



MODELO MATEMATICO PARA DEPOSICION POR PROCESO SPRAY

INTRODUCCION

Para todos es conocido el fenómeno de la corrosión y los efectos que ocasionan los cuales se hacen patentes en el deterioro de los materiales, equipos, etc. Este fenómeno está presente en todas las ramas de la industria, el transporte y la construcción. La corrosión puede producir, en el caso menos desfavorable, la destrucción de un componente metálico con cuantiosas pérdidas económicas y en el peor de los casos pérdidas de vidas humanas. La gravedad del problema que se puede justificar en forma amplia es, qué medidas adoptarlas, una es hacer recubrimientos con otros metales o aleaciones a fin de prolongar la vida económica de los equipos; en éste trabajo se propone que el recubrimiento que se deba aplicar al sustrato, debe estar fundido y enfriarse rápidamente con la cual adquiere mejores propiedades como es el caso de numerosos metales y sus aleaciones que a consecuencia de solidificación rápida se forma un estado metaestable, pero su utilización es limitada, debido a la dificultad de formación de una lamina de espesor uniforme y también por la aparición de óxidos, que casi siempre están asociados con la naturaleza de los productos a procesar, por tal razón se pretende desarrollar técnicas de la deposición de alta densidad provocando la fusión directamente en la superficie del sustrato y con mínima oxidación.

Lo anterior se puede lograr mediante el proceso spray, esto es depositar el material de recubrimiento por atomizado el material debe estar fundido y aplicar directamente sobre la superficie del sustrato, el proceso de recubrimiento requiere ser representado, para ello se sugiere el modelo matemático con lo cual se puede predecir el comportamiento de los diferentes parámetros que intervienen, tales como las propiedades de los materiales de recubrimiento, la potencia del horno y estimar el tamaño y la distribución del material de recubrimiento.

EQUIPOS

Para la implementación del proceso se debe contar con los siguientes equipos:

- Horno de inducción, con cámara de fusión y atomización del material de recubrimiento.
- Mesa, con disposición especial que permita el movimiento del sustrato en tres direcciones.
- La disposición del sistema se ilustra en la figura 1.

FORMULACION DEL MODELO MATEMATICO

Para formular el modelo matemático del sistema representado en la figura 1, el sustrato debe estar fijado sobre la mesa que se mueve en las tres direcciones y permite que el movimiento del sustrato debe ser a la velocidad uniforme y el flujo de material de recubrimiento constante. Para asegurar un espesor uniforme en toda su longitud. El sistema debe estar sujeto a las condiciones siguientes:

- La fusión y solidificación del recubrimiento en el sustrato depende de la potencia del horno.
- Movimiento relativo entre el material de recubrimiento que se alimenta y el sustrato.

El material de recubrimiento fundido y atomizado se deposita en la superficie del sustrato en forma de charco. La forma del recubrimiento que se deposita en el sustrato es aproximadamente semicilíndrica de radio y representado en la figura 2.

En recubrimiento aplicado en el sustrato se divide en tres zonas tal como se muestra en la figura 3 y son los siguientes:

- Recubrimiento líquido.
- Recubrimiento que se solidifica,
- Recubrimiento sólido.

El modelo de las ecuaciones de transferencia de calor se utiliza para predecir

Por: Eulogio Santos De la Cruz

Ingeniero Industrial de la UNMSM. Magister en Ciencias de los Materiales, U.N.I. Profesor principal de la Facultad de Ingeniería Industrial.

El comportamiento para estas tres zonas, sujeta a las siguientes consideraciones:

1. La conductividad térmica y la difusividad térmica del material de recubrimiento son valores promedios de los componentes.
2. La difusividad de masa de cada elemento en la fase líquida es el valor promedio de la autodifusión bajo la temperatura local y la temperatura inicial.
3. El recubrimiento y el sustrato están en perfecto contacto térmico
4. No hay autodifusión de masa en la fase sólida.
5. No hay convección en la fase líquida.
6. El recubrimiento fundido es una solución uniforme de composición igual a la mezcla inicial; su solidificación comienza al momento.

Con las consideraciones asumidas, las ecuaciones de transferencia de calor en el sustrato, la zona de solidificación y la zona líquida del recubrimiento, así como la ecuación de transferencia de masa, se utilizan para determinar la distribución de los átomos del soluto en la fase sólida; el modelo para las tres zonas y otras condiciones auxiliares se formulan como sigue:

a. Ecuaciones basadas en la transferencia de calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial T}{\partial t}$$

- Zona del recubrimiento sólido,

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial T_1}{\partial t} \dots \dots \dots (1)$$

$$t \geq 0 \quad 0 \leq x \leq a$$

- Zona de solidificación del recubrimiento

$$t \geq 0 \quad 0 \leq x \leq s(t)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \alpha_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} \dots \dots \dots (2)$$



Zona líquida del recubrimiento

t >= 0 s(t) <= x <= b
d^2T3/dx^2 = alpha3 * dT3/dt (3)

b. Condiciones auxiliares

K1 * dT1/dx = h1 * (T1 - T0) (4)

T1(a,t) = T2(a,t) (5)

K1 * dT1/dx = K2 * dT2/dx (6)

T2[s(t),t] = T3[s(t),t] = T1[Ct,s(t)] (7)

K3 * dT3/dx = h3 * (T3 - T1) (8)

K2 * dT2/dx = rho * C * ds/dt (9)

x = s(t) y t >= 0 s(0) = a (10)

Las condiciones dadas por las ecuaciones de (1) al (3) y las condiciones auxiliares (4) al (10) son formuladas sobre la base de las siguientes consideraciones:

La temperatura inicial T3 es igual a T3 = Tp + 150°C, donde Tp es la temperatura de fusión del material de recubrimiento, al cual se añade entre 100 a 150 °C más para mantener totalmente la fase líquida.

Para calcular el espesor de recubrimiento se debe efectuar balance de energía requerida para fundir el material de recubrimiento y la energía producida por el horno, los cuales vienen dados por:

- Energía para fundir el material

Qf = [C1(T3 - T1) + Cp] * rho * pi * r^2 * dx (11)

- Energía entrega por el horno:

Eh = (f P) dt (12)

Igualando la ecuación (11) con (12) se obtiene, el espesor del material de recubrimiento.

r = sqrt([Cp(T3 - T0) + Cp] * pi * v * f * u) (13)

P es la potencia del horno y la f la fracción de potencia; El gasto del material de recubrimiento se determina por la conservación de la masa como sigue:

Q0 = v * integral from y=0 to y=r of V(x,y) dy (14)

Desarrollando la relación 14 se obtiene la cantidad de aporte del material de recubrimiento.

Q0 = 1/2 * pi * r^2 * v (15)

CALCULOS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

La prueba del modelo se ha efectuado para material de recubrimiento basado en la aleación de silicio con aluminio en razón que estos elementos son resistentes a la corrosión; la proporción de los componentes de la aleación es una cantidad arbitraria, también se han considerado los parámetros como la velocidad de substrato potencia del horno temperatura de fusión a las aleaciones y las propiedades físicas y térmicas de sus componentes.

La concentración de las aleaciones son: silicio 100, 98 y 96 % y el resto aluminio.

El modelo se comprueba con los parámetros siguientes:

- Potencia del horno
Velocidad de substrato
Fracción (en masa) del soluto en la mezcla.
Calores específicos, calores de fusión, conductividad térmica y densidad, de los componentes del recubrimiento.

Los cálculos se efectuaron con el algoritmo de diferentes finitas mediante el programa IMPLICIT, FOR.

Así tenemos que para un horno de 4 KW de potencia, velocidad del substrato, 0,25m/min. temperatura de fusión 1710 °K y 100% de silicio los resultados son:

- Espesor de recubrimiento (mm) 0,39
Gasto de material de rec. (Kg/min) 0,28

Utilizando potencia de 5 Kw y para las mismas condiciones de velocidad del substrato, temperatura de fusión y composición de silicio los resultados son:

- Espesor de recubrimiento (mm) 0,44
Gasto de material de rec. (Kg/min) 0,31

Para las mismas condiciones de temperatura y concentración de silicio, y velocidad del substrato igual 0,50 m/min, los resultados son:

- potencia del horno (KW) 4 5
espesor de recubrimiento (mm) 0,28 0,31
gasto de materiales de (Kg/min) 0,14 0,18

En las tablas del 1 al 3 se muestran los resultados para diferentes condiciones de potencia del horno, velocidad del substrato temperatura de fusión de la aleación y concentración de silicio, con las cuales se han construido los siguientes diagramas.

En la figura 1 se muestra las tendencias del espesor del recubrimiento en función de la potencia del horno, para las velocidades de 0,25, 0,50 y 0,75 m/min representado por las curvas 1,2 y 3 la magnitud del espesor depende de la potencia del horno esto es, con energías más altas se funde mayor cantidad de material, por consiguiente el espesor es mayor, por otro la velocidad del substrato influye también en el valor del espesor, esto es, con el incremento de la velocidad el espesor de recubrimiento disminuye.

Table 1: Espesor del recubrimiento (mm) para diferentes potencias del horno y velocidades del substrato.

Tabla 1. El espesor del recubrimiento (mm) para diferentes potencias del horno y velocidades del substrato, a temperatura constante de 1710 °K y 100% de silicio.

Table 2: Espesor del recubrimiento para diferentes potencias del horno y concentraciones de silicio a la temperatura (1710 °K) y velocidad (0,75 m/min).

Tabla 2. Espesor del recubrimiento para diferentes potencias del horno y concentraciones de silicio a la temperatura (1710 °K) y velocidad (0,75 m/min).

Table 3: Gasto de material del recubrimiento para diferentes potencias de horno y para tres concentraciones del recubrimiento, a temperatura y velocidad constantes.

Tabla 3. Gasto de material del recubrimiento para diferentes potencias de horno y para tres concentraciones del recubrimiento, a temperatura y velocidad constantes.

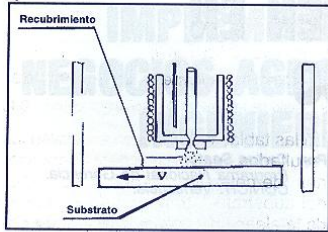


Figura 1

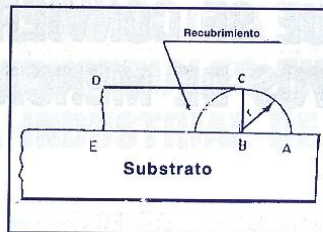


Figura 2

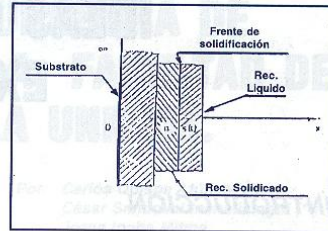
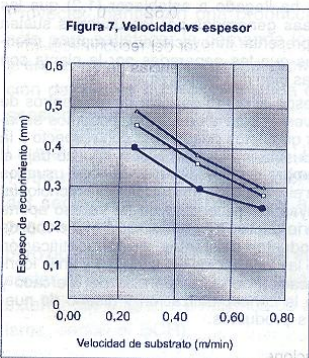
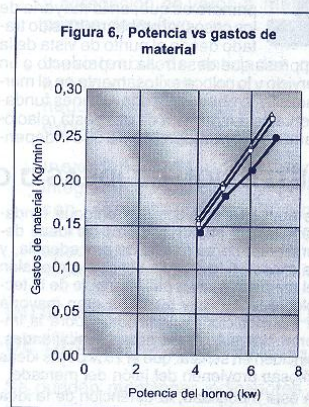
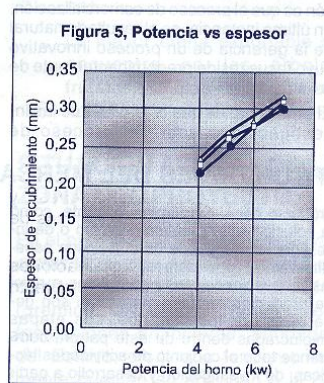
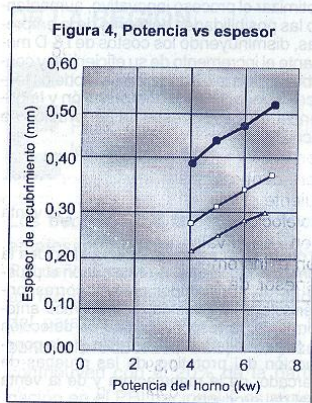


Figura 3



Referencias Bibliográficas

- P. Trojan, R. Flin : Engineering Materials and Their Applications; Houghton Mifflin Company 1989.
- Askeland Donald : The Science and Engineering of Materials; PWS Publishers, 1985.
- Karlekar B. V., Desmond R. M. : heat Transfer, West Publishing Co. 1985.
- Thornton J. y H. Graff: An Analytical Description of the Jet Finishing Process for Hot Dip Metallic Coatings on Strip, Metallurgical Transactions B. Vol. 7B.
- Edwards C. H., Penny D. E.: Elementary Differential Equations With Applications; Printice Hall Inc. 1986
- Camahan Brice Luther, H.A. Wilkes, James O.: Cálculo Numérico, Métodos, Aplicaciones; Editorial Rueda - Madrid

NOMENCLATURA

a,	Ancho del sustrato	h_1	Coefficiente de transferencia del calor en la frontera del sustrato
C_{p3}	Calor específico promedio del material de recubrimiento	h_2	Límite de la superficie de recubrimiento
C_{l3}	Calor latente de fusión del recubrimiento	P	Potencia del horno
R_3	Radio del semicilindro del recubrimiento en el momento de aplicación (espesor de recubrimiento)	F	Fracción de energía del horno
s(t)	Posición de la intercara líquido-sólido	Q_0	Gasto de material de recubrimiento (kg/min)
α_v	Difusividad térmica promedio en la región i	T_0	Temperatura ambiente
Kv	Conductividad térmica en la región i	T^f	Temperatura de fusión
Tv	Temperatura en región i	v	Velocidad del sustrato (m/min).