

NUMERICAL MODELING OF COOLING CURVES IN FOR 7010-T76 ALUMINUM ALLOY WELDING

Meseguer-Valdenebro, J. L.¹; Martínez-Conesa, Eusebio²; Portolés, Antonio³

¹ Centro Universitario de la Defensa. San Javier, ² Universidad Politécnica de Cartagena, ³ Universidad Politécnica de Madrid

This research paper shows a numerical study on cooling curve modeling for GMAW welding process and its interaction with the curve of temperature-time-properties (TTP).

The curve TTP allows approximation to the properties obtained in a 7010-T76 aluminum welded joint with the cooling curve intersection.

The post welding properties that appear on an aluminum alloy will depend both on welding assembly cooling time between 410 and 300 °C and cooling time slop. According to the resulting surface from the intersection between the cooling curve and the TTP curve the appearance of precipitates in the welding assembly will increase or decrease.

Keywords: Aluminum 7010-T76; Weld; Cooling time; Numerical method; Finite element finite.

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LAS CURVAS DE ENFRIAMIENTO EN LA SOLDADURA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7010-T76

Este trabajo presenta un estudio numérico que modela la curva de enfriamiento de un proceso de soldadura GMAW y su interacción con la curva temperatura-tiempo-propiedades (TTP). La curva TTP, permite la aproximación a las propiedades obtenidas en una unión soldada de aluminio 7010-T76 con la intersección de la curva de enfriamiento. Las propiedades de post-soldeo que aparecen en una aleación de aluminio van a depender del tiempo que tarde en enfriar la unión soldada entre 410 y 300 °C y de la pendiente de la curva de enfriamiento. En función de la superficie que se obtiene de la intersección de la curva de enfriamiento y de la curva TTP aumentará o disminuirá la aparición de precipitados en la unión.

Palabras clave: Aluminio 7010-T76; Soldadura; Tiempo de enfriamiento; Método numérico; Elementos finitos.

Correspondencia: Centro Universitario de la Defensa. Base Aérea de San Javier. C/ Coronel López Peña s/n, C.P. 30720. Santiago de la Ribera, Murcia (España)

1. Introducción

Existen dos tipos de series de aluminio serie 7xxx, el primer tipo tienen una resistencia media con una composición estándar formada por Al-Zn-Mg y el segundo tipo presenta una resistencia más elevada que la anterior formada Al-Zn-Mg-Cu con una elevada resistencia a la tracción. La aleación de este artículo es la aleación 7010-T76 y se corresponde con el segundo tipo de las aleaciones de la serie 7xxx, la cual presenta una elevada resistencia a la tracción. Este tipo de aleaciones presenta una buena soldabilidad debido a la presencia de cobre en su matriz lo que eleva la resistencia frente al agrietamiento en caliente (Madhusudhan R., Mukhopadhyay, & Sambasiva R., 2005). La presencia de cobre con el aluminio, forma precipitados de CuAl_2 que aumentan la dureza formando los precipitados de Guinier-Preston (GU) (Singh & Warner, 2010). La cantidad y el tipo de precipitados que son los que van a caracterizar sus propiedades mecánicas.

La calidad del metal de soldadura en las uniones soldadas de las aleaciones de aluminio está condicionada por su composición química y la velocidad de solidificación de la soldadura. Cuanto mayor es la velocidad de solidificación más fina es la estructura que se obtiene en la unión lo que se caracteriza por una mayor resistencia mecánica y una menor tendencia al agrietamiento en caliente (Su, Hua, & Wu, 2014). La velocidad de solidificación en la unión caracteriza el ciclo térmico de soldeo de la unión, lo que determina su calidad estructural (Grong, 1997), siendo crítico el tiempo de enfriamiento entre 410 y 300 °C ($t_{4/3}$), lo que condiciona el ratio de precipitados GU no beneficiosos para las propiedades del cordón en su enfriamiento (Li et al. 2013; Milkereit et al. 2012). La interacción entre la curva de enfriamiento y la curva TTP determinará tanto el volumen como la clase de precipitados que aparecen en la unión (Li, Zhang, & Ding, 2006).

1.1. Curvas TTP

Las curvas TTP definen las propiedades de la aleación en función de sus propiedades químico-físicas y quedan reflejadas en la ecuación (1).

$$C_t = -k_1 \cdot k_2 \cdot \exp\left[\frac{k_3 \cdot k_4^2}{R \cdot T \cdot (k_4 - T)^2}\right] \cdot \exp\left(\frac{k_5}{R \cdot T}\right) \quad (1)$$

k_1 , logaritmo natural de la fracción no transformada durante el enfriamiento

k_2 , constante proporcional a la nucleación, (s^{-1})

k_3 , energía necesaria para la nucleación, $1/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$

k_4 , constante de la temperatura solvus, (K^{-1})

k_5 , constante de la energía de activación por difusión, $1/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$

R, constante de los gases, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T, temperatura, K

Los parámetros para la aleación de aluminio 7010-T76 han sido definidos por otros investigadores (Flynn & Robinson, 2004) y se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de la curva TTP para la aleación 6063-T5

k_1	k_2 (s)	k_3 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)	k_4 (K)	k_5 ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$)
$\text{Ln}(0.98)$	$5.6 \cdot 10^{-20}$	$5.78 \cdot 10^3$	$8.97 \cdot 10^2$	$1.90 \cdot 10^5$

El coeficiente k_1 , además de ser considerado como el logaritmo natural de la fracción no transformada durante el enfriamiento también mantiene una relación con la tensión máxima mediante la relación $\sigma_x = k_1 \cdot \sigma_{\text{max}}$, siendo σ_x la tensión nominal de la aleación obtenida

para una fracción no transformada durante el enfriamiento. σ_x mantiene una relación de proporcionalidad respecto a la tensión máxima (Kavalco & Canale, 2009).

2. Análisis térmico de las uniones soldadas

El análisis térmico mediante un modelo de elementos finitos en la soldadura, se fundamenta en la ecuación de transferencia del calor en un cuerpo, ecuación (2) (Zhu & Chao, 2002)

$$\rho(T) \cdot c_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = q + \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (2)$$

Donde, $\rho(T)$ representa la densidad del material como propiedad termodependiente, $c(T)$ el calor específico, $q(T)$ el calor generado por unidad de volumen, $K_x(T)$, $K_y(T)$, $K_z(T)$ son los coeficientes de conductividad térmica en las tres direcciones (en materiales isotrópicos este valor es el mismo en cualquier dirección), T es la temperatura y t es el tiempo. El problema térmico se rige por una ecuación diferencial no lineal, debido a que las propiedades físicas del material son dependientes de la temperatura (Powell, R.W., Ho, C.Y., & Liley, P.E., 1966).

Las pérdidas de calor por radiación y convección se tienen en cuenta mediante las siguientes relaciones (Zhu & Chao, 2002).

$$q_c = h \cdot (T - T_\infty) \quad (3)$$

$$q_r = \varepsilon \cdot s \cdot (T^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

Donde, h representa el coeficiente de convección, T_∞ la temperatura ambiente, ε la emisividad de la superficie del cuerpo y s la constante de Stefan-Boltzmann.

Tabla 2. Coeficientes de convección del aluminio (Incropera et al. 2007)

Coeficiente de convección, h [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]	3	6	7	8	9
Temperatura [$^\circ C$]	25	150	450	750	1650

Tabla 3. Coeficientes de emisividad del aluminio (Incropera et al. 2007)

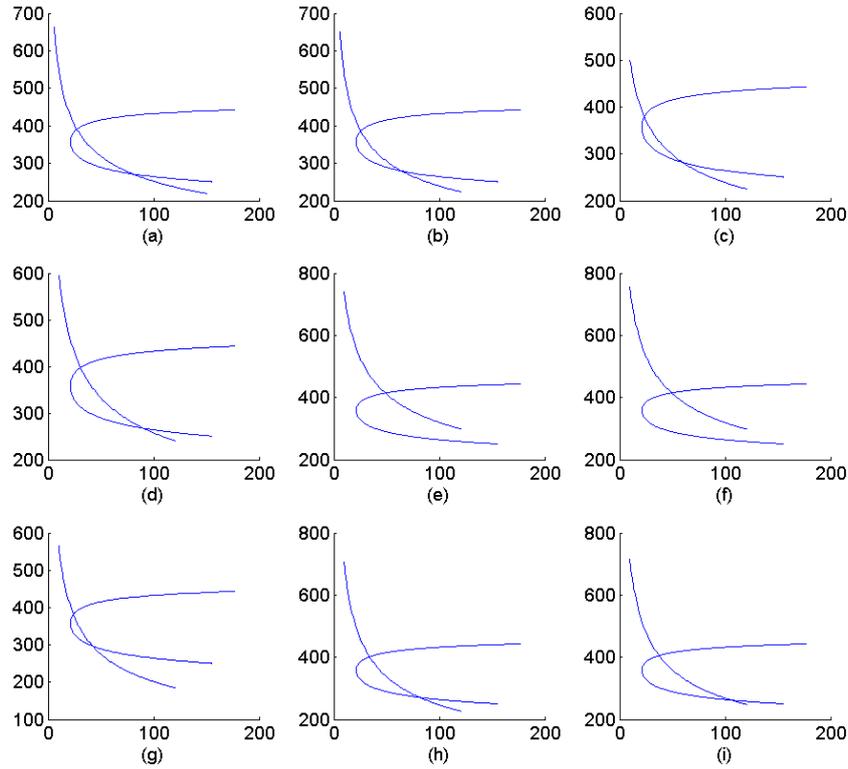
Coeficiente de emisividad del aluminio [ε]	0.8	0.5	0.14
Temperatura [$^\circ C$]	25	300	700

3. Modelización del ciclo térmico

El estudio experimental computacional se ha desarrollado utilizando perfiles de aluminio planos 7010-T76 de dimensiones $40 \times 100 \times 2 \text{ mm}^3$. Las variables de salida del proceso son dos, la primera es el tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$, tiempo que se considera crítico en la aparición de precipitados de Guinier-Preston que influyen sobre las propiedades mecánicas de la unión y la segunda variable es el área de la curva TTP que corta a la curva de enfriamiento, conforme el área sea más pequeña mejores serán las propiedades de la unión, elevando las durezas en la unión y disminuyendo las durezas de la unión cuanto mayor sea el área intersecada entre la curva de enfriamiento y la curva TTP.

En la figura 1, se muestra la intersección entre la curva TTP y las curvas de enfriamiento, donde en el eje de abscisas se representa el tiempo (s) y en el de ordenadas la temperatura ($^\circ C$).

Figura 1. Intersección entre las curvas de enfriamiento y las curvas TTP

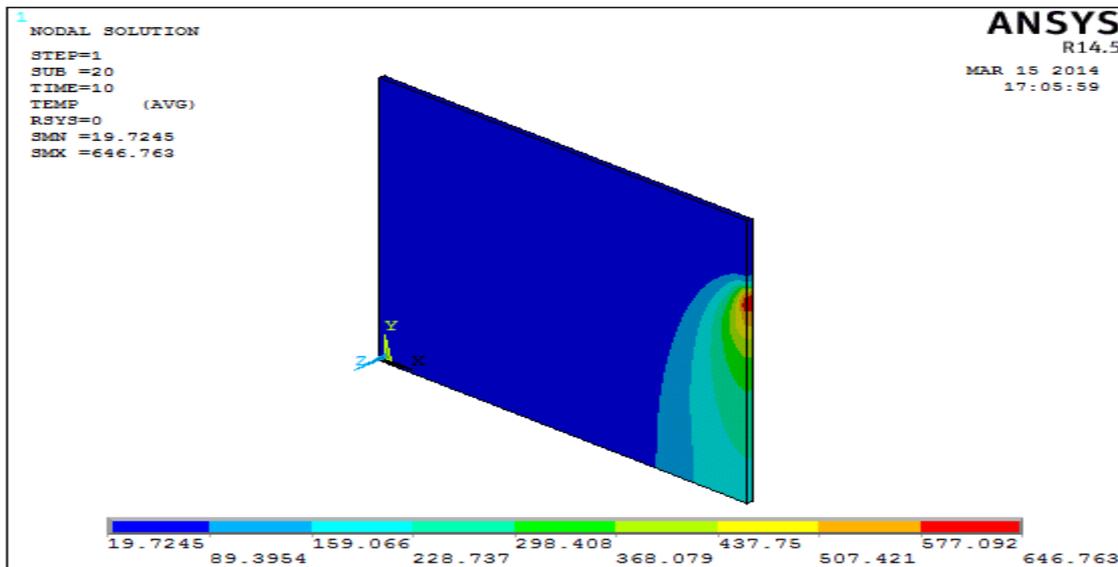


En la figura 1, se comprueba como varía el tamaño del área intersecada entre la curva de enfriamiento y la curva TTP para 9 experimentos diferentes, variando el tamaño del área intersecada en función de la pendiente de la curva de enfriamiento.

4. Resultados

Una vez definidas las variables del problema térmico se resuelve el problema planteado y se obtienen los contornos del problema mostrado en la figura 2 donde se obtiene una temperatura de fusión de 646 °C.

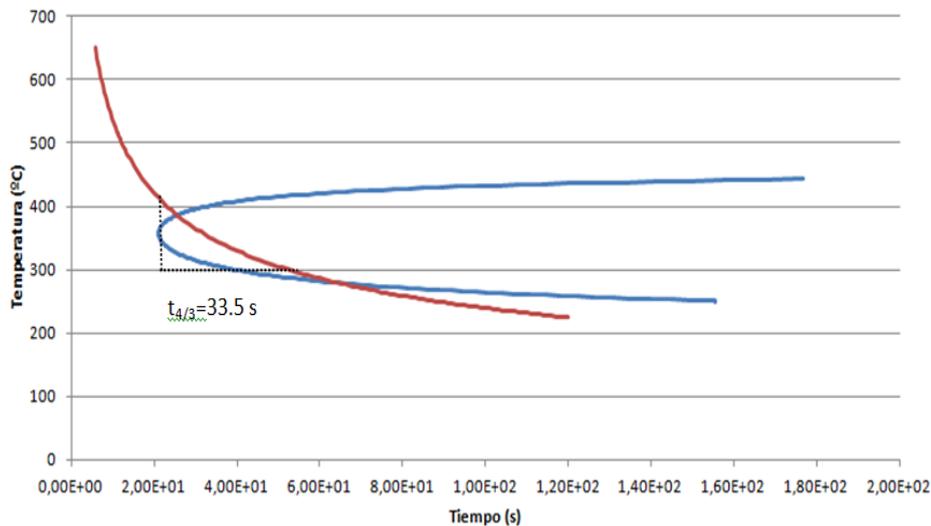
Figura 2. Modelización de la unión por ANSYS



4.1. Curvas de enfriamiento

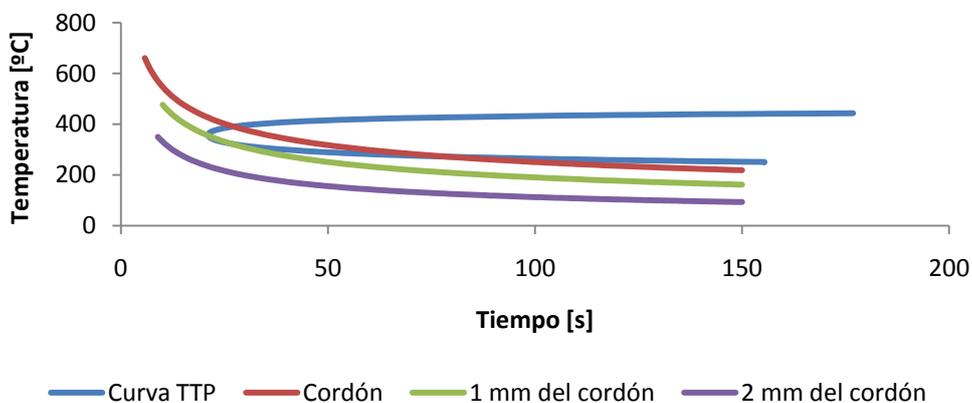
En la figura 3, aparecen representados los resultados del experimento h de la figura 1. Se muestran la curva de enfriamiento medida en el centro del cordón de soldadura y la curva TTP de la aleación de aluminio 7010-T76. La curva de enfriamiento del aluminio, tiene un tiempo de enfriamiento característico entre 410 y 300 °C, conocido como $t_{4/3}$ y aparece representado mediante por una línea punteada entre ambos valores, obteniéndose un tiempo de 33.5 s. Por otro lado el área intersecada entre la curva de enfriamiento y la curva C_t representa la cantidad de precipitados del metal base que se han visto afectados por el ciclo térmico del experimento. El tamaño del área es un valor representativo de la calidad de la unión, siendo inversamente proporcional el tamaño del área intersecada respecto a la cantidad de precipitados del metal base disueltos, siendo beneficiosa para la unión la disminución de los precipitados. El tamaño del área intersecada es de 1079.2 °C·s. El tamaño del área intersecada por ambas curvas, se calcula integrando ambas curvas por el método del trapecio entre los puntos de corte y se calcula la diferencia entre ambas áreas (Eggert & Lund, 1989).

Figura 3. Curva TTP – curva de enfriamiento



En la figura 4 se representan las curvas de enfriamiento medidas en diferentes puntos alejados del cordón soldadura y se obtienen el siguiente resultado.

Figura 4. Curva TTP – curvas de enfriamiento en diferentes puntos de la soldadura



Midiendo las curvas de enfriamiento en diferentes puntos de la unión las curvas de enfriamiento se van desplazando hacia la izquierda y por lo tanto no cortan a la curva TTP. Si la curva de enfriamiento no corta a la curva TTP indica que las propiedades de la aleación no se han visto afectadas por el proceso de soldeo a partir de una distancia determinada del cordón de soldadura.

5. Conclusiones

El presente trabajo realiza un estudio sobre los efectos que tiene el tiempo de enfriamiento $t_{4/3}$ en la aparición de precipitados en una soldadura de aluminio para una aleación 7010-T76. El tiempo de enfriamiento entre 400 y 300 °C se mide en el cordón de soldadura, obteniéndose su curva de enfriamiento correspondiente y sobre ella se mide el $t_{4/3}$. Al alejarse del cordón de soldadura las temperaturas que se obtienen se encuentran por debajo de los 350 °C y por lo tanto no es relevante el tiempo de enfriamiento debido a que no hay presencia de nuevos precipitados GP. La cantidad de estos precipitados va a ser inversamente proporcional al área intersecada entre la curva de enfriamiento y la curva TTP. Al aumentar el área intersecada van a disminuir los precipitados de GP y al disminuir el área intersecada van a aumentar los precipitados GP. El área intersecada en una soldadura informa sobre las propiedades tanto de resistencia mecánica como de resistencia frente a la corrosión.

Este estudio se puede llevar a cabo en otras aleaciones de diferente composición química con el fin de conocer las propiedades resistentes en función del tiempo de enfriamiento.

6. Referencias

- Eggert, N., & Lund J.. (1989). The Trapezoidal rule for analytic functions of rapid decrease. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 27, 389 – 406. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0377-0427\(89\)90024-1](http://dx.doi.org/10.1016/0377-0427(89)90024-1).
- Flynn, RJ, & JS Robinson.(2004). The Application of Advances in Quench Factor Analysis Property Prediction to the Heat Treatment of 7010 Aluminium Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 153, 674–680. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.133.
- Grong. (1997). *Metallurgical Modelling of Welding*. 2nd ed. London: The Institute of Materials.
- Incropera, F, D DeWitt, T Bergman, and A Lavine. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. USA: JOHN WILEY & SONS.
- Kavalco, Patricia M., & Canale, L.C.F. (2009). Quenching Fundamentals: Quenching of Aluminum Alloys: Property Prediction by Quench Factor Analysis. *Heat Treating Progress*, 9, 23–28.
- Hong-ying LI, , ZENG C., Mao-sheng H., Jiao-jiao L., & Xiao-chao L.. (2013). Time–temperature–property Curves for Quench Sensitivity of 6063 Aluminum Alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 38–45. doi:10.1016/S1003-6326(13)62426-7.
- Li, J.-B.a, Zhang, Q.-L.b, & Ding, J.-M.c (2006). Experiments on Properties of Aluminium Welding Joints. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, 16, 331–338. doi:10.2749/101686606778995209. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33751051922&partnerID=40&md5=b6004a2bec972e2cafcde370b1e499b2>.
- Madhusudhan R., G., Mukhopadhyay, A. K., & A. Sambasiva R. (2005). Influence of Scandium on Weldability of 7010 Aluminium Alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 10, doi:10.1179/174329305X29456.

- Milkereit, B., Wanderka Nelia, Schick C., & Kessler O. (2012). Continuous Cooling Precipitation Diagrams of Al–Mg–Si Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 550, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.033>.
- Powell, R.W., Ho, C.Y., & Liley, P.E.. (1966). Thermal Conductivity of Selected Materials. NSRDS.
- Singh, C. V., & D. H. Warner. (2010). Mechanisms of Guinier–Preston Zone Hardening in the Athermal Limit. *Acta Materialia*, 58, 5797 – 5805. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2010.06.055>.
- Su, Y., Xueming H., & Yixiong W.. (2014). Influence of Alloy Elements on Microstructure and Mechanical Property of Aluminum–steel Lap Joint Made by Gas Metal Arc Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 750 – 755. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.11.022>.
- Zhu, X. K., & Y. J. Chao. (2002). Effects of Temperature-dependent Material Properties on Welding Simulation. *Computers & Structures*, 80, 967 – 976. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00040-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00040-8).