

Predicción numérica del afino de los granos en la zona afectada por la temperatura (ZAC) para aportes de multipasadas durante el proceso de soldeo SMAW en el acero al Cr-Mo-V^(*)

Z. Mazur^{*,**}, G. González^{**}, G. Urquiza^{*,**}, O. Salazar^{***}, C. Mariño^{*} y A. Hernández^{*}

- Resumen** Se presenta una metodología de predicción de las dimensiones de las zonas que ocupan distintos tamaños de grano de la zona afectada por la temperatura (ZAC), en los aportes de multipasadas de dos capas, aplicada al acero de baja aleación 1,25Cr-1Mo-0,25V por el soldeo SMAW. Se desarrolló un programa por ordenador para calcular la extensión de las regiones de distintos tamaños de grano en la ZAC de multipasadas de dos capas y predecir el porcentaje de afino de los granos gruesos de la ZAC para determinados parámetros de soldeo, temperatura de precalentamiento y solapamiento de los cordones. Se llevó a cabo la validación del modelo realizando una comparación con los resultados experimentales aportando varios cordones de soldadura en dos capas, obteniendo una razonable concordancia entre la predicción del modelo y la distribución estructural de la ZAC medida durante el experimento.
- Palabras clave** Microestructura de la ZAC. Simulación numérica. Aceros al Cr-Mo-V. Soldadura SMAW. Cordones múltiples de soldadura de dos capas.

Numerical prediction of heat affected zone (HAZ) grain refinement for multiples weld-beads deposits during SMAW welding process of Cr-Mo-V steel

- Abstract** The methodology of prediction of the heat-affected zone (HAZ) microstructure in a multiple-bead welds of the two layers of 1.25Cr-1Mo-0.25V steel using SMAW deposition process is presented. A computer program was developed to calculate extension zones of interest of two layer multipass weld-beads HAZ and predict a percentage of HAZ coarse grains refinement for determined welding parameters, preheating temperature and weld-bead overlap. The computer model has been validated by experiment depositing a series of two-layer weld-beads getting reasonable concordance of model prediction and measured during experiment structural HAZ distribution.
- Keywords** HAZ microstructure. Numerical simulation. Cr-Mo-V steel. Two-layer multipass weld-beads.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros de baja aleación al Cr-Mo-V de gran espesor se aplican comunmente en el diseño del equipo para generación de energía eléctrica en temperaturas hasta 565 °C y presión del vapor hasta 16 MPa. Estos aceros tienen buena resistencia a la rotura y resistencia a la termofluencia, pero son

susceptibles a la fisuración en la zona afectada por el calor (ZAC) durante el proceso de soldeo, durante la eliminación de las tensiones después de soldeo y durante la operación a temperatura elevada, debido a fragilidad de revenido.

En un trabajo anterior^[1] se presentó una metodología de predicción de las dimensiones de las zonas que ocupan distintos tamaños de grano de la

(*) Trabajo recibido el día 19 de enero de 2001 y aceptado en su forma final el día 9 de julio de 2001.

(*) Instituto de Investigaciones Eléctricas. Avda. Reforma 113, Col. Palmira, 62490 Temixco, Morelos, México. E-mail: mazur@iie.org.mx

(**) Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México.

(***) Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Toluca, Toluca, Estado de México, México.

zona afectada por la temperatura (ZAC), en un cordón de soldadura aplicado al acero de baja aleación 1,25Cr-1Mo-0,25V mediante el soldeo SMAW. Las bases para el desarrollo del algoritmo fueron las ecuaciones clásicas de transferencia del calor para determinar los ciclos térmicos del soldeo, la metalurgia básica (incluyendo transformaciones de las fases y crecimiento de granos) y las relaciones empíricas para describir la correlación entre las variables del proceso de soldeo y las dimensiones del cordón de soldadura.

La metodología anteriormente mencionada permite obtener la distribución de la microestructura en la ZAC, de forma razonable, para determinados parámetros del soldeo. Los resultados obtenidos de la predicción de la microestructura en la ZAC de un cordón de soldadura son suficientemente fiables y sustentan el uso del modelo para simular la microestructura de la ZAC en la soldadura de multipasadas, con el propósito de obtener el afino de los granos de la bainita gruesa en la ZAC y mejorar la eficacia de la unión durante la operación.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo por ordenador para simular la microestructura de la ZAC en las soldaduras de multipasadas de dos capas en el acero al 1,25Cr-1Mo-0,25V, con el propósito de obtener el afino de los granos de la bainita gruesa de la ZAC y evitar los efectos nocivos de esta zona a la eficacia de la unión por soldeo.

2. PREDICCIÓN NUMÉRICA DE LA MICROESTRUCTURA EN LA ZAC DE DOS CAPAS DE CORDONES DE SOLDADURA

La zona afectada por la temperatura (ZAC) de las soldaduras de los multipasadas está sometida a ciclos térmicos múltiples, con temperaturas pico que varían entre la temperatura de fusión y la temperatura de precalentamiento. En el ciclo térmico de soldeo, se presenta disolución de los carburos durante calentamiento y se produce crecimiento de granos cuando el material se encuentra en el intervalo de la austenita. El proceso de crecimiento de granos se está presentando para cada ciclo térmico de soldeo cuando la microestructura bainítica se está transformando a austenita. La presencia de un precipitado distribuido establemente en la austenita puede impedir crecimiento de granos^[2]. A pesar de que los ciclos térmicos previos pueden producir diferente distribución de los carburos en la microestructura durante cada subsecuente ciclo térmico, la disolución de los carburos es rápida y completa

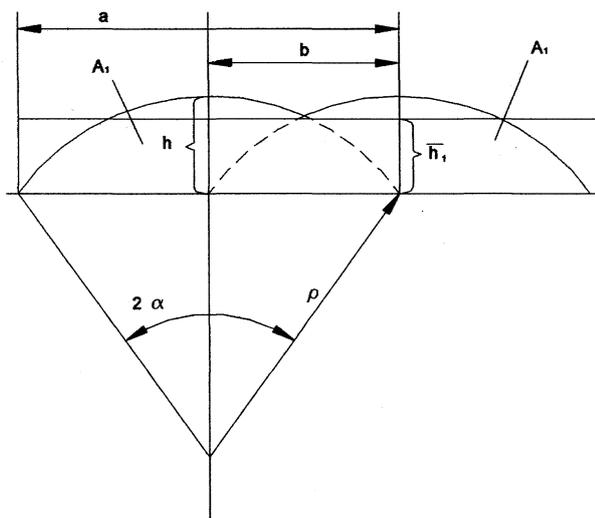
en la temperatura próxima a 1.100 °C^[3]. Cuando esta temperatura se excede, la etapa final de crecimiento de granos no está impedida^[2] y la microestructura inicial tiene un pequeño efecto sobre el tamaño de grano de la austenita. Entonces, para cada combinación de los ciclos térmicos de soldeo, el tamaño de grano de la austenita primaria y la dureza producida son, efectivamente, característicos para el último ciclo térmico experimentado. En estos casos, la microestructura de la ZAC es prácticamente independiente de los ciclos térmicos previos y tiene relación directa con la temperatura y tiempo de austenitización. Bajo estas condiciones, el crecimiento de volumen de los granos se presentará en estas altas temperaturas. Cuando las temperaturas pico del ciclo térmico son menores de 1.100 °C, la distribución de los carburos, dureza de la ZAC y tamaño de granos están modificándose y no están relacionados con el último ciclo térmico experimentado.

El crecimiento de grano puede ser restringido en la línea de fusión por los ciclos térmicos rápidos que dejan un tiempo mínimo en la temperatura alta para crecimiento de granos. Los procesos de soldeo con aportación de pequeño calor cumplen con esta condición y los granos finos pueden ser producidos, no solamente en las zonas más frías de la ZAC sino también en las regiones cercanas a la línea de fusión^[4]. Otro elemento importante que puede mejorar el afino de los granos es la aplicación de una técnica de aportación de cordones solapados de soldadura, que asegura que el segundo ciclo térmico experimentado por la región original de granos gruesos tiene una baja temperatura de pico (<1.100 °C). De esta manera, las zonas de la ZAC de baja temperatura de los cordones sucesivos de soldadura pueden ser sobrepuestas a la línea de fusión de la ZAC de cada aporte previamente aplicado, causando afinamiento continuo^[5]. El solapamiento de cordones de soldadura tiene que ser definido para poder calcular la posición de la fuente del calor en la segunda capa de cordones. El porcentaje de afino es una función de la temperatura de precalentamiento que afecta a la posición de las isoterms de la ZAC y al solapamiento de los cordones.

Se desarrolló un programa informático para calcular la extensión de las regiones de distintos tamaños de grano en la ZAC de multipasadas de dos capas. Los datos de entrada requeridos son: parámetros de soldeo, temperatura de precalentamiento, espesor de la unión y solapamiento de los cordones de soldadura.

2.1. Determinación de las condiciones para el afino de los granos para dos capas de cordones de soldadura

En la situación de dos capas de cordones de soldadura, la altura de la primera capa determina la penetración de la ZAC de la segunda capa a la ZAC de la primera; por ello, el conocimiento de la altura de la primera capa encima de la superficie original es esencial. La altura de la capa del aporte de los cordones de soldadura se produce por el material de aporte aplicado durante el proceso y, por esta razón, no puede calcularse de las ecuaciones clásicas de transferencia del calor. Para resolver este problema, la altura del cordón (Fig. 1) de la primera capa de cordones de soldadura se determinó mediante las mediciones experimentales de los cordones aportados en la placa gruesa del acero al 1,25Cr-1Mo-0,25V, aplicando un intervalo de los parámetros de soldeo^[1]. La altura, h , así como otras dimensiones del cordón de soldadura, están relacionadas con la aportación efectiva del calor, q , de



- a – ancho del cordón de soldadura
- b – distancia entre cordones de soldadura
- h – altura del cordón de soldadura
- \bar{h}_1 – altura media de la primera capa de cordones de soldadura
- ρ – radio del arco de círculo de la superficie del cordón de soldadura
- A_1 – Área del cordón de soldadura
- 2α – Ángulo del cordón de soldadura

Figura 1. Relaciones geométricas para determinar la altura media de la capa de los cordones de soldadura.

Figure 1. Geometrical relationships to determine weld bead medium height.

forma proporcional^[1]. La relación de regresión lineal por mínimos cuadrados obtenida para h , con base en los resultados empíricos anteriormente mencionados, se expresa en la siguiente ecuación^[1]:

$$h = 0,00211q + 1,298 \text{ (mm)} \quad (1)$$

La altura media de la primera capa de cordones de soldadura para los parámetros de soldeo considerados se determinó de las siguientes ecuaciones, teniendo en cuenta las relaciones presentadas en la figura 1, suponiendo que la superficie del cordón de soldadura está formada por un arco de círculo^[1]:

$$\bar{h}_1 \cdot b = A_1 \quad (2)$$

donde,

b – distancia entre los cordones de soldadura(mm)
 A_1 – área del cordón de soldadura (mm²)

Transformando la ecuación (2) se obtiene:

$$\bar{h}_1 = \frac{A_1}{b} \quad (3)$$

Sustituyendo por A_1 ^[1] en la ecuación (3) se obtiene:

$$A_1 = \frac{ah}{2} + \frac{1}{6} \frac{a^3h}{(a^2 + 4h^2)} \quad (4)$$

$$\bar{h}_1 = \frac{1}{b} \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{4ah}{a^2 + 4ah^2} \right) \cdot \left(\frac{a^2 + 4h^2}{8h} \right) - \left(\frac{a^3 - 4ah^2}{16h} \right) \right] \quad (5)$$

Sustituyendo de serie McLaurin (ecs. (6) y (7)) se obtiene, después de transformación:

$$\text{sen}^{-1}x = x + \frac{1}{6}x^3, \quad \text{para } x < 1 \quad (6)$$

$$\text{sen}^{-1} \left(\frac{4ah}{a^2 + 4h^2} \right) = \left(\frac{4ah}{a^2 + 4h^2} \right) + \frac{1}{6} \left(\frac{4ah}{a^2 + 4h^2} \right)^3 \quad (7)$$

$$\bar{h}_1 = \frac{ah}{2b} \left(1 + \frac{a^2}{3(a^2 + 4h^2)} \right) \quad (8)$$

Teniendo la altura media de la primera capa de cordones de soldadura, la segunda capa puede ser sobrepuesta sobre la primera, con modificación de la ZAC de la primera capa cuantificada. Para examinar el afino de grano producido por dos capas de cordones de soldadura, se puede usar el valor de profundidad de granos gruesos C de la ZAC de la primera capa, la penetración p del cordón de la segunda capa y la profundidad de afino D de la segunda capa (Fig. 3). Las condiciones para que se presente el afino de dos capas de cordones de soldadura, de acuerdo con la figura 2, son las siguientes:

$$F_{min} < Z_{min} \tag{9}$$

$$F_{max} > Z_{max} \tag{10}$$

Con base en las relaciones presentadas en la figura 3 se obtiene:

$$Z_{max} = S_{G1} - x_1 + \bar{h}_1 \tag{11}$$

donde,

\bar{h}_1 - altura media de la primera capa de los cordones de soldadura (Figs. 1 y 2)

S_{G1} , x_1 - parámetros de la zona afectada por la temperatura (Fig.3)

La posición del arco de soldeo x_1 , con relación a la superficie original, de acuerdo con las relaciones presentadas en la figura 3, se determinó de la siguiente ecuación:

$$(x_1 + p_1)^1 = x_1^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 \tag{12}$$

Después de la transformación se obtiene:

$$x_1 = \frac{\left(\frac{1}{2}a\right)^2 - p_1^2}{2p_1} \tag{13}$$

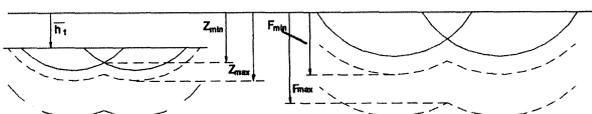


Figura 2. Condiciones para el afino de dos capas de cordones de soldadura.

Figure 2. Conditions for two-layer weld beads refinement.

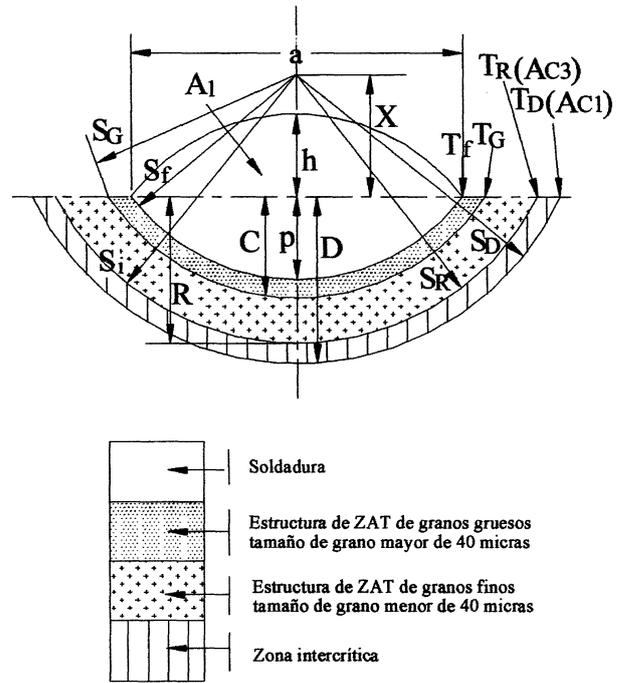


Figura 3. Esquema idealizado de un cordón de soldadura.

Figure 3. Simplified scheme of singular-bead weld.

El índice 1 se refiere a los parámetros de la primera capa de cordones de soldadura. En secuencia se determinan Z_{min} , F_{max} y F_{min} (Figs. 2 y 3) de las siguientes ecuaciones:

$$Z_{min} = \left[(x_1 + p_1)^2 - \left(\frac{1}{2}b_1\right)^2 \right]^{1/2} - x_1 + \bar{h}_1 \tag{14}$$

$$F_{max} = \left[s_D^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2 \right]^{1/2} + \bar{h}_1 - x_2 \tag{15}$$

$$F_{min} = s_{G2} - x_2 + \bar{h}_1 \tag{16}$$

El índice 2 se refiere a los parámetros de la segunda capa de cordones de soldadura. Tomando en cuenta las relaciones entre la geometría del cordón de soldadura y el calor aportado; relación proporcional^[1], se pueden hacer las siguientes sustituciones:

$$\frac{Z_{max}}{q_1} = K_1 \tag{17}$$

$$\frac{Z_{min}}{q_1} = K_2 \tag{18}$$

$$\frac{F_{max}}{q_2} = K_3 \quad (19)$$

$$\frac{F_{max}}{q_1} = K_3 Q \quad (20)$$

$$\frac{F_{min}}{q_2} = K_4 \quad (21)$$

$$\frac{F_{min}}{q_1} = K_4 Q \quad (22)$$

donde,

$$Q = \frac{q_2}{q_1} \quad (23)$$

- q -aportación del calor
- 1,2 -índice a los parámetros de la primera y segunda capa de cordones de soldadura
- K_i -constantes
- Q -relación de la aportación del calor de la segunda y primera capa de cordones de soldadura

El afino completo se puede obtener cuando el intervalo de F_{min} a F_{max} abarca el intervalo de Z_{min} a Z_{max} (Fig. 2). De acuerdo con la figura 2, la condición de afino de los granos de la ZAC se basa en el cumplimiento de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{2}(Z_{max} + Z_{min}) = \frac{1}{2}(F_{max} + F_{min}) \quad (24)$$

La relación óptima de la aportación del calor de la segunda y primera capa de cordones de soldadura Q_{opt} para el afino de los granos puede ser tomada como la línea central de la banda de afino con la banda de granos gruesos creada por la primera capa de los cordones. Esta condición esta dada por la ecuación (25):

$$Q_{opt} = \left| \frac{K_1 + K_2}{K_3 + K_4} \right| \quad (25)$$

Los valores mínimos y máximos de Q_{opt} para el afino se determina de las siguientes ecuaciones:

$$Z_{max} = F_{max} \text{ para } Q_{min} \quad (26)$$

$$Z_{min} = F_{min} \text{ para } Q_{max} \quad (27)$$

Sustituyendo por Z_{max} , Z_{min} , F_{max} y F_{min} de las ecuaciones (17) a (22) se obtiene:

$$Q_{min} = \left| \frac{K_1}{K_3} \right| \quad (28)$$

$$Q_{max} = \left| \frac{K_2}{K_4} \right| \quad (29)$$

2.2. Predicción del porcentaje de afino de los granos de dos capas de cordones de soldadura

De acuerdo con las relaciones presentadas en la figura 1, el solapado de cordones de soldadura w se determina de la siguiente ecuación:

$$w = 100 \left(\frac{a-b}{a} \right) [\text{mm}] \quad (30)$$

donde,

- a – ancho del cordón de soldadura
- b – distancia entre cordones de soldadura

Transformando la ecuación (30) se puede calcular la distancia b entre cordones de soldadura para diferentes valores de solapado w de la ecuación (31):

$$b = a \left(1 - \frac{w}{100} \right) [\text{mm}] \quad (31)$$

Para un solapado dado w , la distancia b entre cordones de soldadura es proporcional a la aportación del calor, q , debido a la misma proporcionalidad del ancho, a , del cordón^[1].

La distancia b corresponde a la posición de la fuente del calor (arco de soldeo) del segundo cordón.

Las relaciones para determinar el porcentaje de afino de los granos de la primera capa de los cordones de soldadura se presentan en la figura 4. Conforme con las relaciones presentadas en esta figura, el porcentaje de afino de los granos de dos capas de cordones de soldadura se puede determinar de la ecuación (32):

$$\% \text{ ref} = \left[\frac{3b - 3L_i}{3b} \right] \times 100 [\%] \quad (32)$$

El solapado, w , de cordones de soldadura se está usando como variable de entrada porque es

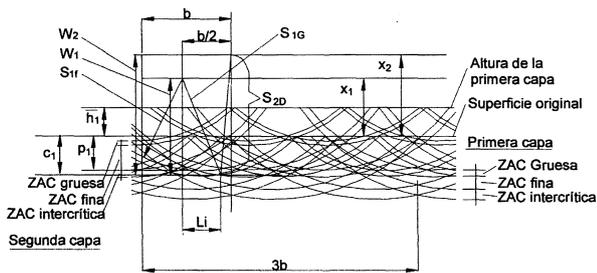


Figura 4. Parámetros y las relaciones para determinar el porcentaje de afino de los granos de la primera capa de cordones de soldadura.

Figure 4. Parameters and relationships to determine percentage of refinement of coarse grains first-layer weld beads.

conveniente para situaciones reales de soldeo. Para procesos de soldeo que producen la forma geométrica fija del cordón de soldadura, el solapado provee la distancia entre cordones de soldadura b . Todos los cálculos se consideran en términos de distancia, b , entre cordones de soldadura. El porcentaje de afino presentado en la ecuación (32) se determina como relación entre las dimensiones lineales de la zona de los granos finos y la zona total de medición.

Usando un programa informático se puede calcular la extensión de las regiones de distintos tamaños de grano en las zonas afectadas por la temperatura (ZAC) en las soldaduras de multipasadas. Los datos de entrada requeridos son los parámetros de soldeo, temperatura de precalentamiento y solapado de cordones de soldadura. Los productos de transformación en varias áreas se estiman de los diagramas de microestructuras producidas durante el proceso de soldeo para regiones transformadas de la ZAC [1]. Así, el tamaño absoluto de los granos y dimensiones de la ZAC se determina de las constantes propias de crecimiento de granos y temperaturas básicas A_{c3} , A_{c1} y temperaturas de transformación como se describió con detalle en el mencionado trabajo anterior [1].

La extensión lineal de los granos gruesos L_i (Fig. 4) y ecuación (32) se determina de las siguientes ecuaciones obtenidas con base en las relaciones presentadas en la figura 4.

$$S_{1G}^2 = W_1^2 + L_i^2 \quad (33)$$

$$S_{2D}^2 = \left(\frac{b}{2} - L_1\right)^2 + W_2^2 \quad (34)$$

$$W_2 = W_1 + x_2 - x_1 \quad (35)$$

$$s_{2f} - p_2 = x_2 \quad (36)$$

$$s_{1f} - p_1 = x_1 \quad (37)$$

Después de las transformaciones de las ecuaciones (33) a (37) se obtiene:

$$bL_i - 2K_{L_1} \sqrt{s_{1G}^2 - L_i^2} = K_{L_2} \quad (38)$$

donde,

$$K_{L_1} = s_{2f} - s_{1f} + p_1 - p_2 \quad (39)$$

$$K_{L_2} = s_{1G}^2 - s_{2p}^2 + \frac{b^2}{4} + K_{L_1} \quad (40)$$

Tomando de la serie McLaurin:

$$(1 - x^2)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{8}x^4 \text{ para } x < 1 \quad (41)$$

y eliminando $1/8 x^4$ debido a su pequeño valor, se obtiene después de la transformación:

$$K_{L_1}L_i^2 + K_{L_3}L_i - K_{L_4} = 0 \quad (42)$$

donde,

$$K_{L_3} = b\sqrt{s_{1G}} \quad (43)$$

$$K_{L_4} = 2K_{L_1}s_{1G} + \sqrt{s_{1G}}K_{L_2} \quad (44)$$

Resolviendo la ecuación cuadrática (42) se obtiene:

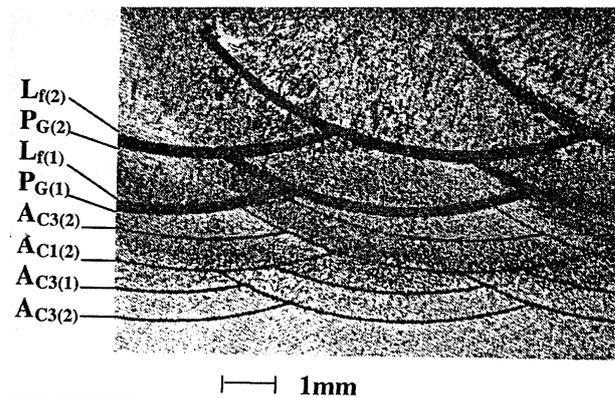
$$L_{i,2} = \frac{-K_{L_3} \pm \sqrt{K_{L_3}^2 - 4K_{L_1}K_{L_4}}}{2K_{L_1}} \quad (45)$$

Para diferentes parámetros de soldeo y solapamientos entre cordones, se puede predecir el porcentaje de afino de los granos en la ZAC de las soldaduras de multipasadas. Para verificar el modelo por ordenador utilizado para determinar el afino de los granos en la ZAC de las soldaduras de

multipasadas, se realizó un experimento aportando varias soldaduras de dos capas de cordones sobre una placa gruesa de 70 mm de espesor, fabricada de acero fundido de baja aleación de acuerdo con la especificación ASTM A 356 Gr 9 (1,25Cr-1Mo-0,25V). Se utilizó el proceso de soldeo SMAW y las variables del proceso incluyeron precalentamiento, intensidad de soldeo, diámetro del electrodo, velocidad de aportación y solapamiento entre los cordones de soldadura.

Varias combinaciones de parámetros de soldeo presentados en la tabla I fueron aplicadas para producir una serie de aportes de soldadura de dos capas y determinar el afino de la ZAC en términos del balance de aportación del calor entre dos capas de cordones de soldadura. En la mayoría de los aportes, el solapamiento entre los cordones fue mantenido constante al 50 %. Para algunos aportes se aplicó un solapamiento del 35 %. Los cordones de soldadura se aportaron aplicando una tensión invariable y un precalentamiento de 250 °C. El porcentaje de afino en la primera capa de la ZAC se midió de acuerdo con la definición presentada en la figura 4 como función de la relación de aportación del calor de la segunda y primera capa de los cordones de soldadura. El afino medido se incrementaba en, aproximadamente, el 50 % para una relación de aporte del calor cercano a 1, llegando al 100 % cuando la relación de aporte de calor subió a 2,2. Los solapamientos mayores del 50 % tienen influencia en la profundidad de los granos gruesos de la ZAC y profundidad máxima de la zona de afino. Para solapamientos mayores del 50 %, cada cordón adyacente está aportándose sobre la superficie elevada del cordón previamente aplicado y no sobre la superficie original de la placa. Como consecuencia, las profundidades de la zona de granos gruesos de la ZAC y zona de afino con referencia a la superficie original se reducirán. Para solapamientos menores del 50 % no se obtuvo el afino completo de la ZAC de granos gruesos. La predicción del afino utilizando el modelo por ordenador y el afino medido, se encuentra en concordancia para relación de aportación del calor mayor de 1,5.

En la figura 5 se presenta la comparación de la soldadura 3 (Tabla I) y predicción numérica de la posición de las isoterma de la ZAC. Se puede apreciar que el modelo puede predecir con razonable precisión la morfología de la ZAC en las soldaduras de multipasadas. En esta figura se resaltaron en oscuro las zonas de granos gruesos de la ZAC y se marcaron con líneas de círculos las zonas de afi-



- $L_{f(1)}, L_{f(2)}$ – Línea de fusión de la capa 1 y capa 2
- $P_{G(1)}, P_{G(2)}$ – Profundidad de la zona de granos gruesos de la capa 1 y capa 2
- $A_{C3(1)}, A_{C3(2)}$ – Límite de la zona de granos finos de la capa 1 y capa 2 (temperatura A_{C3})
- $A_{C1(1)}, A_{C1(2)}$ – Límite de la zona intercrítica de la capa 1 y capa 2 (temperatura A_{C1})

Figura 5. Comparación de la soldadura 3 (Tabla I) y predicción de afino del modelo por ordenador con afino de granos gruesos de 100 %.

Figure 5. Comparison of weld 3 (Table I) and computer model prediction, 100 % refinement of the coarse grains.

no, para poder analizar la posición de la banda de granos gruesos con relación a las zonas de afino (zonas de granos finos). Se puede observar claramente que las zonas de granos gruesos de la ZAC de la primera capa de cordones de soldadura se encuentran dentro de las zonas de afino de la segunda capa, resultando un afino del 100 %.

De la experiencia de aplicación de multipasadas de soldadura se sabe que la altura media, \bar{h}_1 , de la primera capa de cordones de soldadura utilizada en el modelo puede tener cierta variación (típicamente puede ser menor), que se puede producir una penetración variable en la zona de afino de la segunda capa y resultar una extra penetración y un extra afino de los granos. Por eso, si el modelo predice que la altura media de la primera capa es suficiente para obtener penetración de la ZAC de la segunda capa, cada variación en el perfil real del cordón de soldadura causará extra afino y resultará una predicción pesimista del modelo.

El modelo obtiene razonable precisión para la predicción de la distribución de las dimensiones de las zonas de distintos tamaños de grano de la ZAC, en los aportes de multipasadas de dos capas sobre el acero al 1,25Cr-1Mo-0,15V, bajo determinados parámetros de soldeo. La precisión de la

Tabla I. Parámetros de soldadura y el afino de los granos*Table I. Welding parameters and HAZ grain refinement*

Nº de soldadura	Nº de capa	d_a	I	V	q	Relación de aportación del calor	Solapamiento entre cordones	Afino medido	Afino calculado
		mm	A	mm/s	J/mm	Q	w %	%	%
1	1	2,4	70	2,52	417	1,1	50	60	40
	2	2,4	80	2,61	460				
2	1	2,4	70	4,35	241	1,9	50	90	100
	2	2,4	80	2,62	458				
3	1	2,4	90	6,74	200	2,8	50	100	100
	2	3,2	100	2,68	560				
4	1	2,4	90	8,33	162	1,5	50	60	70
	2	3,2	100	6,17	243				
5	1	2,4	90	10,26	132	3,5	50	100	100
	2	3,2	120	3,9	462				
6	1	3,2	90	2,68	504	2,0	35	90	80
	2	3,2	120	1,79	1.008				
7	1	3,2	100	4,57	328	0,9	50	30	50
	2	3,2	120	6,10	295				
8	1	3,2	100	7,25	207	1,8	35	90	80
	2	4,0	120	4,84	372				
9	1	3,2	130	8,54	228	3,2	50	100	100
	2	3,2	130	8,54	228				
10	1	3,2	130	9,86	198	1,3	50	70	50
	2	4,0	140	8,17	257				
11	1	4,0	120	1,89	952	2,0	50	100	90
	2	4,0	140	1,10	1.904				
12	1	4,0	120	3,64	495	1,2	50	60	40
	2	4,0	140	3,53	594				
13	1	4,0	140	5,21	403	3,1	50	100	100
	2	4,8	160	1,92	1.249				
14	1	4,0	180	7,78	347	1,6	35	70	80
	2	4,8	200	5,40	555				
15	1	4,0	180	9,36	288	2,4	35	95	80
	2	4,8	200	4,34	691				
16	1	4,8	180	2,24	1.205	1,3	50	40	60
	2	4,8	200	1,92	1.566				
17	1	4,8	180	3,47	778	2,1	50	100	100
	2	4,8	200	1,84	1.633				
18	1	4,8	200	5,93	506	3,2	50	100	100
	2	4,8	220	2,04	1.619				
19	1	4,8	220	8,13	406	1,8	35	95	85
	2	4,8	240	4,92	731				
20	1	4,8	220	9,62	343	0,9	50	50	30
	2	4,8	240	11,65	309				

predicción depende directamente de las dimensiones del cordón de soldadura determinados experimentalmente.

3. CONCLUSIONES

La microestructura de soldaduras de multipasadas en las secciones gruesas y su distribución espacial en la ZAC puede predecirse con base en el conocimiento de las dimensiones del cordón de soldadura, variables del proceso de soldeo y metalurgia básica.

El control de la relación entre aportación del calor de la segunda y primera capa de cordones de soldadura es esencial para obtener el éxito del afino de los granos gruesos de la ZAC. Prácticamente, esto puede ser logrado por la modificación del tamaño de los electrodos y selección de la intensidad y velocidad de aportación.

Se obtuvo una concordancia razonable entre la predicción del modelo por ordenador y la distribución estructural de la ZAC de soldadura medida en la placa de sección gruesa, para determinados parámetros de soldeo.

La aplicación del modelo para otros materiales requiere realizar su validación mediante los experimentos.

REFERENCIAS

- [1] Z. MAZUR, O SALAZAR, G. GONZALEZ y G. URQUIZA, *Rev. Metal. Madrid* 37, 5 (2001).
- [2] P.J. ALBERRY y W.K.C. JONES, *Met. Technol.* 4, 12 (1977) 557-566.
- [3] P.J. ALBERRY, B. CHEW y W.K.C. JONES, *Met. Technol.* 4, 6 (1977) 317-325.
- [4] J.N. CLARK y J.A. LAMBERT, *Weld. J.* 65, 2 (1986) 42-47.
- [5] B. CHEW y P. HARRIS, *Met. Constr.* 115, 5 (1979) 229-234.