

Т.А. Инкин, И.В. Штенников
(г. Ижевск, Ижевский государственный технический университет
им. М.Т. Калашникова)
T.A. Inkin, I.V. Shtennikov (Izhevsk, Kalashnikov ISTU)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ИСПАРЕНИИ В ВАКУУМЕ

A MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING THE RATE OF FORMATION OF A
CONDENSATION COATING DURING THERMAL EVAPORATION IN VACUUM

Получена математическая модель скорости формирования металлического покрытия на внутренней поверхности полых изделий методом термического испарения в вакууме с соосно-расположенного стержневого испарителя. Проведена экспериментальная проверка результатов теоретических исследований.

A mathematical model of the rate of formation of a metal coating on the inner surface of hollow products by thermal evaporation in vacuum from a coaxially located rod evaporator is obtained. An experimental verification of the results of theoretical studies.

Ключевые слова: вакуумные покрытия, термическое испарение, скорость конденсации, математическая модель.

Keywords: vacuum coatings, thermal evaporation, condensation rate, mathematical model.

Для улучшения эксплуатационных свойств полых изделий авторами патентов [1, 2] предложено нанесение металлических покрытий на их внутреннюю поверхность методом термического испарения в вакууме с соосно-расположенного резистивного испарителя.

Одним из важных технологических параметров нанесения вакуумных покрытий является скорость их конденсации [3, 4], расчет и прогнозирование которой позволит на этапе технологической проработки процесса применить теоретическое моделирование условий формирования покрытия, а вместе с ним прогнозирование структуры и свойств получаемого покрытия.

В связи с этим целесообразным является выявление теоретической зависимости скорости конденсации от условий и режимов испарения и конденсации покрытий в вакууме на внутренней поверхности полых изделий.

Принимая во внимание, что для изделий с малым диаметром отверстия и соответственно, малом расстоянии от испарителя до покрываемой поверхности изделия (1,75–10 мм), формирование покрытия протекает в узком, ограниченном пространстве. В таких условиях практически все количество испаряемого вещества конденсируется на внутренней

поверхности изделия, образуя покрытие.

На примере конденсации хромовых покрытий, температура испарения хрома не превышает 1800 К [5], что соответствует давлению его насыщенных паров не более 10 Па [6]. При такой величине давления термодинамическое состояние парового потока испаряемого материала удовлетворяет условиям состояния идеального газа и согласно теории испарения [6], скорость испарения вещества описывается уравнением Ленгмюра:

$$V_{\text{исп}} = 0,138\alpha p \sqrt{\left(\frac{M}{T_{\text{исп}}}\right)}, \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}, \quad (1)$$

где α – коэффициент испарения, p и M – соответственно, давление паров и молекулярная масса испаряемого материала, $T_{\text{исп}}$ – температура испарения.

Допуская равномерное испарение материала с поверхности испарителя можно принять, что для участка единичной длины испарителя и покрываемого изделия количество испаренного вещества за время dt равно количеству конденсированного: $dM_{\text{исп}} = dM_{\text{конд}}$. Схема испарения и конденсации вещества на внутренней поверхности полого изделия приведена на рис. 1.

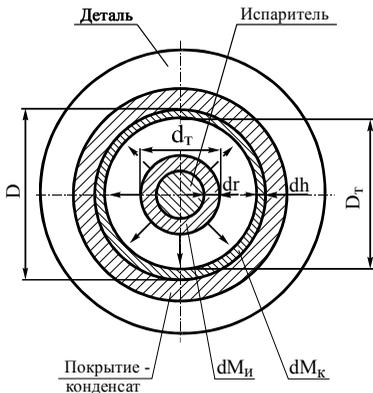


Рис.1. Схема испарения и конденсации вещества на внутренней поверхности полого изделия

Выражая $dM_{\text{исп}}$ через скорость испарения $V_{\text{исп}}$ – уравнение (1), боковую площадь испарителя единичной длины и время dt , а $dM_{\text{конд}}$ через плотность конденсата $\rho_{\text{конд}}$ и занимаемый им объем на покрываемой поверхности толщиной dh , сформированной за время dt , уравнение скорости конденсации покрытия $v_{\text{конд}}$ на внутренней поверхности изделия имеет вид:

$$\frac{dh}{dt} = v_{\text{конд}} = \frac{V_{\text{исп}} d_T}{\rho_{\text{конд}} D_T}, \quad (2)$$

где d_T – текущий диаметр испарителя, м, D_T – текущий диаметр отверстия покрываемого изделия, м.

При неравенстве $D/h \geq 20$, которое, как правило, выполняется на практике, в качестве текущего диаметра D_T можно принять первоначальный диаметр отверстия полого изделия D . При этом погрешность определения скорости конденсации не превышает 10%, а с увеличением диаметра D и уменьшением толщины покрытия h величина погрешности снижается.

Изменение текущего диаметра испарителя d_T в процессе формирования покрытия определяется из количества испаряемого вещества $dM_{\text{исп}}$ за время dt с участка единичной длины испарителя:

$$\frac{dd_T}{dt} = \frac{2V_{\text{исп}}}{\rho_{\text{исп}}} \quad (3)$$

Зная исходный диаметр испарителя – d_0 , его текущее значение – d_T в зависимости от режима испарения описывается уравнением:

$$d_T = d_0 - \frac{2V_{\text{исп}}t}{\rho_{\text{исп}}} \quad (4)$$

В итоге, уравнение скорости формирования покрытия на внутренней поверхности полого изделия примет вид:

$$v_{\text{конд}} = \frac{V_{\text{исп}}d_0}{\rho_{\text{конд}}D} \left(1 - \frac{2V_{\text{исп}}t}{\rho_{\text{исп}}d_0} \right) \quad (5)$$

На практике, представляет интерес среднее значение скорости конденсации покрытия, формируемого в течение времени τ . В результате:

$$v_{\text{конд.ср}} = \frac{V_{\text{исп}}d_0}{\rho_{\text{конд}}D} \left(1 - \frac{V_{\text{исп}}\tau}{\rho_{\text{исп}}d_0} \right) \quad (6)$$

Таким образом, уравнения (5) и (6) выражают зависимость скорости конденсации покрытия на внутренней поверхности полого изделия от скорости испарения материала покрытия – $V_{\text{исп}}$, которая является функцией температуры испарения – $T_{\text{исп}}$, диаметра отверстия покрываемой детали – D , исходного диаметра испарителя – d_0 , текущего времени формирования покрытия – t и длительности нанесения покрытия в целом – τ , а также плотности конденсата – $\rho_{\text{конд}}$ плотности материала покрытия на испарителе – $\rho_{\text{исп}}$.

В уравнении (1) коэффициент испарения α определяется из соотношения фактической скорости испарения вещества в вакууме – $V_{\text{исп.фак}}$ к теоретически возможной величине – $V_{\text{исп.теор}}$, вычисляемой из уравнения (1) при $\alpha=1$.

Фактическая величина скорости испарения находится из количества испаренного вещества – $M_{\text{факт}}$ за время τ с боковой поверхности испарителя единичной длины, площадью – $S_{\text{исп}}$.

$$V_{\text{исп}} = M_{\text{факт}} / (\tau \cdot S_{\text{исп}}) = \rho_{\text{исп}} \Delta d / 2\tau, \quad (7)$$

где Δd – изменение диаметра испарителя в течении времени τ .

Окончательное выражение для вычисления коэффициента испарения вещества с цилиндрического проволочного испарителя примет вид:

$$\alpha = \rho_{\text{исп}} \Delta d / 2V_{\text{исп.теор}}\tau. \quad (8)$$

По результатам экспериментальных исследований на примере использования порошковых испарителей хрома с плотностью испаряемого слоя – $4,31 \text{ г/см}^2 \pm 5\%$ средняя величина коэффициента испарения для хрома составила 0,48 (Табл. 1).

Таблица 1. Результаты определения коэффициента испарения хрома

№ _{оп} п/п	$T_{\text{исп}}$ К	p , Па	τ , мин	d_0 , мм	d_K , мм	Δd , мм	$V_{\text{исп}}$, $\text{г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мин}^{-1}$	α	$\alpha_{\text{ср}}$
1	1670	1,33	20	3,56	3,29	0,27	$0,62 \times 10^{-2}$	0,469	0,48
2	1730	3,32	8	3,25	2,97	0,28	$1,52 \times 10^{-2}$	0,496	
3	1790	8,65	3,5	3,29	2,99	0,3	$3,89 \times 10^{-2}$	0,475	

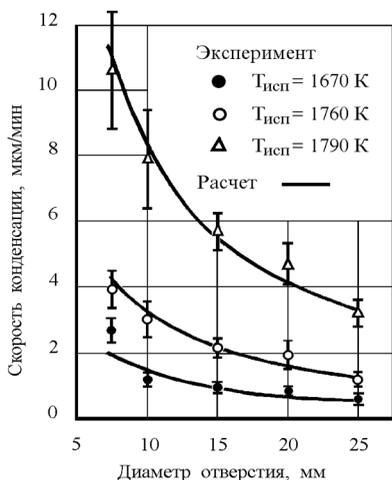


Рис.2. Экспериментальная и теоретическая зависимости скорости конденсации хрома на внутренней поверхности втулок от диаметра их отверстия

10% (рис.2).

Таким образом, уравнения (5) и (6) достаточно точно описывают зависимость скорости формирования покрытий на внутренней поверхности полых изделий от температуры испарения $T_{исп}$, диаметра отверстия покрываемого изделия D , исходного диаметра испарителя d_0 , длительности нанесения покрытия τ .

Полученные теоретические зависимости могут использоваться при математическом моделировании процесса формирования покрытия на внутренней поверхности полых изделий методом термического испарения в вакууме с соосно-расположенного резистивного испарителя.

Список литературы

1. Заявка № 58–42267 Японии, МКИ С23С 13/02. Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность труб. 19.09.83.
2. Патент № 1487486 России, МКИ С23С 14/00. Устройство для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность длинномерных изделий: № 4107792/24-21; Заявл. 04.06.86 / В.И. Сидоренко, И.В. Штенников, А.Б. Яриков (Россия).
3. Мовчан, Б.А. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме / Б.А. Мовчан, И.С. Малашенко / под ред. Б.Е.Патона – Киев: Наукова думка, 1983.– 232с.
4. Бабад-Захряпин, А.А. Дефекты покрытий.– М.: Энергоатомиздат, 1987.–152с.
5. Сидоренко, В.И. К вопросу о слоистом строении вакуумных конденсатов хрома / В.И. Сидоренко, И.В. Штенников // Вестник ИжГТУ. 2007. – №1(33) – С. 50-53.
6. Технология тонких пленок: Справочник : [В 2 т. : Т.] 1 / под ред. Л.Майссела, Р. Глэнга. – М.: Сов. радио, 1977. – 20 см.

Материал поступил в редколлегию 08.10.19.