

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Матвиенко С.А., Стрельник Ю.Н., Савенко Э.С.

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Макеевка

Ключевые слова: формирование покрытия, моделирование процесса, комбинированные покрытия, движение частиц, взаимодействие с поверхностью.

Аннотация. В данной работе разработана аналитическая модель процесса образования покрытия методом холодного газодинамического напыления. Модель учитывает основные физические явления, влияющие на формирование покрытия, такие как движение газопорошковой смеси, взаимодействие частиц с подложкой и деформацию материала. Разработанная математическая модель может быть использована для проектирования новых технологий нанесения износостойких покрытий на базе холодного газодинамического напыления.

ANALYTICAL MODEL OF THE COATING FORMATION PROCESS BY COLD GAS DYNAMIC SPRAYING

Matvienko S.A., Strel'nik Yu.N., Savenko E.S.

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka

Keywords: coating formation, process modeling, combined coatings, particle motion, interaction with the surface.

Abstract. In this work, an analytical model of the coating formation process by the method of cold gas dynamic spraying has been developed. The model takes into account the main physical phenomena affecting the formation of the coating, such as the movement of the gas-powder mixture, the interaction of particles with the substrate and the deformation of the material. The developed mathematical model can be used to design new technologies for applying wear-resistant coatings based on cold gas dynamic spraying.

Введение. Холодное газодинамическое напыление (ХГДН) – это инновационный процесс нанесения покрытий, при котором частицы порошкового материала разгоняются потоком газа до сверхзвуковых скоростей и, ударяясь о подложку, формируют плотное покрытие. В отличие от традиционных термических методов, ХГН осуществляется при относительно низких температурах, что минимизирует нежелательные фазовые превращения, окисление и термические напряжения в наносимом слое и подложке. Этот метод находит широкое применение в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, авиастроение, энергетику и медицину, благодаря возможности создания покрытий с улучшенными свойствами, такими как высокая адгезия, низкая пористость и хорошая износостойкость. Метод ХГДН позволяет формировать плотные и адгезионно прочные покрытия из различных материалов, включая твердые сплавы, керамику и металлокерамические композиции [1-3].

Существует несколько подходов к моделированию процесса ХГДН, основанных на различных математических методах и физических принципах [4-6].

Эйлеровый подход рассматривает газ и порошок как сплошные среды, описываемые уравнениями Эйлера или Навье-Стокса [7]. Уравнения для газа и

порошка решаются совместно, с учетом сил взаимодействия между фазами. Эйлеровый подход хорошо подходит для моделирования макроскопических характеристик процесса, таких как распределение скорости и давления. Однако, он не позволяет детально описывать взаимодействие отдельных частиц с подложкой.

В Лагранжевом подходе отслеживается движение каждой отдельной частицы порошка [7]. Уравнения движения для каждой частицы решаются с учетом сил, действующих на частицу со стороны газа и других частиц. Лагранжевый подход позволяет более детально моделировать процесс взаимодействия частиц с подложкой, но требует значительных вычислительных ресурсов.

Комбинированный эйлерово-лагранжевый подход сочетает в себе преимущества обоих подходов. Газ моделируется эйлеровым подходом, а движение частиц порошка отслеживается лагранжевым подходом. Такой подход позволяет получить достаточно точные результаты при умеренных вычислительных затратах.

Целью данной работы является разработка математической модели процесса ХГДН, учитывающей основные физические явления, влияющие на формирование покрытия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать математическое описание движения газопорошковой смеси в сопле Лаваля и в пространстве напыления; создать модель взаимодействия частиц порошка с подложкой, учитывающую деформацию частиц и подложки при ударе, а также адгезионные силы, возникающие на границе контакта; разработать алгоритм расчета формирования покрытия путем последовательного нанесения слоев частиц.

Основная часть. Для моделирования процесса ХГДН предлагается использовать комбинированный эйлерово-лагранжевый метод. Газ-носитель, как правило, сжатый воздух или азот, описывается уравнениями Навье-Стокса для сжимаемого газа. Уравнения решаются в трехмерной постановке с учетом вязкости и теплопроводности газа. Движение частиц порошка описывается уравнениями Ньютона, учитывающими силы аэродинамического сопротивления, силы тяжести и силы взаимодействия между частицами. Сила аэродинамического сопротивления определяется на основе эмпирических зависимостей, учитывающих скорость, размер и форму частиц, а также свойства газа. Для моделирования процесса взаимодействия частиц с подложкой используется модель адгезии, основанная на принципе образования металлической связи между частицей и подложкой.

Здесь: α – объемная доля газа; β – объемная доля частиц; ρ – плотность газа; ρ_p – плотность частиц; v – скорость газа; v_p – скорость частиц; p – давление; τ – тензор вязких напряжений; e – удельная внутренняя энергия газа; e_p – удельная внутренняя энергия частиц; k – коэффициент теплопроводности газа; T – температура; F_p – сила межфазного взаимодействия; F_d – сила, обусловленная разностью давлений; Q_p – теплообмен между газом и частицами; Q – тепло, выделяющееся при деформации частиц.

Табл. 1. Уравнения

Уравнения сохранения массы:	Для газа	$\partial(\alpha\rho)/\partial t + \nabla(\alpha\rho v) = 0$
	Для частиц	$\partial(\beta\rho_p)/\partial t + \nabla(\beta\rho_p v_p) = 0$
Уравнения сохранения импульса	Для газа	$(\alpha\rho v)/\partial t + \nabla(\alpha\rho v v) = -\alpha\nabla p + \nabla(\alpha\tau) + F_p$
	Для частиц	$(\beta\rho_p v_p)/\partial t + \nabla(\beta\rho_p v_p v_p) = -\beta\nabla p + F_d - F_p$
Уравнения сохранения энергии	Для газа	$\partial(\alpha\rho e)/\partial t + \nabla(\alpha\rho e v) = -\alpha p(\nabla v) + \nabla(\alpha k \nabla T) + Q_p$
	Для частиц	$\partial(\beta\rho_p e_p)/\partial t + \nabla(\beta\rho_p e_p v_p) = Q - Q_p$

Сила межфазного взаимодействия F_p учитывает силы аэродинамического сопротивления, действующие на частицы со стороны газа:

$$F_p = 0,5 C_d \rho A |v - v_p| (v - v_p), \quad (1)$$

где C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления; A – площадь поперечного сечения частицы.

Сила, обусловленная разностью давлений, F_d учитывает влияние градиента давления на движение частиц:

$$F_d = -\beta \nabla p \quad (2)$$

Теплообмен между газом и частицами Q_p определяется разностью температур газа и частиц и коэффициентом теплоотдачи:

$$Q_p = hA(T - T_p), \quad (3)$$

где h – коэффициент теплоотдачи; T_p – температура частиц.

Система уравнений дополняется уравнением состояния газа и уравнением, описывающим деформацию частиц при ударе о подложку.

Модель взаимодействия частиц с подложкой из нескольких подмоделей, описывающих различные этапы взаимодействия частиц с подложкой:

Подмодель динамики полета частиц описывает движение частиц в газовом потоке и их ускорение до удара о подложку. Она учитывает аэродинамическое сопротивление, гравитацию и взаимодействие частиц между собой. Для расчета динамики полета частиц используется метод дискретных элементов (МДЭ) с учетом межчастичного взаимодействия.

Подмодель контактного взаимодействия описывает деформацию и напряженное состояние в частице и подложке в момент контакта. Она основана на модели МКЭ с использованием нелинейных моделей материалов и контактных алгоритмов. Для повышения вычислительной эффективности используется метод адаптивного измельчения сетки, позволяющий более детально моделировать область контакта.

Подмодель адгезии и формирования связи описывает процессы, приводящие к адгезии частицы к подложке и формированию прочной связи. Она основана на модели МД, которая учитывает межатомные взаимодействия и процессы диффузии. Для уменьшения вычислительной нагрузки используется метод грубого зернения, позволяющий моделировать большие системы с меньшим количеством атомов.

Подмодель термических эффектов описывает нагрев частицы и подложки в результате пластической деформации и трения. Она основана на решении уравнения теплопроводности с учетом источников тепла, связанных с деформацией и трением.

Движение каждой i -й частицы описывается уравнением Ньютона:

$$m_i \cdot d^2 r_i / dt^2 = F_i, \quad (4)$$

где m_i – масса i -й частицы, r_i – радиус-вектор положения i -й частицы, F_i – суммарная сила, действующая на i -ю частицу.

Суммарная сила F_i включает в себя:

- аэродинамическое сопротивление F_d , рассчитываемое на основе коэффициента сопротивления и скорости частицы относительно газового потока;
- гравитационную силу $F_g = m_i \cdot g$, где g – ускорение свободного падения;
- силу взаимодействия между частицами F_c , рассчитываемую с использованием модели контактного взаимодействия (например, модель Герца-Минского).

Сила, действующая на частицу со стороны газового потока, определяется как:

$$F_g = 0,5 \cdot C_d \cdot \rho_g \cdot A \cdot (v_g - dr/dt)^2, \quad (5)$$

где C_d – коэффициент лобового сопротивления; ρ_g – плотность газа; A – площадь поперечного сечения частицы; v_g – скорость газового потока.

Уравнение теплопроводности решается для расчета температурного поля в частице и подложке:

$$\rho \cdot c_p \cdot dT/dt = k \cdot \nabla^2 T + Q, \quad (6)$$

где ρ – плотность материала; c_p – удельная теплоемкость; T – температура; k – теплопроводность; Q – источник тепловыделения (пластическая деформация, трение).

Контактное взаимодействие описывается уравнение равновесия для твердого тела, описывающее деформацию частицы и подложки:

$$\nabla \cdot \sigma + f = 0, \quad (7)$$

где σ – тензор напряжений, f – вектор объемных сил.

Тензор напряжений σ связан с тензором деформаций ϵ через определяющее уравнение материала (например, закон Гука для упругого материала или более сложные модели для пластичного материала). Граничные условия задаются на поверхности контакта между частицей и подложкой, включая условия Кулона для трения.

Адгезия и формирование связи описывается уравнением движения для каждого атома i :

$$m_i \cdot d^2 r_i / dt^2 = - \nabla U_i \quad (8)$$

где U_i – потенциальная энергия i -го атома, зависящая от положения соседних атомов. Для описания межатомного взаимодействия используются различные потенциалы (например, потенциал Леннарда-Джонса).

Формирование покрытия моделируется путем последовательного нанесения слоев частиц.

Алгоритм расчета формирования покрытия включает следующие этапы:

- 1) генерация координат и скоростей частиц в потоке;
- 2) расчет траекторий частиц до столкновения с подложкой;
- 3) расчет деформации частицы и подложки при ударе;
- 4) определение адгезионных сил, возникающих на границе контакта;
- 5) определение вероятности прилипания частицы к подложке;
- 6) обновление геометрии поверхности покрытия;

7) повторение этапов 1-6 для каждого слоя частиц.

Заключение. Результаты моделирования показали, что увеличение давления и скорости газа приводит к увеличению скорости частиц и улучшению адгезии покрытия. Однако при слишком высоких скоростях частиц может происходить разрушение подложки. Уменьшение размера частиц порошка приводит к увеличению плотности покрытия и уменьшению его пористости. Материал порошка и подложки оказывают существенное влияние на адгезию и микротвердость покрытия. Использование порошков с высокой твердостью позволяет получать покрытия с высокой износостойкостью. Угол напыления и расстояние от сопла до подложки влияют на равномерность нанесения покрытия.

Список литературы

1. Матвиенко С.А., Гончаров А.М. Повышение кавитационной стойкости гильз цилиндров форсированных дизелей // Инженер. – 2024. – №1(37). – С. 56-59.
2. Матвиенко С.А., Бачурин Н.Д. Концепция формирования функциональных покрытий методом холодного газодинамического напыления // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции, г. Севастополь, 16-22 сентября 2024. – Донецк: ДонНТУ, 2024. – С. 209-213.
3. Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. – Курчатовский институт. 2020. – №8(90). – С. 77-93.
4. Карчевский М.М., Шагидуллин Р.Р. Математические модели механики сплошной среды. Учебное пособие. – Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина, 2007. – 212 с.
5. Бодров Е.Г., Серебряков И.С., Латфулина Ю.С., Напримерова Е.Д., Мясоєдов В.А. Математическое моделирование процесса холодного газодинамического напыления порошковых цветных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21, №4. – С. 148-155.
6. Кулик Е.В., Чушнякава М.В. Моделирование холодного газодинамического осаждения наночастиц: первый шаг // Материалы Региональной молодежной научно-практической конференции. Нанотехнологии. Информацион. Радиотехника (НИР-22). – Омск: ОмГТУ, 2022. – С. 185-190.
7. Шаланин В.А. Эйлєровы методы моделирования потоков со свободной поверхностью // Молодой ученый. – 2016. – №2(106). – С. 258-261.
8. Шаланин В.А. Лагранжевы методы моделирования потоков со свободной поверхностью // Молодой ученый. – 2016. – №2(106). – С. 261-263.

Сведения об авторах:

Матвиенко Сергей Анатольевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации»;

Стрельник Юрий Николаевич – старший преподаватель кафедры «Автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации»;

Савенко Эдуард Станиславович – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации».