



Mayo 1996

DECIMOPRIMERAS JORNADAS TÉCNICAS DE SOLDADURA

MADRID, 21, 22 y 23 de Mayo de 1996
Consejo Superior de Investigaciones
Científicas
Serrano, 117

DECIMOPRIMERAS JORNADAS TÉCNICAS DE SOLDADURA
Depósito legal: B.12.718/96
Imprime: GRUP 4 - Badalona
© CESOL, María de Molina, 62, 8º A, 28006 Madrid
© ELSEVIER PRENSA, S.A. Avda. Paral·lel, 180, 08015 Barcelona

Simulación de los Procesos Dinámicos durante el Vuelo de las Partículas de Polvo de Cr_3C_2 -NiCr en la Proyección HVOF

V. SOBOLEV, J.M. GULEMANY, J.A. CALERO

CENTRO DE PROYECCIÓN TÉRMICA. UNIVERSIDAD DE BARCELONA. Metalurgia Física-Ciencia de los Materiales. Dpto. de Ingeniería Química y Metalurgia

RESUMEN

En el presente trabajo se estudiará mediante la simulación matemática los procesos dinámicos que tienen lugar durante el vuelo de las partículas de polvo de Cr_3C_2 -NiCr en la proyección HVOF. La complejidad del proceso a estudiar queda manifiesta debido a los diferentes procesos que tienen lugar, desde la reacción de combustión de los gases, pasando por la interacción fluido-partícula de polvo durante todo el vuelo, así como la influencia de reacciones de oxidación y de disolución de carburos en la transferencia de calor y de masa. Los resultados teóricos obtenidos permiten establecer las condiciones de proyección óptimas de este polvo para el proceso HVOF. Estos resultados están en concordancia con los resultados experimentales de los recubrimientos obtenidos.

1.-INTRODUCCIÓN

La versatilidad de la técnica de proyección térmica de alta velocidad, HVOF, permite la obtención de recubrimientos de diferentes sistemas con el fin, entre otros, de procurar una alta resistencia a la erosión, abrasión, corrosión, etc. Es bien conocido que el sistema Cr_3C_2 -NiCr se utiliza ampliamente en la ingeniería como recubrimientos que deben soportar medios abrasivos y que trabajan a elevadas temperaturas, incluso alrededor de los 900°C.

La calidad de los recubrimientos obtenidos mediante proyección HVOF depende significativamente de las velocidades y temperaturas de las partículas de polvo proyectadas cuando impactan con el sustrato [1-3]. Estas velocidades y temperaturas dependen de la historia del polvo proyectado.

Son diversos los procesos dinámicos que influyen en el movimiento de las partículas: la cinética de combustión, la dinámica del fluido en la pistola, las interacciones entre el fluido y las partículas de polvo, los procesos de aceleración y deceleración que sufre el fluido, el calor transferido, la masa transferida entre fases en el interior de las partículas de polvo debido a disoluciones durante el vuelo de éstas, la expansión del fluido en la salida de la pistola, etc.

La construcción de un sistema experto utilizando la simulación matemática, es una de las herramientas más efectivas para el estudio y resolución de este tipo de problemas. Con anterioridad se han elaborado los modelos físicos y matemáticos correspondientes [2,4], teniendo en cuenta las variaciones de las velocidades y temperaturas del fluido, las interacciones fluido-partícula, la influencia de la densidad en la velocidad del fluido, la pequeña influencia (casi negligible) del efecto Knudsen, la estructura de las partículas de polvo, los procesos de disolución y difusión, así como la historia térmica de las partículas, calentamiento, fusión, enfriamiento y solidificación.

En el presente artículo se han realizado ciertos avances en cuanto a la adaptación del modelo matemático al sistema físico existente [2,4]. Se han incluido en el modelo los procesos dinámicos en la cámara de combustión, pistola y zona de expansión a la salida de ésta, así como los efectos de aceleración y deceleración a los que se ven sometidos el sistema fluido-partícula sólida. También se ha introducido la influencia de la transferencia de masa durante el vuelo en las propiedades termofísicas del material que constituye el polvo proyectado. La consecución de unas condiciones óptimas de proyección conllevan a la mejora de la estructura y de la calidad de los

recubrimientos en cuanto a propiedades como son la densidad, la porosidad, la dureza y ciertas propiedades de interés tecnológico.

2.-CONDICIONES EXPERIMENTALES

El sistema de proyección HVOF considerado en nuestra investigación es el instalado en la Universidad de Barcelona (Plasma Technik PT100). Opera con una mezcla de propano y oxígeno superior a la estequiométrica, con una relación de equivalencia $\phi=1.44$ [5].

Se han proyectado partículas de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ (de tamaños comprendidos entre $d_p=10\text{-}60\mu\text{m}$ y con $d_p=40\mu\text{m}$ como valor más probable) sobre un sustrato de acero (34Cr4Mo) bajo en carbono, para tres distancias de proyección diferentes, 20 cm, 30 cm y 40cm desde la salida del cañón de la pistola de proyección.

Los recubrimientos han sido obtenidos a partir de una materia prima original compuesta de partículas de polvo (75% Cr_3C_2 +25% NiCr), aglomeradas y posteriormente densificadas por plasma, formadas por pequeños carburos de cromo (esencialmente Cr_3C_2 y M_7C_3 , donde $\text{M}=\text{Cr}$ y Ni, éste último en menor cantidad) rodeados de una fase metálica de inconel (75% Ni+25% Cr) rica en Ni. Los recubrimientos muestran un aumento significativo de fase metálica

fundida durante la proyección, formada por Ni, Cr, y C en alto contenido. También se observa la formación de un óxido de cromo, Cr_2O_3 , en la superficie de las partículas de polvo proyectadas y en la superficie de cada capa proyectada [6].

3.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO

3.1. Parámetros del fluido

Para el estudio del comportamiento mecánico y térmico de la partícula es necesario el conocimiento de la velocidad y temperatura del propio fluido. En general para la determinación de estos comportamientos se debe dar solución a un sistema de ecuaciones para la mezcla fluido-partícula [7].

Puesto que la fracción volumétrica η en HVOF es muy pequeña ($\eta \ll 1$) el sistema de ecuaciones para la mezcla fluido-partícula, puede ser separado en dos problemas; uno para el fluido y otro para las partículas de polvo. Por lo tanto el factor que tiene en cuenta la interacción fluido-partícula se introduce en la ecuación de la transferencia de cantidad de movimiento para la partícula [7.8].

Teniendo todo lo anterior en cuenta, las velocidades y temperaturas del fluido deberán ser determinadas en la cámara de combustión, cañón, y a lo largo de la distancia de proyección (fig.1)

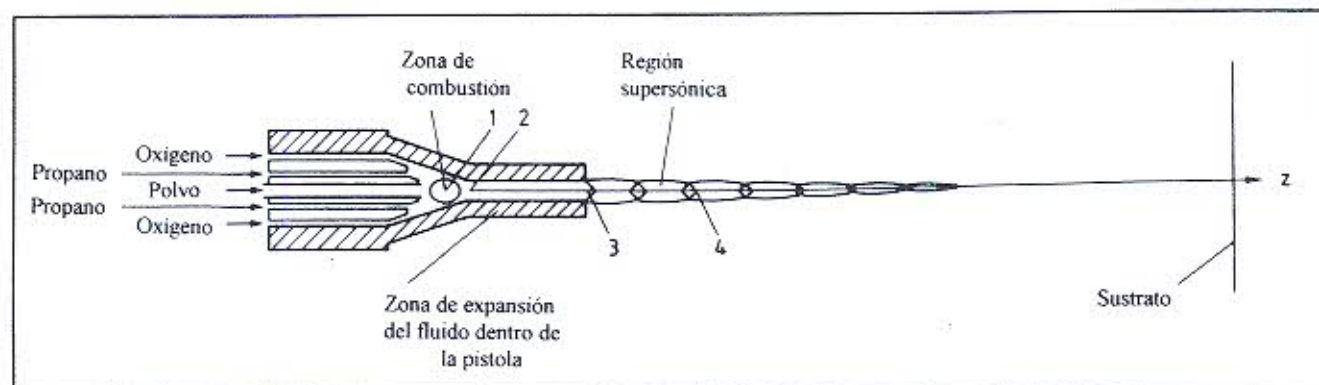


Figura 1

Esquema de la proyección HVOF: 1, 2, 3, 4 son los puntos 1, 2, 3, 4 respectivamente.

3.1.1. Cámara de combustión

El proceso de combustión en HVOF puede ser considerado similar al que tiene lugar en la propulsión de cohetes. Así pues podemos utilizar el mismo modelo unidimensional para nuestro proceso de alta velocidad, HVOF. Dicho modelo puede ser utilizado tanto para composiciones de equilibrio como para situaciones donde no se llega a conseguir estas composiciones al eliminarse rápidamente los productos de la reacción, composición congelada [9].

Las medidas muestran que los productos de combustión están muy lejos de la composición de equilibrio, de tal forma que podemos considerar más realista la situación de composición congelada [10]. Sin embargo para obtener unos resultados más precisos sería necesario incluir en el modelo procesos cinéticos de combustión y fenómenos dinámicos del fluido en la cámara de combustión.

El sistema general de ecuaciones que describen el flujo turbulento y la transferencia de masa durante el proceso de reacción de combustión es extremadamente

complicado incluso en el caso unidimensional. Además parámetros tales como viscosidad, coeficientes de difusión, constantes de velocidad de reacción, etc... sometidos a elevadas temperaturas son a menudo desconocidos. Es por ello que se justifica la necesidad de introducir correcciones semiempíricas para obtener resultados lo más precisos posibles.

La temperatura y velocidad del fluido T_{f1} , v_{f1} en la cámara de combustión puede ser calculados de forma aproximada mediante [11]:

$$T_{f1} = T_{f0} + b_1 [2500\phi - 700(\phi - 1)], \phi > 1 \quad (1)$$

$$v_{f1} = b_2 v_{f0} \quad (2)$$

$$v_{f1} = \frac{0,78 \cdot 10^4}{\left(\frac{10^4}{T_f} + \frac{900}{T_{f0}}\right)^{4,938}} \cdot P_{f1}^{-0,09876} \quad (3)$$

donde b_1 y b_2 son factores de corrección para ajustar T_{f1} y v_{f1} a los datos experimentales bajo los valores de ϕ dados.

3.1.2. Procesos dinámicos del fluido en la pistola

Para simplificar el problema matemático y clarificar la física del proceso debemos considerar que el flujo de fluido dentro de la pistola es adiabático y que no se producen otras reacciones de combustión. Para el cálculo se han utilizado valores medios para los siguientes parámetros termodinámicos γ y c_p .

Tenemos la siguiente relación entre la longitud de la pistola, L , y el número de March, M , dentro de la pistola y a una distancia z de la entrada tal que en ese punto $M_3=1$ [12]:

$$\frac{\chi}{D}(L-z) = \frac{1-M^2}{\gamma M} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \left[\frac{(\gamma+1)M^2}{2+(\gamma-1)M^2} \right] \quad (4)$$

La temperatura del fluido viene dada por [12]:

$$T_f = \frac{2+(\gamma-1)M_2^2}{2+(\gamma-1)M^2} \cdot T_{f2} \quad (5)$$

y la presión en el punto 2 y 3 (fig 1) por:

$$P_{f2} = r \rho_{f2} T_{f2} \quad (6)$$

$$P_{f3} = P_{f2} M_2 \cdot \frac{K_2}{K_3} \sqrt{\frac{T_{f3}}{T_{f2}}}$$

La presión del fluido viene dada por la expresión [12,13]:

$$\rho_f = \rho_{f2} \cdot \frac{K_2 M_2}{KM} \sqrt{\frac{T_{f2}}{T_f}}$$

$$\rho_f = r \rho T_f \quad (7)$$

Se han introducido diversos factores correctores, K , K_2 y K_3 para tener en cuenta la variación de la

velocidad del sonido, c , debida a los efectos disipativos dentro de la pistola.

El coeficiente de caída de presión χ viene dado por la siguiente expresión [14]:

$$\frac{1}{\sqrt{x}} = -2lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\chi}} + \frac{\omega}{3,71D} \right) \quad (8)$$

Si tenemos en cuenta las interacciones fluido-partícula este coeficiente se ve modificado [15]:

$$\chi_s = \chi (1 + B\zeta) \quad (9)$$

$$B = 1,2 - 0,1 \ln(St) \quad (10)$$

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 KM \sqrt{\gamma T_f}}{18 \mu L} \quad (11)$$

3.1.3 Expansión del fluido a la salida de la pistola

Puesto que justamente antes de salir de la pistola la presión excede a la atmosférica se produce una expansión del fluido en la misma salida con el consecuente incremento del número de Mach por encima de la unidad y la formación de ondas de choque [1,12].

En los límites de la llama la presión disminuye rápidamente acercándose a la atmosférica, mientras que en el eje de la llama lo hace de forma más lenta, por lo que una región supersónica central se forma dentro de la llama separando las zonas de flujo sub y supersónicos. En esta región central se forman las ondas de choque [1].

El diámetro de la región supersónica gradualmente disminuye debido a la energía disipada por la superficie límite de la llama, lo cual conlleva a la desaparición de esta región.

Considerando la expansión isentrópica y teniendo en cuenta que la presión en el exterior de la pistola, P_4 , es 1 bar; podemos conocer la T_{f4} , ρ_{f4} , v_{f4} , v_{f3} , M_4 según [12,13].

Asimismo la longitud del haz supersónico viene dada por las ecuaciones [13,14]:

$$L_c = D(3,917M_4 + 1,963), 1 \leq M_4 \leq 1,6 \quad (12)$$

$$L_c = D(14,712M_4 - 15,31), 1,6 \leq M_4 \leq 2,4 \quad (13)$$

La expansión del haz es relativamente pequeña bajo velocidades sónicas. En estas condiciones el comportamiento de la llama obedece las leyes de flujos incompresibles [16].

Debido esencialmente a las grandes velocidades que se dan en la proyección HVOF, sólo las componentes longitudinales de la velocidad de fluido y partícula son tenidas en cuenta [1,3].

Fuera de la pistola por lo tanto tenemos las

velocidades v_{f3} , v_{f4} y temperaturas T_{f3} , T_{f4} de fluido, así como los valores experimentales v_{f5} y T_{f5} en la superficie del sustrato ($z=0.4$) [2,5]. Además se ha calculado la T_f y v_f a distancias superiores ($z=0.6$) para simular el comportamiento al aumentar excesivamente la distancia de proyección. En este punto hemos introducido los valores v_{f6} y T_{f6} . La velocidad del fluido se calcula mediante una interpolación cuadrática entre los puntos 3 y 5 y lineal entre el 5 y el 6 (fig. 1). La temperatura por su parte se determina por interpolación lineal.

3.2. Transferencia de momento

Teniendo en cuenta las interacciones fluido-partícula así como la aceleración-deceleración del fluido, la ecuación del movimiento para partículas esféricas queda como sigue [2,8,17,18]:

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3}{4} \cdot \frac{C_D}{d_p} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_p} \langle v_f - v_p \rangle |v_f - v_p| + \frac{18\mu_f\eta}{d_p^2\rho_f} \langle 1 + 0.15Re^{0.687} \rangle \langle v_f - v_p \rangle - \frac{3b_3}{4} - \frac{d\langle v_f - v_p \rangle}{dt} \quad (14)$$

El segundo término en la parte derecha de la igualdad, describe las interacciones fluido-partícula [8,15] y el tercer término introduce el efecto de la aceleración-deceleración del flujo de fluido [17].

El coeficiente de arrastre viene dado por la siguiente ecuación [18]:

$$C_D = \left(\frac{23.707}{Re} \right) \left(1 + 0.165Re^{\frac{2}{3}} - 0.5Re^{-0.1} \right), \quad 0.15 \leq Re \leq 500 \quad (15)$$

$$Re = d_p |v_p - v_f| \rho_f \mu_f^{-1}$$

La condición inicial para la ecuación (*) es:

$$v_p(0) = v_{p0} \quad (16)$$

La posición viene dada por:

$$z(t) = \int_0^t v_p(t) dt \quad (17)$$

3.3. Transferencia de calor

El comportamiento térmico de las partículas esféricas de Cr_3C_2 -NiCr viene dado por la ecuación de conductividad de calor [2,19]:

$$\rho_p c_p \psi(T_p) \cdot \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{x^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(x^2 \lambda_p \cdot \frac{\partial T_p}{\partial x} \right), \quad 0 \leq x \leq R_p, \quad t > 0 \quad (18)$$

$$\psi(T_p) = 1 + qc_p^{-1} (1-k)^{-1} (T_K - T_L)^{-1} \left(\frac{T_K - T_L}{T_p - T_L} \right)^{\frac{2-k}{1-k}}$$

$$T_S \leq T_p \leq T_L;$$

$$\psi(T_p) = 1, T_p > T_L, T_p < T_S$$

La temperatura de la partícula de polvo T_p es una función del tiempo t y de la coordenada radial x . Para la resolución de la ecuación (18) se necesitan dos condiciones límite. En el centro de la partícula se introduce la condición de simetría para la temperatura (19), mientras que para la superficie de la partícula se introduce la ecuación de intercambio de calor entre la partícula y el fluido (20).

$$\frac{\partial T_p}{\partial x}(0, t) = 0 \quad (19)$$

$$\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial x}(R_p, t) = \alpha (T_f - T_p(R_p, t)) \quad (20)$$

En el momento inicial la temperatura de la partícula en cualquier punto es constante e igual a T_{p0} .

El coeficiente de transferencia de calor α (20) viene determinado por la ecuación semiempírica de Ranz-Marshall [17]:

$$Nu = \frac{\alpha d_p}{\lambda_f} = 2 + 0.6Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, \quad Pr = \frac{c_f \mu_f}{\lambda_f} \quad (21)$$

Para el cálculo de Re , Nu y Pr se introducen los valores medios de ρ_f , μ_f , c_f y λ_f en el intervalo $T_{ps} \leq T \leq T_f$.

Tanto la ecuación que define la transferencia de momento como la que define la transferencia de calor no tienen en cuenta el efecto Knudsen [2].

3.4. Transferencia de masa durante el vuelo

La transferencia de masa durante el vuelo es debida a la disolución de una cierta parte de carburos y el consecuente incremento de la proporción de C y de Cr en la fase metálica que actúa como enlante de carburos. Los resultados experimentales muestran que la mayoría de los Cr_3C_2 se encuentran inalterados tras la proyección, tan solo aquellos de pequeño tamaño sufren una disolución parcial o total durante el vuelo. Los carburos M_7C_3 sufren un proceso parecido, incrementando por lo tanto el contenido en carbono y Cr de la zonas adyacentes en estado fundido [6]. El enfriamiento que sufren las partículas de polvo cuando llegan al sustrato es del orden de 10^{6-7} K/s por lo que la estructura resultante de las zonas que han sufrido fusión parcial o total resulta amorfa y/o nanocristalina. Para la evolución de las propiedades termodinámicas del material de las partículas, también se deben tener

en cuenta la oxidación de las partículas durante el vuelo y la formación del óxido de cromo, esencialmente Cr_2O_3 .

En el cálculo se ha considerado la fracción volumétrica de carburos global como si fueran Cr_3C_2 . Esta fracción ϵ puede ser descrita según [20]:

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 - At)^{\frac{3}{\beta}}, \beta = 1 - \epsilon \quad (22)$$

$$A = r_*^{-1} \left[1 - \left(\epsilon_* \epsilon_0^{-1} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$$

De forma similar la fracción volumétrica de óxido de cromo, δ vendrá dada por:

$$\delta = \delta_0 (1 + Gt)^{\frac{3}{\gamma}}, \gamma = 1 - \delta \quad (23)$$

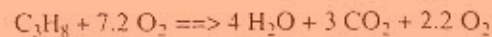
$$G = r_*^{-1} \left[\left(\delta_* \delta_0^{-1} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right]$$

En (23) se introduce un valor muy pequeño de oxidación del polvo de partida δ_0 por motivos técnicos del método matemático empleado para la simulación. Los parámetros ϵ y δ han sido utilizados para la determinación de las propiedades térmicas del material que forma las partículas de polvo de acuerdo con las reglas de mezcla [22].

4.- SIMULACIÓN MATEMÁTICA

El problema térmico y mecánico ha sido resuelto con los algoritmos descritos en [2.18]. Para la simulación

matemática se ha considerado la siguiente reacción que tiene lugar en la cámara de combustión de la pistola de HVOF:



Las propiedades de los productos de combustión (viscosidad, densidad, calor específico, conductividad térmica) usadas para la determinación de los parámetros del fluido se han obtenido mediante reglas de mezclas. Se ha calculado la velocidad y temperatura del fluido siguiendo los puntos establecidos en la sección 3.1.

Según los datos experimentales se ha tomado como tamaño de las partículas esféricas R_p , entre 10 y 60 μm . Las propiedades de los materiales que han sido empleadas en la simulación se presentan en la Tabla 1. Se ha considerado que el incremento de C en la fase metálica de Ni-Cr no influye excesivamente en las propiedades termofísicas, de tal forma que se ha interpretado como negligible su influencia [6].

Para la variante básica del sistema de cálculo se han utilizado los siguientes parámetros: radio de la partícula, $R_p=20\mu\text{m}$, temperatura inicial de la partícula $T_{p0}=1350^\circ\text{C}$, relación de equivalencia $\phi=1.44$, factores de correlación $b_1=0.84$, $b_2=440$, velocidad inicial de la partícula $v_{p0}=305 \text{ ms}^{-1}$, fracción volumétrica inicial de carburo de cromo $\epsilon_0=0.3$, fracción volumétrica inicial de óxido de cromo $\delta_0=0.005$, fracción volumétrica final de óxido de cromo $\delta_*=0.05$, flujo de propano $Q_{pr}=60 \text{ lmin}^{-1}$, flujo de oxígeno $Q_{ox}=440 \text{ lmin}^{-1}$, flujo de gas transportador (nitrógeno) $Q_{N_2}=20 \text{ lmin}^{-1}$, longitud de pistola $l=0.1 \text{ m}$, coeficiente $b_3=0.03$.

Propiedades	Ni	Cr	Cr_3C_2	Cr_2O_3
Densidad (kgm^{-3})	8900	7190	6600	5210
Calor específico ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	471	460	300	880
Conductividad térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	83	67	95	22
Difusividad térmica ($10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	1.98	2.03	4.80	0.48
Calor latente de fusión (10^6 Jkg^{-1})	0.3	0.27	—	—

Tabla 1
Propiedades termofísicas del material de polvo de partida

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Parámetros del fluido

Los valores calculados de la velocidad del fluido, temperatura y presión en los puntos más críticos para el sistema de proyección HVOF (fig.1) se presentan en la

Tabla 2. Las velocidades y temperaturas del fluido a lo largo de toda la distancia de proyección se calculan interpolando los resultados presentados en la Tabla 2. Los resultados se muestran en las figuras 2 y 6 respectivamente.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Velocidad (ms^{-1})	312	305	550
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	2771	2600	2165
Presión (bar)	3.37	2.50	1.0

Tabla 2

Parámetros del fluido en los puntos más críticos del sistema de proyección térmica HVOF

5.2. Comportamiento mecánico de las partículas.

Comparación con Resultados Experimentales

En el proceso de HVOF la velocidad de las partículas v_p aumenta en la dirección del sustrato, alcanza su valor máximo y posteriormente disminuye (fig.2). La velocidad de la partícula disminuye con el aumento del diámetro de la partícula, d_p .

Cuando el d_p aumenta, la máxima velocidad v_{pm} correspondiente al diámetro previo, va disminuyendo y se desplaza hacia el sustrato. Por ello las partículas de mayor tamaño varían más uniformemente su velocidad a lo largo de la distancia de proyección.

El valor de v_{pm} aumenta al aumentar tanto la fracción volumétrica de carburo de cromo, como la de óxido de cromo, puesto que estas fases poseen densidades más pequeñas respecto a la fase metálica de inconel. Bajo estas condiciones la posición z_m de máxima velocidad se desplaza hacia la salida de la pistola.

Un dato importante para el sistema de proyección de alta velocidad es la velocidad, v_{p*} , en la distancia recomendada de proyección, $L_s=z-L$, en nuestro caso de 0.3m desde la salida de la pistola. También es importante el tiempo de vuelo de la partícula, t_* .

Experimentalmente se han realizado proyecciones por encima y por debajo de la distancia recomendada, concretamente a 0.2m y 0.4m desde la salida de la pistola. Los resultados de dureza están relacionados con la compactación sufrida por el recubrimiento y en menor medida con la transferencia de masa durante el vuelo que pueda tener lugar. La compactación sufrida es esencialmente proporcional a la diferencia de presión existente entre la cámara de combustión y el exterior. Y esta diferencia de presión está íntimamente relacionada con la velocidad de la partícula (especialmente debido a su mayor densidad) y con la velocidad del fluido [6]. Se puede observar en la figura 2 como el máximo de velocidad de partícula y fluido obtenidas según el modelo matemático empleado se encuentran en la zona de 0.1m a 0.2m.

La figura 3 muestra que la velocidad v_{p*} aumenta inicialmente debido a la aceleración del fluido,

alcanzando el valor máximo cuando $d_p \approx 25\mu\text{m}$ y disminuye posteriormente debido al crecimiento del tamaño de la partícula. El tiempo de vuelo aumenta con el diámetro de la partícula.

La velocidad de la partícula v_{p*} aumenta al aumentar la fracción volumétrica final de carburo de cromo (fig.4). Esta velocidad aumenta de igual forma con la fracción volumétrica final de óxido de cromo. Ambas tendencias tienen lugar debido a que tanto el carburo de cromo como el óxido tienen menor densidad que no la fase metálica de Ni y Cr. El tiempo de vuelo de la partícula disminuye con el aumento de ϵ_0 y ϵ_* (fig.5).

5.3. Comportamiento térmico de la partícula

Comparación con los Resultados Experimentales

Puesto que los coeficientes de difusión de calor de los materiales que constituyen las partículas son altos (sin tener en cuenta el óxido de cromo presente en pequeña cantidad) la variación de la temperatura dentro de la partícula es muy pequeña. Por ello se ha trabado tan solo con la temperatura en la superficie.

Como se puede ver en la fig.6 durante el proceso de proyección HVOF las partículas de polvo inicialmente se calientan alcanzando la temperatura de fusión de la fase metálica de NiCr. Durante la fusión la temperatura de la partícula crece de forma lenta debido a la absorción del calor latente de fusión. Tras la fusión la temperatura de la partícula, T_p , sigue aumentando rápidamente hasta alcanzar su valor máximo T_{pm} en $z=z_m$ y posteriormente disminuye.

Cuando se alcanza la temperatura líquida de la fase metálica, comienza la solidificación y la temperatura de la partícula disminuye muy lentamente a pesar de la significativa disminución de la temperatura del fluido debido a la extracción de calor latente. Una vez finalizada la solidificación la partícula se enfría rápidamente.

El calentamiento de las partículas grandes es relativamente pequeño. Al aumentar el diámetro de la partícula, la temperatura máxima de las partículas T_{pm} se desplaza hacia la superficie del sustrato.

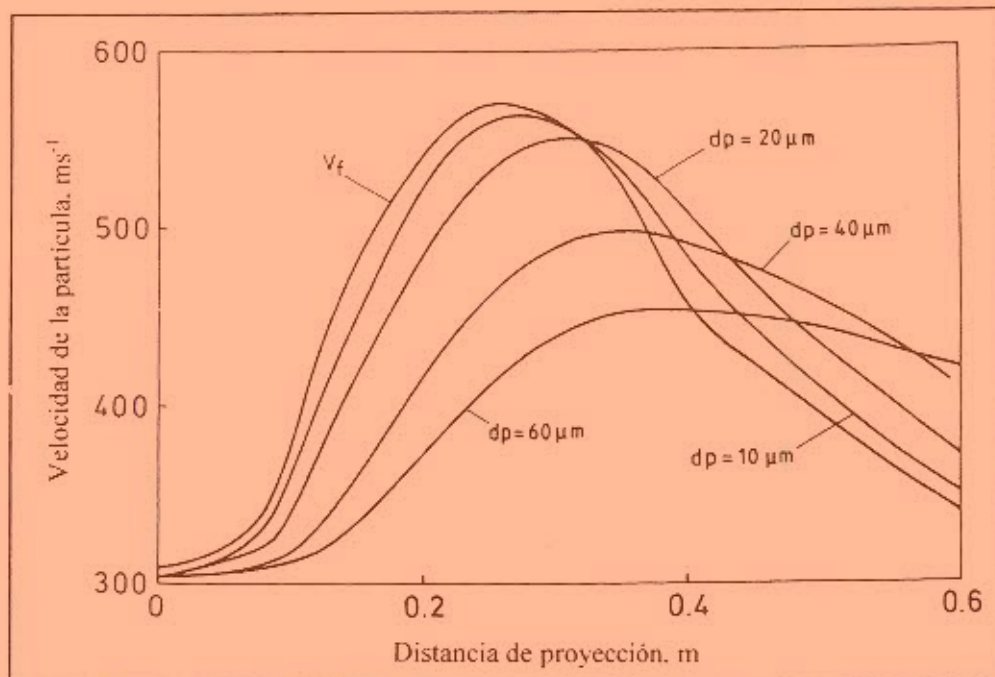


Figura 2
Variación de la velocidad de la partícula con la distancia de proyección.

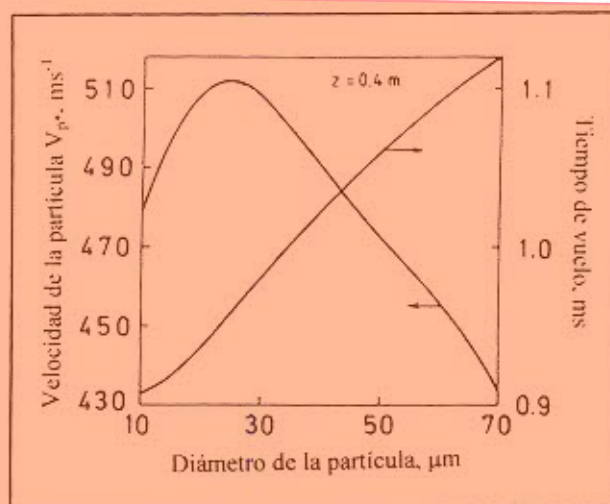


Figura 3
Variación de la velocidad máxima de la partícula y del tiempo de vuelo a la distancia $z=0.4$ m respecto al diámetro de la partícula.

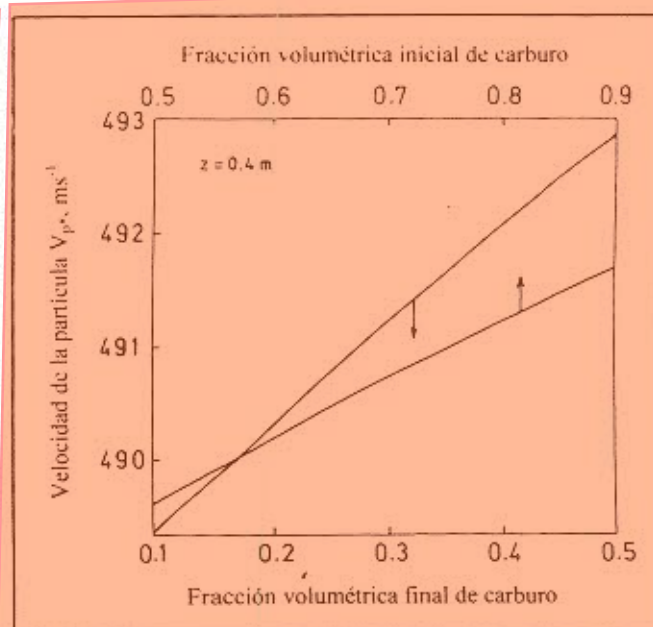


Figura 4
Variación de la velocidad de la partícula en $z=0.4$ m respecto a la fracción volumétrica final e inicial de carburo de cromo.

Si no se considera el proceso de disolución de carburos, la difusividad térmica de las partículas es mayor que en caso contrario y por lo tanto la partícula alcanza una mayor temperatura.

También tienen influencia las proporciones de carburos y óxidos en los recubrimientos, de tal forma que como se puede ver en la figura 7 al aumentar el contenido inicial de carburos, ϵ_i la temperatura de la

partícula crece y causa un aumento de la difusividad contenido inicial de carburos, ϵ_0 la temperatura de la partícula crece y causa un aumento de la difusividad térmica de las partículas. Es mucho más compleja la situación cuando la fracción volumétrica final de carburo, ϵ^* , disminuye. Por una parte el hecho de disminuir ϵ^* supone un aumento de la disolución sufrida por los carburos y esto implica una disminución de la difusividad térmica de las partículas y por lo tanto

un aumento de la temperatura. Además también implica una disminución de la velocidad de la partícula debido al crecimiento de la densidad, lo que conlleva al aumento del tiempo de permanencia en la zona dónde la temperatura del fluido es elevada. Por otra parte, la

disminución de la velocidad de la partícula provoca a su vez una disminución en el coeficiente de transferencia de calor α entre la superficie de la partícula y el fluido.

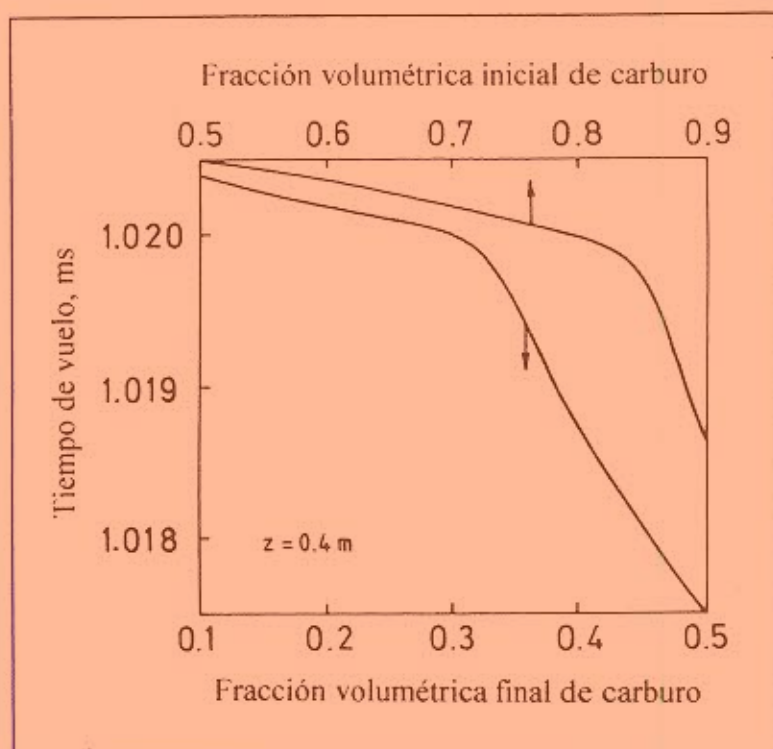


Figura 5

Variación del tiempo de vuelo de la partícula respecto a la fracción volumétrica final e inicial de carburo de cromo.

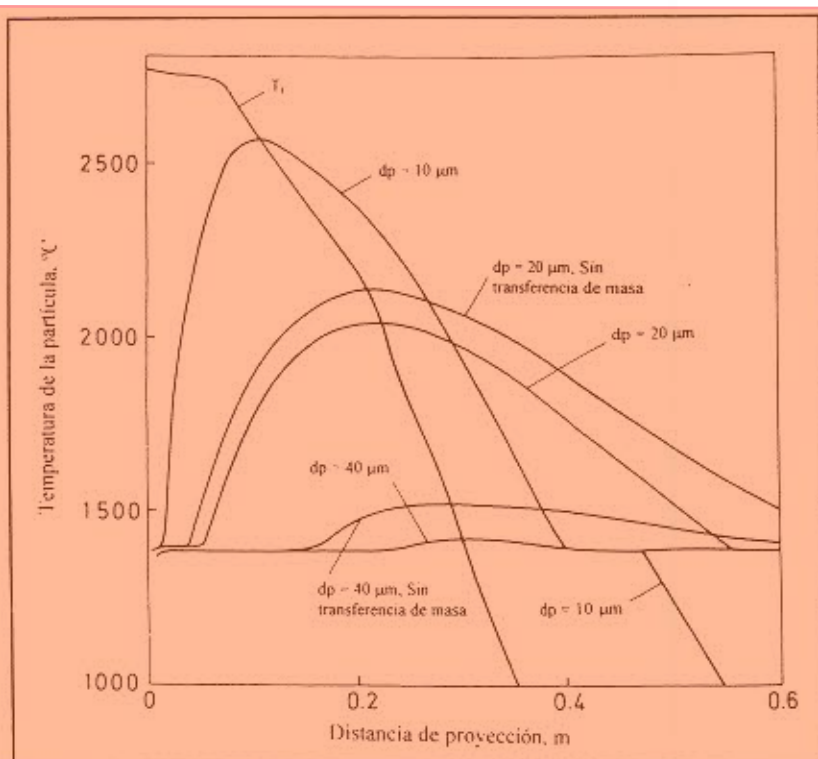


Figura 6

Variación de la temperatura superficial de la partícula respecto a la distancia de proyección.

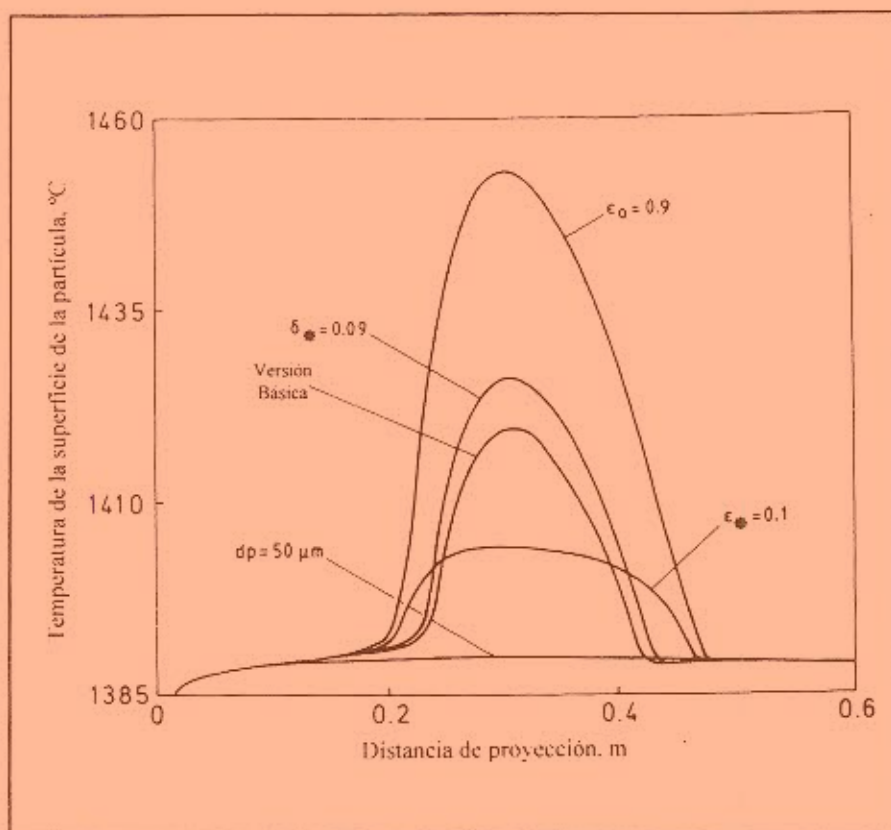


Figura 7

Influencia de los procesos de transferencia de masa en la temperatura superficial de la partícula respecto a la distancia de proyección.

La competencia entre estos dos factores provoca el comportamiento de la temperatura de la partícula cuando la fracción volumétrica final de carburos ϵ^* disminuye. En un primer momento la temperatura de la partícula es superior a aquella que corresponde a la situación que hemos llamado básica, cuando $\epsilon^* = 0.3$. Posteriormente ocurre todo lo contrario retomando la situación inicial en los momentos finales del enfriamiento previo a la solidificación.

El aumento de la fracción volumétrica final de óxido de cromo, δ_* , conlleva la disminución de la difusividad térmica de las partículas y de su densidad. Esto implica un crecimiento de la velocidad de la partícula y consecuentemente un aumento del coeficiente de transferencia de calor α . Cuando este factor es el dominante, la temperatura de la partícula aumenta. Esta situación se muestra en la figura 7. La temperatura para las partículas grandes ($d_p \geq 50 \mu m$) varía de forma muy lenta.

De igual manera que en el comportamiento mecánico, para el proceso de proyección térmica HVOF es de vital importancia conocer la evolución de los valores máximos de la temperatura T_{pm} y la posición a la cual se alcanzan, z_m , así como la temperatura de la partícula a la distancia de proyección.

Experimentalmente en las proyecciones realizadas a 0.2, 0.3 y 0.4m no se han observado diferencias drásticas de procesos térmicos de disolución [6]. En las figuras 6 y 7 se muestra como la temperatura máxima para las partículas de diámetros comprendidos entre $20 \mu m$ y $40 \mu m$ están alrededor de 0.2m-0.3m desde la salida de la pistola. El sobrecalentamiento de las partículas pequeñas justificarían un aumento de la porosidad para distancias de proyección más cortas, sin embargo el factor principal del aumento de la porosidad lo constituye la disminución de velocidad de las partículas o mejor dicho, la disminución de la energía cinética de las partículas. Este efecto tiene lugar al aumentar la distancia de proyección [6].

El valor de T_{pm} aumenta con la temperatura inicial de la partícula T_{p0} , la fracción volumétrica inicial de carburo de cromo ϵ_0 y la fracción volumétrica final de óxido de cromo δ_* . Disminuye sin embargo, cuando la fracción volumétrica de carburo de cromo ϵ_* aumenta.

El parámetro z^* disminuye con d^* , aumenta con T_{p0} , ϵ_* y se comporta no-uniformemente con ϵ_0 , alcanzando su valor máximo cuando $\epsilon_0 \approx 0.82$.

Las figuras 8 y 9 muestran como la temperatura T_{p*} a la distancia de proyección de 0.3m desde la salida de la pistola aumenta con T_{p0} , δ_* , ϵ_0 y disminuye con ϵ_* .

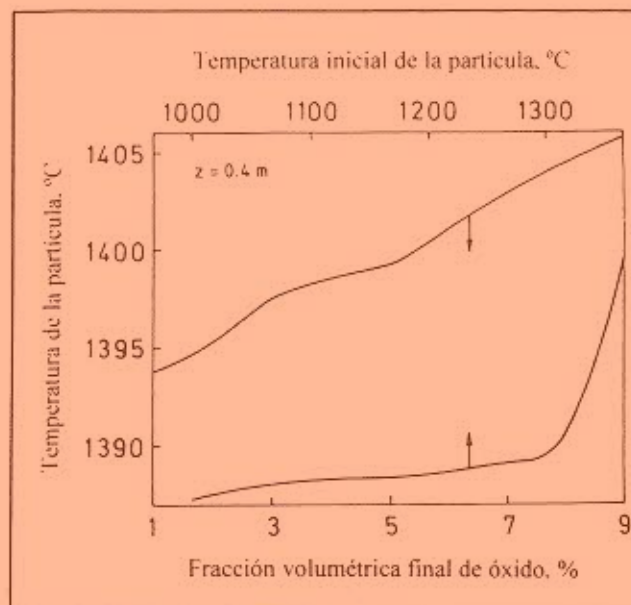


Figura 8

Fig. 8. Variación de la temperatura de la partícula a $z=0.4\text{m}$ respecto a su temperatura inicial y a la fracción volumétrica final de óxido de cromo.

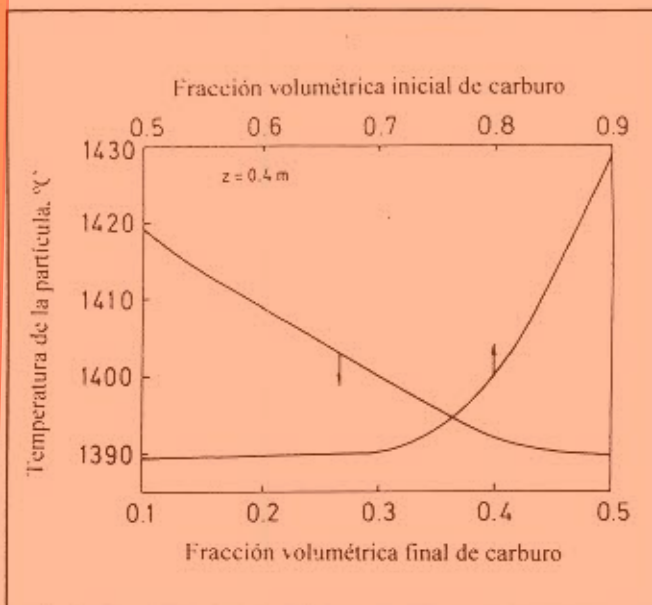


Figura 9

Variación de la temperatura de la partícula a $z=0.4\text{m}$ respecto a la fracción volumétrica final e inicial de carburo de cromo.

Desde el punto de vista experimental las variaciones de T_p respecto al diámetro de las partículas d_p son muy importantes (fig.10,11). Se puede observar como la temperatura T_p disminuye cuando tiene lugar la disolución del carburo de cromo, así como cuando la distancia de proyección (a la cual se coloca el sustrato) aumenta.

Parece evidente, por los resultados experimentales previamente descritos, que las condiciones de proyección mejoran cuando la distancia de proyección disminuye, sin embargo desde el punto de vista térmico cuando la diferencia entre las temperaturas T_p que corresponden a diferentes diámetros de partícula dentro de un intervalo de distribución de tamaño de partícula no es muy acentuada, se deberían obtener mejores recubrimientos, puesto que tendríamos un menor sobrecalentamiento y por lo tanto una menor porosidad. Si observamos las figuras 10 y 11 por este último criterio obtendríamos mejores condiciones de proyección cuando la distancia desde la salida de la pistola hasta el sustrato fuese mayor. No hay que perder de vista que el aumento de las distancias de proyección desde el punto de vista mecánico, hace disminuir sustancialmente las velocidades, con lo que provocamos un aumento drástico de la porosidad, siendo este factor mecánico predominante sobre el factor térmico para el caso estudiado [6].

Sin embargo en estas mismas figuras 10,11 sí que se puede observar que en el caso de procesos de transferencia de materia dentro de las partículas de polvo, esta diferencia de T_p resulta mucho menor y el intervalo de diámetros de partículas óptimo se hace

más estrecho. El resultado es que para cada una de las distancias tenemos unas condiciones térmicas óptimas en cuanto a distribución de tamaños de partículas. Por ejemplo para $L_s=0.3\text{m}$ las condiciones de proyección óptimas incluyen: $d_p=(11-12\mu\text{m}, 34-44\mu\text{m})$, $\epsilon_0=0.7-0.9$, $\epsilon_s=0.1-0.45$, $\delta_s=0.02-0.08$ y $T_0=1320-1360^\circ\text{C}$.

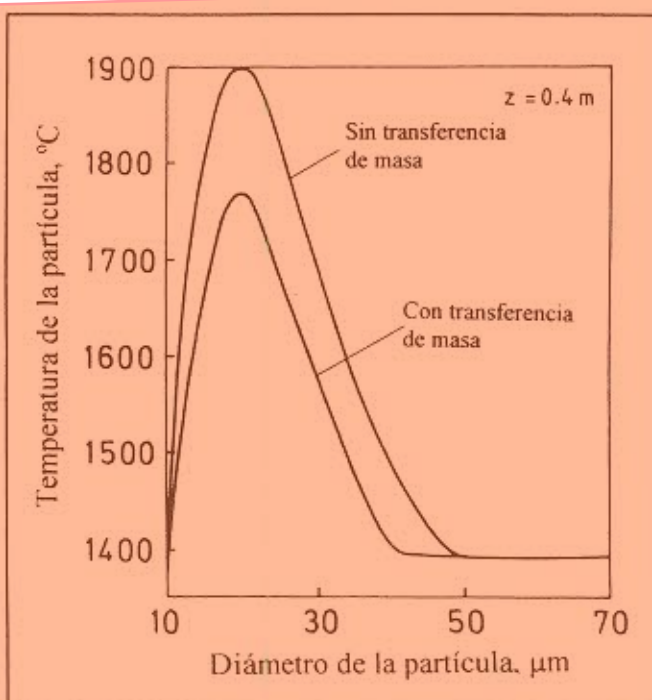


Figura 10

Variación de la temperatura de la partícula respecto a su diámetro para diferentes posiciones del sustrato con y sin disolución de carburos.

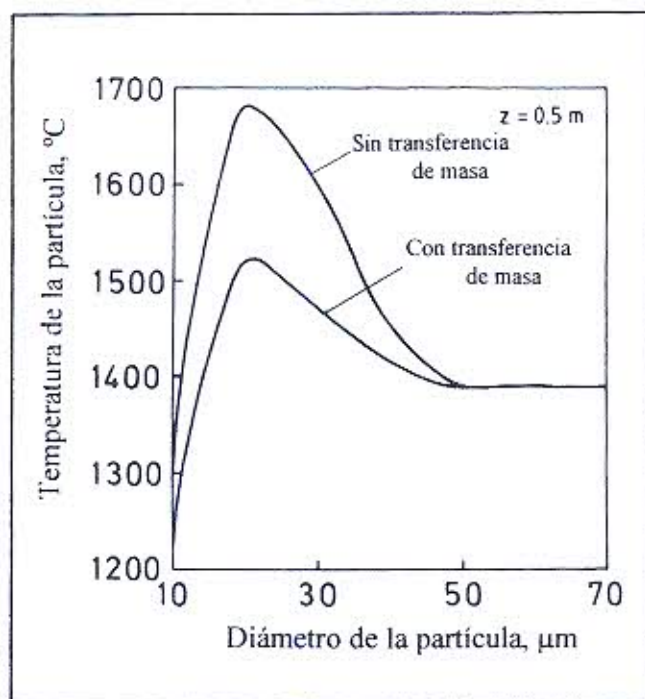


Figura 11

5.- CONCLUSIONES

- 1) Se ha desarrollado un modelo matemático para describir los procesos dinámicos que tienen lugar durante el vuelo de partículas de polvo compuestas de matriz metálica y de fases de alto punto de fusión (en el caso estudiado, carburos de cromo). En dicho modelo se han tenido en cuenta los procesos de combustión, dinámica de las partículas y fluido (dentro y fuera de la pistola), así como los procesos de transferencia de calor y masa.
- 2) Al aumentar la fracción volumétrica de carburo de cromo y de óxido de cromo las velocidades máximas que alcanzan las partículas aumentan y la posición en donde estas velocidades son obtenidas se desplaza hacia la salida de la pistola, o sea disminuye.
- 3) La velocidad de la partícula a la distancia de proyección recomendada ($L_s=0.3\text{m}$) varía de forma no lineal con respecto al tamaño y diámetro de las partículas de polvo. En un primer momento aumenta hasta alcanzar su valor máximo para $d_p=25\mu\text{m}$ y posteriormente disminuye. Asimismo esta velocidad aumenta cuando lo hace la fracción volumétrica final de carburo de cromo y al aumentar la fracción volumétrica final de óxido de cromo. El tiempo de vuelo de las partículas aumenta con el diámetro y disminuye con el aumento de la fracción volumétrica inicial y final de carburo de cromo.
- 4) La temperatura de la partícula aumenta, alcanza su

valor máximo y disminuye a lo largo de la distancia de proyección. Durante la fusión y la solidificación de la fase metálica la temperatura varía de forma lenta debido a la absorción y extracción respectivamente del calor latente. La disolución de carburos causa la disminución de la temperatura de la partícula.

- 5) La temperatura de la partícula aumenta con la fracción volumétrica inicial de carburo de cromo y con la fracción volumétrica final de óxido de cromo. La disminución de la fracción volumétrica final de carburo de cromo conduce a la disminución de la temperatura de la partícula en la región de fusión total, mientras que en regiones anteriores y posteriores la temperatura de la partícula aumenta.
- 6) La temperatura máxima de la partícula aumenta con la temperatura inicial de la partícula, la fracción volumétrica inicial de carburo de cromo y la fracción volumétrica final de óxido de cromo. Sin embargo, esta temperatura máxima disminuye cuando aumenta la fracción volumétrica final de carburo de cromo. La posición del máximo de temperatura disminuye con la fracción volumétrica final de carburo de cromo, aumenta con la temperatura inicial de la partícula y con la fracción volumétrica final del óxido de cromo.
- 7) La temperatura de la partícula a la distancia de colocación del sustrato ($L_s=0.3\text{m}$) aumenta con la temperatura inicial de la partícula, con la fracción volumétrica inicial de carburo de cromo y con la fracción volumétrica final de óxido de cromo, mientras que disminuye con la fracción volumétrica final de carburo de cromo. Si variamos la posición del sustrato aumentándola de $L_s=0.3\text{m}$ a $L_s=0.4\text{m}$, la temperatura de la partícula disminuye.
- 8) El proceso de transferencia de calor dentro de las partículas de polvo conduce al aumento del intervalo de tamaños de partículas adecuados. Esto ocurre también cuando la posición cambia desde $z=0.4\text{m}$ a $z=0.5\text{m}$. Cuando $z=0.4\text{m}$ el intervalo preferente de diámetros es de $d_p=11-12\mu\text{m}$ a $d_p=34-44\mu\text{m}$, mientras que cuando $z=0.5\text{m}$ el intervalo es de $d_p=14-19\mu\text{m}$ a $d_p=26-46\mu\text{m}$.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la CICYT su soporte financiero mediante el proyecto MAT94-0013. V.V. Sobolev agradece a la CICYT la concesión de un año Sabático SAB94-0066 en la Universidad de Barcelona. J.A. Calero da su agradecimiento también a la Generalitat de Catalunya por la concesión de su beca FI. Finalmente los autores agradecen a Carburos Metálicos S.A. el apoyo económico recibido a través del Centro de Proyección Térmica de la Universidad de Barcelona.

REFERENCIAS

- 1 M.L.Thorpe y H.J.Richter: *J. Therm. Spray Technol.*, 1992, vol. 1(2), pp. 161-170.
- 2 V.V.Sobolev, J.M.Guilemany, J.C.Garmier y J.A.Calero: *Surf. Coat. Technol.*, 1994, vol.64, pp. 181-187.
- 3 D.W.Parker y G.L.Kutner: *Adv. Mater. Proces.*, 1994, 7, 31-35.
- 4 V.V.Sobolev, J.M.Guilemany, J.R.Miguel y J.A.Calero: *Univ. of Barcelona, Barcelona, Surf. Coat. Technol.*, en imprenta, 1996.
- 5 Introduction to the CDS Technology. Plasma Technik AG, Wohlen, 1990, pp. 12-13.
- 6 J.M.Guilemany y J.A.Calero: *Univ. de Barcelona, Barcelona, Comunicación Privada*, 1995.
- 7 K.S. Han, M.K.Chung y H.J.Sung: *Trans. ASME, J. Fluids Engin.*, 1991, vol.113, pp. 130-136.
- 8 V.V.Sobolev, J.M.Guilemany y J.A.Calero: *Univ. of Barcelona, Barcelona, J. Therm. Spray Technol.*, 1995, 4(3), 276-287.
- 9 S.Gordon y B.McBride: 1976, NASA SP-273, Lewis Research Center.
- 10 W.D.Swank, J.R.Fincke, D.C.Haggard y G.Irons: *Thermal Spray Industrial Applications*, ASM International, Materials Park, Ohio, 1994, pp. 313-318.
- 11 J.H. Horlock y D.E.Winterbone: *The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engines*, Ed., Clarendon Press, Oxford, 1986, pp. 824-848, 12.
- 12 R.Ouziaux y J.Perrier: *Mecanique des Fluides Appliquee*, vol.2, Dunod, Paris 1967, pp. 11-78.
- 13 J.C.Garmier: *Plasma Technik S.A. France, Villefontaine*, trabajo no publicado, 1990.
- 14 R.Duziaux y J.Perrier: *Mecanique des Fluides Appliquee*, vol.1, Dunod, Paris, 1972, pp. 216-223.
- 15 F.T.Dodge, S.T.Green y J.E.Johnson, *Trans. ASME, J. Fluids Engin.*, 1991, vol.113, pp. 469-474.
- 16 J.Szekely y N.J.Themelis: *Rate Phenomena in Process Metallurgy*, Wiley-Interscience, New-York, 1971, pp. 718-724.
- 17 S.Temkin y H.K.Menta: *J. Fluid Mech.*, 1982, vol.116, pp. 297-313.
- 18 D.Apelian, M.Paliwal, R.W.Smith y W.F.Schilling: *Inter. Met. Rev.*, 1983, vol.28(5), pp. 271-294.
- 19 V.V.Sobolev y P.M.Trefilov: *Thermophysics of Metal Solidification during Continuous Casting*, Metallurgy, Moscow, 1988, pp. 6-16.
- 20 R.H.Doremus: *Rate of Phase Transformations*, Academic Press, London, 1985, pp. 12-20.
- 21 J.M.Guilemany, J.Nutting y N.Llorca-Isern: *Powder Metallurgy*, 1994, vol.37(4) 289-292.
- 22 T.Yoshida y K.Akashi: *J. Appl. Phys.*, 1977, vol. 48(6), 2252-2260.

Apendice: Lista de símbolos

T	temperatura, °C
v	velocidad, ms ⁻¹
P	presión, bar
M	número de Mach
z	coordenada longitudinal, m
φ	relación de equivalencia
c _p	calor específico, J kg ⁻¹ K ⁻¹
γ	relación de calores específicos
L	longitud de la pistola, m
D	diámetro de la pistola, m
χ	coeficiente de caída de presión
ρ	densidad, kg m ⁻³
t	tiempo, s
c	velocidad del sonido, m s ⁻¹
Re	número de Reynolds
r	relación de la constante universal de gases con la masa molar del fluido, J kg ⁻¹ K ⁻¹
m	masa, kg
w	rugosidad de la pared de la pistola, m
St	número de Stokes
F	área de la sección transversal de la pistola, m ²
d _p	diámetro de la partícula, m
ζ	relación entre el flujo másico de la partícula y el fluido
μ	viscosidad dinámica, kg m ⁻¹ s ⁻¹
L _c	longitud de la región supersónica de la llama, m
C _D	coeficiente de arrastre
q	calor latente de fusión, J kg ⁻¹
k	coeficiente de partición
T _K	temperatura de fusión del níquel, °C
x	coordenada radial de la partícula, m
Ψ	parámetro de efectividad
α	coeficiente de transferencia de calor, W m ⁻² K ⁻¹
λ	conductividad térmica, W m ⁻¹ K ⁻¹
T _{ps}	temperatura de la superficie de la partícula, °C
Pr	número de Prandtl
Nu	número de Nusselt
η	fracción volumétrica de partículas
ε	fracción volumétrica de carburo de cromo
δ	fracción volumétrica de óxido de cromo
β	fracción volumétrica de fase metálica

t_* tiempo de inicio de fusión de la fase metálica, s

R_p radio de partícula, m

Q_{pr} flujo de propano, l min⁻¹

Q_{ox} flujo de oxígeno, l min⁻¹

Q_N flujo de nitrógeno, l min⁻¹

L_s distancia de proyección, m

$b_1, b_2, K_1, K_2, K_3, A, G$ coeficientes

Subíndices

p partícula

f fluido

m máximo

o inicial

e equilibrio

L liquidus

S solidus

1 parámetro en el punto 1 de la fig. 1

2 parámetro en el punto 2 de la fig. 1

3 parámetro en el punto 3 de la fig. 1

4 parámetro en el punto 4 de la fig. 1