



FISURACIÓN EN CALIENTE EN LA ALEACIÓN AA6261T6

RESUMEN

Las aleaciones de aluminio son conocidas por ser susceptibles al agrietamiento en caliente [10,23]. Por ejemplo, el agrietamiento de licuación ocurre en la zona parcialmente fundida (ZPF). En cambio, el agrietamiento de solidificación ocurre en la zona de fusión. En esta investigación se hicieron soldaduras de parche circular mediante el proceso TIG con materiales de aporte ER5356 y ER4043.

Se observaron grietas de licuación para ambos materiales de aporte. Con el aumento del calor de aporte, la longitud de grieta era considerablemente mayor en el caso del ER5356 que en el del ER4043. Se concluyó que el agrietamiento de licuación era severo al emplear ER5356, lo que hacía que los porcentajes de dilución fluctuaran entre 50 y 70.2%, que en el caso del ER4043 corresponden a rangos de 54 al 73.2% de dilución.

Palabras Claves. Efecto del Calor de Aporte, Porcentaje de dilución, Agrietamiento de licuación, Prueba de Parche Circular, Temperatura Vs Fracción Sólido (T vs fs.).

ABSTRACT

Aluminum alloys are known for being prone to hot cracking. For instance, liquation cracking occurs in the partially melted zone (PMZ) [1- 6,11,22].

Ing. Edison Jairo Gomez
Harold Belalcázar
Instructor Centro ASTIN
SENA • Regional Valle



But solidification cracking takes part in the fusion zone [8]. Circular patch welds of Alloy AA6261T6 were made by GTA (gas tungsten arc) with both filler metals ER4043 and ER5356.

Liquation cracks were observed for both ER5356 and ER4043 filler metals. At augmented heat input, the crack length was considerably greater in the case of ER5356 than in the case of ER4043 filler metals. It was concluded that "liquation cracking was severe when using ER5356, which made dilution ratio ranging from about 50 to 70.2% than in the case of ER4043 of 54 to 73.2 %.

Keywords: Heat Input Effects, Dilution ratio (%D) Effects, Liquation Cracking, Circular patch Test, Temperature Vs Fraction

Solid ($T-f_s$).

INTRODUCCIÓN

La fisuración en caliente es un fenómeno de agrietamiento que se produce a temperaturas elevadas durante la última etapa de la solidificación y es de carácter intergranular [1-5,24]. Entre otros factores, las impurezas presentes en las aleaciones de aluminio inducen licuación en la zona parcialmente fundida (ZPF) debido a la reacción eutéctica con la matriz circundante [7, 8].

Debido a las aplicaciones crecientes de las aleaciones Al-Mg-Si en elementos estructurales, es importante obtener uniones soldadas sanas, libres de fisuras en caliente, para así lograr transmitir los esfuerzos que a lo largo de la

vida de la estructura se produzcan sobre la unión soldada.

Por lo anterior, resulta de gran interés a nivel mundial el estudio del fenómeno de la fisuración en caliente de las soldaduras, de la misma manera que se requiere minimizar y predecir la susceptibilidad de estas aleaciones a tal fenómeno.

En consecuencia, existen investigaciones orientadas a identificar las condiciones tanto metalúrgicas como mecánicas que permiten la formación de grietas en caliente [21].

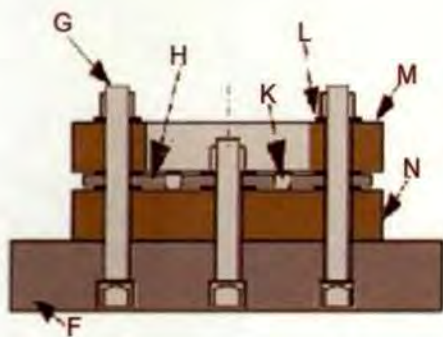
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para evaluar la influencia del calor de aporte (HI) y el tipo de material de aporte sobre la susceptibilidad

al agrietamiento en caliente de AA6261T6, se utilizó la prueba de parche Circular (Figura 1).

Se seleccionó esta prueba debido a su gran reproducibilidad y a su construcción relativamente sencilla, la cual no requiere de un complejo equipo que disponga de un sistema de control de carga externa, como ocurre con el ensayo de Varestraint [9, 17, 19].

FIGURA 1 Montaje de la Prueba de Parche Circular (PC). **F:** Placa de acero A36 **N:** placa de acero A36 **M:** Placa de acero A36 con una perforación en el centro de diámetro 83mm, **L:** Arandela, **G:** Tornillo-5/16 pulg, **H:** probeta de ensayo, **K:** soldadura [1-4]



$$\% \text{ Dilución (D)} = \frac{A_{MB}}{(A_{MB} + A_{MA})} \times 100 \% \quad (2)$$

Donde, A_{MB} es el área de la sección transversal del metal base fundido (mm^2) y A_{MA} es el área de la sección transversal del metal de aporte (Figura 2 y 3).

Figura 2. Esquema del área de la sección transversal del metal base fundido (A_{MB}) y el área de la sección transversal del metal de aporte (A_{MA}).



Figura 3. Determinación de los valores de A_{MB} y A_{MA} . Mediante el programa Autocad 2007.



el número de micro-fisuras y se procedió a tomar la medida aproximada de las longitudes totales, empleando la escala del microscopio.

Fracción sólido (f_s):

Es un fragmento o fracción de sólido de la cantidad total de material que está solidificando que se encuentra entre la temperatura de *solidus* y de *liquidus* [12,14]. Por tanto, la siguiente es la expresión para la variación de la fracción sólido en función de la temperatura, conocida como ecuación de Sheil [1-4,13]:

$$f_s = 1 - \left[\frac{T_m - T_L}{T_m - T} \right]^{1-k}$$

Donde T_m es el punto de fusión del aluminio puro, T_L la temperatura de *liquidus* de la aleación, k el coeficiente de distribución en el equilibrio, $m_L = (T_L - T_m)/C_o$, y C_o el contenido de soluto de la aleación antes de la solidificación.

Microanálisis: Se realizó un microanálisis óptico (aumento 10 μm) para observar y determinar

Cálculo de Curvas de Temperatura (T) - Vs Fracción Sólido (f_s).

Calor de Aporte (HI): El calor de aporte se calcula según la siguiente ecuación [25]:

$$\text{Calor de Aporte (HI)} = \frac{V \cdot I}{V_s} \quad (\text{J/mm}) \quad (1)$$

Donde, I es el amperaje (A), V el voltaje y V_s la velocidad de Soldadura (mm/Seg).

Dilución: El coeficiente de dilución se determinó según la ecuación 2 [25]:

Tabla 1. Calor de Aporte

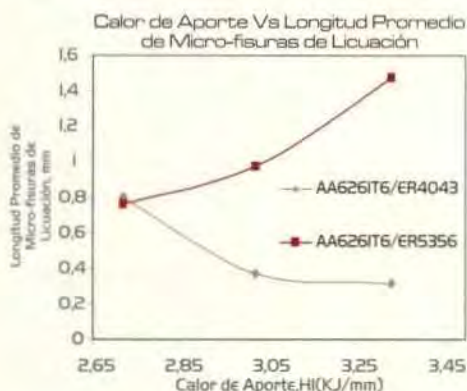
Soldadura	%D	Numero de Micro-fisuras de Licuación (ML)	Longitud de Microfisuras de Licuación (mm)	HI*
6261/4043	54.13	3	0,80 ± 0,208	HI ₁
6261/5356	50.40	28	0,76 ± 0,316	
6261/4043	67.31	5	0,37 ± 0,128	HI ₂
6261/5356	63.53	37	0,97 ± 0,50	
6261/4043	73.01	8	0,31 ± 0,049	HI ₃
6261/5356	70.12	48	1,471 ± 0,24	

Las curvas de la (Figura 6) se calcularon con el programa Pandat 5.0 [26]

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todas las soldaduras se evidenció una modificación en la composición química por efecto del calor de aporte y el tipo de material de aporte empleado. Al observar la Tabla 1 y Figura 4, se puede apreciar que los valores más altos que ocurren en longitud de microfisuras de licuación (mm) son los que presentan un calor de aporte HI_3 con ER5356 y un porcentaje de dilución del 70,12%.

Figura 4. Relación entre la longitud promedio de Microfisura y el calor de aporte para las soldaduras AA6261T6/ER4043 y AA6261T6/ER5356.



Evidencias de Agrietamiento de Licuación

La micrografía óptica (10 μ m) de la Figura 5 plasma la micro-estructura característica de las soldaduras de la aleación AA6261T6 con el calor de aporte de nivel alto HI_3 (3.33 KJ/mm) y el material de aporte ER5356.

La zona de fusión presenta una micro-estructura dendrítica [15,16,20] y la Zona Parcialmente Fundida (ZPF) de las soldaduras, tanto con el material de aporte ER5356 como con el ER4043, presenta microfisuras de licuación [6-8]. Se aprecia un aumento en la longitud de la microfisura de licuación en la micrografía de la soldadura AA6261T6/ER5356 (Figura 5).

En la Figura 6 (recuadro rojo) se muestra que durante la trayectoria de la solidificación, la mayor tendencia a la fisuración de AA6261T6/ER5356 se debió al hecho de tener una fs. en la última etapa de la solidificación (580 - 520°C) mayor a la fs. del metal base AA6261T6.

La presencia de las microfisuras en las soldaduras AA6261T6/ER4043 y la fisuración considerablemente crítica que se presentó en la AA6261/ER5356, también pueden estar relacionadas con la presencia de precipitación, intergranular, debido al ciclo de calentamiento y enfriamiento que ocurre durante la soldadura.

CONCLUSIONES

- Factores como el porcentaje de dilución en función del calor de aporte deben tenerse

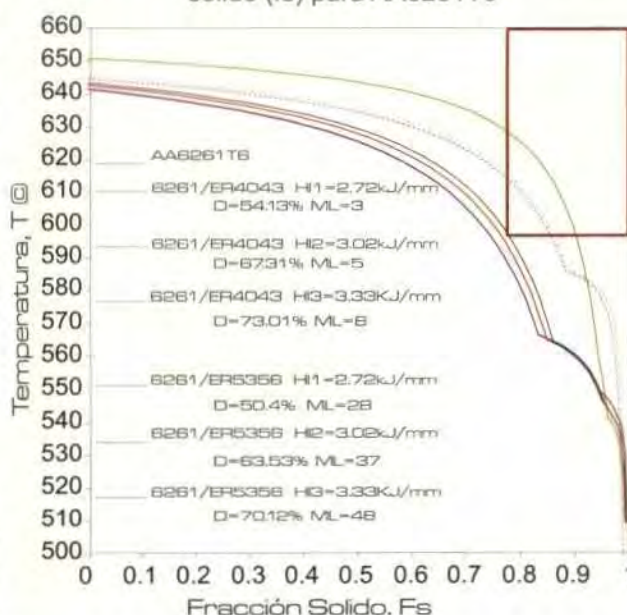
Figura 5 Micrografía Óptica (10 μ m) AA6261T6/ER5356(2.08mg-0.51Si - 0.308Fe - , D=70.12% ; HI_3 = 3.33 KJ/ mm I_3 =165A 22V).



en cuenta al realizar un procedimiento de soldadura para la aleación AA6261T6, para evitar la fisuración tanto a nivel macro-estructural como a nivel micro-estructural.

- Los resultados de los análisis metalográficos permitieron corroborar la validez de la teoría de curvas de Temperatura Vs Fracción sólido, para determinar

Figura 6: Curvas de Temperatura (T) vs. Fracción sólido (fs) para AA6261T6



cuándo una aleación de la serie 6XXX es susceptible de microfisurarse.

● La tendencia a la fisuración en caliente de la aleación AA6261T6 con los tres niveles de calor de aporte (2.72 KJ/mm, 3.02 KJ/mm y 3.33 KJ/mm) y los aportes de ER5356 y ER4043 coincide con los resultados que predicen las curvas de Temperatura (T) Vs fracción Sólido (fs).

● Los resultados experimentales de análisis metalográficos corroboran que la prueba de Parche Circular es una técnica válida para evaluar la susceptibilidad para fisurarse en caliente en las aleaciones de aluminio de la serie 6XXX, como la aleación AA6261T6.

Referencias:

- [1] HUANG, C., and KOU, S. 2004. Liquation cracking in full-penetration Al-Cu welds. *Welding Journal*. P. 1-12.
- [2] HUANG, C., and KOU, S. 2004. Liquation cracking in full penetration Al-Mg-Si welds. *Welding Journal*. P. 111-122.
- [3] CAO, G y KOU, S. 2006. Predicting and Reducing Liquation-Cracking Susceptibility Based on Temperature vs. Fraction Solid. *Welding Journal*. P.10-18.
- [4] CAO, G y KOU, S. 2005. Liquation cracking in full penetration Al-Si welds. *Welding Journal* 83(2): P. 63 - 71.
- [5] KOU, S. 2003. *Solidification and Liquation Cracking Issues in Welding*. 2003. June. *Welding Journal*, P. 38 - 39 - 40
- [6] BY C. HUANG and S. KOU. Liquation Mechanisms in Multicomponent Aluminium Alloys during Welding. *welding Journal*. P. 211 a 222.
- [7] Jose Maria SISTIAGA. *Aleaciones de Aluminio y de Magnesio*. Edit. Montecorvo. Madrid. 196 P. 59, 140, 141, 142.
- [8] KOU, S. *WELDING Metallurgy*. John Wiley & Sons, Inc., 2nd edition. P. 263, 264
- [9] WILKEN, K y KLEISTNER, H. 1991. Clasificación y Evaluación de Ensayos de Agrietamiento en Caliente de Uniones Soldadas. *Revista de Soldadura*, CENIM, Vol. 21, No. 3. P. 147-159.
- [10] ULRICH Krüger, SCHWEISS-TECHNISCHE Lehrund Versuchsanstalt Berlin. 1994. *Weldability*. EAA - European Aluminium Association. P. 1 - 13
- [11] KATOH, M., and KERR, H. W. 1987. Investigation of heat-affected zone cracking of GTA welds of Al-Mg-Si alloys using the Vareststraint test. *Welding Journal* 66(12). P. 251-259.
- [12] SAYAGO Quintero Omar. Solidificación. Departamento de Ciencia de Materiales. Universidad Simón Bolívar. pdf. P. 1-64.
- [13] KOU, S. 2003. *Welding Metallurgy*, 2nd edition. New York, N. Y., John Wiley and Sons. P. 151
- [14] FLEMINGS, M. C. 1974. *Solidification Processing*, and Appendix B. New York, N. Y., McGraw-Hill. P. 34-36, 160, 162, 256, 258
- [15] ARNBERG, L., CHALL, G., and BACKERUD, L. 1993. Determination of dendritic coherency in solidifying melts by rheological measurements. *Materials Science and Engineering A173*. P. 101-103.
- [16] GITTOS, N. F., and SCOTT, M. H. 1981. Heat-affected zone cracking of Al-Mg-Si alloys. *Welding Journal*. P. 95-103.
- [17] JOHN C. Lippold. 2005. Recent Developments in Weldability Testing for Advanced Materials. ASM International. Joining of Advanced and Specialty Materials VII (#05116G). The Ohio State University Columbus, OH USA. P. 1-8.
- [18] NAKA K. y MATSUDA, Trans. JWRI, 24 (1995), Pg 83.
- [19] NELSON, T. W., LIPPOLD, J. C., Lin, W., and Baeslack III, W. A. 1997. Evaluation of the circular patch test for assessing weld solidification cracking. I. Development of a test method. *Welding Journal* 76(3). Pg 110 - 119.
- [20] KOSTRIVAS A. And LIPPOLD J. C. 2000. A Method for Studying Weld Fusion Boundary Microstructure Evolution in Aluminum Alloys. *Welding Journal*. P. 1-8
- [21] Pérez C. R., M. D. CHAPETTI, R. G. Cocco y L. A. de Vedia. 2000. Iniciación Y Crecimiento De Fisuras Por Fatiga En Uniones Soldadas de Aluminio de Alta Resistencia: Aplicación del Enfoque Local. *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*. P. 499-504
- [22] RAMANAIAH N., RAO K. S., GUHA B and RAO K. P. 2005. Effect Of Modified AA4043 Filler On Partially Melted Zone Cracking Of Al-Alloy Gas Tungsten Arc Welds. *Science and Technology of Welding and Joining*. Vol 10 No 5. P. 591- 596
- [23] LIU Ren-pei, DONG Zu-jue, PAN Yong-ming. 2006. Solidification Crack Susceptibility Of Aluminum Alloy Weld Metals. *University of Aeronautics and Astronautics*. Nanjing: Science. P. 110-116.
- [24] ANDERSON Tony., Alcoa Wire Corporation, USA. *Troubleshooting in aluminium welding*. 2002. Vol. 54 No 2. P. 36, 37, 38
- [25] GOMEZ Reina Manuel. 1988. *Soldadura de Los Aceros - Aplicaciones*, 2nd edición. Madrid (España). Edit Galapagar. P. 366
- [26] Pandat. 2001. Phase diagram calculation software package for multicomponent systems. 2001. CompuTherm LLC, Madison, Wis.