

Incidencia de los parámetros del proceso de soldadura por fricción agitación en una aleación de aluminio

Wilmer Reyes Feria

wrferia@ecg.minem.moa.cu

Tomás Fernández Columbié

tfernandez@ismm.edu.cu

Luis Hernández Dorado

lghernandez@ecg.minem.moa.cu

Marjoris Utria Jiménez

mutria@ismm.edu.cu

Rafael Antonio Castillo Díaz

Universidad de Moa (Cuba).

Resumen: Se establecieron las variaciones microestructurales y la dureza en una aleación de aluminio de la serie AA 1050 sometida a proceso de soldadura por fricción agitación. El diseño de la herramienta empleada consistió en una combinación de hombro cóncavo y pin cónico roscado. Las láminas se cortaron perpendiculares, al sentido de laminación, de 180 mm de largo y 80 mm de ancho con un espesor de 5 mm, se unieron en series de dos láminas a lo largo, trazando cordones de soldadura de 170 mm. De una estructura de granos pequeños y una red continua de partículas finas en una matriz de fase α con granos equiaxiales, luego de la soldadura, la zona termomecánica afectada muestra una reorientación, con cierto grado de recristalización y en la zona térmica afectada la presencia de partículas de silicio eutéctico reprecipitados.

Palabras clave: microestructuras; fricción-agitación; pin cónico; zona termomecánica afectada.

Recibido: 14 noviembre 2018/ Aceptado: 7 mayo 2019.

Incidence of the friction-stir welding process parameters of aluminum alloy

Abstract: Hardness and the microstructural variations were established in an AA 1050 series aluminum alloy subjected to friction stir weld. The design of the tool used consisted of a concave shoulder and threaded conical pin combination. Sheets metals were perpendicularly cut; lamination direction 180 mm long and 80 mm wide with 5 mm thickness, they were joined in series of two sheets along by drawing 170 mm weld seams. From a small grains structure and a continuous network of fine particles in α -phase matrix with equiaxial grains, after welding, the affected thermo-mechanical zone shows a reorientation, with some recrystallization degree and the presence of re-precipitated eutectic silicon particles in the affected thermal zone.

Keywords: microstructures; friction stirring; conical pin; affected thermo-mechanical zone.

Introducción

El desarrollo de la tecnología en la soldadura por fricción agitación (*Friction Stir Welding, FSW*) para crear uniones se ha desarrollado vertiginosamente debido a los esfuerzos dirigidos por las industrias del transporte aéreo y terrestre, sin embargo, la comprensión de las transformaciones microestructurales que ocurren durante el proceso de soldadura y el control de las propiedades mecánicas posterior a esta ha avanzado de manera lenta (Jata, Sancar & Ruschav, 2000).

La soldadura por fricción-agitación es un proceso en estado sólido que sirve para unir materiales a través de una herramienta rotativa que consta de un hombro y de un pin que penetra en la junta y gira avanzando en la dirección de la línea de contacto de los materiales. La unión se logra debido a la agitación o mezcla generada por el pin y la presión ejercida por el hombro sobre el material. Durante esta interacción la fricción produce la temperatura y presión necesarias para la generación de la junta soldada (Miroslav *et al.*, 2012).

En el proceso FSW, tanto las grandes deformaciones como los tratamientos no isotérmicos, contribuyen a una evolución en la microestructura y a la subsecuente modificación de las propiedades mecánicas en la unión soldada (Gallais *et al.*, 2008). En las aleaciones de aluminio térmicamente tratables son al menos tres las características microestructurales de la unión a las que se asocia la dureza desarrollada tras el proceso de soldadura: la estructura de grano fino que resulta de la recristalización dinámica, la fractura mecánica de las partículas constituyentes y el proceso disolución-precipitación de las fases de fortalecimiento y dispersoides.

La distribución de temperatura en la soldadura ha sido estudiada, de forma experimental y teóricamente para entender el proceso de soldadura y los materiales soldados. Dickerson, Shi & Shercliff (2003) presentó un modelo térmico simple, asumió constante una superficie de calor para predecir el flujo dentro de la herramienta y la pieza. Un modelo térmico, considerando constante el calor friccional en el hombro de la herramienta y el pin, para predecir la historia térmica en una aleación de aluminio, fue desarrollado por Rajamanickam *et al.* (2009); Riahi y Nazari (2010). Song y Kovacevic (2003) desarrollaron un modelo térmico, considerando constante el calor en la superficie del hombro y el lado el fondo del pin.

Existen trabajos donde la distribución de temperaturas y el flujo de calor en la junta son relacionados con la generación de esfuerzos residuales. Entre las principales investigaciones se encuentra la de Sutton *et al.* (2002), en donde los esfuerzos residuales estuvieron relacionados con los cambios microestructurales y la distribución de calor en la junta. Peel *et al.* (2003) y Steuwer, Peel & Withers (2006) relacionaron la distribución de esfuerzos residuales en la dirección longitudinal de la junta con la entrada de calor al sistema, dominada principalmente por las velocidades de avance y de rotación de la herramienta.

La calidad de la soldadura depende de los parámetros del proceso, tales como la velocidad de rotación, velocidad de penetración, tiempo de sostenimiento (Mahmoud y Khalifa, 2014; Lakshminarayanan, Annamalai & Elangovan, 2015). Durante el proceso FSW, los parámetros de operación determinan la cantidad de calor generado, la plastificación del material alrededor del pin, la geometría de la soldadura y, por tanto, las propiedades mecánicas de la unión. Se considera que este mecanismo de flujo consolida la unión de los materiales mediante la extrusión y forja del material a altas velocidades de deformación (Arbegast, 2003).

El trabajo tiene como objetivo determinar la incidencia de los parámetros del proceso de soldadura por fricción-agitación (FSW) en la formación microestructural de una aleación de aluminio de la serie AA 1050.

Análisis de la composición química

En la Tabla 1 se muestra la composición química estándar de esta aleación según *Alloy Casting Institute (ACI)*, designación adoptada por la ASTM, de la *American Society for testing Materials – ASTM* y la SAE.

Tabla 1. Composición química, porcentaje en masa y mecánicas de la aleación AA 1050

Nomenclatura	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Al
AA 1050	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,03	0,05	Resto
Propiedades mecánicas	Resistencia a la tracción (MPa)				Elongación (%)		Dureza (HV)	
	145				5		33	

Esta serie es considerada de alta pureza (0,02 % de impurezas admisibles); el contenido de aluminio puro está entre el 0,1 % y el 1 % como máximo. El hierro (Fe) y el silicio (Si) son impurezas que se encuentran en la bauxita, mineral de partida, por lo

tanto, son las más abundantes en el aluminio, e incrementan la resistencia mecánica de las aleaciones en esta serie.

El contenido de hierro es de 0,006 % hasta 0,6 % y de silicio de 0,01 % hasta 0,5 %; además de otros elementos como el Cu, Ti y Zn. La composición química es el factor fundamental en la figuración en caliente, puesto que, dependiendo de esta, así serán los compuestos intermetálicos formados y las temperaturas de fusión correspondientes; de ella dependerá la formación de compuestos eutécticos.

Microestructura de la muestra patrón

Para el análisis microestructural se empleó un microscopio binocular marca NOVEL modelo NIM-100, dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE. La Figura 1 se corresponde con la muestra patrón de la aleación de aluminio AA 1050.



Figura 1. Estructura metalográfica de la aleación AA 1050.

La microestructura presenta granos pequeños y una red continua de partículas finas de una estructura en la matriz de fase α . Se observan granos equiaxiales de aluminio, predominantemente. Ocurre la precipitación en el interior de los granos. En los límites de granos se llegan a formar largos precipitados de silicio.

Preparación de la junta

En la soldadura por fricción se deben tener en cuenta las funciones principales del proceso como son: unión, compresión, rotación y fricción bajo presión de las partes y ajustes minuciosos de los tiempos de procesamiento requeridos, así como las fuerzas radiales y axiales. En la Figura 2 se muestra la instalación para la soldadura de la aleación AA 1050.



Figura 2. Instalación del proceso de soldadura a tope de la aleación de aluminio.

La máquina herramienta empleada fue la fresadora. Se tuvo en cuenta su rigidez, que fuera capaz de resistir momentos de gran magnitud; eliminar las vibraciones y fugas, especialmente, aquellas durante el proceso de soldadura. Se cortaron láminas de aluminio de la serie AA 1050 laminadas en frío; se realizó el corte perpendicular, al sentido de laminación, con dimensiones de 180 mm de largo y 80 mm de ancho con un espesor de 4 mm. Estas se unieron en series de dos láminas a lo largo, trazando cordones de soldadura de 170 mm. La sujeción de las láminas se realizó mediante tornillos, garantizando que estas quedaran inmóviles, para así lograr un buen cordón de soldadura.

Se realizó un total de nueve soldaduras a tope, manteniendo los parámetros, velocidad de soldadura (V_s) y velocidad de rotación (V_r), utilizando la herramienta con pin roscado y una inclinación del husillo de la máquina de 2° respecto a la pieza.

Cálculo de los parámetros de la herramienta

Para seleccionar el diámetro del hombro (D_h) se tuvo en cuenta el torque teórico (T) en el husillo de la fresadora, el cual se calcula de acuerdo con Carrasco y demás colaboradores (2013).

$$T = \frac{P}{\omega}$$

Donde T es el torque; en Nm, P es la potencia de la fresadora; en W y ω es la velocidad angular de la herramienta; en rad/s.

La altura (H) del pin cónico en la herramienta se calculó según Carrasco y otros colaboradores (2013).

$$H = \frac{(S - \Delta - 0,5(D_h + D_r)) \cdot \text{sen}(A) \cdot \text{sen}(B)}{\text{sen}(B - A)}$$

Donde:

H - altura del pin roscado; mm

S - espesor de la placa a soldar; mm

D_h - diámetro del hombro; mm

D_r - diámetro mayor del cono; mm

Δ - espacio entre el pin introducido y el fondo de la placa; mm

A - ángulo de inclinación de la herramienta en la fresadora; grados

B - ángulo del cono, está entre 60° a 80°

Cálculo del torque en la interfase del hombro

En la soldadura por fricción, el movimiento asociado con la fuerza aplicada debe ser capaz para generar un calor suficientemente que plastifique el metal, donde la interfase se encuentre bajo un estado de deformación plástica y, en consecuencia, la superficie inicial del material se expulse formando un flujo plástico. La fuerza de torsión total en la interfase del hombro puede ser calculada (según Paidar *et al.*, 2014) como:

$$T_h = \frac{4}{3} \pi \cdot \sigma_{cont} \cdot n (R_h^3 - R_p^3)$$

Siendo: T_h el torque en la interfase del hombro, en Nm; σ_{cont} el esfuerzo de corte al contacto, en MPa, r la distancia para el eje de la herramienta, en mm; R_h el radio del hombro, en mm; R_p el radio del pin, en mm.

El esfuerzo de corte al contacto se determina como:

$$\sigma_{cont} = \mu \cdot \sigma$$

Siendo: μ el coeficiente de fricción, para el aluminio es 0,9 y σ la presión de contacto, en MPa.

Para la presión de contacto, entonces:

$$\sigma = \frac{Fc}{\pi \cdot R_h^2}$$

Generación de calor en el proceso de soldadura

La fuente de generación de calor del proceso de SFA depende de la geometría de la herramienta. Cada superficie geométrica de la herramienta posee una ecuación generadora de calor. El objetivo principal de este modelo es estimar la generación y el flujo de calor en el proceso, basándose en diferentes condiciones de contacto entre la interfase de la herramienta y la pieza de trabajo. En la Figura 3 se muestran las geometrías y sus respectivos calores generados (Q) dependientes, según Shi, Dickerson & Shercliff (2003).

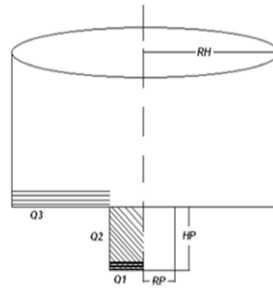


Figura 3. Geometrías dependientes.

- $Q1$ - es el calor generado por la superficie circular del pin;
- $Q2$ - es el calor generado por la superficie cilíndrica del pin;
- $Q3$ - es el calor generado por la superficie del hombro.

Durante el proceso, la fuente de calor es el rozamiento desarrollado entre las superficies de contacto. Este es dependiente de las geometrías de la superficie de la herramienta. Para calcular la generación de calor en el modelo, como se muestra en la Figura 4, la geometría de la herramienta es dividida en tres superficies: circular del pin, superficie cilíndrica del pin y la superficie el hombro.

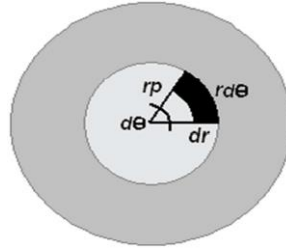


Figura 4. Segmentos infinitesimales $d\theta$, dr , $rd\theta$ en el área circular del pin de radio R_p .

Este segmento infinitesimal posee la siguiente formulación:

$$dA = R_p \cdot d\theta \cdot dr$$

Siendo $d\theta$ el cambio angular, dr el cambio radial, r_p la distancia radial a un segmento.

En donde el segmento infinitesimal contribuye con una fuerza y un torque formulado como:

$$\frac{dF}{dA} = \sigma_{cont}; dF = \sigma_{cont} \cdot dA$$

Entonces;

$$dM = R_p \cdot dF$$

La generación de calor de este segmento está dada por:

$$dQ_1 = \omega \cdot R_p \cdot dF$$

Siendo dQ la generación de calor por unidad de tiempo; dF es la fuerza que afecta la superficie.

Remplazando en esta dF se obtiene:

$$dQ_1 = \omega \cdot R_p \cdot \sigma_{cont} \cdot dA$$

Remplazando dA , se obtiene:

$$dQ_1 = \omega \cdot R_p \cdot \sigma_{cont} \cdot R_p \cdot d\theta \cdot dr$$

Donde R_p es el radio del área circular del pin, en mm ω , es la velocidad angular, en rad/s y $d\theta$, dr , $rd\theta$ son segmentos infinitesimales en el área circular del pin.

Para determinar el porcentaje de calor generado en la superficie circular del perno se consideran las dimensiones reales de la herramienta.

$$P_{circ\ pin} = \frac{(2\pi \cdot R_p^3 \cdot \omega \cdot \sigma_{cont})}{\frac{3}{(2\pi \cdot \omega \cdot \sigma_{cont}) (R_h^3 + 3R_p^2 \cdot H_p)}} \cdot 3$$

Donde:

R_p - radio del pin; mm

R_h - radio del hombro; mm

H_r - altura del pin, mm

Preparación metalográfica de la probeta

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: desbaste, pulido, desengrasado y lavado. El desbaste y el pulido se realizaron con la variación de la granulometría de los papeles abrasivos al ser aplicadas a la pieza de trabajo. Las lijas fueron colocadas sobre una placa de vidrio, se cambió el sentido del lijado a 90° al pasar de un pliegue a otro, para eliminar la capa de material distorsionado y deslizado dejado por el anterior. Para el acabado se utilizó un paño de fieltro grueso, se usó como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

Una vez pulida las muestras se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro, se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono (Cl₄C) para evitar cualquier vestigio de grasa y pasta de pulir. En el ataque químico se empleó una solución de 15 ml de HCl concentrado más 10 ml de HF al 48 %, diluido en 85 ml de agua desmineralizada, para revelar los perfiles de las microestructuras. En la medición de la microdureza se efectuaron tres mediciones a las muestras en diferentes lugares, las

que se promediaron; la carga aplicada fue de 0,49 N, en un tiempo de 15 s. El indentador empleado fue el de pirámide de diamante, con un ángulo de 136°.

Resultados y discusión

Independiente de los parámetros que se establecen para el proceso de soldadura SFA se consideran otros que determinan la unión soldada, entre ellos están: la profundidad de penetración del hombro y el ángulo de inclinación de la herramienta respecto a la normal de la superficie, profundidad de penetración del pin, diseño del pin y el hombro de la herramienta. En la Tabla 2 se muestran los resultados de los parámetros establecidos para la soldadura.

Tabla 2. Parámetros de soldadura

Parámetros	
Diámetro del hombro; mm	20
Diámetro del pin; mm	6
Velocidad de rotación; r/min	1 200
Velocidad de soldadura; mm/min	30
Presión de soldadura; MPa	16,28
Espesor de las planchas; mm	5
Torque; Nm	44,5
Flujo de calor; W	534

En la soldadura por fricción, el pin hace contacto con las placas, generando calor por rozamiento, el hombro de la herramienta hace contacto, restringiendo la profundidad de penetración, lo que genera calor por fricción y una zona termomecánica, la placa en movimiento relativo respecto a la herramienta crea un cordón con una microestructura de grano fino totalmente recristalizada.

Uno de los elementos fundamentales en el proceso es el calor generado por fricción en la interfase de la herramienta y el material de la pieza de trabajo. El flujo de calor debe mantener una temperatura en la pieza de trabajo, suficiente para que el material se plastifique y que el pin pueda agitar circularmente el material, pero lo suficientemente bajo para que no se funda, reportado por Mijajlović (2011) y Veljić (2012).

Análisis microestructural de la ZTMA

La evolución de la microestructura durante el proceso de soldadura depende de diferentes parámetros, la composición química y tratamientos térmicos de los materiales a unir. Estos parámetros también definen la entrada de calor y el tamaño de las zonas afectadas en la junta. Los tratamientos térmicos definen la estructura

inicial del material mientras que la composición química y la microestructura permiten definir los mecanismos de endurecimiento y crecimiento o disolución de precipitados. En la Figura 5 se muestra la microestructura de la zona termomecánicamente afectada (ZTMA).

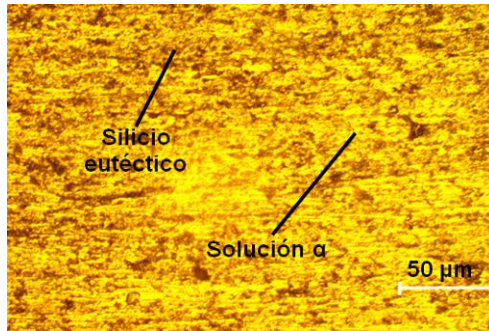


Figura 5 (a). Muestra 1.

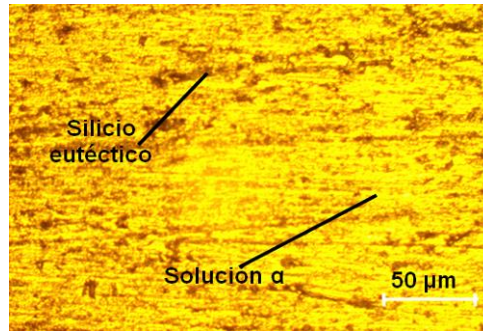


Figura 5 (b). Muestra 2.

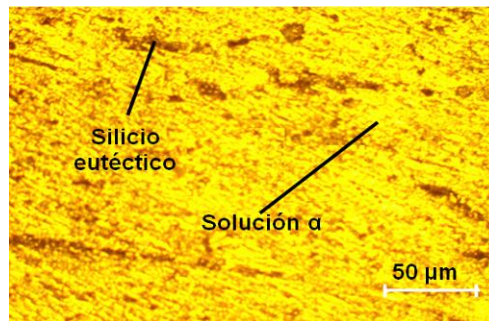


Figura 5 (c). Muestra 3.

La zona termomecánicamente afectada muestra una reorientación de los granos con relación a la muestra patrón, pero con grado de recristalización. En las estructuras se observa la presencia de silicio eutéctico en una matriz de la solución α . Luego del proceso de fricción, la estructura inicial, en la medida que se acerca a la zona afectada térmicamente los granos son más finos por el aporte de calor y subenfriamiento, exhibiendo además un área con crecimiento de grano.

En esta zona, los granos son sometidos a deformación y se observa el flujo de material debido al proceso de fricción. El efecto de la soldadura puede causar una caída en la resistencia del material debido al incremento en las temperaturas pico. Esto causa incoherencia en los precipitados, cuando la temperatura es suficientemente alta, además puede ocurrir alguna reprecipitación durante el enfriamiento, causando valores de dureza bajos en relación con el metal base.

Comportamiento microestructural de la ZAT

En la ZAT el material base sufre un ciclo térmico que modifica su estructura y sus propiedades mecánicas, sin embargo, en esta área no ocurre flujo plástico alguno. En la Figura 6 se muestra el comportamiento microestructural obtenido en esta zona.

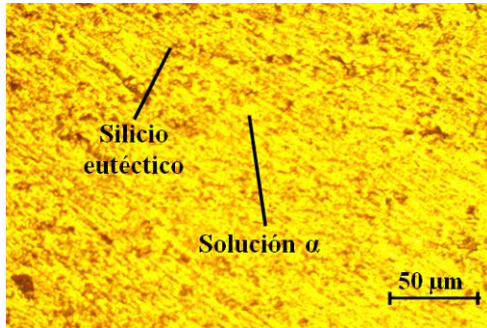


Figura 6 (a). Muestra 1.

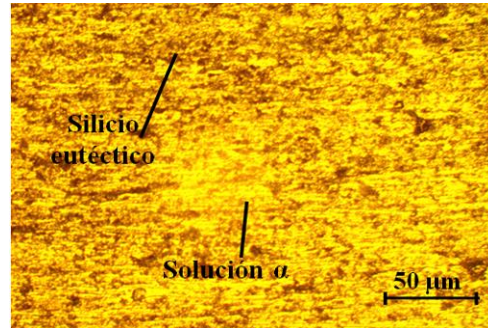


Figura 6 (b). Muestra 2.

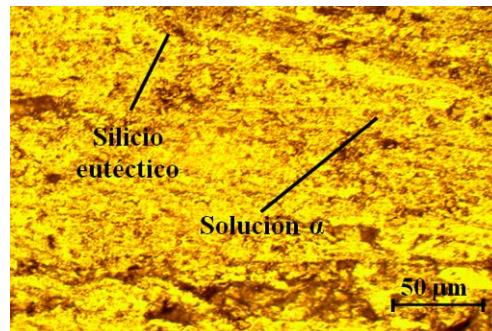


Figura 6 (c). Muestra 3.

En esta área se distingue que el tamaño y distribución de los intermetálicos ubicados en dicha zona muestran cierto grado de uniformidad. También se perciben partículas de silicio eutéctico reprecipitados debido a su disolución por efectos de calentamiento durante el proceso de soldadura, existe un engrosamiento significativo de precipitados y una disminución de su cantidad. Esto se debe a que, si bien los niveles de deformación son menores o nulos, comparados con los existentes en la zona termomecánicamente afectada, el perfil de temperaturas en esta región es suficiente para provocar difusión de los elementos químicos aleantes, modificando el estado inicial de distribución y tamaño de los precipitados.

La causa del tamaño del grano de esta zona se podría considerar como consecuencia de dos eventos simultáneos que se presentan en esta zona de la soldadura: el primero se asocia a la elevada deformación plástica que se genera en el material por el flujo

plástico a que es sometido, situación que promueve una alta velocidad de nucleación de los granos recristalizados. La segunda, se relaciona con que la temperatura alcanzada en dicha zona sea relativamente baja, con lo cual la velocidad de crecimiento de los núcleos resulta baja. Esta combinación de efectos repercute en el pequeño tamaño de grano resultante en tal zona de la soldadura, expuesto en trabajo previo por Nandan, Debroy & Bhadeshia (2008).

Comportamiento microestructural en la zona agitada

El flujo vertical en la ZA es debido a la trayectoria helicoidal formada por el movimiento rotacional y la trayectoria del pin, lo cual justifica los procesos de deformación plástica extrema con altas velocidades de deformación plástica, tensiones altas y la recristalización dinámica consecutiva de la soldadura deformada. En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos en esta zona.

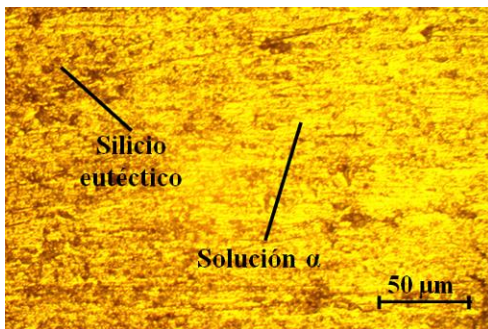


Figura 7 (a). Muestra 1.

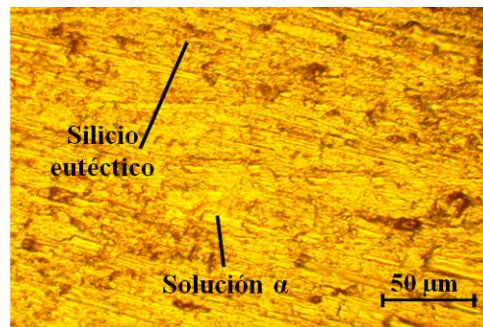


Figura 7 (b). Muestra 2.

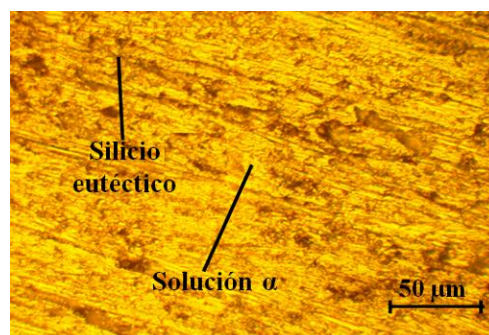


Figura 7 (c). Muestra 3.

En la ZA la microestructura resultante es de pequeños granos equiaxiales, rodeando a otros granos un poco más grandes, característica de la recristalización dinámica ocurrida en esta zona microestructural, donde exhibe un proceso complejo de evolución microestructural. En la región del pin el material sufre deformaciones

plásticas severas a elevadas temperaturas, esto produce recristalización dinámica continua en la ZA.

El tamaño de grano conserva una relación directa con el aporte de calor por unidad de longitud, siendo que entre mayor sea este aporte, se proporcionará más energía a los granos para favorecer su crecimiento. Debido al principio de operación de la soldadura por fricción agitación en esta zona una gran cantidad de partículas dispersoides y constituyentes se fracturan como consecuencia de los altos niveles de deformación y los picos de temperatura que se alcanzan en esta zona, recuperándose las condiciones de dureza del material del material base, según lo reportado por Jata, Sancaran & Ruschav (2000).

Análisis de la microdureza en las diferentes probetas

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de dureza realizado en las diferentes zonas luego del proceso de soldadura por fricción agitación de la aleación AA 1050. Los perfiles de dureza fueron realizados en las diferentes zonas para las diferentes condiciones de soldadura.

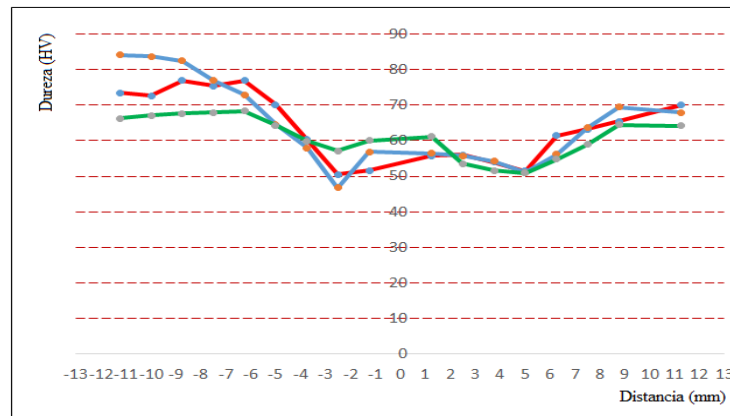


Figura 8. Comportamiento de la dureza en las diferentes zonas.

En la figura se observa la variación de la dureza que experimentan las zonas en las uniones soldadas de las diferentes probetas. Partiendo desde el metal base, la dureza se reduce más en la ZA con respecto a la ZTMA y la ZTA, donde presenta un ligero incremento cerca de la periferia. Para la probeta 2 (línea azul) existe un incremento con respecto a la probeta 1 (línea roja) y la probeta 3 (línea verde), lo cual está en correspondencia con las estructuras y porcentaje de microconstituyentes obtenidos.

Los perfiles de microdureza de las zonas soldadas, en la ZTMA, en todos los casos mostraron una dureza mayor como resultado del endurecimiento por precipitación que se produce en la aleación debido a la presencia del silicio. Esta zona presenta una estructura de grano más fina motivado al rápido enfriamiento del pozo de soldadura. En las aleaciones del grupo 1 el silicio es un elemento que provoca el endurecimiento, teniendo en cuenta que el proceso de laminación le otorga al material acritud, así como la capa alúmina con su alta temperatura de fusión, lo que ha sido expuesto por Sathiya, Aravindan & Noorul (2005).

Conclusiones

Los parámetros establecidos, número de revoluciones, fuerza de contacto, velocidad de desplazamiento, permiten garantizar la unión metalúrgica de la aleación de aluminio AA 1050 en una máquina herramienta convencional.

Las microestructuras obtenidas en la aleación de aluminio AA 1050, luego del proceso de soldadura por fricción agitación, con frecuencia de rotación de 1 200 r/min y velocidad de avance de 30 mm/min están precedidas por la formación de fase α , silicio eutéctico y carburos de silicio, según la zona de la unión.

En el barrido de dureza realizado en las diferentes zonas de la unión soldada, partiendo desde el metal base con 83 HV, se reduce a 48 HV en la ZTMA, con ascenso nuevamente a 58 HV en la ZTA y se reduce a 56 HV en la ZA, asociado al proceso de transformación que ocurre en esta zona.

Referencias bibliográficas

- ARBEGAST, W. 2003. Constitutive analysis, modeling and simulation, In: JIN, Z.; BEAUDOIN, A.; BIELER, T. A. & RADHAKRISHNAN. B. (editors). *Hot deformation of aluminum alloys III*. John Wiley & Sons, Warrendale. 313 p.
- CARRASCO, J.; BERDUGO, I.; OSPINA, R. & UNFRIED, J. 2013. Optimización del diseño y fabricación de herramienta con pin cónico roscado para soldadura por fricción-agitación. *Revista Visión Electrónica* 7(2): 135-144.
- DICKERSON, T.; SHI, Q. & SHERCLIFF, H. 2003. Heat flow into friction stir welding tools. In: 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Park City, Utah, 14-16.

- GALLAIS, C.; DENQUIN, A.; BRECHET, Y. & LAPASSET, G. 2008. Precipitation microstructures in an AA6065 aluminum alloy after friction stir welding: Characterization and modelling. *Materials Science and Engineering, A* 496(21): 77-89.
- JATA, K.; SANCARAN, K. & RUSCHAV, J. 2000. Friction stir welding effect on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050 t-7451. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31A(7): 2181-2192.
- LAKSHMINARAYANAN, A.; ANNAMALAI, V. & ELANGOVAN, K. 2015. Identification of optimum friction stir spot welding process parameters controlling the properties of low carbon automotive steel joints. *Journal of Materials Research and Technology* 4(3): 262-272.
- MAHMOUD, T. & KHALIFA, T. 2014. Microstructural and mechanical characteristics of aluminum alloy AA5754 friction stir spot welds. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23(3): 898-905.
- MIJAJLOVIĆ, M. 2011. Mathematical model for analytical estimation of generated heat during friction stir welding. Part 1. *Journal of Balkan Tribological Association* 17(2): 179-191.
- MIROSLAV, M.; NENAD, P.; SLOBODAN, J.; DRAGAN, J. & MIODRAG, M. 2012. Experimental studies of parameters affecting the heat generation in friction stir welding process. *Thermal Science* 16(2): S405-S417.
- NANDAN, R.; DEBROY, T. & BHADESHIA, H. 2008. Recent advances in friction stir welding process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science* 53(20): 980-1023.
- PAIDAR, M.; KHODABANDEH, A.; NAJAFI, H. & SABOUR, A. 2014. Effects of the tool rotational speed and shoulder penetration depth on mechanical properties and failure modes of friction stir spot welds of aluminum 2024-T3 Sheets. *Journal of Mechanical Science and Technology* 28(12): 123-131.
- PEEL, M.; STEUWER, A.; PREUSS, M. & WITHERS, P. 2003. Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminum AA5083 friction stir welds. *Acta Materialia* 51(16): 4791-4801.

- RAJAMANICKAM, N.; BALUSAMY, V.; REDDY, G. & NATARAJAN, K. 2009. Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds. *Mater. Design* 30(6): 2726-2731.
- RIAHI, M. & NAZARI, H. 2010. Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6 via numerical simulation. *Int. J. Advanced Manuf. Technol.* 55(15): 143-152.
- SATHIYA, P.; ARAVINDAN, S. & NOORUL, A. 2005. Mechanical and metallurgical properties of friction welded AISI 304 austenitic stainless steel [J]. *Int J Adv Manufact Technol* 26(10): 505-511.
- SONG, M. & KOVACEVIC, R. 2003. Thermal modelling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. *Int. J. Machine Tools & Manuf* 43(11): 605-615.
- STEUWER, A.; PEEL, M. & WITHERS, P. 2006. Dissimilar friction stir welds in 5083-6082: The effect of process parameters on residual stress. *Materials Science and Engineering A* 441(1-2): 187-196.
- SUTTON, M.; REYNOLDS, P.; WANG, D. & HUBBARD, C. 2002. Study of residual stresses and microstructure in 2024-T3 aluminum friction stir butt welds. *Journal of Engineering Materials and Technology* 124(2): 215-225.
- SHI, Q.; DICKERSON, T. & SHERCLIFF, H. 2003. Modelo termo-mecánico por EF de la soldadura por fricción agitación de AL2024 incluyendo la carga axial sobre la herramienta. En: 4to Simposio Internacional de Soldadura por Fricción Agitación.
- VELJIĆ, D. 2012. A coupled thermo-mechanical model of friction stir welding. *Thermal Science* 16(2): 527-534.