

ТЕПЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПОКРЫТИЕ–ОСНОВА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

*Белорусская государственная политехническая академия
Минск, Беларусь*

Практика и теория нанесения упрочняющих покрытий требует четкого представления о характере тепловых процессов происходящих на границе раздела покрытие–основа. При формировании вакуумно-плазменных покрытий, нагрев подложки обусловлен двумя механизмами передачи тепла: путем воздействия ионного потока (ионная бомбардировка) и теплообменом между конденсируемым покрытием и подложкой. В случае ионной бомбардировки, процесс передачи тепла обусловлен механизмом передачи энергии путем упругого удара, а в случае конденсации частиц – тепло передается непосредственно путем теплопередачи от расплавленной частицы к обрабатываемой основе.

Наибольший интерес представляет исследование теплофизических процессов, происходящих при конденсации покрытия. В этом случае должна решаться нестационарная теплопроводная задача, с учетом начальных и граничных условий: частица осаждается на поверхность основы при температуре плавления конденсируемого материала; растекаясь на поверхности основы, частица приобретает форму полусферы, радиус которой определяется объемом падающей капли; лучистым теплообменом пренебрегаем, вследствие очень быстрого остывания частицы; температура подложки принята равной 670–770 К, что соответствует оптимальным режимам конденсации вакуумно-плазменных покрытий. Исследования проводились для частицы титана, осаждающейся на металлическую основу из аустенитной хромоникелевой стали 12Х18Н10Т. Графическая модель кристаллизации расплавленной частицы покрытия, с соответствующим теплообменом, показана на рис. 1.

Частица жидкого титана, попадая на подложку из стали 12Х18Н10Т, растекается, образуя полусферическую поверхность радиуса r_0 . В начальный момент времени тепловой фронт распространяется в основу через слой dx . Механизм передачи тепла, в этом случае, описывается уравнением теплопроводности для плоской задачи x [1]:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial j}{\partial x} \quad (1)$$

где ρ – плотность материала; c_v – удельная теплоемкость материала; T – температура; t – время; j – поток тепла; x – глубина проникновения теплового потока.

Минимальный размер слоя dx можно принять за размер кристаллической решетки подложки ($dx=R$), тогда установившаяся температура в слое, равном размеру кристаллической решетки, определится по формуле:

$$T_1 = \frac{c_{v,1} \rho_1 T_{пл} + \frac{3}{2r_0} \rho_2 c_{v,2} T_0}{c_{v,1} \rho_1 + \rho_2 c_{v,2}} \quad (2)$$

где T_1 – температура нагрева подложки покрытием; ρ_1, ρ_2 – плотность материала покрытия и подложки, соответственно; $c_{v,1}, c_{v,2}$ – удельная теплоемкость материала покрытия и подложки, соответственно; $T_{пл}$ – температура плавления материала покрытия; T_0 – температура подложки; R – размер кристаллической решетки материала подложки; r_0 – радиус частицы покрытия.

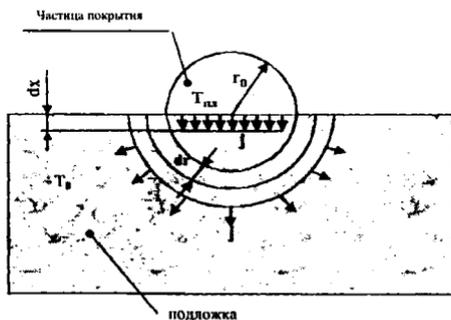
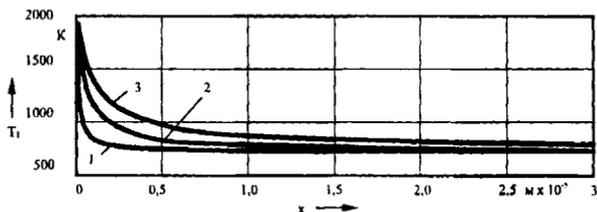


Рис. 1 Схематическое изображение теплопроводной задачи иллюстрирующей разогрев основы частицей

В результате решения дифференциального уравнения (1), получена зависимость изменения температуры подложки от глубины проникновения. (рис. 2).

По прошествии некоторого времени тепловой фронт проникает в глубь основы уже не через плоский слой dx , а через полусферу радиусом r_0 (см. рис.1).



Диаметр частицы: 1 – $D_k = 1$ мкм; 2 – $D_k = 5$ мкм; 3 – $D_k = 10$ мкм

Рис. 2. Изменение температуры подложки в зависимости от глубины проникновения теплового фронта

С данного момента времени, механизм передачи тепла описывается нестационарным уравнением теплопроводности в сферических координатах, а именно [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\chi}{r_0^2} \left(2r_0 \frac{\partial T}{\partial r_0} + r_0^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r_0^2} \right) = 0, \quad (3)$$

где r_0 – радиус капли материала покрытия; χ – коэффициент теплопроводности подложки.

Используя метод конечных разностей для решения уравнения (3), можно определить скорость распространения тепла, а также изменение температуры подложки.

$$\frac{d r}{d t} = \frac{\chi C_1}{c_{v,2} \rho_2 r_{cp}^2 (T_1 - T_0)} \quad (4)$$

где $\frac{dr}{dt}$ – скорость распространения фронта разогрева подложки; $r_{cp} = r + dr$; dr – переменный радиус проникновения тепла в глубину подложки; C_1 – постоянная интегрирования.

$$T_1 = \frac{c_{v,1} \rho_1 T_{ns} r_0^3 + \rho_2 c_{v,2} T_0 r_{cp}^3}{c_{v,1} \rho_1 r_0^3 + \rho_2 c_{v,2} r_{cp}^3} \quad (5)$$

В результате решения уравнений (4) и (5) были получены следующие зависимости (1,2,3 – диаметр частицы – 1,5 и 10 мкм, соответственно):

1 – изменение температуры подложки от глубины проникновения теплового фронта (рис. 3);

2 – изменение температуры охлаждения частицы со временем (рис. 4);

3 – скорость распространения теплового фронта в материале подложки (рис.5).

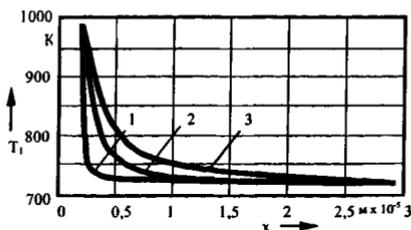


Рис. 3. Изменение температуры подложки от глубины проникновения теплового фронта

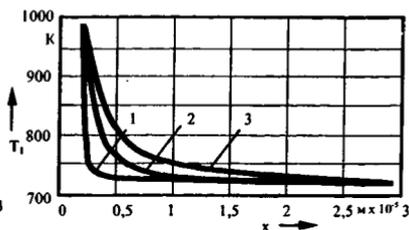


Рис. 4. Изменение температуры частицы во времени

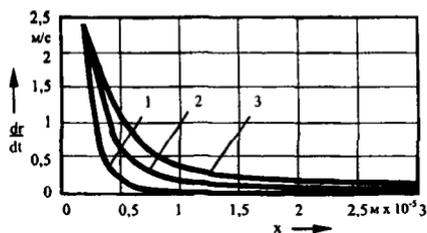


Рис. 5. Скорость распространения теплового фронта в материале подложки

Из полученных зависимостей следует, что на глубине, равной радиусу частицы покрытия, материал основы значительно разогревается и это обуславливает диффузию материала частицы на достаточно большую глубину. Возникает слой композиционного материала, в котором формируются микрогруппировки типа кластерных образований [2]. В этой связи был выполнен конкретный квантово-механический расчет энергии связи ряда металлов с основой из железа. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Энергия связи частиц с железной основой

| Энергия связи, эВ | Материал покрытия | | | |
|-------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| | Ti | Cr | Ni | Cu |
| $E_{ков}$ | 4,233 | 4,239 | 4,314 | 4,021 |
| $E_{ион}$ | 0,140 | 0,056 | 0,028 | 0,028 |
| $E_{рез}$ | 4,374 | 4,296 | 4,342 | 4,050 |

Из результатов, приведенных в таблице видно, что наибольшей энергией связи с железом обладают атомы титана, поэтому они должны формировать кластер вида TiFe. Таким образом, формирование на железной основе покрытия из титана позволяет получить упрочняющие поверхности с постепенно уменьшающейся энергией связи и имеющие максимальную адгезию к подложке. Все это создает благоприятные условия для последующего нанесения на подложку износостойкого покрытия из нитрида титана. В итоге реализуется многослойное покрытие с плавно изменяющейся энергией связи вглубь основы, что снимает эффект хрупкости и создает более эластичное покрытие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Курс общей физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1975. – 551 с. 2. Зелинская Г.М., Романов А.В., Слуховских О.И. и др. Об атомной структуре трехкомпонентных расплавов на основе металлов группы железа с кремнием и бором // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000.– Т. 22, № 7.– С. 45-51.