$$H_x(x,y)=\frac{-q_1(x)\cdot x+\frac{\mu_2}{\mu_1}\rho_1(x)\cdot\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}{\frac{D}{2}+\sigma}\cdot$$

$$\cdot\frac{C_3e^{\sqrt{\delta_y}y}+C_4e^{\sqrt{\delta_y}y}}{C_3e^{\sqrt{\delta_y}\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}+C_4e^{\sqrt{\delta_y}\sqrt{\left(\frac{D}{2}+\sigma\right)^2-x^2}}}$$

– проекция магнитного поля на ось Y на верхней границе внутри эквидистантного зазора магнитопровода.

Заключение

Установлено, что определение величины магнитной напряженности *H* для МАО СПП обеспечивает пространственное распределение МП внутри рабочего зазора при использовании полюсных наконечников с профилем рабочих поверхностей, эквидистантным обрабатываемой поверхности.

Список использованной литературы

1. Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохо-зяйственных машин / Л. М. Акулович, Л.Е. Сергеев – Минск: БГАТУ, 2019. – 272 с.

УДК 621.793.72: 519.87

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПОКРЫТИЯ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

[1]С.М. Ведищев, д-р техн. наук, профессор,
[2]Г.И. Трифанов, канд. техн. наук, доцент,
[1]Ю.Е. Глазков, канд. техн. наук, доцент,
[1]М.М. Али Раззак, аспирант

[1]Тамбовский государственный технический университет,
г. Тамбов, Российская Федерация,
[2]Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,
г. Воронеж, Российская Федерация
serg666_65@mail.ru,

Аннотация. В статье представлена модель расчета покрытия при плазменном напылении деталей машин**.**

Abstract. The article presents a model for calculating the coating during the plasma spraying of machine parts.

Ключевые слова: модель, покрытие, плазменное напыление, детали машин.
Keywords: model, coating, plasma spraying, machine parts.

Актуальность

В рамках проводимых научных изысканий значительное количество исследователей сосредоточили свои усилия на анализе технологий и способов восстановления машин и механизмов [1].

В частности, рассматривая кинематику движений процесса плазменного напыления покрытий, были проанализированы работы [2, 3], в которых были исследованы такие параметры как скорость движения плазмотрона, толщина формируемого покрытия и т.д.

Исходя из существующего научно-технического было принято решение о проведении исследования толщины формируемого слоя покрытия при проведении восстановительных работ на заводских предприятиях агропромышленного комплекса.

Результаты исследования

Известно, что для плоской поверхности детали при её плазменной ортогональной обработке (угол падения 90°) толщина покрытия рассчитывается по формуле:

$$h_o = \frac{G \cdot K_{\text{И}} \cdot n}{\rho_c \cdot V_c \cdot S}, \quad (1)$$

где: h_0 – номинальная толщина покрытия, м; G – массовый расход напыляемого порошка, кг/с; $K_{\text{И}}$ – коэффициент использования материала (КИМ), показывающий долю порошка, осевшего на поверхность детали; n – количество проходов плазмотрона; $\rho_{\text{с}}$ – плотность формируемого покрытия (с учетом пористости), кг/м^3; V_S – скорость линейного перемещения (сканирования) плазмотрона, м/с; S – шаг смещения плазмотрона между проходами, м.

Взяв за основу уравнение (1) внесем корректировку с учетом геометрических особенностей обрабатываемых деталей, а именно – угол падения наносимого материала θ (угол между нормалью к поверхности $\vec{n}$ и вектором направления плазменной струи $\vec{d}$). Это обусловлено тем, что в процессе плазменной обработки угол между осью плазменной струи и поверхностью детали постоянно изменяется, что оказывает прямое влияние на площадь пятна напыления

(происходит «размазывание») и на коэффициент использования материала.

Так, при наклоне плазменного потока происходит увеличение площади пятна, а толщина пропорционально уменьшается [4]:

$$h_{\text{геом}} = h_0 \cdot \cos(\theta) \tag{2}$$

При этом КИМ нелинейно зависит от угла θ. При значительном отклонении от нормали происходит «рикошет» части наносимого материала, что видно из зависимости:

$$\mathrm{K_и}(\theta) = \mathrm{K_и} \cdot \cos^{\mathrm{m}}(\theta), \tag{3}$$

где m – эмпирический коэффициент, зависящий от материала частиц и их кинетической энергии.

Объединив уравнения (1-3) получаем уравнение по определению толщины в локальной точке покрытия с учетом угла падения наносимого порошкового материала:

$$h(\theta) = \frac{G \cdot K_{\text{И}} \cdot n}{\rho_c \cdot V_s \cdot S} \cdot \cos^{m+1}(\theta) \tag{4}$$

Из источников [5, 6] известно, что плазменная струя по своей природе не является однородной. В связи с этим уравнение (4) видоизменится ввиду нормального (гауссового) распределения:

$$h_1(x) = \frac{G \cdot K_{\text{И}}}{\rho_c \cdot V_s \cdot \sigma\sqrt{2}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \tag{5}$$

где: $h_1(x)$ – толщина покрытия на расстоянии x от оси движения плазмотрона; σ – среднеквадратичное отклонение, характеризующее ширину плазменного пятна (зависит от дистанции напыления и конструкции сопла).

Для расчета реальной толщина покрытия в произвольной точке $M(x, y, z)$ необходимо ввести дополнительные параметры:

1) M – точка на поверхности детали с единичной нормалью $\vec{n}_M$;

2) $P(t)$ – положение сопла плазмотрона в момент времени t;

3) $\vec{d}(t)$ – единичный вектор направления оси плазменной струи в момент времени t.

4) $L(t) = \left|M - P(t)\right|$ – текущая дистанция напыления.

Учитывая дополнительные параметры уравнение по определению реальной толщины формируемого покрытия $h(M)$ запишется:

$$h(M)=\frac{1}{\rho_c}\int_o^T q\left(R_{ox}(t),L(t)\right)\cdot K_И\left(\theta(t)\right)\cdot\cos\theta(t)\cdot I_s(M,t)dt\,, \quad (6)$$

где: $q(R_{ox},L)$ – пространственная плотность потока массы в струе; I_s – индикатор аэродинамического затенения [7].

Заключение

По итогу проведенного исследования разработана аналитическая база для расчёта толщины покрытия при восстановлении деталей машин и механизмов. Получены аналитические уравнения, позволяющие определять толщину наносимого покрытия при плазменном напылении на поверхности деталей машин. Была учтена специфика взаимодействия плазменной струи с поверхностью, что дало возможность прогнозировать параметры формируемого слоя.

Список использованной литературы

1. Жачкин, С. Ю. Инновационные подходы к оптимизации технологии упрочнения деталей машин с использованием нанокомпозитных хромовых покрытий / С. Ю. Жачкин, А. И. Завражнов, Г. И. Трифонов. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Русайнс", 2026. – 144 с. – ISBN 978-5-466-11833-9. – EDN IYCPDZ.

2. Жачкин, С. Ю. Моделирование кинематики плазменного напыления на сложнопрофильные поверхности / С. Ю. Жачкин, М. Н. Краснова, Н. А. Пеньков, Г. И. Трифонов // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т.128. – С. 133-139.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026666029 Российская Федерация. Моделирование процесса упрочнения композитным покрытием на базе пр-НХ17СР4-р+SIC : заявл. 13.05.2026 : опубл. 28.05.2026 / С. М. Ведищев, Г. И. Трифонов, Ю. Е. Глазков [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тамбовский государственный технический университет". – EDN SQWIFL.

4. Соловьев, М. Е. Математическая модель оптимизации шага напыления защитных покрытий на основе минимизации второго центрального момента / М. Е. Соловьев, С. С. Кокарев, С. Л. Балдаев [и др.] // Вестник Московского энергетического института. 2026. № 1. – С. 149–159.

5. Кравченко, И. Н. Влияние термодинамических параметров плазменной струи на адгезионную прочность газотермических покрытий / И. Н. Кравченко, Ю. А. Кузнецов, Т. Н. Боровик [и др.] // Технический сервис машин. 2024. Т. 62. № 2. – С. 77–84.

6. Девойно, О. Г. Изучение поведения частицы диффузионно-легированного порошка аустенитной стали в плазменной струе при напылении / О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, Б. Б. Хина // Наука и техника. 2025. Т. 24. № 3. – С. 181–191.

7. Liu, S. H. A review and progress of multiphase flows in atmospheric and low pressure plasma spray advanced coating / S. H. Liu, Ju. P. Trelles, Ch. J. Li [et al.] // Materials Today Physics. 2022. Vol. 27. – P. 100832.