Тип статьи: научная
УДК 621.9.047
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-6-148-155

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ И НАГРЕВА ЧАСТИЦ ПОРОШКА В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ

Сергей Юрьевич Жачкин [1]***, Никита Алексеевич Пеньков*** [2]***, Денис Викторович Щипцов*** [3]***, Павел Владимирович Цысоренко*** [4]
[1]*Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия*
[1]zhach@list.ru
[2,3]*ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Россия*
[2]snikishin24@bk.ru, [3]myth7np7nikit@gmail.com
[4]*Войсковая часть 44261, г. Новосибирск, Россия*

Автор ответственный за переписку: Сергей Юрьевич Жачкин, zhach@list.ru
Corresponding author: Sergey Zhachkin, zhach@list.ru.

Реферат. *При использовании специального навесного оборудования в сельскохозяйственной технике часто приходится сталкиваться с выходом из строя гидравлических систем привода рабочих органов по причине износа контактирующих пар трения. Рассматривается процесс нанесения газотермических композиционных покрытий плазменным нанесением для восстановления таких дефектов. Для определения параметров плазменной струи, обеспечивающих получение осадков заданного качества, изучалась динамика поведения отдельно взятой частицы в потоке без учета взаимодействия соседних частиц. Использовался критерий контролируемого плавления частиц композиционного материала. С одной стороны, это обеспечивает получение требуемой адгезии покрытия с обрабатываемой поверхностью, а с другой – создаёт сжимающие остаточные напряжения в формируемом слое. Задача решается в предположении изотропности пространства. Эффекты упруго-пластического деформирования не принимаются во внимание. Представлен алгоритм численного решения определяющих соотношений, описывающих характер движения плазменной струи в зависимости от определяющих её внешних факторов. Для случая использования в качестве наполнителя частиц оксида алюминия диаметром 45 мкм представлены зависимости скорости частиц от пройденного ими расстояния и их температуры в зависимости от размера фракции твердой части наполнителя. Полученные закономерности позволяют заранее прогнозировать свойства осаждаемых покрытий, добиваясь тех или иных особенностей, определяемых условиями эксплуатации восстанавливаемого узла.*

Ключевые слова: *плазменное струя, композиционное покрытие, уравнение теплопроводности, тензор напряжения, параметры осаждения.*

ABOUT A QUESTION OF DETERMINING KINEMATIC AND THERMODYNAMIC PARAMETERS IN PLASMA JET

Sergey Zhachkin [1]***, Nikita Penkov*** [2]***, Denis Shiptzov*** [3]***, Pavel Tsysorenko*** [4]
[1]*Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia*
[1]zhach@list.ru
[2,3]*MERC AF«AFA», Voronezh, Russia*
[2]snikishin24@bk.ru, [3]myth7np7nikit@gmail.com
[4]*Military unit 44261, Novosibirsk, Russia*

Abstract. *When using special attachments in agricultural machinery, one often has to deal with the failure of the hydraulic systems for driving the working bodies due to wear of the contacting friction pairs. The process of applying gas-thermal composite coatings by plasma deposition to restore such defects is considered. The dynamics of the behavior of a single particle in a flow without taking into account the interaction of neighboring particles was studied to determine the parameters of the plasma jet, which provide precipitation of a given quality. The criterion of controlled melting of composite material particles was used. This ensures, on the one hand, obtaining the required adhesion of the coating to the treated surface, and on the other hand, it creates compressive residual stresses in the formed layer. The problem is solved under the assumption that the space is isotropic. The effects of elastic-plastic deformation are not taken into account. An algorithm is presented for the numerical solution of constitutive relations that describe the nature of the motion of a plasma jet depending on the external factors that determine it. The dependences of the particle velocity on the distance traveled by them and their temperature depending on the size of the fraction of the solid part of the filler are presented for the case of using aluminum oxide particles with a diameter of 45 μm as a filler. The regularities obtained make it possible to predict in advance the properties of deposited coatings, achieving certain features determined by the operating conditions of the restored unit.*

Keywords: *chrome plating electrolyte, composite coatings, iron plating, regression analysis, inclusion concentration.*

Для цитирования: Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Щипцов Д.В., Цысоренко П.В. Моделирование движения и нагрева частиц порошка в плазменной струе // Наука в центральной России. 2022. № 6 (60), С. 147-154. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-6-147-154.

For citation: Zhachkin S., Penkov N., Shiptzov D.., Tsysorenko P. About a question of determining kinematic and thermodynamic parameters in plasma jet. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2022; 6(60): 147-154. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-6-147-154.

Введение. При использовании специального навесного оборудования в сельскохозяйственной технике часто приходится сталкиваться с выходом из строя гидравлических систем привода рабочих органов по причине износа контактирующих пар трения. Одним из наиболее распространенных видов дефектов, приводящих к падению рабочего давления гидравлической жидкости в системе, служит нарушение заданной проектом формы детали (конусность, эллипсность). Это приводит к падению рабочего давления в системе, вызванного утечкой рабочей среды. Восстановление такого рода дефектов – нетривиальная задача. С одной стороны, необходимо нанесение размерного покрытия с точностью до нескольких микрон на изношенные поверхности, с другой – получаемые осадки должны обладать определенной микротвердостью и износостойкостью для качественной работы гидравлического узла в течение заданного проектом срока. Для получения возможности управления качеством формируемых осадков, необходимо иметь математическую модель формирования такого покрытия.

При нанесении износостойких композиционных покрытий с заданными эксплуатационными показателями часто используют плазменные методы нанесения, где в качестве базовых материалов используют такие вещества, какметаллы, оксиды и их механические смеси [1, 2]. При получении таких покрытий к ним предъявляется ряд специфических требований:

- во время контакта струи с обрабатываемой поверхностью детали частицы струи должны быть расплавлены, что служит необходимым условием обеспечения высокой адгезии получаемого покрытия;
- величина расплавления частиц должна быть контролируемой, полные переход частиц в жидкое состояние не допустим;
- время реакции частиц порошка с внешней средой должно быть минимизировано за счет регулирования расстояния от сопла до обрабатываемой поверхности;
- процентное содержание композиционных включений должно строго контролироваться, поскольку это значительно влияет на качество получаемых осадков.

Покрытия заданного качества вполне определяются правильно подобранными технологическими параметрами и заданными требованиями к технологии нанесения композиционных осадков[4].

Материалы и методы. Для определения параметров осаждения при рассматриваемом процессе плазменного напыления будем изучать поведение отдельно взятой композиционной частицы, движущейся в плазменной струе. Для упрощения расчетов будем полагать, что частица изотропна и имеет форму сферы и не изменяет своей конфигурации на протяжении всего процесса осаждения. Определяющее соотношение, описывающее динамику поведения частицы определяется вторым законом Ньютона, записанным в дифференциальном виде [3, 5]:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \sum F_p \tag{1}$$

где $m_p=\rho_p V_p$ – масса композиционного включения; ρ_p – плотность композита; V_p – объем композиционного включения; v_p – скорость включения; F_p – равнодействующая внешних сил, действующих на движущиеся композиционные частицы.

Практика показывает, что наибольшее влияния из всего спектра внешних сил на рассматриваемую частицу оказывают силы сопротивления, определяемые как: $F_a = -0,5\xi_g S_p \rho_g \left|v_p - v_g\right|\left(v_p - v_g\right)$ и силы притяжения к Земле: $F_g = \rho_g g$.

Вычисления. С учетом сделанных оговорок определяющее соотношение (1) запишется в виде:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} + 0,5\xi_g S_p \rho_g \left|v_p - v_g\right|\left(v_p - v_g\right) = \rho_p g \tag{2}$$

где ρ_g и $v_g = (u_g, v_g, w_g)$ – параметры плазменной струи; ξ_g– коэффициент аэродинамического сопротивления; $S_p = \pi d_p^2$ – площадь эффективного сечения.

Коэффициент $\xi_g = f\left(\mathrm{Re}\right)$ есть функция числа Рейнольдса и зависит от типа течения струи (ламинарное или турбулентное) и табулирован. Его значения фиксированы и приведены в [1]. Уравнение (2) – векторное соотношение относительно $v_p=(u_p,v_p,w_p)$. Для определения постоянныхинтегрирования, появляющихся при решении дифференциального уравнения воспользуемся начальным условием:

$$v_p\big|_{t=0} = v_{p,0} \tag{3}$$

где $v_{p,0}$ – скорость композиционного включения в начальный момент времени, когда она попадает в струю плазмы.

С учетом преобразований, приведенных в [6, 7], а также принимая быстроту перемещения газа и температуру струи известными величинами вдоль всей траектории движения, преобразуем полученные соотношения. Зная быстроту перемещения композиционного включения v_p и учитывая уравнение (2) можно определить компоненты вектора скорости частицы в произвольной ортогональной системе координат. Зная скорость частицы, проинтегрируем соотношение для нее, как функции координат композиционной частицы в потоке:

$$\frac{dr_p}{dt} = v_p \tag{4}$$

Начальные условия для определения постоянных интегрирования при решении уравнения (4) имеют вид: $x\big|_{t=0} = x_{0,inp}, y\big|_{t=0} = 0, z\big|_{t=0} = z_{0,inp}$,где координаты в левой части равенств обозначают место истечения газовой струи из сопла.

Полученный закон изменения скорости композиционной частицы позволяет определять её значение в произвольный момент времени, а также знать её координаты с точностью до произвольной постоянной.

Для определения теплового равновесия существующего потока частиц можно записать уравнение баланса:

$$\rho_p C_{ep} \frac{\partial T_p}{\partial t} = div\left(\lambda_p gradT_p\right), \quad 0 < t < t_k, \quad (x, y, z) \in \Omega_p \tag{5}$$

где T_p – мгновенное значение температуры композиционного включения в заданной точке пространства.

В дальнейших рассуждениях будем полагать: перенос тепла осуществляется исключительно посредством теплопроводности. Проходящий процесс изотропен.

Результаты и обсуждение. Предполагается, что явно выраженного фронта плавления нет. Определяющее соотношение записывается с использованием эффективной теплоемкости (рис. 1) [2, 8, 10].

Вводится в рассмотрение сферическая система координат, уравнение теплового баланса (5), в которой можно представить в виде:

$$\rho_p C_{ep} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 \sin(\theta)}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\lambda_p \sin(\theta)\frac{\partial T_p}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2 \sin^2(\theta)}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial \varphi}\right) \tag{6}$$

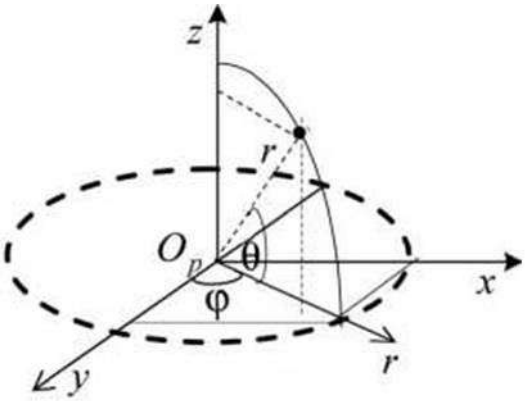

Рисунок 1 - Локальная система координат для описания движения и геометрии частицы

Компоненты тензора напряжений внутри частицы имеют следующий вид:

$$\begin{gathered}
\sigma_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \sigma_{r\varphi} = \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r\sin(\theta)}\frac{\partial u_r}{\partial \varphi} - \frac{u_\varphi}{r}, \\
\sigma_{r\varphi} = \frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}, \\
\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r\sin(\theta)}\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{u_r}{r} + \frac{u_\Theta ctg(\theta)}{r}, \sigma_{\varphi r} = \sigma_{r\varphi}, \\
\sigma_{\varphi\theta} = \frac{1}{r\sin(\theta)}\frac{\partial u_\theta}{\partial \varphi} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\varphi}{\partial \theta} - \frac{u_\varphi ctg(\theta)}{r}, \\
\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{r\sin(\theta)}\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}, \sigma_{\theta r} = \sigma_{r\theta}, \sigma_{\theta\varphi} = \sigma_{\varphi\theta}.
\end{gathered} \tag{7}$$

В рамках рассматриваемой модели положим, что поле градиента температуры изотропно относительно вектора скорости движения частиц. В зоне $r = R_p$ теплообмен рассматривается особым образом: при r=0 имеет место симметрия теплового потока струи. В этом случае уравнение (6) для заданного диапазона изменения координаты преобразуется к виду:

$$\rho_p C_{ep} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r}\right), 0 < r < R_p \tag{8}$$

Значение R_p определяется габаритами композиционных включений. Будем полагать, что при достижении критической температуры значение R_p характеризуется фронтом испарения.

Уравнение баланса для значения $r=R_p$ описывается соотношением Стефана-Больцмана, имеющее вид:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_{t0}\left(T_p - T_g\right) + \beta_b \sigma_b \left(T_p^4 - T_g^4\right), \tag{9}$$

где T_g – значение температуры плазменного потока; α_{t0} – коэффициент теплообмена (таблица значений представлена в [1]).

При r=0 в условиях симметрии относительно оси плазменной струи уравнение баланса запишется:

$$\lim_{r \to 0} r^2 \lambda_r \frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \tag{10}$$

Полученные дифференциальные уравнения не интегрируются в квадратурах. Решение ищется с использованием численных методов [6, 9]. Суть предлагаемого разностного метода описана в [2].

Вводятся для рассмотрения разностные сетки: первая ось – временная ω_tшагом интегрирования Δt_m; вторая ось – координатная $\overline{\omega}_r$ с шагом интегрирования Δt_i (рисунок 2).

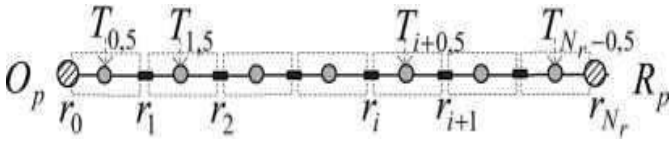

Рисунок 2 - Принципиальная схема численного решения определяющих соотношений (9), (10)

Элементарные объемы $e_{r,i} = \left[r_{i-1}, r_i\right]$ подбираются таким образом, чтобы полностью перекрыть область допустимых значений пространственно-временных координат так, чтобы $\left[0, R_p\right] = \bigcup_{i=1}^{N_R} e_{r,i}$. Варьируемым параметром полагают температуру в произвольной точке выбранного объема$T_{i+0,5} = T_p(r_{i+0,5}, t_m)$, а также её краевые значения.

Интегрируя (8) по внутренним элементарным объемам $e_{r,i}=[r_{i-1},r_i]$, имеем:

$$\rho_{i+0,5} C_{e,i+0,5} \frac{T_{i+0,5} - \breve{T}_{i+0,5}}{\Delta t_m} = \frac{1}{r_i^2 \Delta r_i}\left[r_{i+1}^2 \lambda_{i+1} \frac{T_{i+1,5} - T_{i+0,5}}{\overline{\Delta r_{i+1}}} - r_i^2 \lambda_i \frac{T_{i+0,5} - T_{i+0,5}}{\overline{\Delta r_i}}\right] \tag{11}$$

где $\overline{\Delta r_i} = r_{i+0,5} - r_{i-0,5} = 0,5\left(\Delta r_i + \Delta r_{i-1}\right)$; $\Delta r_i = r_{i+1} - r_i$; $\breve{T}_{p,i} = T_p\left(r_i, t_m\right)$.

Выражение (11) содержит N_r уравнений относительно $N_0^T = N_r + 2$ неизвестных. При переходе к численному интегрированию соотношения (10), оно трансформируется в:

$$\lambda_0 \frac{T_{0,5} - T_0}{0,5\Delta r_i} - \frac{\Delta r_i}{6} C_{e,0} \rho_0 \frac{T_0 - \breve{T}_0}{\Delta t_m} = 0 \tag{12}$$

Нетрудно заметить, что полученное уравнение допускает погрешность, не превосходящую величины порядка $\Delta r_i^2 + \Delta t_m$ на решении (8).

Уравнение баланса для граничной области интегрируем также с точностью до второго порядка:

$$-\left(\alpha_{t0}\left(T_{Nr} - T_g\right) + \beta \sigma_b \left(T_{Nr}^4 - T_g^4\right)\right) - \lambda_{N-0,25} \frac{T_{Nr} - T_{Nr-0,5}}{\Delta \tilde{r}_{Nr}} - \frac{\Delta \tilde{r}_{Nr}}{2} r_{Nr-0,25}^2 C_{e,Nr} \rho_{Nr} \frac{T_{Nr} - T_{Nr}}{\Delta t_m} = 0 \tag{13}$$

где $\Delta \tilde{r}_{Nr} = 0,5\Delta r_{Nr}$; $r_{Nr-0,25} = r_{Nr} - 0,25\Delta r_{Nr}$.

Соотношения (11)–(13) в совокупности представляют собой нелинейную систему алгебраических уравнений относительно $T_{p,i}$. Последовательное решение её будем реализовывать через итерационный процесс во внутренних узлах пространственно-временных координат при i изменяющихся до 1 до N_{r-1}:

$$\rho_{p,i}C_{ep,i}\frac{\overset{s+1}{T_i}-\tilde{T}_i}{\Delta t_m}=\frac{1}{r_{i+0,5}^2\overline{\Delta r_i}}\cdot\left(r_{i+0,5}^2\tilde{\lambda}_{p,i}\frac{\overset{s+1}{T_{i+1}}-\overset{s+1}{T_i}}{\overline{\Delta r_{i+1}}}-r_{i-0,5}^2\tilde{\lambda}_{p,i-1}\frac{\overset{s+1}{T_i}-\overset{s+1}{T_{i-1}}}{\overline{\Delta r_i}}\right). \quad (14)$$

Полученное линеаризованное уравнение перепишем относительно неизвестных в следующем виде:

$$a_iT_{i-0,5}^{s+1}+b_iT_{i+0,5}^{s+1}-c_iT_{i+0,5}^{s+1}+f_1=0,\quad i=1,...,N_{r-1} \quad (15)$$

Соотношение (11) на границе области определения – в нуле, запишется таким образом:

$$\lambda_0\frac{\overset{s+1}{T_{0,5}}-\overset{s+1}{T_0}}{0,5\Delta r_1}-\frac{\Delta r_1}{6}C_{e,0}\rho_0\frac{\overset{s+1}{T_0}-\tilde{T}_0}{\Delta t_m}=0 \quad (16)$$

Для более удобного анализа полученное выражение перепишем в следующем виде:

$$-c_0T_0^{s+1}+bT_{0,5}^{s+1}+f_0=0 \quad (17)$$

Аналогично для соотношения (13) можем записать:

$$a_{Nr}T_{Nr-1}^{s+1}-c_{Nr}T_{Nr}^{s+1}+f_{Nr}=0 \quad (18)$$

Уравнения (15)–(18) для большей наглядности перепишем теперь в матричном виде:

$$\overset{s+1}{\mathrm{A}}\,\overset{s+1}{T}=F \quad (19)$$

где $A^{(s)}$- матрица размерности $\left[N_0^T\times N_0^T\right]$.

Из соотношений (13)–(15) отдельные элементы матрицы определяются как:

$$a_i=\frac{\Delta t_m}{\overline{\Delta r_i}\Delta r_{i-1}}\frac{r_{i-0,5}^2}{r_i^2}\lambda_{i-0,5},\quad \mathrm{b}_i=\frac{\Delta t_m}{\overline{\Delta r_i}\Delta r_i}\frac{r_{i+0,5}^2}{r_i^2}\lambda_{i+0,5},\quad \mathrm{c}_i=\rho_iC_{e,i}+a_i+b_i \quad (20)$$

Решаем полученные уравнения методом прогонки. Условия устойчивости для предлагаемого алгоритма выполнены ($a_i>0$, $b_i>0$, $c_i\geq a_i+b_i$). В качестве критерия сходимости полагаем:

$$\left|T_{i+0,5}^{s+1}-T_{i+0,5}^{s}\right|\leq\varepsilon_1T_{i+0,5}^{s}+\varepsilon_2,\quad i=0,...,N_r \quad (21)$$

где ε_1, ε_2 – фиксированные числа.

Все необходимые параметры: температуру струи – T_g , положение композиционного включения – $\overset{s+1}{l}_{m+1}$, его скорость – $\overset{s}{v}_p$ в любой момент времени определяют следующим образом:

$$T_g=f_{A,str}\left(l_{m+1}^{s+1},r_{str}\right),\quad l_{m+1}^{s+1}=l_m+\overset{s}{v}_p\Delta t_m,\quad \overset{s}{v}_p=f_{A,v_p}\left(\overset{s}{l}_{m+1},R_p\right). \quad (22)$$

Предположим, что распыляемые частицы располагаются в зоне максимальной температуры газового потока. В этом случае скорость газа будет максимальной. Такое состояние композиционных включений обеспечивает необходимую степень их сращивания с матрицей формируемого покрытия и обеспечивает высокую адгезию к обрабатываемой поверхности.

В качестве исходных данных рассмотрим нагрев сферической частицы $A1_2O_3$ диаметром 45 мкм. Решая совместно уравнения (19) и (22) для каждого временного слоя, получим значение координат частиц, их скорости и температуры для каждой точки плазменного потока. Средняя скорость частиц вдоль оси струи, в зависимости от пройденного пути, приведена на рисунке 3. Как видно на рисунке 4 в момент времени t=0,00016 с (кривая 1) на расстоянии *l* = 0,0184 м от кромки сопла границы композиционных включений начинают плавиться. В момент времениt=0,00025 с (кривая 2) на расстоянии*l*=0,0403 м происходит дальнейший нагрев армирующих частиц. При t=0,00045 с (кривая 3) и*l* = 0,0935 м налицо переход композиционных частиц в жидкое состояние. Кроме того, как видно на рисунке 3, для таких расстояний значение скорости потока будет максимальным.

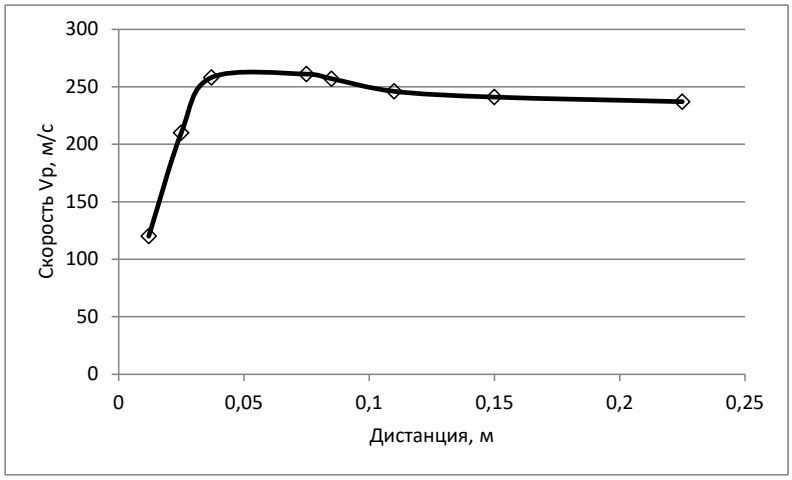

Рисунок 3 - Зависимость скорости частицы как функции пройденного расстояния от сопла распылителя

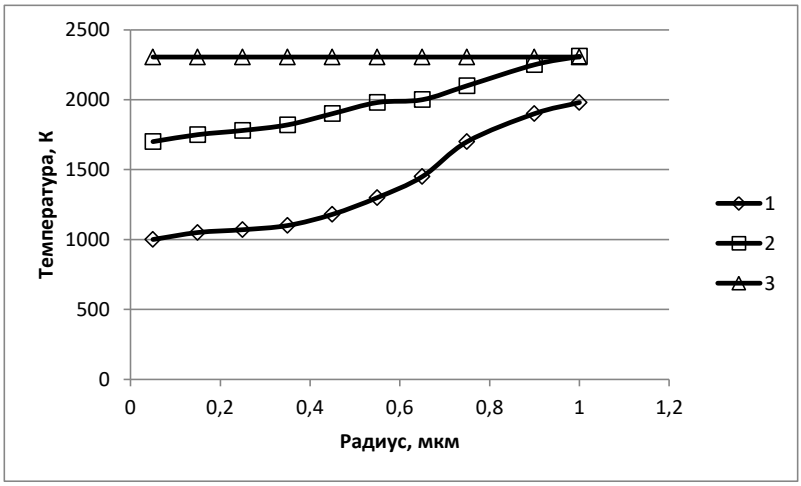

Рисунок 4 - Характер распределения температуры внутри частицы в зависимости от её размера для различных временных интервалов

Выводы. При поиске рациональных режимов нанесения плазменного покрытия использовался критерий контролируемого плавления частиц композиционного материала. С одной стороны, это обеспечивает получение требуемой адгезии покрытия с обрабатываемой поверхностью, а с другой – создаёт сжимающие остаточные напряжения в формируемом слое.

Полученные закономерности скорости частицы как функции пройденного расстояния от сопла распылителя и по характеру распределения температуры внутри частицы в зависимости от её размера для различных временных интервалов позволяют заранее прогнозировать свойства осаждаемых покрытий, добиваясь тех или иных особенностей, определяемых условиями эксплуатации восстанавливаемого узла.

Список источников

1. Кудинов В.В., Пекшев П. Ю., Белащенко В. Е. и др. Нанесение покрытий плазмой. − М., 1990. – 58 с.
2. Костиков В. И., Шестерин Ю. А. Плазменные покрытия. – М., 1978. – 154 с.
3. Жачкин С.Ю. Расчет напряжений в дисперсно-упрочненных композитных гальванических покрытиях / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, О.А. Сидоркин, С.В. Нелысов // Наука в центральной России. – 2016. – № 2. – С. 32–37.
4. Жачкин С.Ю. Антикоррозионная защита металла методом гальваноконтактного

осаждения / С.Ю. Жачкин, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, В.В. Михайлов, Д.В. Гедзенко, Н.А. Пеньков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 11. – С. 29–31.

5. Жачкин С.Ю. Нанесение размерных композитных хромовых покрытий методом гальваноконтактного осаждения / С.Ю. Жачкин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 7. – С. 44–48.

6. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М., 1983. – 214 с.

7. Zhachkin S.Yu. Wear-resistance of composite galvanic chrome coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova // Engineering Studies. – 2017. – Vol. 9, is. 3(2). – P. 529–536.

8. Жачкин С.Ю. Холодное гальваноконтактное восстановление деталей // Воронеж: ВГТУ, 2002. – 138 с.

9. Жачкин С.Ю. Нанесение размерных композитных хромовых покрытий методом гальваноконтактного осаждения / С.Ю. Жачкин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 7. – С. 44–48.

10. Zhachkin S.Yu. The impact of the strengthening phase filler on the properties of composite dispersion-strengthened galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.A. Krasnova, A.I. Zavrazhnov // Engeneering computations. – 2018. – № 8(2). – Vol. 35. – P. 3245–3251.

References

1. Kudinov V.V., Pekshev P.Yu., Belashchenko V.E., et al. Plasma Coating. – M., 1990. – 58 p.

2. Kostikov V.I., Shesterin Yu.A. Plasma coatings. – M., 1978. – 154 p.

3. Zhachkin S.Yu. Calculation of stresses in dispersion-strengthened composite galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, O.A. Sidorkin, S.V. Nelysov // Science in Central Russia. – 2016. – №.2. – P. 32–37.

4. Zhachkin S.Yu. Anticorrosive protection of metal by the method of galvanic contact deposition / S.Yu. Zhachkin, A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, V.V. Mikhailov, D.V. Gedzenko, N.A. Penkov // Strengthening technologies and coatings. – 2014. – №.11. – P. 29–31.

5. Zhachkin S.Yu. Application of dimensional composite chromium coatings by galvanic contact deposition / S.Yu. Zhachkin // Strengthening technologies and coatings. – 2006. – № 7. – P. 44–48.

6. Samarsky A.A. Theory of difference schemes. – M., 1983. – 214 p.

7. Zhachkin S.Yu. Wear-resistance of composite galvanic chrome coatings /S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova// Engineering Studies. – 2017. – Vol. 9, is. 3(2). – P. 529–536.

8. Zhachkin S.Yu. Holodnoe gal'vanokontaktnoe vosstanovlenie detalej // Voronezh: VGTU, 2002. – 138 s.

9. Zhachkin S.Yu. Application of dimensional composite chromium coatings by galvanic contact deposition / S.Yu.Zhachkin // Strengthening technologies and coatings. – 2006. – №.7. – P. 44–48.

10. Zhachkin S.Yu. The impact of the strengthening phase filler on the properties of composite dispersion-strengthened galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.A. Krasnova, A.I. Zavrazhnov // Engeneering computations. – 2018. – № 8(2). – Vol. 35. – P. 3245–3251.

Информация об авторах

С. Ю. Жачкин – доктор технических науч, профессор; Н. А. Пеньков – доктор технических наук; Д. В. Щипцов – преподаватель; П. В. Цисоренко – старший офицер.

Information about the authors

S. Zhachkin - Doctor of Technical Sciences, Professor; N. Penkov - Doctor of Technical Sciences; D. Shchiptsov - lecturer; P. Tsisorenko – senior officer.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 24.10.2022 Принята к публикации (Accepted): 14.12.2022