

дит к удалению примесей через каналы, образовавшиеся между частицами покрытия. Анализ микроструктуры защитного покрытия из Al_2O_3 показывает, что формирование слоя идет за счет точечного сваривания частиц, оплавленных по поверхности в факеле плазмотрона и имеющих форму, близкую к сферической.

На основании исследований и анализа полученных данных выбраны оптимальные толщины оплаваемого покрытия и защитного слоя. В случае оплавления ПН-ХН80-С4Р4 толщины защитного тугоплавкого покрытия h_1 износостойкого покрытия h_2 должны находиться в соотношении $h_1 \approx 0,2h_2$.

На рис. 3 показана деталь торцевого уплотнения нефтяного насоса, оплавленного под защитным слоем из Al_2O_3 , полученным плазменным напылением. Практика оплавления под защитным слоем показывает, что в данном случае возможно применение газопламенного, печного нагрева, а также нагрева ТВЧ. При этом обеспечивается хорошая защита подложки и покрытия от окисления и натекания расплава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобяков О.С., Гинзбург Е.Г. Некоторые особенности износостойких покрытий, полученных зонно-плазменным оплавлением//Изв. АН БССР: Сер. физ.-техн.наук. — 1983. — № 1.
2. Вайнерман М.Х., Шоршоров М.Х. Плазменная наплавка металлов. — Л., 1968. — 20 с.
3. Найдич Ю.В. Контактные явления в металлических расплавах. — Киев, 1972. — 196 с.

УДК 577.525.1:621.793.7

Т.Ф.БОГИНСКАЯ, Е.Я.ГОЛОВКИНА,
канд.техн.наук, А.С.ЛАЗАРЕВ,
канд.техн.наук (БПИ)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Во многих работах, посвященных решению проблемы моделирования плазменного напыления, роль подложки, на которую набегает газовый поток, не учитывается. Это упрощение незначительно искажает расчетную траекторию движения частиц при малых скоростях истечения потока. Однако процесс напыления при увеличении скорости плазмы исследован недостаточно. Этой проблеме и посвящена данная работа.

Система уравнений, описывающих процесс плазменного напыления, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div}(\rho \vec{v} m_j - \gamma_j \operatorname{grad} m_j) = 0; \\ \operatorname{div}[\rho \vec{v} h - \gamma_h \operatorname{grad} T - \mu \operatorname{grad} (\frac{v^2}{2})] = 0; \\ \operatorname{div}(\rho \vec{v} v_z - \sigma_{zz}) + \frac{\partial p}{\partial z} = 0; \\ \operatorname{div}(\rho \vec{v} v_r - \sigma_{rr}) + \frac{\partial p}{\partial r} = 0; \\ \frac{du}{dt} = a(u - v_z); \\ \frac{dw}{dt} = a(w - w_r), \end{array} \right. \quad (1)$$

где ρ — плотность газа; \vec{v} — скорость газа; v_z, v_r — компоненты скорости; m_j — масса j -го компонента; γ_j, γ_h — коэффициенты переноса массы и энтальпии; h — энтальпия; T — температура; μ — вязкость газовой смеси; σ_{zz}, σ_{rr} — вязкие напряжения; p — давление газа; u, w — компоненты скорости частицы; a — коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от материала частицы, ее формы и параметров потока.

Система уравнений (1) решена разностным методом на криволинейных ортогональных сетках с полушагом. Переход от дифференциальных уравнений к разностным осуществлен аналогично методу интегральных соотношений (двойным интегрированием и заменой подынтегральных выражений функциями специального вида).

На рис. 1, 2 приведены результаты расчета траекторий полета частиц порошка Al_2O_3 и W различных фракций в зависимости от скорости истечения плазменной струи (аргон, $4500^\circ C$, $\rho = 0,068 \text{ г/см}^3$). Максимальную скорость частица набирает на первой половине длины струи, а затем скорость остается почти постоянной. С увеличением скорости истечения струи эффект ее торможения вблизи подложки незначительно сказывается на скорости напыляемой частицы, хотя остывание частицы в этой зоне намного заметнее.

Расчеты показали, что такая картина наблюдается, пока число Маха потока ниже единицы (течение транзвуковое). Переход к сверхзвуковому режиму кардинально меняет картину процесса. Наличие подложки (или просто препятствия) создает условие для возникновения отошедшей ударной волны. Проходя через фронт ударной волны, частицы попадают в зону торможения, в которой функция аэродинамического сопротивления имеет уже другой вид. Увеличение плотности газа в зоне между фронтом отошедшей ударной волны и на-

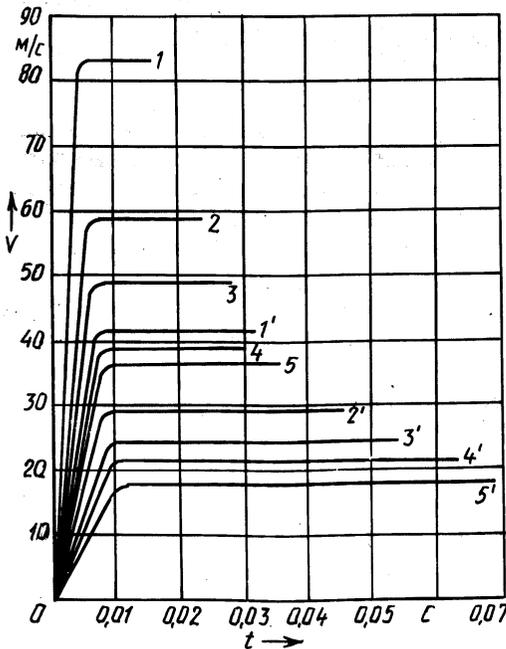
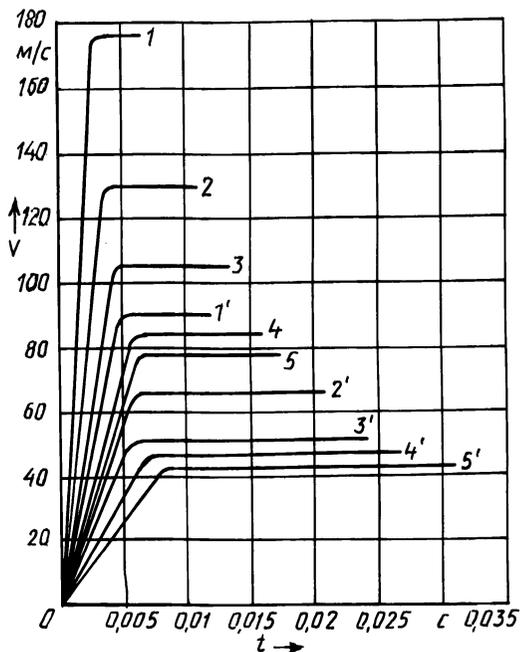


Рис. 1. Изменение скорости частиц вольфрама в плазменной струе:

1, 1' — радиус частицы $r = 10 \text{ мкм}$;
 2, 2' — $r = 20 \text{ мкм}$; 3, 3' — $r = 30 \text{ мкм}$;
 4, 4' — $r = 40 \text{ мкм}$; 5, 5' — $r = 50 \text{ мкм}$;
 1...5 — при скорости плазменной струи на выходе из плазматрона 270 м/с;
 1'...5' — 130 м/с

Рис. 2. Изменение скорости частиц Al_2O_3 в плазменной струе:
 1, 1' - $r = 10$ мкм; 2, 2' - $r = 20$ мкм;
 3, 3' - $r = 30$ мкм;
 4, 4' - $r = 40$ мкм; 5, 5' - $r = 50$ мкм;
 1...5 - при скорости плазменной струи на выходе из плазмотрона 270 м/с; 1'...5' - 130 м/с



пыляемой поверхностью также способствует интенсификации процесса торможения частицы. Это значительно ухудшает качество сцепления покрытий с подложкой, не способствуя их хорошему взаимодействию.

Другой вид неустойчивости проявляется при усложнении системы уравнений (1). Добавление уравнений турбулентности Колмогорова-Прандтля позволяет проанализировать переход течения струи от ламинарного к турбулентному режиму. В этом случае также наблюдается уменьшение скорости частиц порошка, что в конечном счете сказывается на качестве покрытия.

Таким образом, существуют наборы управляемых параметров, при которых картина процесса плазменного напыления скачкообразно изменяется. Накопленного экспериментального и теоретического материала пока недостаточно, но уже сейчас можно сделать вывод о том, что модель рассматриваемой технологии относится к сложным самоорганизующимся системам с катастрофическим переходом от одного состояния к другому. Отсюда следует, что поверхность, образованная совокупностью точек в координатном пространстве, удовлетворяющих решению системы (1), имеет складки, определение которых и дает возможность оптимизировать технологический процесс.

Для повышения качества покрытия необходимо найти зоны неустойчивости технологического процесса, а затем определить оптимальные значения управляемых параметров в интервалах между складками на поверхности решений.