

И.А. Селиверстов¹, С.А. Русанов², канд.техн.наук, мол. научн. сотр.,

И.В. Смирнов¹, канд.техн.наук, доц., В.И. Копылов¹, д-р техн.наук, проф.

1 – НТУ Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина

2 – Херсонский НТУ, г. Херсон, Украина

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВИБРОКИПАЮЩЕМ СЛОЕ

Проведено аналіз поведінки порошкового матеріалу в умовах впливу вібрації і плазмового потоку в процесі вакуумної металізації. За допомогою комп'ютерного моделювання були визначені раціональні параметри віброперемішування для отримання рівномірної металевої оболонки на частинках керамічного порошку. Показана можливість плакування порошкового матеріалу з ультратонкими частинками методом вакуумної металізації.

The assaying of behaviour of a powdered material in the conditions of agency of vibration and a plasma stream in the course of vacuum schooping is carried out. By means of computer modeling rational parameters intermixing of a powder for reception of the uniform metal shell on particles of a ceramic powder have been spotted. Possibility of cladding of a powdered material with the ultradimensional particles a method of vacuum schooping is shown.

Введение При создании защитных покрытий используются композиционные порошки, полученные, в том числе, в условиях вакуумной металлизации [1 -3].

Ионно-плазменное плакирование порошков при дуговом разряде включает в себя в качестве необходимого этапа перемешивание порошковой смеси, содержащей порой компоненты различной фракции – от макрочастиц диаметром десятки и сотни микрометров до ультрадисперсных составляющих (нанопорошков). При этом для интенсификации процесса перемешивания сопровождается вибрационным воздействием [3, 4]. Степень интенсификации процесса перемешивания с одновременным наложением вибраций, а также процесса плакирования порошкового материала, в целом, определяется внешними условиями, конструктивными особенностями установки, физико-механическими свойствами и формой частиц порошка, параметрами вибрации и вакуумно-дугового напыления, а также рядом других факторов.

Под действием вибраций порошки могут переходить в состояние виброоживления, а при более интенсивном воздействии – в состояние виброкипания [5, 6]. В нашем случае виброкипящий слой подвергается активному перемешиванию, которое зависит, прежде всего, от ускорения колебаний. В то же время при описании состояния частиц порошка в вакууме необходимо учитывать силовое воздействие на порошковую массу также потока напыляемых микрочастиц плазмы [1]. Кроме того, процесс вакуумной металлизации порошковых материалов характеризуется очень сложными физико-химическими процессами, изменяющимися во времени, и протекающими на поверхности макрочастиц и в глубине виброкипящего слоя. Наиболее важным фактором, обуславливающим эффективность перемешивания и, прежде всего тонкодисперсных порошков, а также свойства плакирующих пленок, является температура на поверхности обрабатываемых частиц, которая устанавливается в результате теплового и динамического воздействия со стороны плазменного потока. Все эти вопросы, связанные с изучением особенностей плакирования порошкового материала в вакууме в условиях перемешивания и наложения вибраций, на сегодняшний день остаются малоизученными и актуальными.

Постановка задачи Целью работы является определение и анализ оптимальных параметров плакирования, а также интенсивности вибрационных колебаний в условиях перемешивания с учетом воздействия на виброкипящий слой порошковой смеси плазменного потока частиц напыляемого металла.

Методика исследований Плакирование порошка осуществлялось на установке ионно-плазменного напыления АНГА-1. В качестве обрабатываемого порошка был выбран оксид алюминия (Al_2O_3), на который наносились пленки титана и алюминия (катодный материал) в условиях вакуума

($\sim 10^{-3}$ Па) [1]. Для активации процесса перемешивания порошка разработано специальное вибрационное устройство, которое размещалось внутри вакуумной камеры установки АНГА-1 (Рис. 1).

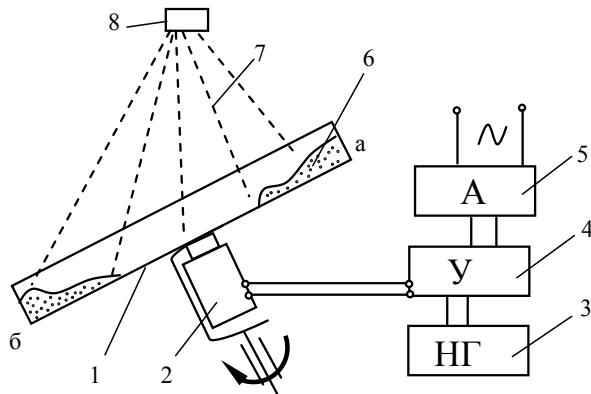


Рис. 1 Схема устройства для перемешивания порошка при наложении вибрации

Порошок засыпался в загрузочное устройство 1, выполненное в виде круглого медного короба к днищу которого жестко закреплялась электромагнитная катушка 2 с массивным стальным сердечником, питание катушки осуществлялось с помощью усилителя 4, исходный сигнал формировался низкочастотным генератором 3 в диапазоне 10–100 Гц. Мощность сигнала регулировалась автотрансформатором 5. Работа устройства заключалась в следующем. Порошок из верхнего положения (а) под действием вибрации доводился до состояния виброкипения, равномерно распределялся по днищу короба и перемещался в положение (б), затем короб поворачивался на 180° и процесс повторялся.

Плазменный поток 7 генерировался от металлического катода 8 находящегося над порошком 6.

Результаты и обсуждение полученных данных

Виброперемешивание порошкового материала

Как известно, состояние материала на вибрирующей поверхности определяется параметром перегрузки (коэффициент режима работы) [5]:

$$\Gamma = \frac{A\omega^2 \sin \beta}{g \cos \alpha} \quad (1)$$

где A – амплитуда колебаний, м; ω – круговая частота колебаний, с^{-1} ; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; α – угол наклона вибрирующей поверхности к горизонту, рад; β – угол наклона траектории колебаний относительно вибрирующей поверхности (угол вибрации), рад.

Чтобы слой материала двигался по вибрирующей поверхности с отрывом (виброкипящий слой), необходимо (но недостаточно), чтобы значение $\Gamma > 1$, в противном случае отрыва частицы от поверхности не будет. Нужно учитывать, что для промышленной вибрационной системы переход слоя материала из состояния виброожижения к состоянию виброкипения наблюдается в некоторых случаях при значительно большей интенсивности вибрации, чем это следует из формулы (1).

На динамику виброкипящего слоя оказывают влияние физико-механические свойства порошкового материала, и наиболее значительные прежде всего такие, как компрессионные, когезионные и адгезионные свойства, а также способность к вибрационному уплотнению материала и тому подобное [5]. Чем более сжатый материал, тем более значительное влияние оказывают предельные условия задачи – взаимодействие слоя со стенками рабочего органа. Также необходимо учитывать влияние на характер движения слоя взаимодействие частиц в разрыхленном состоянии, что может быть задано согласно кинетическим теориям, или эмпирической зависимостью.

Определить параметры виброкипения, которые обеспечивали бы оптимальные условия перемешивания в реальном времени в вакуумной камере установки АНГА-1, является очень сложной задачей. В связи с этим было проведено предварительное численное моделирование поведения порошкового материала на вибрирующих поверхностях. Анализ вышеупомянутых процессов, которые происходят при вибрационном воздействии на порошок, был проведен с помощью системы автоматизированного моделирования «Виброслой 1.0» [7, 8].

Эффективность равномерного осаждения слоя металла при выбранных параметрах вибрации (амплитуда и частота) и скорости вибротранспортировки, которая непосредственно влияет на равномерность распределения металлической пленки на поверхности частицы, оценивалась металлографическим анализом по величине толщины слоя h , известным значениям массы m материала, которая испарялась из катода (определялась экспериментальным методом):

$$h = R_1 - R_0 \quad (2)$$

Для упрощения расчетов приняли форму частицы порошка в виде шара с радиусом R_0 , и тогда масса одной частицы порошка определится выражением:

$$m_i = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \rho \quad (3)$$

где ρ – объемная масса материала частицы (объемная масса Al_2O_3 – 3970 кг/м³).

Радиус частицы с оболочкой обозначим через R_1 , тогда теоретическая масса оболочки одиночной частицы порошка определится по формуле:

$$m_{об.м.} = V_{об} \rho_m = \frac{4}{3} \pi (R_1^3 - R_0^3) \rho_m \quad (4)$$

где ρ_m – объемная масса материала катода.

Масса оболочки может быть определена экспериментально, и рассчитана по формуле:

$$m_{об.е.} = \frac{m}{N} \quad (5)$$

где $N = \frac{m_n}{m_i}$ – количество частиц в массе порошка, m_n – масса порошка.

Тогда теоретически рассчитанная толщина металлической оболочки определяется как:

$$h = \sqrt[3]{\frac{3V_{об}}{4\pi} + R_0^3} - R_0 \quad (6)$$

Система автоматизированного моделирования «Виброслой 1.0», с помощью которой проводилось численное моделирование процесса виброкипения, предназначена для моделирования гидродинамики виброкипящих слоев, с учетом особенностей дисперсного материала как двухфазной среды. В программе осуществляется численное решение дифференциальных уравнений неразрывности и движения для твердой и газовой фазы, которые представлены в виде [8, 9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_s \varepsilon_s}{\partial t} + \text{div}(\rho_s \varepsilon_s \mathbf{v}_s) &= 0; \\ \varepsilon_s &= \frac{\varepsilon_{so}(\mathbf{r})}{1 + \text{div} \mathbf{u}}; \\ \mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s &= -\frac{k}{\mu} \text{grad } p; \\ \rho_s \varepsilon_s \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} &= -\varepsilon_s \cdot \text{grad } p + \text{Div} \boldsymbol{\tau} - \rho_s \varepsilon_s \mathbf{g} + \mathbf{R}. \end{aligned} \quad (7)$$

где ε_i – объемная концентрация i компоненты (ε_g имеет название порозность); ρ_i – объемная масса i компоненты, $i=s,g$, кг/м³; \mathbf{v}_i – вектор скорости i компоненты, м/с; \mathbf{u} – вектор перемещения центра тяжести системы частиц, которая находится внутри элементарного физического объема dV с радиус-вектором \mathbf{r} , выделенного в области Ω , м; k – проницаемость слоя, м²; μ – динамическая вязкость газа, Па·с; t – время, с; p – давление, Па; \mathbf{R} – вектор взаимодействия между частицей и газом, Н/м³; $\boldsymbol{\tau}$ – тензор напряжений (какие возникают при взаимодействии частиц); Div – оператор тензорной дивергенции.

Замыкают систему (7) реологические зависимости для заданной среды, которые вместе с начальными и предельными условиями позволяют промоделировать процесс вибровозбуждения дисперсного материала, при этом вид отмеченных параметров зависит от параметра χ , что указывает на то, находится ли материал в данной точке в плотном состоянии ($\chi = 1$) или в состоянии взрыхления ($\chi = 0$):

$$\chi = \begin{cases} 1, & f(\tau_{ij}) \leq [\sigma]; \\ 0, & f(\tau_{ij}) > [\sigma], \end{cases} \quad (8)$$

где τ_{ij} – компоненты тензора напряжений в слое материала, $f(\tau_{ij}) R[\sigma]$, $R \in \{<, >, =\}$ – условие прочности элементарного физического объема порошковой среды, как отношения между комбинацией напряжений

$f(\tau_{ij})$ и предельным ее значениям $[\sigma]$. Например, если рассматривается одномерное подбрасывание слоя материала, который в плотном состоянии может считаться упругой изотропной средой, то

$$\chi = \begin{cases} 1, & E_0 \partial u_y / \partial y \leq \sigma_0; \\ 0, & E_0 \partial u_y / \partial y > \sigma_0, \end{cases} \quad (9)$$

где u_y – сдвиг частицы материала относительно статического состояния, м; E_0 – модуль общей линейной деформации материала (модуль структурной деформации), Па [5]; σ_0 – удельное усилие сцепления зерен (прочность внутренней связи), Па [4].

Аналогично задается условие предельного равновесия, определяющее пластичную зону. Тогда на плоскости скольжения в условиях предельного равновесия полное касательное напряжение равняется

$$\tau = f\sigma + \tau_0 \quad (10)$$

где f – коэффициент внутреннего трения; σ – нормальные напряжения, Па; τ_0 – начальное сопротивление сдвига, Па.

Направление τ совпадает с направлением главной скорости деформации сдвига.

От параметра χ зависит модель реологического поведения слоя материала в каждом элементарном физическом объеме среды. В первом приближении слой дисперсного материала в плотном состоянии можно считать упругой изотропной средой [10, 11]. В соответствии с этим тензор, который описывает плотное состояние среды вне состояния предельного равновесия, запишется как [10, 11]:

$$\tau_{ij} \Big|_{\chi=1} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\eta \varepsilon_{ij} \quad (11)$$

где η, λ – постоянные ламе, Па, которые зависят от порозности сыпучей среды ε ; δ_{ij} – символ кронекера;

$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – компоненты тензора малой относительной деформации.

Тензор, который описывает среду в состоянии взрыхления, задается аналогично тензору вязких напряжений для ньютоновской жидкости в виде [12]:

$$\tau_{ij} \Big|_{\chi=0} = \mu_s \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{2}{3} \mu_s \dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij} \quad (12)$$

где μ_s – параметр, который характеризует интенсивность обмена импульсом при столкновениях частицы в слое в состоянии взрыхления; $\dot{\varepsilon}$ – дифференцирование параметра по времени.

Предельные условия описывают состояние твердой и газовой фазы около верхней и нижней вибрирующей поверхности.

Более обстоятельно модель дисперсной среды под действием вибрации и результаты численного моделирования при решении определенных задач виброкипения рассмотрены в ряде работ [8, 9, 13]. На основании таких подходов для описанных выше условий эксперимента путем численного моделирования в рамках программы «Виброслой 1.0» были получены результаты, которые раскрывают некоторые особенности движения рассмотренного материала, с учетом широкого спектра влияющих на процессы факторов. При движении частиц порошкового материала на первое место по влиянию на общий характер движения выходит когезионная и адгезионная характеристики.

Проведение эксперимента в вакууме эквивалентно заданию высокой проницаемости k слоя. На Рис. 2–5 представлены результаты моделирования динамики слоев порошка оксида алюминия фракцией 20–60 мкм на платформе, которая вибрирует с частотой 30 Гц и амплитудой колебаний 0,3 мм.

Как видно на Рис. 2., а при указанных параметрах вибрации порошковый материал периодически отрывается от грузонесущей поверхности и находится в виброкипящем состоянии. Перемещение слоя вдоль вибрирующей поверхности не является равномерным. За счет действия адгезионной и когезионной составляющей и обмена импульсами в состоянии взрыхления нижние монослои отстают от верхних, что особенно заметно на пространственной траектории движения частиц (Рис. 2. в).

Характерное торможение нижних частиц хорошо просматривается на графике распределения скорости движения вдоль вибрирующей поверхности по высоте и во времени (Рис. 3).

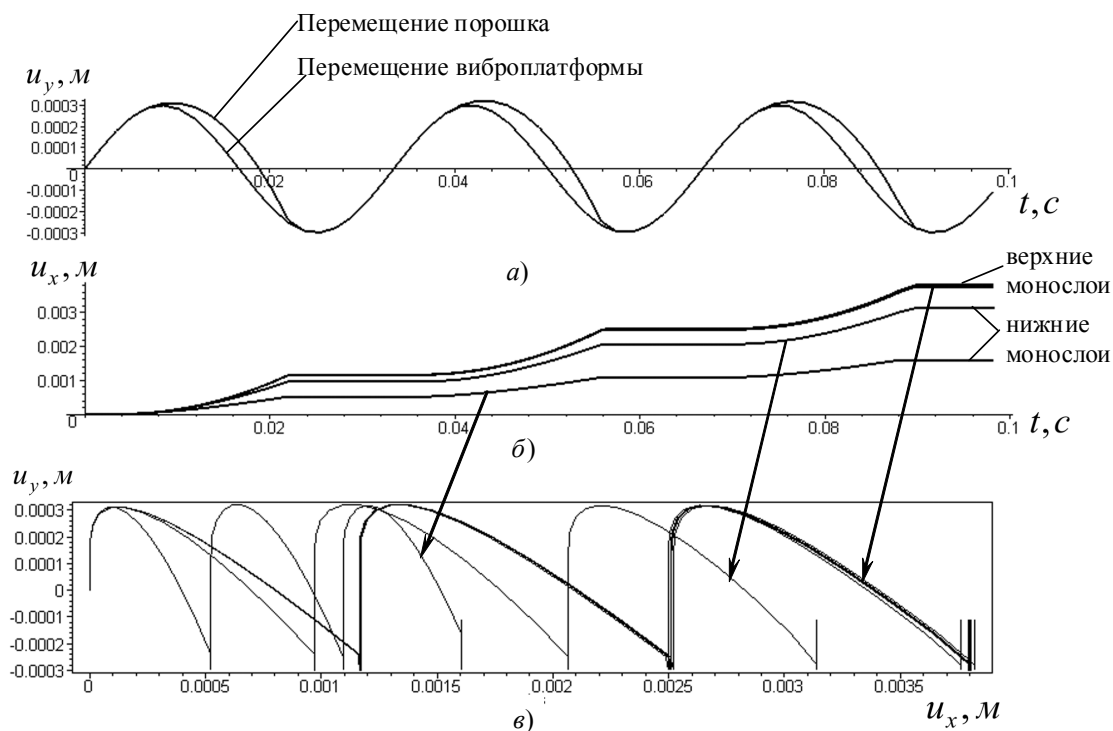


Рис. 2 Поперечные (а) и продольные (б) перемещения слоя материала и траектории движения частицы слоя в пространстве (в)

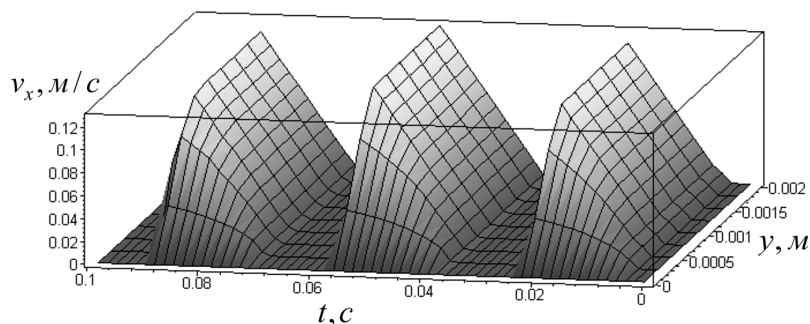


Рис. 3 Скорость движения частицы вдоль вибрирующей поверхности по высоте слоя во времени

Средняя скорость движения частиц вдоль вибрирующей поверхности, как следует из Рис. 4., распределена также неравномерно по высоте слоя. При отмеченных условиях эта скорость достигает 4,5 см/с, что удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными.

На Рис. 5. представлено распределение ударных сжимающих напряжений. Указанные напряжения влияют не только на общий характер движения слоя материала, но и могут значительно повлиять на закон движения вибрирующей поверхности, особенно, например, для достаточно высоких слоев порошковой массы.

Тем не менее, данные о таких напряжениях, полученные при моделировании и в результате проведенных экспериментов, свидетельствуют о незначительном влиянии высоты слоя в диапазоне 2–5 мм и массой порошка 260–670 г на параметры его движения применительно к конструкции данной вакуумной установки.

Таким образом, необходимо отметить, что интенсивность перемешивания, а, в конечном счете скорость конденсации металла на поверхности частичек порошка, взаимосвязаны и зависят, как от времени пребывания порошка во взвешенном состоянии под влиянием плазменных потоков, так и от скорости вибротранспортирования (скорости перемещения с верхнего положения в нижнее) порошка по

наклонной поверхности дна перемешивающего устройства. На основе экспериментальных данных и в результате компьютерного моделирования были получены оптимальные параметры виброкипения, которые влияют на заданную скорость, а именно частота и амплитуда колебаний.

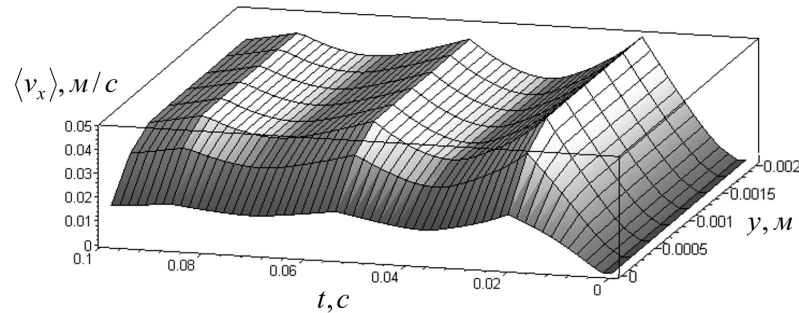


Рис. 4 Распределение средней скорости движения частиц порошка вдоль вибрирующей поверхности

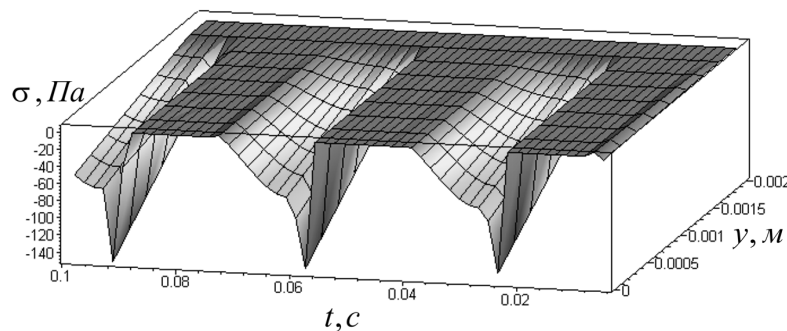


Рис. 5 Распределение сжимающих напряжений по высоте и во времени виброкипящего слоя порошка на основе оксида алюминия

Совмещение процессов виброперемешивания и осаждения из потока плазмы

Динамика порошкового материала определяется не только наложением виброколебаний, но также и процессом взаимодействия с потоком распыляемых микрочастиц (потоком металлической плазмы), осаждаемых в виде оболочки на поверхность макрочастиц порошка (Al_2O_3).

Согласно имеющимся данным в условиях вакуумно-дуговой металлизации плазменный поток (Al, Ti) при высокой плотности ($\approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$) имеет скорость порядка 350–1000 м/с, что определяет характер взаимодействия заряженных ионов с частицами порошка [1]. В этих условиях возможно, что в процессе взаимодействия за счет передачи кинетической энергии от плазменного потока, частицы порошка, приобретая прямолинейное движение, могут отклоняться на значительную дистанцию от траектории, которую задает вибротранспортирующая поверхность, превышающую размеры вакуумной камеры. С другой стороны, при встречном движении плазменного потока имеется вероятность торможения вибрирующих частиц порошка и прекращение их движения, что не желательно.

Таким образом, эффективность реакции порошка определяется наложением двух сил – от вибрирующей поверхности и плазменного потока. Эти силы, в свою очередь, можно оценить по скорости изменения импульса макрочастицы под действием этих сил.

В первом случае импульс силы от вибрирующей поверхности можно записать в виде:

$$F_1 = MV_1 \quad (13)$$

где M – масса частицы порошка.

Полную максимальную скорость направленного движения при виброкипании $V_l = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ определим из графиков скоростей (Рис. 6).

Как следует из Рис. 6, скорость частиц порошка вдоль несущей поверхности V_x приближается к нулю, когда порошок лежит на вибротранспортирующей поверхности. В то же время скорость частиц в

перпендикулярном направлении к платформе V_y изменяется по закону движения вибротранспортирующей поверхности (участок а – б).

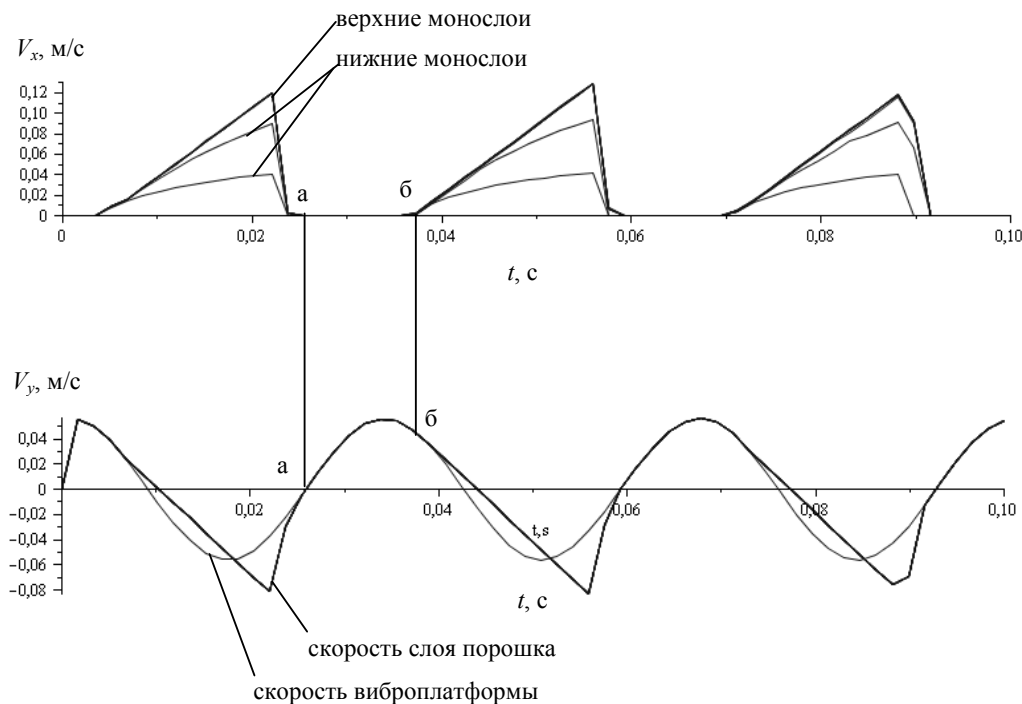


Рис. 6 Скорость движения частицы порошка в направлении координатных осей (ось X направленная параллельно, а ось Y перпендикулярно несущей поверхности)

В момент отрыва (падения) скорость изменяется практически по прямолинейному закону

$$\begin{cases} V_x = -gt \cos \alpha + V_{x0}; \\ V_y = -gt \sin \alpha + V_{y0}, \end{cases}$$

и при условии отсутствия сопротивления газов приобретает значения, большие по сравнению со скоростью виброплатформы.

Во втором случае при взаимодействии (ударе) импульс силы от направленного движения ионов (Al, Ti) определяется как:

$$F_2 = \frac{d}{dt}(m_j v) \quad (14)$$

где $m_j = \frac{N_i^{2/3} m_0 \pi d}{4}$ – полный (максимальный) поток, который падает на одну макрочастицу диаметром d ; N_i – ионная концентрация, m_0 – масса одного иона; v – скорость направленного движения ионов.

При этом отклонение (рассеивание) макрочастиц порошка оксида алюминия, на которые наносится оболочка, на некоторое расстояние l от своего начального положения может быть определено, исходя из законов сохранения энергии и импульса, и записывается в виде:

$$l = \int_{m_0}^{m_j} \frac{2v^2}{F_2} \frac{m}{m+M} dm \quad (15)$$

Значения силы F_2 были рассчитаны на основании экспериментальных данных по определению давления плазменного потока на порошковую массу р.

Результаты расчетов по уравнению (15) величины разлета (отклонения) макрочастиц в зависимости от их диаметра D , для соответствующих параметров осаждения ионов катодного материала приведены на Рис. 7.

Согласно теоретическим расчетам величина отклонения l частиц Al_2O_3 сильно зависит от концентрации плазменного потока, и наибольшие отклонения при данных режимах осаждения наблюдаются для частиц диаметром, меньших 1 мкм, то есть ультрадисперсных порошков. Для частиц диаметром 40–60 мкм отклонения частиц не наблюдается.

Такие теоретические выводы соответствуют наблюдениям при проведении экспериментов.

При испытании смесей порошков, которые содержали ультрадисперсную составляющую (диаметр ≤ 1 мкм), установлен разлет определенной массы частиц за пределы рабочей емкости (виброплатформы), где перемешивался порошок.

Выводы Таким образом, при вакуумном плакировании необходимо учитывать две составляющие силового воздействия на порошковый материал – со стороны потока ионов (металлической плазмы) и со стороны виброплатформы.

Проведенный теоретический анализ параметров распыления катодного материала из алюминия и титана, а также параметров виброкипения при перемешивании порошка оксида алюминия и смесей на его основе позволяет на практике обеспечить эффективное перемешивание всей порошковой массы и создать равномерно распределенную плакирующую оболочку по всей поверхности частицы порошка, что подтверждается металлографическим анализом.

Список литературы

1. Копылов В.И., Смирнов И.С., Селиверстов И.А., Давыдов А.А. Исследования параметров плазменных потоков вакуумного дугового разряда при плакировании порошков // Проблемы техники. – 2008. - №1. – С. 63 – 78.
2. Новиков Н.Н. Особенности поведения дисперсных материалов при их металлизации в вакууме. // Рук. деп. Укр. НИИНТИ от 12. 09. 87. – 20с.
3. Шаронов Е.А., Ванновский В.В., Алексеев С.В. Вакуумно-дуговое напыление меди на порошок керамики $SiO_2 - FeO$ // Труды 6-й междунар. Конференции «Пленки и покрытия - 2001» - СПб: Изд. СПбГТУ - 2001 -С146-149
4. Андрианов Е.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. – М.: Химия, 1982. – 255 с.
5. Катыльков А.В., Любартков В.А. Дозирование сыпучих и вязких материалов. – Л.: Химия, 1990. – 240 с.
6. Членов В.А., Михайлов Н.В. Виброкипящий слой. – М.: Наука, 1972. – 344с.
7. Система автоматизованого моделювання "Виброслой 1.0". Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №25051. /С.А.Русанов. – №24961: Заявл. 14.04.2008; Опубл. 24.07.2008.
8. Русанов С.А., Луняка К.В., Михайлик В.Д. Моделювання гідродинаміки віброкиплячих шарів // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – № 3. – С. 188-195.
9. Русанов С.А., Луняка К.В., Смагін П.В. Дослідження процесу віброкипіння дисперсних середовищ // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 1 (89). – С. 115-122.
10. Нигматулин Ф.И. Основы механики гетерогенных сред. - М.: Наука, 1978.–336с.
11. Капранова А.Б., Зайцев А.И., Бушмелев А.В. Модель движения свободной границы дисперсной смеси в рабочем объеме уплотнителя с криволинейными лопатками // Изв. вузов. Химия и хим. технология - 2006-Т49 Вып3-С78-81
12. Gidaspow, D. Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions. - Boston: Academic Press Inc., – 1994. – 211 p.
13. Русанов С.А., Луняка К.В. Гідродинаміка віброкиплячого шару, поперемінно контактуючого з двома вібруючими поверхнями. // Проблеми інформаційних технологій – 2007. – №2(002). – С.55-59.

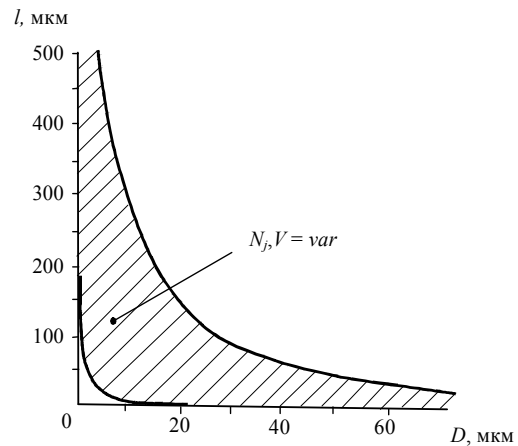


Рис. 7 Теоретические значения отклонения частиц порошка Al_2O_3 в зависимости от размера макрочастиц (диаметра), скорости, плотности и вида потока ионов (алюминия, титана)