

РАСЧЕТ КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ПЛАЗМЕННО-ДЕТОНАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

Кравченко Ю.А., ассистент

В настоящее время ведутся широкие исследования, направленные на выяснение путей существенного сокращения длительности получения на изделиях из металлов и сплавов разнообразных покрытий (керамика, металлокерамика), а также повышения их качества. Однако экспериментальный поиск эффективных режимов формирования защитного слоя является очень дорогостоящим, что обуславливает необходимость фундаментального понимания процессов, происходящих в момент формирования покрытия и разработку теории, позволяющей моделировать процесс и анализировать предполагаемый результат работы. Сравнительно новым направлением в области модификации свойств поверхности есть плазменно-детонационная технология, которая позволяет формировать защитные покрытия на основе порошков тугоплавких материалов с наперед заданным составом и точностью воспроизведения толщины в условиях серийного производства. В её основе лежат процессы взаимодействия частиц напыляемого материала с газовой атмосферой установки, частицами порошка в плазменном потоке и поверхностью материала подложки.

Основное значение при осаждении частички на подложку имеют температура в области контакта T_k , длительность воздействия, величина ударного и напорного давлений, а также степень шероховатости материала подложки. Во время напыления микровыступы на подложке прогреваются первыми и значительно быстрее, что обуславливает возможность образования химической связи в контактной области. Для хорошего сцепления покрытия с подложкой необходимо, чтобы в процессе высокоскоростного осаждения материала температура частиц порошка значительно превышала температуру плавления подложки. Термическое взаимодействие частицы с подложкой сопровождается выравниванием температуры материалов в зоне контакта. Если $T_k > T_{пл.п}$ (температура плавления подложки), то процесс затвердевания жидкой частицы происходит одновременно с плавлением материала основы. Такие условия формирования покрытий создают хорошие предпосылки для образования химической связи между разнородными материалами с одновременным погружением твердой фазы частицы в две жидкости (снизу – материал подложки, сверху – жидкая, только что упавшая частица). При этом происходит механическое перемешивание материалов частицы и подложки, что, должно обеспечивать высокую адгезию покрытий, подобную сцеплению материалов в процессе сваривания.

Согласно решению одномерной задачи контактной теплопроводности и фазового перехода для случая $T_k < T_{пл.п}$ при условии идеального теплового контакта подложки с расплавленной частицей ($T_q \rightarrow T_{пл.п}$), температура в зоне взаимодействия может быть рассчитана из соотношения:

$$T_k = \frac{K_\varepsilon (T_q - T_0)}{K_\varepsilon + \Phi(\alpha)} + T_0 \quad (1)$$

где $T_ч$ и T_0 – температура частицы и подложки в момент осаждения покрытия;
 $T_{пл}$ – температура плавления материала частицы; $\Phi(\alpha)$ – функция интеграла вероятностей; $\alpha=f(K_э, K_L)$ – корень уравнения, решение которого номографировано;
 $K_э = (\lambda_1/\lambda_2) \cdot \sqrt{a_2/a_1}$ – критерий тепловой активности частицы по отношению к подложке; λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности порошка и подложки;
 $a = \sqrt{\lambda/(\rho c)}$ – коэффициент температуропроводности соответствующего материала; ρ и c – плотность и теплоемкость. Функция интеграла вероятности $\Phi(\alpha)$ определяется из уравнения:

$$K_э + \Phi(\alpha) = K_L \cdot \frac{e^{-\alpha^2}}{\alpha} \quad (2)$$

$$K_L = \frac{c_1 \cdot (T_{пл} - T_0)}{1,77 \cdot L}, \text{ где } L - \text{скрытая теплота плавления материала частицы.}$$

Данная модель применялась для оценки контактной температуры взаимодействия расплавленных частиц порошка оксида алюминия с поверхностью стальной подложки. При расчете использовались табличные значения физических величин для α -фазы Al_2O_3 и стали 12X18Н9Т, приведенные в таблице 1.

Исходные данные для расчета контактной температуры T_k

| Материал | $T_{пл}$, К | $\frac{\lambda, \text{ Дж}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}}$ | $c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ | $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $L, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ |
|----------------------|--------------|--|---|--------------------------------------|------------------------------------|
| α - Al_2O_3 | 2323 | 3,24 | 1256 | 3700 | 109×10^3 |
| 12X18Н9Т | 1750 | 26 | 532 | 7600 | - |

При условии, что $T_0=973$ К, а $T_ч \rightarrow 2300$ К критерий тепловой активности частицы $K_э=0,378$, $K_L=0,66$. Исходя из этих значений для $K_э$ и K_L , а также используя номограмму для определения α , находим корень уравнения (2): $\alpha=0,54$. Тогда $\Phi(\alpha)=0,2054$, а минимальная величина T_k , в соответствии с уравнением (1), равна 1850 К.

Значит, сплавление порошка в поверхность является вполне возможным, поскольку $T_k > T_{пл}$ материала подложки. Однако температура в зоне взаимодействия может быть значительно выше, так как сама технология напыления не исключает возможности нахождения частиц порошка в составе плазменно-детонационного потока в перегретом состоянии, что обеспечивает дополнительный ввод энергии в области локальных взаимодействий.