

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ОСАЖДЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Сергей Юрьевич Жачкин¹
Никита Алексеевич Пеньков²
Роман Владимирович Беляев²

¹Воронежский государственный технический университет

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Министерства обороны Российской Федерации

Рассматривается осаждение гальванических композитных покрытий струйным методом с позиций теоретической механики. В этой связи принята соответствующая модель процесса осаждения, учитывающая кинематику и динамику процесса, но абстрагирующаяся от процессов деформации осаждаемого покрытия. Это позволило качественно описать формирование слоя композитного покрытия и показать зависимость этого процесса от геометрических параметров инструмента и его расположения относительно обрабатываемой поверхности. Были исследованы параметры движения частиц при вылете из сопла при сочетании различных начальных условий. Приведены математические выражения для определения параметров струи, скорости движения частиц наполнителя, диаметра частиц и их взаимосвязи. Это достигнуто благодаря моделированию процесса осаждения, в ходе которого двухкомпонентная среда – стандартный электролит хромирования и композитный материал рассматриваются в виде однокомпонентного потока. Подобное допущение может быть объяснено исключительной ролью наполнителя, обеспечивающего пластическую деформацию наносимого слоя композитного материала. При этом было установлено, что форма частиц композитного материала не оказывает существенного влияния на качество получаемых осадков, поэтому при выборе моделируемой формы частицы принимались в рассмотрение в виде шаров. В этих условиях электролит играет роль токопроводящей среды, которая не оказывает существенного влияния на структуру получаемых осадков. Предлагаемая технология нанесения электролитических покрытий позволяет получать остаточные напряжения сжатия в нанесенном слое, что положительно сказывается на прочностных характеристиках обрабатываемых деталей. Для определения концентрации наполнителя была принята гипотеза о равномерном распределении его частиц в струе электролита.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композитное покрытие на основе хрома, диаметр сопла, скорость струи, напряжения сжатия, концентрация наполнителя, угол атаки.

MODELING OF JET PLATING PROCEDURE OF ELECTRODEPOSITED COMPOSITE COATINGS

Sergey Yu. Zhachkin¹
Nikita A. Penkov²
Roman V. Belyaev²

¹Voronezh State Technical University

²Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation

The article deals with the electroplated composite coating jet deposition. The proposed process of deposition is considered with regard to theoretical mechanics. In this case, an appropriate model of the deposition process has been adopted. It takes into account of the kinematics and dynamics of this process, but in a departure from deformation processes of the deposited coating. This allowed providing reasonable details of the formation of the layer of the composite coating. Moreover the authors defined the dependence of this process on the geometric parameters of the tool and its location relative to the surface. Particles motion parameters upon departure from the nozzle with the different initial condition combination were investigated. The mathematical expressions for determination of such jet parameters as filler particles velocity, particles diameters and their relationship are given. This is achieved by simulating the deposition process, in which a two-component medium, i.e. standard chromium plating electrolyte and a composite material, are considered as a single-component flux. This assumption can be explained by the exceptional role of the

filler providing plastic deformation of the applied layer of the composite material. It was found that the shape of the particles of the composite material does not significantly affect the quality of the resulting precipitation. Therefore, at choosing a simulated shape of the particles the authors took into consideration the form of balls. Under these conditions, the electrolyte plays the role of a conductive medium that insignificantly influence the structure of the resulting precipitation. This technology of electrolytic coatings application allows obtaining compressive stress in the formed layer, which has a positive effect on the strength characteristics of the different parts. To determine the concentration of the filler, a hypothesis about the uniform distribution of its particles in the electrolyte jet was adopted.

KEYWORDS: chromium-based composite coating, nozzle diameter, jet speed, compressive stresses, concentration of filler, attack angle.

В последние годы успешно развивается технология осаждения композитных гальванических покрытий, которые получают из суспензий, представляющих собой электролит с добавкой определенного количества дисперсного порошка. Включение дисперсных материалов в металлическую матрицу значительно изменяет свойства покрытий. Гальванические покрытия с дисперсной фазой обладают уникальными свойствами и могут быть использованы для решения разнообразных проблем, возникающих на всех этапах жизненного цикла машиностроительного объекта. Работы в этой области охватывают не только этапы разработки, изготовления или ремонта машин и оборудования, но и дальнейший период их эксплуатации, в том числе обкатку, техническое обслуживание, тюнинг и безразборный ремонт.

Осаждение гальванических композитных покрытий струйным методом рассматривается с позиций теоретической механики. В этой связи принята соответствующая модель процесса осаждения, учитывающая кинематику и динамику процесса, но абстрагирующаяся от процессов деформации осаждаемого покрытия. Это позволило описать формирование слоя композитного покрытия и показать зависимость данного процесса от геометрических параметров инструмента и его расположения относительно обрабатываемой поверхности. Были исследованы параметры движения частиц при вылете из сопла при сочетании различных начальных условий.

Двухкомпонентная струя может быть рассмотрена упрощенно в виде однокомпонентного потока взаимодействующих абразивных частиц, что значительно упростит применяемый математический аппарат. При этом остается возможным описать кинематику и динамику процесса осаждения покрытия на восстанавливаемую поверхность.

Реальные частицы абразивного материала имеют неправильную и весьма сложную форму, их представляют обычно в виде правильных тел, чаще всего эллипсоидов или сфер [4, 8, 10]. В принятых допущениях абразивные частицы принимаются имеющими форму сфер [9], размеры которых – случайные величины. Эти размеры подчинены закону распределения, согласующемуся с процентным содержанием крупной, основной и мелкой фракций абразивного материала [6, 8, 10].

Благодаря моделированию процесса осаждения, в ходе которого двухкомпонентная среда (стандартный электролит хромирования и композитный материал) рассматривается в виде однокомпонентного потока, подобное допущение может быть объяснено исключительной ролью наполнителя, обеспечивающего пластическую деформацию наносимого слоя композитного материала.

Ранее было установлено, что форма частиц композитного материала не оказывает существенного влияния на качество получаемых осадков, поэтому при выборе моделируемой формы частицы принимались в рассмотрение в виде шаров. В этих условиях электролит играет роль токопроводящей среды, которая не оказывает существенного влияния на структуру получаемых осадков. Для определения концентрации наполнителя была принята гипотеза о равномерном распределении его частиц в струе электролита.

Содержание абразивного материала по фракциям распределялось следующим образом [10]: 65 % – основная, 30% – мелкая, 5% – крупная. Таким образом, величины процентного содержания фракций в абразивном материале эквивалентны величинам вероятностей появления частиц, соответствующих данной фракции.

Реализация размеров частиц потока воспроизводится приемами статического моделирования [2, 11] в два этапа.

На первом этапе определяется фракция частицы сопоставлением значения случайного числа – размера частицы с равномерным законом распределения вероятностей, которое воспроизводится с помощью стандартного генератора псевдослучайных чисел.

На втором этапе устанавливается значение размера диаметра сферы частицы внутри диапазона, соответствующего выбранной на первом этапе фракции

$$d_{ij} = d_{k-1} + \frac{d_k - d_{k-1}}{P_k - P_{k-1}} (\gamma - P_{k-1}), \quad (1)$$

где d_{k-1} и d_k – предельные значения радиусов, соответствующие данной фракции частиц;

P_{k-1} и P_k – вероятности появления соответственно $k-1$ -й и k -й фракции частиц;
 γ – псевдослучайное число с равномерным законом распределения вероятностей.

Показатели физико-механических свойств материала абразивных частиц (твёрдость, плотность, коэффициент Пуассона, модуль упругости, прочность на срез) являются случайными величинами с нормальным законом распределения вероятностей [3], которые воспроизводятся с помощью датчиков случайных чисел.

Параметры закона распределения (математическое ожидание и дисперсия) устанавливаются по известным методикам и справочным данным.

Рассчитанный диаметр частицы, берущийся как среднее размера фракции используемого абразива и плотности материала, позволяет определить массу движущейся частицы как

$$m_i = \frac{\pi d_r^3 \rho_r}{6}, \quad (2)$$

где d_r – средний диаметр размера фракции абразива;

ρ_r – плотность абразива.

Дальнейшее исследование выполнялось с абразивными частицами, движущимися с постоянными скоростью и углом атаки (по отношению к обрабатываемой поверхности).

В результате анализа литературы установлено, что при использовании сопла Лаваля [3, 5] скорость частиц на срезе можно принять равной скорости истечения сжатого воздуха через это сопло

$$v_r = \sqrt{\left(2 \frac{k}{k-1} RT_0\right) \left(1 - \frac{p}{p_0} \frac{k-1}{k}\right)}, \quad (3)$$

где k – показатель адиабаты, для воздуха $k = 1,4055$;

R – удельная газовая постоянная, $R = 287$ Дж/(кг·К);

p_0 и T_0 – давление и температура сжатого воздуха до попадания в сопло Лаваля [5];

p – давление воздуха на срезе сопла, равное атмосферному давлению $p = 0,1$ МПа.

Величина угла атаки частицы зависит от технологических особенностей моделируемого процесса обработки [1]. Например, в случае исследования обработки потоком частиц, сформированным сопловым аппаратом, принимаем, что все частицы потока имеют одинаковый угол атаки. При этом величина угла может изменяться в широких пределах (практически от 0 до 180°).

Длина струи устанавливается во взаимосвязи с углом атаки α и расстоянием L_1 (см. рис.) от торца сопла до обрабатываемой поверхности:

$$L = \frac{L_1}{\sin \alpha}. \quad (4)$$

Таким образом, длина струи в данной модели непосредственно не задается, а рассчитывается по выражению (4). В частном случае, при $\alpha = 90^\circ$, расстояние от торца сопла до обрабатываемой поверхности равно длине струи (см. рис.).

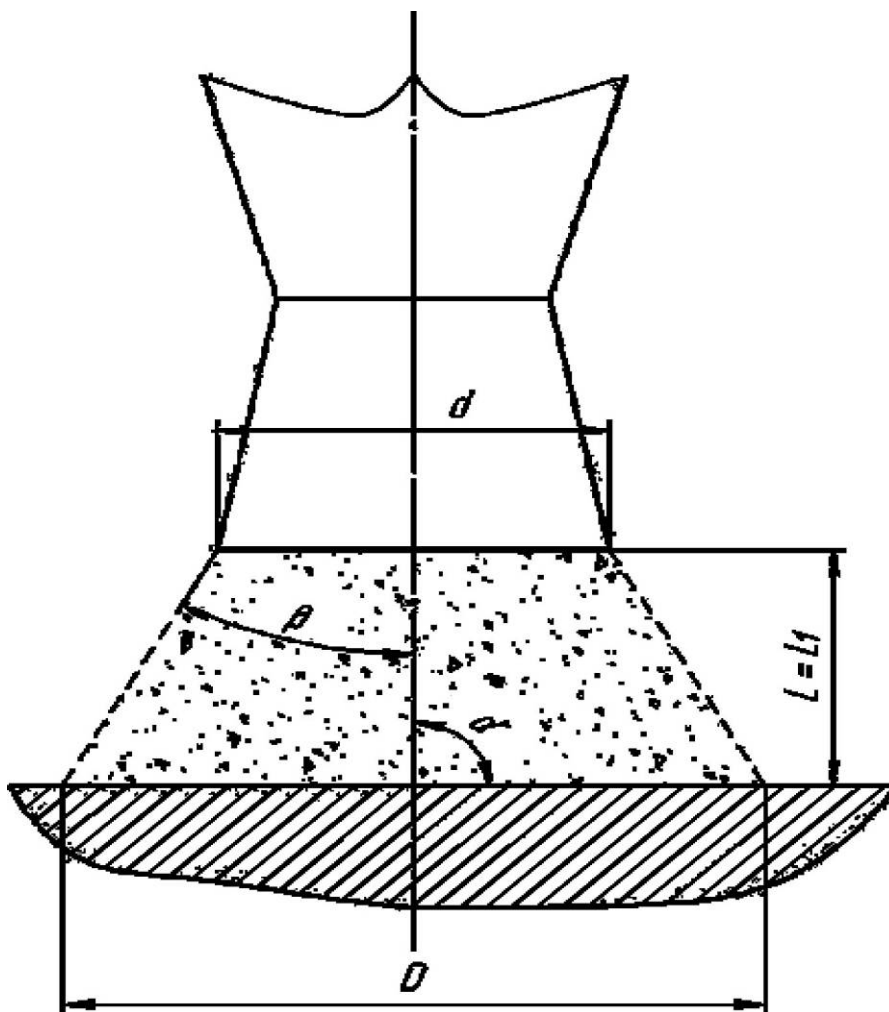


Схема нанесения покрытия на обрабатываемую поверхность

Количество абразивных частиц, долетающих до поверхности восстанавливаемой детали с необходимой кинетической энергией, то есть количество актов единичного контактного взаимодействия, обусловлено концентрацией абразивного материала в потоке, величиной расхода в единицу времени через срез сопла, а также временем и маршрутом перемещения сопла по обрабатываемой поверхности [7].

Поскольку абразивные частицы равномерно распределены в потоке, концентрация частиц, находящихся в единице объема, будет довольно точно характеризовать распределение компонентов струи по всему объему струи. Поток выбрасываемых сопловым аппаратом абразивных частиц представляет собой усеченный конус (см. рис.), объем которого определяется как

$$V = \frac{\pi L}{12} (d^2 + D^2 + dD). \quad (5)$$

В свою очередь, диаметр пятна контакта D струи абразивных частиц в зависимости от диаметра на срезе соплового аппарата d и длины струи L находим по формуле

$$D = d + 2L \operatorname{tg} \beta, \quad (6)$$

где β – центральный угол раскрытия сопла, который обычно выбирают в пределах 6–8 градусов.

После подстановки и преобразований выражение (5) приобретает вид

$$V = \frac{\pi L}{12} (3d^2 + 6dL \operatorname{tg} \beta + 4L^2 \operatorname{tg}^2 \beta). \quad (7)$$

Зная скорость, с которой частицы выходят из соплового аппарата v_r , и считая эту скорость постоянной, находим время, в течение которого горизонтальный слой частиц переместится от среза соплового аппарата до обрабатываемой поверхности

$$\Delta t = \frac{L}{v_r} \quad (8)$$

Зная количество частиц, выбрасываемых сопловым аппаратом в единицу времени, можно найти количество частиц, находящихся в объеме рассмотренного выше конуса

$$N_e = N_c \Delta t = N_c \frac{L}{v_r}. \quad (9)$$

Тогда количество частиц, находящихся в единице объема, будет равно

$$k = \frac{N_e}{V} = \frac{12 N_c \frac{1}{v_r}}{\pi L (3d^2 + 6dL \operatorname{tg} \beta + 4L^2 \operatorname{tg}^2 \beta)}, \quad (10)$$

где v_r – скорость частиц на срезе, определяется в соответствии с (3).

Выводы

Предлагаемая технология нанесения электролитических покрытий позволяет получать остаточные напряжения сжатия в нанесенном слое, что положительно сказывается на прочностных характеристиках обрабатываемых деталей.

Проведенные исследования позволили определить параметры струи: скорость движения абразивных частиц, диаметр частиц и их взаимосвязь, что дает возможность прогнозировать качество получаемых осадков в зависимости от выбора условий осаждения покрытия.

Библиографический список

1. Вайнер Я.В. Технология электрохимических покрытий / Я.В. Вайнер, М.А. Дасоян. – Ленинград : Машиностроение, 1972. – 464 с.
2. Вячеславов П.М. Методы испытаний электролитических покрытий / П.М. Вячеславов, Н.М. Шмелева. – Ленинград : Машиностроение, 1977. – 88 с.
3. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды / А.А. Ильюшин. – Москва : МГУ, 1971. – 248 с.
4. Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. – Москва : Химия, 1979. – 352 с.
5. Ландау Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – Москва : Физматлит, 2006. – 736 с.
6. Левитский В.С. Хромирование деталей машин и инструмента / В.С. Левитский. – Москва – Киев : Машгиз, 1956. – 268 с.
7. Марченко Ю.В. Отделочная обработка в свободных абразивных средах на машинах с пространными маятниковыми колебаниями : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Ю.В. Марченко. – Старый Оскол, 2001. – 201 с.
8. Напряжения в композитных материалах, используемых при ремонте деталей машин / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, О.А. Сидоркин, С.В. Нельсов, В.Г. Беленцов // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 124, № 2. – С. 52–57.
9. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики / Н.Н. Никитин. – Москва : Высшая школа, 1990. – 607 с.
10. Хан Х. Теория упругости. Основы линейной теории и ее применения / Х. Хан. – Москва : Мир, 1988. – 344 с.
11. Zhachkin S.Yu. The technical definition of permanent dispersion-strengthened composite multilayer galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova // Australian Journal of Education and Science. – 2018. – Vol. XI, No. 1 (21). – Pp. 238–253.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Сергей Юрьевич Жачкин – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Воронеж, e-mail: zhach@list.ru.

Никита Алексеевич Пеньков – кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, Российская Федерация, г. Воронеж, e-mail: myth_np_nikit@mail.ru.

Роман Владимирович Беляев – начальник НИЦ ФГКВУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, Российская Федерация, г. Воронеж, e-mail: myth_np_nikit@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 07.07.2018

Дата принятия к печати 05.08.2018

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Sergey Yu. Zhachkin – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Automated Production Equipment and Machinery, Voronezh State Technical University, Russian Federation, Voronezh, e-mail: zhach@list.ru.

Nikita A. Penkov – Candidate of Engineering Sciences, Head of the Laboratory, Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russian Federation, Voronezh, e-mail: myth_np_nikit@mail.ru.

Roman V. Belyaev – Head of Scientific Center, Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russian Federation, Voronezh, e-mail: myth_np_nikit@mail.ru.

Received July 07, 2018

Accepted August 05, 2018