороны экономической целесообразности восстановление деталей, в частности с помощью газотермической обработки, обусловлено тем, что около половины деталей, поступающие на ремонтные работы, могут быть использованы после восстановления при его себестоимости на 15...30% от цены новых деталей. При этом стоит отметить, что лишь 5...9% деталей не подлежат восстановлению. Одним из перспективных способов восстановления изношенных деталей является плазменное напыление. В данной статье разработаны уравнения определения кинематических режимов плазменного напыления, в частности, скорости перемещения плазмотрона для сложнопрофильных поверхностей деталей. Кроме того, смоделирована система уравнений для прогнозирования распространения тепла в деталях при плазменном напылении. Разработана система уравнений по прогнозированию толщины нанесенного слоя после плазменного напыления на поверхности деталей.

Ключевые слова: плазменное напыление, теплофизические параметры, температура нагрева, толщина напыления, кинематика, плазмотрон.

Введение

На сегодняшний день технология плазменного напыления является одним из самых технологичных, экономичных и эффективных процессов нанесения износостойкого покрытия с помощью высококонцентрированного потока энергии. Краткая характеристика показателей напыления и процесса формирования плазменного слоя представлены на рисунке 1.

При контакте плазменной струи с поверхностью детали протекают различные физико-химические и теплофизические процессы. Одним из основополагающих параметров, характеризующих процесс плазменного напыления и качество получаемого покрытия, является температура нагрева поверхности восстанавливаемой детали. При этом необходимо учитывать, что нанесение множества слоев с контроли-

руемой геометрией формообразования возможно при условии точного математического прогнозирования. Из чего следует, что в областях методологического планирования при использовании плазменных технологий можно вынести конкретные проблемные вопросы, относящиеся к конкретной детали и её функциональному слою [1-3].

Данная работа посвящена исследованию физико-механических и теплофизических параметров плазменного напыления и их зависимости от траектории перемещения плазмотрона.

Цель данной работы состоит в разработке системы уравнений для прогнозирования распространения тепла в сложнопрофильных деталях при плазменном напылении, а также системы уравнений по прогнозированию толщины нанесенного плазменного слоя.

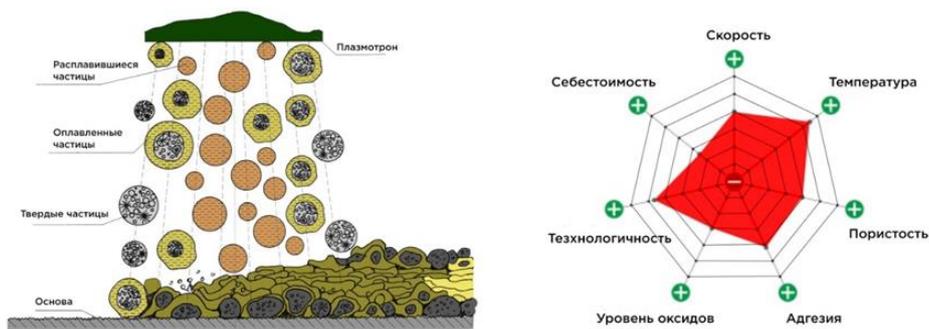


Рисунок 1. Характеристика процесса плазменного напыления

Основная часть

Уравнение процесса распространения тепла от плазменной струи в обрабатываемой детали определяется [4,5]:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi\lambda v} \times \frac{\exp(z_1/(4at))}{\sqrt{t(t_0 + t)}} \quad (1)$$

где, T – температура нагрева детали (K); T_0 – температура тела (K); y, z_1 – глубина пятна нагрева (m); t – время ($сек$); t_0 – длительность распространения фиктивного источника ($сек$); Q – эффективная мощность плазменной дуги (Bm); v – скорость перемещения инструмента (плазматрона) (m/c); λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности.

На основе ряда работ [6-7] было получено уравнение для расчета толщины плазменного слоя детали:

$$H = \frac{\delta \times \sqrt{\pi\rho_1}}{v} \times \left\{ \exp\left(-\left(x^2/\rho_1^2\right)\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\} \quad (3)$$

где, δ – коэффициент, характеризующий скорость увеличения толщины покрытия в центре пятна распыла; A – шаг смещения (m).

Как видно из формул (1) и (3) одним из важных факторов, влияющих на величину толщины наносимого слоя и температуру нагрева детали при плазменном напылении, является скорость перемещения плазматрона v относительно обрабатываемой поверхности.

Поэтому, опираясь на работы [8-10], была разработана таблица определения скорости перемещения плазматрона для различных поверхностей деталей.

$$H_{(x,y)} = H_{(x)} = H_{max} \times \exp\left(-\left(x^2/\rho_1^2\right)\right) \quad (2)$$

где, H_{max} – высота напыленного покрытия (m); x – координата движения сопла плазматрона относительно плоскости напыления детали (m); ρ_1 – радиус пятна распыла (m).

Как показывает практика детали промышленности, требующие восстановления и упрочнения, имеют значительные габаритные размеры. Вследствие этого при напылении контактной поверхности количество рядов нанесенного плазменного покрытия будет наверняка более трех. Поэтому для трех и более рядов напыления, высота напыленного слоя может быть рассчитана по формуле [7]:

где, ρ, φ, z – цилиндрические координаты; β – шаг спирали траектории перемещения центра пятна напыления по поверхности; β_z – шаг проекции траектории перемещения центра пятна напыления на ось z ; $tg\psi$ – угол раскрытия конуса; R – радиус цилиндра (m); D – внешний диаметр винтовой линии (m); D_1 – диаметр винтовой линии не подвергаемый плазменной обработке (m); φ_1 – угол крутизны подъема; α – угол выреза; $d\varphi/dt$ – скорость вращения обрабатываемой детали (m/c); dz/dt – продольная скорость перемещения инструмента (m/c); $d\rho/dt$ – радиальная скорость перемещения инструмента (m/c).

Определение скорости перемещения плазмотрона

№ п/п	Типовая поверхность	Уравнение скорости перемещения плазмотрона
1.	Дисковая	$v_d = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^2 + \beta\varphi^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2}$
2.	Коническая	$v_k = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^2 + (\operatorname{tg}\psi\beta_z\varphi)^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$
3.	Цилиндрическая	$v_u = \sqrt{R^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$
4.	Винтовая	$v_e = \sqrt{\left(\frac{\pi\left(\sqrt{D^2(1+\operatorname{tg}\varphi_1)} - D_1^2(1+\operatorname{tg}\varphi_1)\right)}{\alpha}\right)^2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$

Схема напыления приведенных типовых поверхностей деталей представлена на рисунке 2.

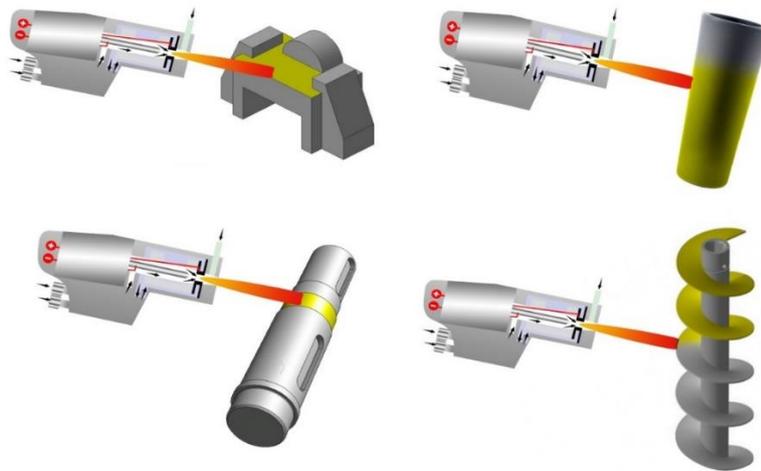


Рисунок 2. Схема напыления типовых поверхностей деталей машин

Результаты и их обсуждение

С помощью формулы (1) можно спрогнозировать температуру нагрева детали, но для более точного значения температуры при плазменном напылении стоит внести некоторые математические корректировки.

Опираясь на результаты работ [11-13] уравнение для определения коэффициента теплопроводности:

$$a = \lambda / c\rho_{nn} \quad (4)$$

где, c – теплопроводность (Bm/mK); ρ_{nn} – плотность плазменного покрытия ($кг/м^3$).

Коэффициент теплопроводности определим с помощью уравнения Лихтенкера [14,15]:

$$\lambda = \lambda_M^{1-P} \times \lambda_B^P \quad (5)$$

Учитывая внесенные математические корректировки и смоделированные уравнения скорости перемещения плазмотрона, выводим систему уравнений для прогнозирования температуры нагрева деталей при плазменном напылении:

$$\begin{aligned}
T_o &= \frac{Q}{2\pi\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P\sqrt{(d\rho/dt)^2 + \beta\varphi^2(d\varphi/dt)^2}} \times \frac{\exp(z_1c\rho_{nn}/(4t\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P))}{\sqrt{t(t_0+t)}} + T_0 \\
T_u &= \frac{Q}{2\pi\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P\sqrt{R^2(d\varphi/dt)^2 + (dz/dt)^2}} \times \frac{\exp(z_1c\rho_{nn}/(4t\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P))}{\sqrt{t(t_0+t)}} + T_0 \\
T_k &= \frac{Q}{2\pi\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P\sqrt{(d\rho/dt)^2 + (tg\psi\beta_z\varphi)^2(d\varphi/dt)^2 + (dz/dt)^2}} \times \frac{\exp(z_1c\rho_{nn}/(4t\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P))}{\sqrt{t(t_0+t)}} + T_0 \\
T_e &= \frac{Q}{2\pi\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P\sqrt{\left(\frac{\pi\left(\sqrt{D^2(1+tg\varphi_1)} - D_1^2(1+tg\varphi_1)\right)}{\alpha}\right)^2 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}} \times \frac{\exp\left(\frac{z_1c\rho_{nn}}{4t\lambda_M^{1-P}\lambda_B^P}\right)}{\sqrt{t(t_0+t)}} + T_0
\end{aligned} \tag{6}$$

Опираясь на полученные уравнения по определению скорости перемещения плазмотрона для различных поверхностей деталей, была смоделирована система уравнений по определению толщины плазменного слоя для сложнопрофильных поверхностей детали:

$$\begin{aligned}
H_o &= \frac{\delta \times \sqrt{\pi\rho_1}}{\sqrt{(d\rho/dt)^2 + \beta\varphi^2(d\varphi/dt)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{\rho_1^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\} \\
H_k &= \frac{\delta \times \sqrt{\pi\rho_1}}{\sqrt{(d\rho/dt)^2 + (tg\psi\beta_z\varphi)^2(d\varphi/dt)^2 + (dz/dt)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{\rho_1^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\} \\
H_u &= \frac{\delta \times \sqrt{\pi\rho_1}}{\sqrt{R^2(d\varphi/dt)^2 + (dz/dt)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{\rho_1^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\} \\
H_e &= \frac{\delta \times \sqrt{\pi\rho_1}}{\sqrt{\left(\frac{\pi\left(\sqrt{D^2(1+tg\varphi_1)} - D_1^2(1+tg\varphi_1)\right)}{\alpha}\right)^2 \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}} \times \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{\rho_1^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \right\}
\end{aligned} \tag{7}$$

Выводы

Разработаны уравнения для определения скорости перемещения плазмотрона для различных поверхностей деталей.

Учитывая уравнения по определению коэффициентов температуропроводности и теплопроводности, а также уравнения для определения скорости перемещения плазмотрона для деталей, была разработана система уравнений для прогнозирования распространения тепла в обрабатываемых сложнопрофильных деталях при плазменном напылении.

Разработана система уравнений для прогнозирования и последующего контроля толщины нанесенного плазменного

слоя на сложнопрофильные поверхности деталей.

Библиографический список

1. Леонов С.Л., Ситников А.А., Татаркин М.Е. Моделирование износа наплавленных поверхностей деталей // Ползуновский альманах. 2012. №1. С.228–229.
2. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
3. Соснин Н.Е., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2013. 406 с.

4. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск: Наука и техника, 1971. 265 с.
5. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск. Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
6. Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И. Толщина покрытия детали при плазменном напылении // Научно-практический журнал «Современные материалы, техника и технологии». №1 (16). 2018 г. С. 77–82.
7. Влияние кинематики движения инструмента на формирование износостойкого покрытия / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова Г.И. Трифонов и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т.14. №5. 2018. С. 142–147.
8. 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.Е. Баумана, 2008. 360 с.
9. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый и др. Минск: Беларус. навука, 2011. 357 с.
10. Жачкин С.Ю., Астахов М.В. Износостойкие покрытия для восстановления и изготовления деталей машин // Технология металлов: Ежемес. производственный, научно-техн. и учебно-метод. журнал. Москва 2005. № 1. С. 40–43.
11. Жачкин С.Ю., Нелысов С.В. Повышение микротвердости дисперсно-упрочненных композитных покрытий на основе железа. Наука в центральной России. 2016. № 6. С. 49–54.
12. Системный анализ при моделировании напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при нанесении композитных покрытий методом ГКО / С.Ю. Жачкин, А.Н. Пеньков, Г.В. Зибров и др. // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2013. № 6. С. 63–67.
13. Соснин Н.А., Ерамков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб: Изд-во Политехи, ун-та, 2013. 406 с.
14. Негода Е.Н. Тепловые процессы при сварке: учеб. пособие. Дальневосточный государственный технический университет. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. 125 с.
15. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

Information about the paper in English

G.I. Trifonov
 Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy
 Voronezh, Russia
 E-mail: grishakip@yandex.ru
 Received 22.05.2019

UNDERSTANDING THE RELATIONSHIP BETWEEN THE THERMOPHYSICAL AND PHYSICO-MECHANICAL PARAMETERS OF PLASMA SPRAYING AND THE TRAVEL RATE OF THE PLASMATRON

Abstract

In cost-effectiveness terms, rebuilding parts (in particular, by gas-thermal spraying) is justified by the fact that almost half of the parts submitted for repair can be rebuilt and reused, and the rebuild cost amounts to 15...30% of the cost of new parts. It should be noted that only 5...9% of parts cannot be rebuilt. One of the innovative rebuild techniques includes plasma spraying. This paper offers some equations for defining the kinematic modes of plasma spraying, and namely for defining the travel rate of the plasmatron when handling parts with complex surface geometry. The authors came up with a system of equations for predicting the propagation of heat in parts during plasma spraying. A system of equations was also developed for predicting the resultant thickness of a plasma sprayed surface layer.

Keywords: plasma spraying, thermophysical parameters, heating temperature, spray coat thickness, kinematics, plasmatron.
