

“OPTIMALS PARAMETERS DETERMINATION OF THE ORBITAL WELD TECHNIQUE USING MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINT”.

AUTHORS: A. Miranda*, J.F. Echevarría, S. Rondón, P. Leiva, F. A. Sendoya, J. Amalfi, M. López, H. Domínguez

- Universidad “Hnos. Saíz Monte de Oca”, Pinar del Río, CUBA.

ADDRESS: Centro de Estudios Aplicados al Desarrollo Nuclear, Calle 30, No. 502, C. Habana, CUBA

e-mail: jfem@ceaden.edu.cu

ABSTRACT.

The paper deals with the study of the main parameters of thermal cycle in Orbital Automatic Weld, as a particular process of the GTAW Weld technique. Also is concerned with the investigation of microstructural and mechanical properties of welded joints made with Orbital Technique in **SA 210** Steel, a particular alloy widely use during the construction of Economizers of Power Plants.

A number of PC software were used in this sense in order to anticipate the main mechanical and structural characteristics of Weld metal and the Heat Affected Zone (HAZ).

The papers also might be of great value during selection of optimal Weld parameters to produce sound and high quality Welds during the construction / assembling of structural components in high requirements industrial sectors and also to make a reliable prediction of weld properties.

INTRODUCCION.

La soldadura por fusión es un proceso en el que una fuente de calor móvil y muy intensa se aplica a las piezas a soldar, para obtener la unión de las mismas mediante su calentamiento local hasta el estado plástico o de fusión. A consecuencia de ello, la región adyacente al cordón de soldadura sufre importantes cambios microestructurales, que serán los responsables de las futuras propiedades mecánicas del material en dicha zona^{1, 2, 3, 4}.

Una tendencia actual en investigaciones sobre soldadura es el pronóstico computarizado de las propiedades mecánicas y estructurales de la unión soldada. Aquí se calcula el campo de temperaturas transitorio: $T(x, y, z, t)$, en un punto de interés: (x, y, z) , en cualquier instante de tiempo, a partir de parámetros físicos - químicos del material y de las características del proceso de transferencia del calor. Estos trabajos contribuyen tanto a la comprensión y comprobación de los modelos teóricos como a la optimización de tecnologías de soldaduras por vías económicas.

En este trabajo se describe un modelo que se aplica a la determinación de los parámetros principales del ciclo térmico asociado a la soldadura GTAW automática, realizada por el método orbital, en tuberías de acero SA 210. Dicho modelo no solo permite predecir características de la unión, sino que conlleva a la optimización de los regímenes de soldadura realizadas por este método^{1, 2, 3, 4}.

Fundamentación teórica del modelo de calculo.

Los trabajos clásicos de Rosenthal¹ son empleados de manera prácticamente universal para describir la tendencia general de los campos de temperatura como función de las coordenadas espaciales y el tiempo, en soldadura de diferentes tipos^{1, 2, 3}. El algoritmo de Rosenthal plantea soluciones analíticas para la *Ecuación Diferencial de Transmisión del Calor*, considerando a la conductividad térmica y al calor específico como independientes de la temperatura. La coincidencia aceptable que ha sido obtenida por diferentes autores^{1, 2, 3} entre las predicciones según este modelo y los datos experimentales, ha conducido a la adopción de su formalismo como una primera aproximación válida.

Bajo este modelo, y haciendo las consideraciones adicionales:

- a) Movimiento uniforme de la fuente de calor (electrodo) (aproximación cuasiestacionaria),
- b) Distribución uniforme de la temperatura en el espesor,
- c) Propagación del calor en la geometría de plancha delgada semi - infinita, o en el caso equivalente de un cilindro de paredes finas y pequeño diámetro (cuerpo de revolución).
- d) La velocidad de recorrido de la fuente es mucho mayor que la correspondiente al flujo de calor (aproximación instantánea),

Puede llegarse a obtener la expresión que permite calcular la temperatura en diferentes puntos, geoméricamente ubicados fuera del cordón, para el caso que nos ocupa de la soldadura en tubos de pequeño diámetro:

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{q}{v \delta \sqrt{4\pi \lambda \rho c t_i}} e^{-y^2/(4at_i)} + T_o \quad (1)$$

Sobre esta base, llegan a obtenerse también las expresiones que permiten calcular otros parámetros de interés, como son: la temperatura pico o máxima alcanzada en cada punto, los anchos de las zonas donde se alcanzan temperaturas superiores la temperatura pico y de la Zona Afectada por el Calor (ZAC), el tiempo de enfriamiento entre las temperaturas de 800 a 500 °C y la velocidad media de enfriamiento desde una temperatura de interés:

$$T_p = T_o + \left[\frac{2}{\pi e} \right]^{1/2} \frac{q/v}{2\delta \rho c y} \quad (2)$$

$$2l = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{c \rho v \delta (T_p - T_o)} \quad (3)$$

$$2l_{ZAC} = \frac{q \sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{c \rho v \delta (722 - T_o)} \quad (4)$$

$$\Delta t(800 \rightarrow 500) = \frac{(q/v\delta)^2}{4\pi \lambda \rho c} \left\{ \frac{1}{(500 - T_o)^2} - \frac{1}{(800 - T_o)^2} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

$$w_m = -2\pi \lambda \ c \ \rho \ \frac{(T - T_o)^3}{\left(\frac{q}{v\delta} \right)^2} \quad (6)$$

Con estos resultados y bajo la *aproximación parabólica* de Easterling^{1, 5} se obtiene también la expresión que predice el tamaño medio final de los granos, después de un ciclo con temperatura máxima T_p :

$$g^2 - g_0^2 = k_1 \int_0^\infty \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) dt = k_1 \alpha \tau \exp\left(-\frac{Q}{RT_p}\right) \quad (7)$$

Donde las constantes α y τ caracterizan a un ciclo térmico de temperatura pico T_p dada. Haciendo uso además de algunas relaciones semi- empíricas pueden obtenerse las fracciones en volumen de los diferentes constituyentes estructurales desarrollados en la ZAC (martensita, bainita y ferrita – perlita) y a partir de ahí la distribución de durezas en la ZAC.

MATERIALES Y METODOS.

Para la calificación del procedimiento de soldadura orbital se realizaron un grupo de 10 probetas de uniones soldadas de tuberías de acero al carbono SA 210, de 32 mm de diámetro exterior nominal y 4.5 mm de espesor. Las mismas fueron sometidas a los siguientes ensayos de laboratorio: *inspección visual, ensayo de tracción de tracción, ensayos de dureza, metalografía* los cuales son requeridos, como parte de la *Calificación de los Procedimientos de Soldadura (PQR)*⁶.

Además de ello, empleando las expresiones antes introducidas, se procedió a la modelación en computadora de algunos de los principales parámetros característicos del ciclo térmico de la soldadura orbital, así como la comparación de los resultados teóricos, con las observaciones experimentales.

Muestras de soldadura orbital.

Para la realización de las muestras, se usó una máquina de soldadura orbital programable de procedencia Sueca, marca ESAB, modelo MECHTIG 315; utilizando un cabezal de soldadura modelo A21 PRB 18-40, refrigerado por agua. Algunas de las características técnicas de este conjunto son:

Velocidad de giro del cabezal: 0.15 – 2.30 rpm

Corriente máxima de soldeo a 80 %: 250 Amp.

Diámetro del electrodo: 1.6 mm.

El procedimiento de soldadura (Welding Procedure Specification, WPS) seguido contempla la realización de una sola pasada, sin material de aportación, a pesar de que el espesor de pared de los tubos utilizados para realizar las muestras es relativamente elevado. Además se empleó electrodo de Tungsteno con Torio y Argón (al 99.99 % de pureza), como gas de protección del baño y para la purga interior de los tubos⁷.

El proceso a seguir para el establecimiento del programa de soldadura (optimización de los parámetros característicos del ciclo de soldadura, ejemplo, intensidad de corriente por cuadrante y velocidad de rotación del electrodo) es mayormente práctico, e incluye el “punteo” previo de las piezas a soldar y esta operación consume bastante tiempo y materiales.

Antes de comenzar la soldadura, los tubos deben ser limpiados y posteriormente punteados colocando los puntos aproximadamente a 120°, después de lo cual se procede a realizar una limpieza mecánica de los puntos de soldadura con papel de esmeril y alcohol a una distancia de 25 mm a ambos lados de los puntos como mínimo. Para la soldadura de este tipo de acero al carbono se emplearon los electrodos de tungsteno con torio, ya que éstos admiten mayor intensidad de corriente y esto permite aumentar la productividad⁷.

Equipos y ensayos usados.

Ensayos in –situ.

En todos los casos las uniones fueron sometidas al ensayo de *Inspección Visual y Medición de Dimensiones*, con el fin de detectar la presencia de defectos. El ensayo se realizó bajo una metodología establecida para otra industria y siguiendo estándares de aceptación/rechazo establecidos.

Ensayos mecánicos.

Estos métodos de ensayos están dirigidos fundamentalmente a prever los defectos que puedan incidir en el deterioro de la unión soldada, tomando en cuenta las propiedades mecánicas que se exigen para la explotación.

- **Ensayo de Tracción⁸:** Para realizar este ensayo se utilizó una máquina de fabricación soviética P - 50 de 50 toneladas y se sometieron a este ensayo: 6 muestras por soldadura orbital. Los resultados obtenidos fueron comparados con los obtenidos de 4 muestras pertenecientes a los tubos en estado de suministro, sin soldadura.
- **Medición de Dureza Brinell⁹:** Se utilizó un durómetro modelo TB 3109, con carga de 185 Kgf, para este fin se utilizaron 4 muestras de soldadura orbital y 1 perteneciente a las tuberías en estado de suministro. El ensayo se realizó según el procedimiento establecido en el laboratorio de materiales del CEADEN.

Ensayos metalográficos

Para la caracterización estructural de la unión soldada en diferentes puntos ubicados en la zona afectada por el calor (ZAC), se realizaron observaciones en el microscopio óptico NEOPHOT 32 con un sistema de cámara de vídeo incorporado. Estas muestras fueron tomadas del primer, tercer y cuarto cuadrantes, en dos muestras de soldadura orbital. Esto se realizó con los siguientes objetivos:

- Identificar las estructuras presentes en la ZAC,
- Determinar el tamaño de grano, según la norma ASTM E 112 - 88,
- Determinar el ancho de las diferentes subzonas,
- Determinar la composición de constituyentes estructurales, y
- Determinar la dureza de las diferentes subzonas de la ZAC.

Procedimiento de calculo empleado.

En la práctica, el proceso de soldadura **no es instantáneo**, por lo que se hace necesario resolver la ecuación diferencial de conducción del calor con las condiciones más próximas a la técnica de soldadura que se emplea, utilizando el principio de superposición y la aproximación instantánea. El algoritmo generalmente empleado durante este tipo de modelación contempla:

- a) La determinación del *Campo de Temperatura* en la unión soldada, y de los parámetros térmicos derivados del mismo: *Temperatura Pico (T_p)* y *el intervalo de tiempo correspondiente al enfriamiento entre las temperaturas de transformaciones de fases*,
- b) El cálculo del *tamaño de la Zona Afectada por el Calor (ZAC)*,
- c) La determinación de la *Velocidad de Enfriamiento* y de la *Composición de Fases* del cordón, la ZAC y el metal base.

Las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 se implementaron utilizando un programa realizado en QBasic. Los cálculos se aplicaron al primer sector, dado que este es el más crítico, debido a que los valores de corrientes que se emplean en este sector son los más elevados y aquí se produce un

calentamiento reiterado, motivado porque el procedimiento de soldadura contempla dos veces el paso de la fuente de calor por un mismo sector de este cuadrante².

RESULTADOS Y DISCUSION.

Calibrado del modelo teórico.

Para validar el modelo se tomaron las muestras utilizadas en la calificación del procedimiento de soldadura, las mismas fueron caracterizadas experimentalmente. En estos cálculos se tomaron las temperaturas críticas (temperatura de fusión T_f , temperatura A_{c3} y A_{c1}) para el acero SA 210 según^{10, 11} (ver tabla No.2), hallándose los semi - anchos teóricos de las diferentes zonas, los tamaños de granos, las fracciones de las constituyentes microestructurales (Martensita, Bainita y Ferrita – perlita) y sus correspondientes microdurezas en las subzonas de la ZAC.

Los resultados obtenidos se compararon con los valores experimentales correspondientes. Los resultados se presentan en las Tablas No. 3 y 4.

Tabla No.2. Composición química del acero SA 210¹².

C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %
0.18	0.75	0.25	0.003	0.012

Tabla No.3. Resultados teóricos y experimentales para la validación del modelo.

Denominación de la zona.	Ancho de la ZAC experimentalmente medido, mm	Ancho de la ZAC, calculado teóricamente, mm	Tamaño de grano medido, μm	Tamaño de grano teórico, μm
Metal fundido ($T > 1490^\circ\text{C}$)	4.2 ± 0.05	4.3	-	-
Zona sobrecalentada T ($1250 - 1490^\circ\text{C}$)	1.93 ± 0.50	175	125 ± 35	95
Zona recocida T ($900 - 1250^\circ\text{C}$)	1.47 ± 0.30	1.60	32 ± 10	22
Zona entre A_{c3} y A_{c1} T ($900 - 727^\circ\text{C}$)	2.57 ± 0.20	2.40	22	22
Metal base T ($< 727^\circ\text{C}$)	-	-	22	22

* Se reporta el promedio aritmético y la desviación típica σ_{n-1} para un número de 3 mediciones, realizadas en distintas localizaciones de la ZAC.

Como se puede apreciar en la tabla No.3 los valores teóricos y experimentales de los semianchos de las subzonas de la ZAC tienen una coincidencia aceptable. Además para los valores de tamaño de grano se observa alguna dispersión experimental, debido a que el procedimiento de medición empleado para la determinación del mismo no fue el más exacto (se utilizó el método de comparación). No obstante la mayoría de los valores teóricos obtenidos caen dentro de la distribución de valores experimentales. Esto corrobora la bondad del modelo utilizado.

Una vez corroborado el modelo con las mediciones experimentales, se realizaron otras pruebas utilizando otros parámetros de soldadura, con el objetivo de establecer alguna correlación que

ayudara a minimizar el número de muestras y el gasto de material que implica poner a punto un programa en una máquina de soldadura orbital. Para ello se tomó como criterio para evaluar la penetración del cordón de soldadura aquel que comúnmente se utiliza en la industria médico – farmacéutica y biotecnológica, que consiste en que el ancho del metal fundido debe ser como máximo igual a dos veces el espesor de pared del tubo (es decir 4 mm), de lo que debe resultar la penetración uniforme en todo el perímetro^{13, 14, 15, 16}. Los resultados se muestran en la tabla No. 4.

Tabla No.4. Resultados de simulación de procesos de soldadura para el establecimiento de un criterio de optimización.

Identificación de la muestra	Principales parámetros del programa		Defectos observados	Resultados de la modelación	
	I ₁ , A	V, mm/s		2l _{cordón} , mm	T _p a 4 mm del centro del cordón, °C
MC 4	190	1.73	Falta de penetración	5.9	1137
MC 6	200	1.73	Falta de penetración	6.2	1196
MC 9	210	1.73	Falta de penetración	6.5	1254
MC 23	210	1.348	Ninguno, Penetración total	8.4	1601
MC 11	215	1.348	Ninguno, Penetración total	8.5	1638

En la tabla No.4 se puede apreciar que en las muestras que presentaron los defectos de falta de penetración, el ancho del cordón fue inferior al especificado, y la temperatura máxima a 4 mm del centro del cordón fue inferior a 1530 °C, la temperatura de fusión, para este acero^{10, 11}. Esto significa que es posible utilizar los resultados de nuestro modelo para reducir el número de muestras a realizar en los ajustes de los programas de las máquinas de este tipo (optimización).

Ensayos in situ:

Las muestras realizadas por soldadura orbital con los programas optimizados y calificados, se sometieron al ensayo de inspección visual y medición, según la metodología establecida¹⁴. Se comprobó en todos los casos la ausencia de defectos y la presencia de un buen aspecto exterior e interior; a pesar de que hasta el momento no se tienen noticias de un anterior empleo exitoso de este tipo de soldadura en el país, para la soldadura ***sin aporte de material***, en aceros de esta nomenclatura y espesor de 4.5 mm.

Ensayos mecánicos:

Pruebas de tracción.

Un grupo de seis probetas con soldaduras realizadas por el método orbital, fue sometido al ensayo de tracción. Los resultados de los ensayos se recogen en la tabla No.5.

Como se puede apreciar la rotura en todos los casos ocurrió en el metal base y a valores de tensiones iguales o superiores a los del metal base. Por ello los resultados se consideran aprobados, según lo estipulado en la sección IX del código ASME, artículos QW.152 y 153.

Tabla No. 5. Resultados de las pruebas de tracción en las muestras de Soldadura Orbital.

Identificación de la Muestra.	Resistencia a la Tracción, MPa.	Zona de Rotura
1	483	Metal base
2	470	Metal base
5	461	Metal base
6	470	Metal base
7	457	Metal base
8	466	Metal base
Valor Medio para las muestras con soldadura orbital	468	
Valor medio para el metal base	472	

Ensayos de dureza.

En cuanto a los ensayos de dureza Brinell realizados, se puede decir que los valores obtenidos para distancias mayores que 8 mm del centro del cordón coinciden con los valores de dureza del metal base, que fue de 143 HB. Esto se debe a que las coordenadas de los puntos seleccionados se encuentran fuera de las zonas de transformaciones estructurales. Además en dicha se puede apreciar que los valores de dureza no difieren significativamente de los obtenidos para las muestras de soldadura por electrocontacto.

Ensayos metalográficos.

La distribución de las zonas observadas en la ZAC difiere en comparación con los métodos tradicionales de soldadura, para el primer cuadrante, ya que se observa una zona de grano grueso en la línea de fusión (Ferrita en forma de agujas, Martensita, y estructuras intermedias), seguida por una zona de granos de tamaño moderado (Ferrita y estructuras intermedias con huellas de sobrecalentamiento, con tamaños de granos menores que los del metal base), una zona de grano fino (zona normalizada de Ferrita y Perlita) y finalmente el metal base. En la figura No.1 se

muestra el aspecto regular y uniforme de soldadura orbital sin material de aportación en el interior del tubo de acero SA 210.

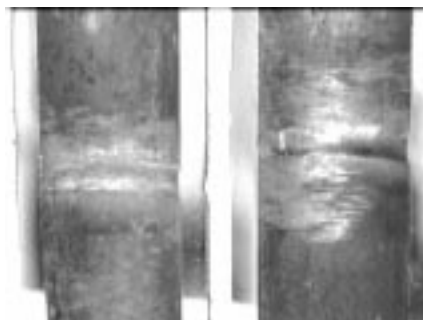


Figura No. 1. Macrografía interior de la Soldadura Orbital

CONCLUSIONES.

1. *Por vez primera en el país, se estableció un procedimiento para Soldadura Orbital en tubos de acero SA 210, de diámetro 32 mm y 4.5 mm de espesor, sin material de aporte.*
2. *La calidad de las soldaduras por el método Orbital, sin material de aporte, satisface los requisitos de resistencia establecidos para los ensayos de tracción según normas ramales y los principales códigos y especificaciones.*
3. *Los resultados del modelo teórico para el proceso de Soldadura Orbital dan buena coincidencia para las temperaturas pico y en función del tiempo, ancho del cordón de soldadura y de la ZAC, el tiempo de enfriamiento de una temperatura a otra en la ZAC, la microdureza y el tamaño de grano.*
4. *El modelo teórico empleado no es exacto en la zona del metal fundido, en la cual se requiere emplear métodos de elementos finitos para lograr una exactitud adecuada.*

REFERENCIAS.

- [1]. Easterling, K., Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, London, 1983.
- [2] V. N. Volochenko, V. M. Ympolskiy et. Al., Teoria Svarochnij Processov, Moskva , Vischaya shkola, 1988.
- [3] Rosenthal, D., Trans. Am. Soc. Metals 68, 849, 1946.
- [4] Glizmanenko, D.L., Soldadura y Corte de los Metales, Inst. Cubano del libro, La Habana. 1968.
- [5] L.C. Livschits, A. N. Jakimov., Metallovedenie svarki i termicheskaya obrabotka svarnij soedininienii, Maschinostroenie, 2 Izдание, 1989, 336 ctr.

- [6] ASME Code, Section IX, 1995.
- [7] H. R., Germán., Manual del Soldador, Editorial CESOL, Madrid, 1994.
- [8] ASTM E8-93a. Tension Test of Metallic Materials.
- [9] ASTM E10 - 93 Brinell Hardness Test in Metallic Materials.
- [10] Zacarias, I
- [11] Zacarias II,
- [12] Informe de AQ, de la EMCE, o Norma ASTM
- [13] K. Henon, Barbara, Practical applications of Orbital Tube and Pipe Welding, Reprinted from Practical Welding Today, Vol. 2, No. 2, 1998.
- [14] ASME BPE, Part MJ, Material Joining, MJ6 Weld Acceptance Criteria, 1997.
- [15] K. Henon, Barbara, Pfizer Animals Health Group Upgrades and Expands Facility with Orbital Welding and State – Of – The – Art Equipment, Pharmaceutical Engineering, March/April, 1996.
- [16] K. Henon, Barbara, Orbital TIG provides right connections for vaccine plant, Welding & Metal Fabrication, April, 1998.