



UNIONES POR REMACHE DE ALEACIONES 2024 MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA FSSW

Cindy E. Morales Bazaldúa¹, Argelia Fabiola Miranda Pérez¹, Gladys Yerania Pérez Medina², Irene Calliari³, David Salvador González González⁴

^{1,2}Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Saltillo, México, ³Universidad de Padua, Padova, Italia, ⁴Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, México
e-mail: cindy.morales@comimsa.com, argelia.miranda@comimsa.com, gladysperez@comimsa.com, irene.calliari@unipd.it, david.gonzalez@uadec.edu.mx

RESUMEN

En el campo aeronáutico, los materiales deben cumplir requerimientos específicos como: desempeño excepcional, estabilidad dimensional, alta resistencia a la corrosión y desgaste, y alta resistencia. El objetivo de los procesos de unión es preservar las propiedades de los materiales lo mejor posible. Los procesos de soldadura en estado sólido surgen como una alternativa de manufactura que preservan la eficiencia de la unión en aleaciones de aluminio, especialmente el proceso de soldadura de puntos por fricción agitación (FSSW) para estructuras con remaches empleados en la industria aeronáutica. Este estudio fue desarrollado con el objetivo de evaluar la soldabilidad de uniones efectuadas mediante FSSW de aleaciones de aluminio de la serie 2024. El experimento se efectuó usando un centro de maquinado con CNC, una herramienta de carburo de tungsteno de configuración cilíndrica para el pin. Las pruebas realizadas variando la velocidad rotacional y manteniendo la velocidad axial y la profundidad de hundimiento constante. Para la evaluación del flujo de calor y la deformación plástica se realizó una caracterización microestructural en todas las zonas características del proceso de soldadura en estado sólido, la zona afectada termomecánicamente presenta zonas de granos recristalizados a lo largo de la soldadura, y algunos precipitados de aluminio fueron analizados mediante espectroscopia de energía dispersiva (EDS) en el microscopio electrónico de barrido.

PALABRAS CLAVES: SEM, FSSW, Aleaciones de Aluminio, 2024 T3, dislocación por etch pit

RIVETED 2024 ALUMINUM ALLOYS THROUGH FRICTION STIR SPOT WELDING

ABSTRACT

In aeronautical field the materials must fulfill specific requirements, such as, exceptional performance, dimension stability, wear and corrosion resistance, and high strength. The objective of the joining processes is to keep materials properties as stable as possible. Solid state joining process arises as a manufacturing alternative to preserve joint efficiency in aluminum alloys, especially Friction Stir Spot Welding (FSSW) for riveted structures in aeronautic industry. This study was carried out in order to evaluate the weldability of FSS welds of 2024 Aluminum alloy. The experiment was carried out using a CNC machine and a tungsten carbide tool with a cylindrical pin. The tests were performed varying the rotational speed, maintaining the axial feed rate and plunging depth constant. Microstructural characterization was accomplish to evaluate the heat and plastic flow in all the distinguishable zones, the thermomechanical affected zone presents recrystallized grains along the weld, some aluminum precipitates were analyzed by means of the Energy-dispersive Spectroscopy on the Scanning Electron Microscope.

KEY WORDS: SEM, FSSW, Aluminum Alloys, 2024 T3, dislocation etch pit

1. INTRODUCCIÓN

La industria aeronáutica cubre un campo extenso de aplicaciones como: estructuras de aeronaves, motores, turbinas, materiales y tecnologías de manufactura, diseño, cabinas interiores y muchas más [1]. Debido a la demanda creciente de proveer nuevos materiales para mejor desempeño de sistemas aeronáuticos, las



aleaciones ligeras son comúnmente empleadas y mayormente estudiadas [1, 2]. Estas aleaciones poseen propiedades como alta resistencia a la fatiga, bajo peso estructural, alta tenacidad a la fractura y superplasticidad [2, 3]. Por ejemplo, las aleaciones Al-Cu-Mg fueron primeramente desarrolladas para aplicaciones de manufactura de estructura del avión [4, 5], y ampliamente utilizadas para las estructuras de viento y fuselaje bajo tensión [6]. La aleación tratada térmicamente 2024-T3, es de alta resistencia con cobre (Cu) como elemento principal de aleación en su composición química [6] y es de fácil manufacturabilidad. Sin embargo, al momento de unir esta aleación puede convertirse en un verdadero reto ya que mediante el uso de procesos de soldadura convencionales por fusión puede sufrir distorsión, precipitación de intermetálicos dañinos [7, 8] y deformación a consecuencia del alto coeficiente de expansión térmica [9]. Los procesos de soldadura en estado sólido surgen como una alternativa para la unión de aleaciones ligeras desde 1991, procesos inventado por el Instituto de Soldadura (TWI) en Reino Unido, fue llamado Soldadura por Fricción Agitación (FSW), que es un proceso de soldadura en estado sólido donde la unión no alcanza la fusión de sus componentes. El proceso está basado en el principio de obtener temperaturas relativamente altas para forjar dos componentes de aluminio empleando una herramienta que gira sobre su mismo eje a lo largo de la unión [10]. Una alternativa reciente para este proceso es el proceso de soldadura de puntos por fricción agitación (FSSW), y como reemplazo para unión de componentes por remache pero en estado sólido. Es considerado una competencia competitiva del proceso de soldadura de puntos por resistencia (RSW) para uniones de aluminio, la unión se realiza entre materiales adyacentes en la configuración de solape, evitando remaches mecánicos y bloqueo de palanca [11 – 13]. Diversos estudios se han realizado describiendo el impacto de los parámetros usando el proceso FSSW para unir estas aleaciones [13 – 15], sin embargo, el presente trabajo se ocupa de una caracterización microestructural de la soldabilidad de las uniones por remache de la aleación 2024-T3 usando el proceso FSSW mediante un centro de maquinado, sobresaltando las dislocaciones presentes y evidenciadas en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

2. MATERIALES Y MÉTODO

Uniones FSSW de la aleación AA2024 T3

El aluminio AA2024 T3 usado en esta investigación fue de una aleación comercial de composición descrita en la Tabla 1 y propiedades mecánicas mostradas en la Tabla 2. La placa fue recibida de 2 mm de espesor, y más tarde fue unida en traslape como se muestra en la Fig. 1. Esta aleación es especialmente empleada en estructuras aéreas y fuselaje debido a la excelente resistencia mecánica que presenta, y que demandan esas partes de la aeronave [16]. Los remaches fueron realizados a 20 mm de distancia entre ellos (ver Fig. 1a) con 3 mm de profundidad de inmersión para asegurar la penetración mínima de la unión.

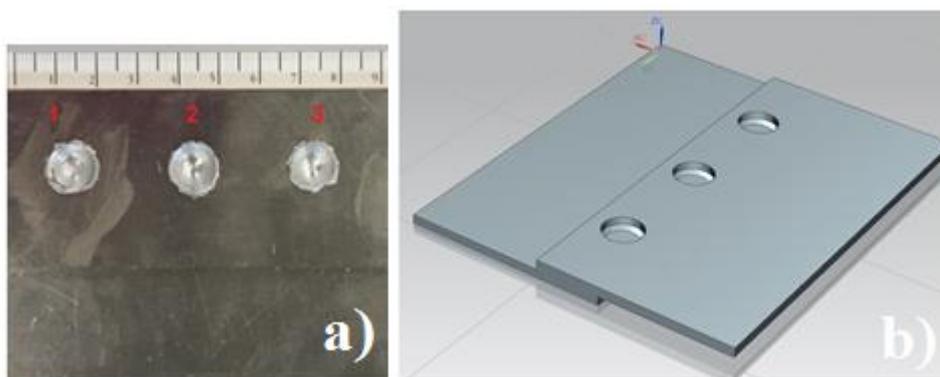


Fig. 1 Soldadura a traslape de AA2024 T3 mostrando los remaches realizados



Tabla 1: Composición química de AA2024 T3 utilizada en esta investigación (% ep).

Sn	Mg	Pb	Zn	Cu	Ni	Fe	Mn	Cr	Ti	Si	Al
0.01	1.41	0.01	0.14	3.76	0.01	0.14	0.48	<0.01	0.02	0.11	Bal.

Tabla 2: Propiedades mecánicas de la aleación AA2024 T3.

Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	% Elong.	Capacidad calorífica (J/g °C)	Conductividad térmica (W/mK)	Dureza Vickers (HV)
2.78	440	290	10	0.875	121	137

Las soldaduras fueron hechas en un centro de maquinado Bridgeport con un CNC VMC 760XP3, usando una herramienta de carburo de tungsteno (WC), un sistema de sujeción para las placas de configuración a traslape y las variaciones de los parámetros fueron en función únicamente de la velocidad de rotación de la herramienta (ver Tabla 3). El sistema completo es mostrado en la Fig. 2, cabe destacar que la velocidad de rotación fue el parámetro con variación debido a la influencia que se ha discutido ampliamente en literatura [13, 15, 17].

Tabla 3: Parámetros empleados para las uniones por remache de AA2024 T3.

FS spot	Velocidad de rotación (rpm)
1	1200
2	1000
3	2100

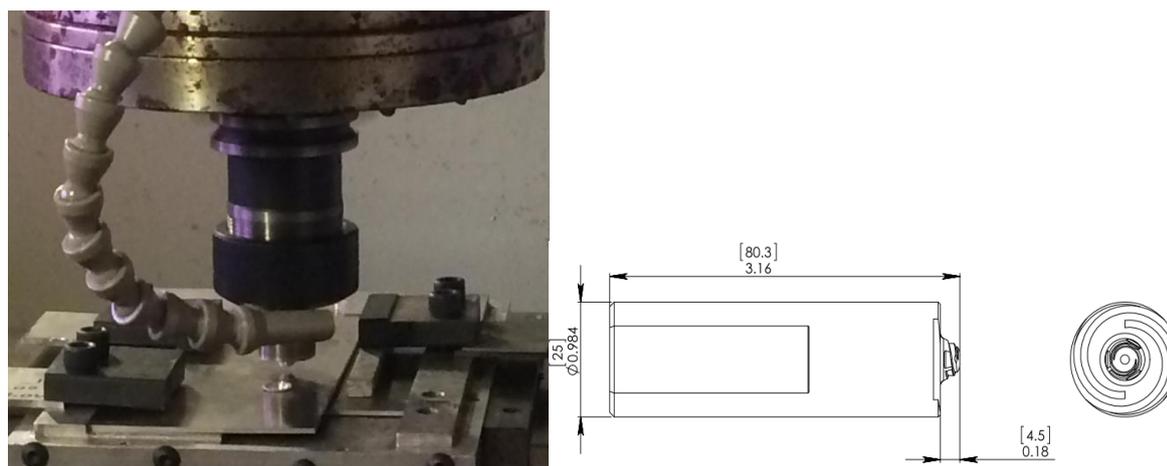


Fig. 2 Centro de maquinado CNC machine y herramienta empleados.

Técnicas de caracterización

Las placas fueron cortadas empleando un Leco VC-500, montadas en baquelita, sufrieron una preparación tradicional de lijado y pulido usando alúmina de 1 μm alrededor de 30 minutos y después fueron atacadas



empleado ácido fluorhídrico por 20 segundos. Las microestructuras fueron examinadas usando un microscopio óptico Olympus (OM) y un SEM Jeol operando a 15kV. Para mediciones de composición química se realizaron escaneos en línea y mapa usando mediciones de energía dispersiva que viene añadido al SEM. Las mediciones de dureza fueron desarrolladas en vickers empleando un microdurómetro, las identificaciones fueron realizadas a lo largo de la soldadura abarcando todas las zonas generadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Caracterización microestructural del metal base

La microestructura de la aleación AA 2024 T3 se muestra en la Fig. 3, claramente se expone la precipitación de la fase secundaria θ' en el metal base.

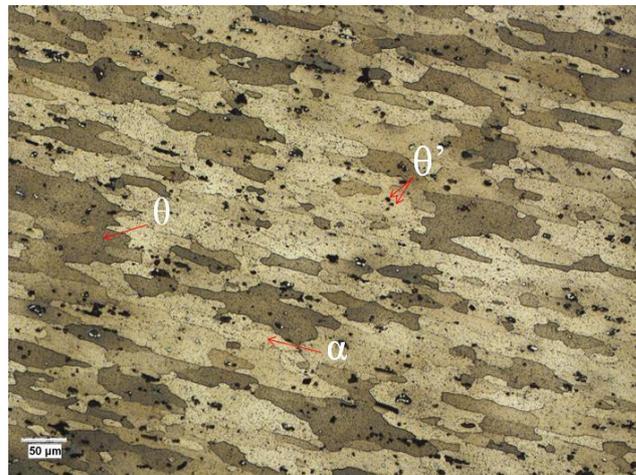


Fig. 3 Microscopía óptica del metal base previo a la soldadura, mostrando las fases más comunes.

Las diferentes fases son evidenciadas en la Fig. 3, por ejemplo, la fase α se refiere a aquella en solución sólida de cobre y otros elementos de aleación en la red cúbica centrada en el cuerpo (FCC) del aluminio. Sin embargo, la fase θ es el compuesto intermetálico conformado por la siguiente fórmula química CuAl_2 [18, 19]. Es importante mencionar que los precipitados de θ' dispersos a lo largo de la microestructura del material se ajustan a la fórmula CuAl_2 , no obstante, la distinción es que aparece como una dispersión de precipitados finos distribuidos por toda la microestructura y no como una colonia de precipitados como la fase θ [20]. De hecho, los precipitados θ' son la evidencia del tratamiento térmico T3 que se efectúa a este tipo de aleación, 1) solución tratada, 2) trabajado en frío y 3) templado [18].

Puntos de fricción agitación de AA2024 T3

La macrografía de las zonas de la soldadura se presenta en la Fig. 4. La penetración de todas las muestras fue menor para observar la influencia de los parámetros y el impacto en la microestructura. La Fig. 5 presenta la forma representativa de la soldadura FSSW y pueden observarse todas las zonas del proceso. La zona de agitación (SZ) donde ocurre la recristalización dinámica, la unión del material se puede observar en esa zona. La recristalización dinámica es causada por el flujo del material durante el proceso de unión [21], seguido de nucleación y crecimiento de nuevos granos. En la zona afectada termomecánicamente (TMAZ) la entrada de calor y la deformación plástica es menor que en la SZ, otra zona que se puede distinguir es la afectada por el calor (HAZ) en donde el material solo alcanza cierta temperatura experimentando ciclos térmicos sin deformación plástica.

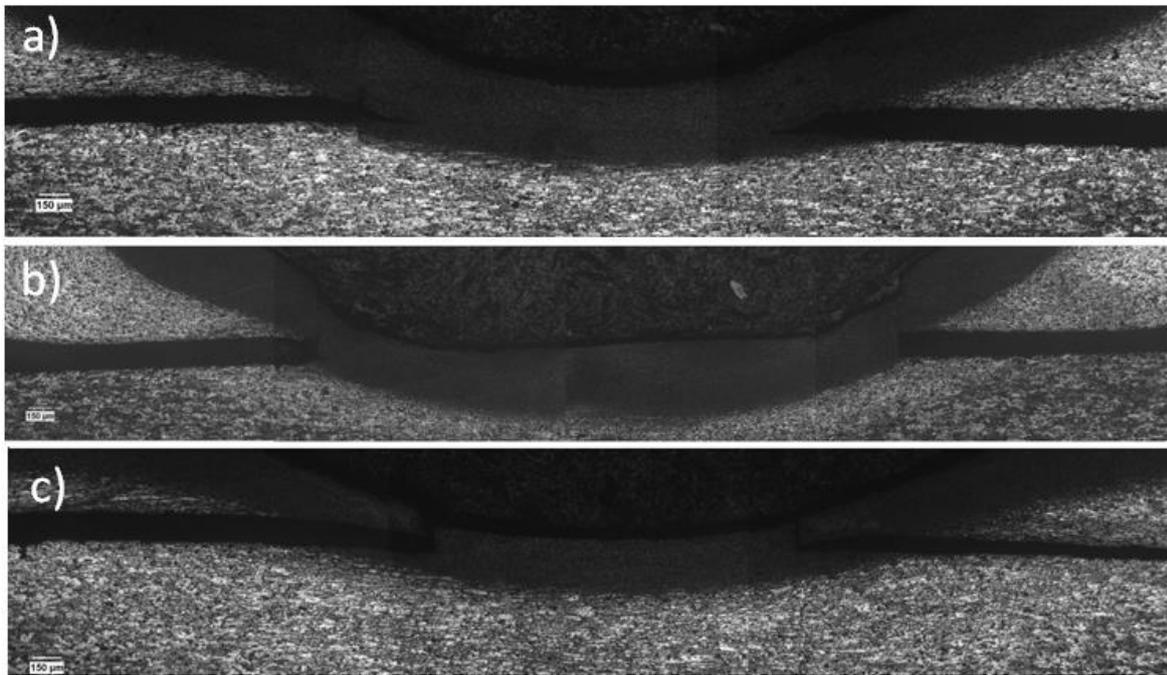


Fig. 3 Macroestructura de las uniones por remache de a) muestra 1, b) muestra 2 y c) muestra 3.

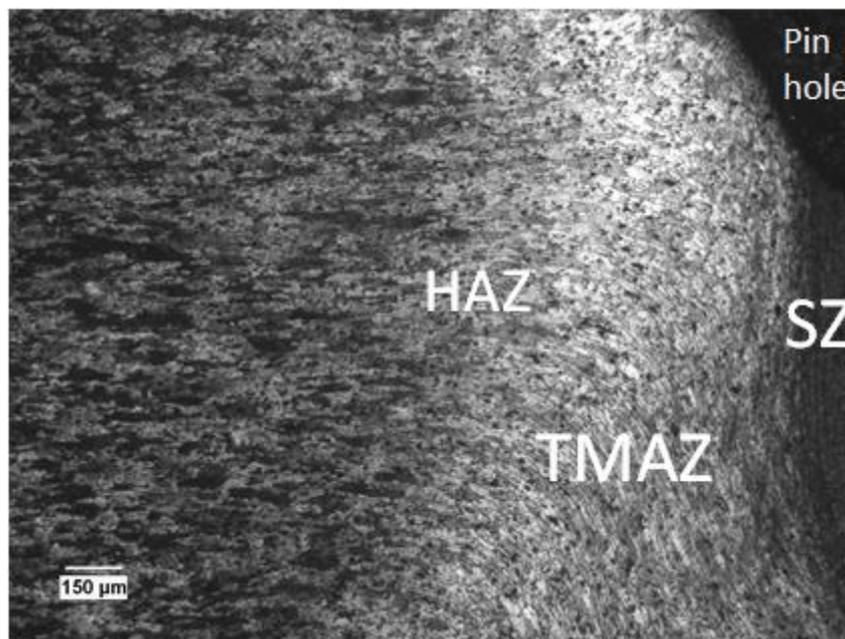


Fig. 4 OM de la sección transversal de uniones AA2024

La Fig. 6 presenta micrografías electrónicas de barrido de la muestra 1 separadas por las diferentes zonas generadas por el proceso. En la SZ (ver Fig. 6b), se puede observar estructuras de grano fino debido al mecanismo de recristalización severo generado por el proceso, que es generalmente libre de dislocaciones, esta estructura fina concuerda con los resultados de microdureza presentados más adelante (Fig. 8) donde se puede



observar el decremento de la microdureza. Más adelante, en el inicio de la TMAZ está representado en la Fig. 6c donde se pueden visualizar pequeñas partículas blancas distribuidas en los granos refinados. Estas partículas blancas fueron analizadas químicamente usando un haz de 1 μm de diámetro y fueron reconocidas mediante mediciones EDS como inclusiones de Al-Cu. De acuerdo con la Tabla 4, el porcentaje atómico corresponde a aquellas obtenidas en [20] como la fase θ' .

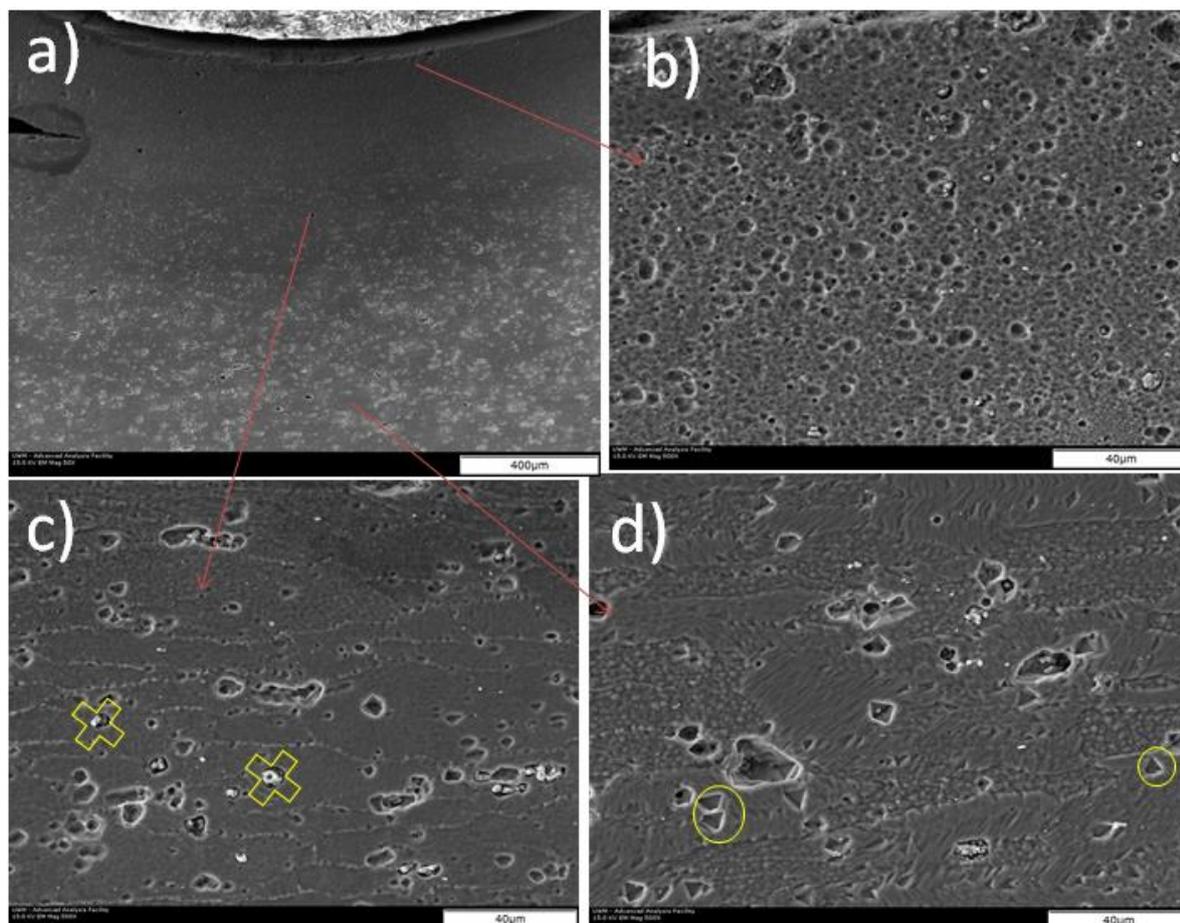


Fig. 5 Micrografías SEM de las diferentes zonas de FSSW: a) SZ, b) TMAZ, c) Transición TMAZ-HAZ.

Tabla 4. Composición química (% at.) de las partículas secundarias Al-Cu

Elemento	Dev. Std.	% Atómico	k-Ratio
Al	1.82	70.52	0.283
Cu	2.93	29.48	0.457

En la Fig. 6d, la cual es representativa de la zona de transición entre la TMAZ y la HAZ, se evidencian algunos triángulos en las micrografías SEM. Estas observaciones conducen el desarrollo microestructural de dos procesos principales, el térmico y el termomecánico. Los triángulos pueden ser definidos como dislocaciones debido a picaduras de grabado [22] (etch pit). Estas dislocaciones fueron evidenciadas ya que el reactivo de ataque puede evidenciar todas las dislocaciones que surgen en la superficie. Esto se puede entender por el hecho de que cuando el material es deformado plásticamente, una cantidad del trabajo realizado se expande en forma de calor y la energía almacenada se retiene dentro del material produciendo una gran cantidad de defectos cristalinos (dislocaciones). Se sabe que si una dislocación se mueve cuando se aplica una tensión al cristal, la distancia recorrida depende del estrés aplicado y el tiempo que se aplica la tensión. Por otra parte, la



nueva posición de la dislocación se revela como un hoyo inferior afilado como se ve en la Fig. 6d. Estas dislocaciones disminuyen en la SZ a causa de la recrystalización, pero se presentan en cantidades grandes en la transición TMAZ/HAZ. La muestra 3 (ver Fig. 7) que es en realidad la soldada con la mayor velocidad de rotación, presenta mayor número de dislocaciones por etch pit, este movimiento de dislocaciones fue producido por la energía almacenada durante la deformación plástica.

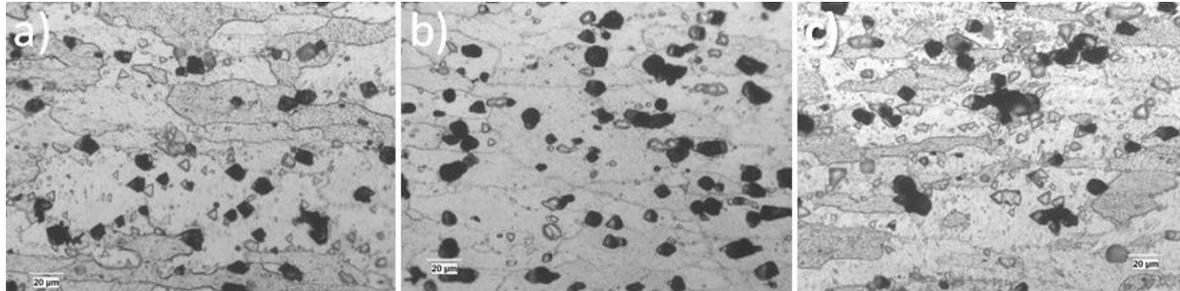


Fig. 6 Micrografías OM de la zona TMAZ/HAZ: a) muestra 1, b) muestra 2 y c) muestra 3.

Evaluación de microdureza

La Fig. 8 muestra el efecto en la microdureza como consecuencia de la deformación plástica producida para el FSSW en el AA2024. Los resultados revelaron que las uniones tienen una microdureza menor en el SZ que en el metal base. Todas las zonas tienen una disminución de la microdureza debido a la recrystalización dinámica generada para la deformación plástica y la distribución de la fase θ' . Es por lo que, el desplazamiento de las dislocaciones produce el incremento de la energía almacenada que tiene valores de microdureza más altos en la TMAZ/HAZ.

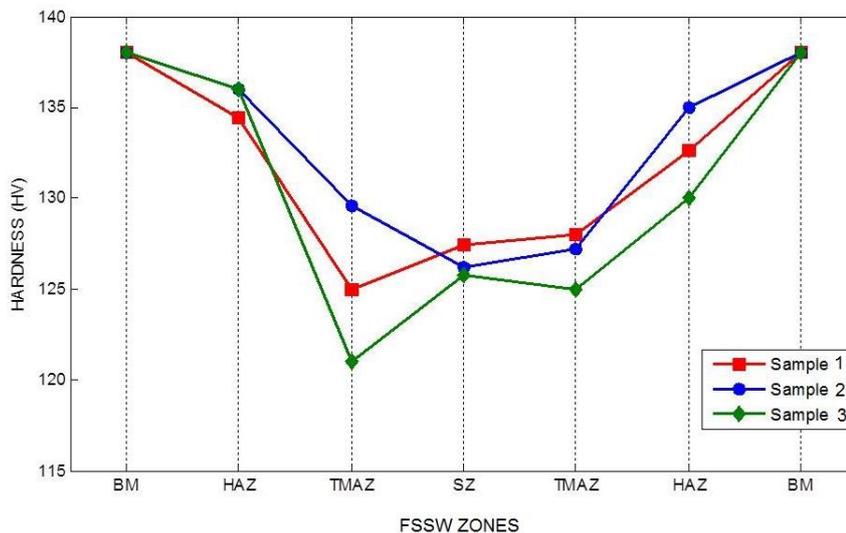


Figure 7. Valores representativos de microdureza de las uniones de FSS AA2024

4. CONCLUSIONES

Se investigó la soldabilidad del AA2024 T3 en el presente trabajo. Se discutió la influencia de la velocidad de rotación en la microestructura y la evaluación de microdureza. Con base en el estudio presentado, los resultados importantes se pueden resumir de la siguiente manera:



- a) Para lograr una fricción satisfactoria, la soldadura del punto de agitación requiere una selección especial de los parámetros. La unión del AA2024 se logró con los parámetros de proceso seleccionados.
- b) La microestructura de las soldaduras del FSSW presenta las zonas principales, la zona agitada, la zona afectada termomecánicamente y la zona afectada por el calor. El SZ presenta granos recristalizados por la deformación plástica producida por el proceso, dando una estructura fina dentro de pequeñas inclusiones de Al-Cu distribuidas en la matriz. En el TMAZ, se observó la fase θ' que aumenta la resistencia en la aleación de aluminio.
- c) Se detectaron dislocaciones por picaduras en el OM y SEM en todas las muestras, el mayor de dislocaciones se presentó en la muestra 3 debido a la velocidad de rotación más alta que provoca el desplazamiento de los defectos. Las dislocaciones fueron evidenciadas solo en la transición TMAZ / HAZ
- d) En la microdureza, las evaluaciones concluyen que las zonas donde se produce la recristalización disminuyen la energía almacenada y producen una estructura libre de dislocación con granos refinados.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Dr. Hugo López Ferreira, al Dr. Héctor Hernández García y al Dr. Eduardo Hurtado Delgado por las valiosas sugerencias sobre este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] LECCE, Leonardo, CONCILIO, Antonio. *Shape Memory Alloy Engineering for Aerospace, Structural and Biomedical Applications*. Butterworth-Heinemann, 2015. 448 pp. ISBN 978-0-08-099920-3
- [2] NAKAI, Manabu, ETO, Takehiko. "New aspects of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications". *Materials Science Engineering A*, 2000, vol. 285, núm. 1-2, pp 62 – 68.
- [3] ABOTULA, Sandeep. et. al. "Dynamic Constitutive Behavior of Aluminum Alloys: Experimental & Numerical Studies". En actas de Society for Experimental Mechanics Series Annual Conference, 2011, pp. 195 – 205.
- [4] MAJZOBI, G.H., KASHFI, M., BONORA, N., IANNITTI, G., RUGGIERO, A., KHADEMI, E., "Damage characterization of aluminum 2024 thin sheet for different stress triaxialities". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 18, núm. 3, pp. 702-712.
- [5] LIN, Y.C., LI, Lei-Ting, FU, Yan-Xiang, JIANG, Yu-Qiang. "Hot compressive deformation behavior of 7075 Al alloy under elevated temperature". *Journal of Materials Science*, 2012, vol. 47, núm. 3, pp. 1306 – 1318.
- [6] DAVIS, J. R. *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International. Handbook Committee, 1993. 784 pp. ISBN 978-0-87-170496-2
- [7] MOHAMED, A. B., ZNAIDI, A., BAGANNA, M., NASRI, R. "The Study of the Hardening Precipitates and the Kinetic Precipitation its Influence on the Mechanical Behavior of 2024 and 7075 Aluminum Alloys Used in Aeronautics". En actas de Conference on Multiphysics Modelling and Simulation for Systems Design, MMSSD, 2015, vol. 2, pp. 219-228.
- [8] ZNAIDI, A., "Formulation et identifications des lois de comportements anisotropes d'un alliage d'aluminium 2024T3", *Marseille Plasticité*, 2009.
- [9] FERJUTZ, K., DAVIS, J.R., WHEATON, N.D., *Welding, Brazing, and Soldering*. ASM Handbook. ASM International, 1993, 1299 pp. ISBN 978-0871703828.
- [10] MISHRA, R. S., KUMAR, P. S. N., *Friction Stir Welding and Processing*. Springer International Publishing , 2014. 338 pp. ISBN 978-3-319-07042-1
- [11] IWASHITA, T. *Method and apparatus for joining*. US Patent 6,601,751 B2 2003, 2003
- [12] WANG, D., LIU, S., CAO, Z., "Study of friction stir welding of aluminum" *J Mater Sci.*, 2004, vol. 39, pp. 689–1693.
- [13] KARTHIKEYAN, R., BALASUBRAMANIAN, V. "Predictions of the optimized friction stir spot welding process parameters for joining AA2024 aluminum alloy using RSM". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, vol. 5, pp.173-183.
- [14] GERLICH, A., SU, P., YAMAMOTO, M., NORTH, T.H., "Effect of Welding Parameters on the Strain Rate and Microstructure of Friction Stir Spot Welded 2024 Al Alloy". *J. Mater. Sci.*, 2007, vol. 42, pp. 5589–5601.
- [15] PAIDAR, M., KHODABANDEH, A., NAJAFI, H., ROUH-AGHDAM, A. S., "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". *J. of Mech. Sci. and Tech.*, 2011, vol. 28, núm. 12, pp 4893 – 4898.



- [16] HATCH, J. E., *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. ASM International, 1984. 424 pp. ISBN 978-0-87170-176-3.
- [17] UPADHYAY, P., REYNOLDS, A. P., “Thermal Management in Friction-Stir Welding of Precipitation-Hardened Aluminum Alloys”. P. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 2015, vol. 67, num. 5, pp. 1022 – 1031.
- [18] HIGGINS, R.A., *Engineering Metallurgy*. Edward Arnold Publisher, 1983. 560 pp. ISBN 978-0340568309
- [19] POLMEAR, I.J., *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*, N.Y., Butterworth-Heinemann , 1995, 544 pp. ISBN 978-0-08-099431-4.
- [20] HUDA, Z., TAIB, N. I., ZAHARINIE T., “Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy”. *Mat. Chem. Phy.* 2009, vol.113, pp. 515 – 517.
- [21] CUEVAS MATA, O., MIRANDA PÉREZ, A. F., GARCÍA VÁZQUEZ F. J., PÉREZ MEDINA G. Y., REYES VALDÉS F. A., “Effect of FSW parameters on microstructure of aluminum matrix composite joints”. *In: Materials Characterization*. Springer International, pp.139-146.
- [22] VOORT, G. F. *Metallography, Principles and Practice*. ASM International, 1984. 752 pp. ISBN 978-0-87170-672-0

SOBRE LOS AUTORES

La M.T. Cindy Estefanía Morales Bazaldúa es Ingeniero Químico, Especialista en Soldadura Industrial y egresada del posgrado de Maestría en Tecnología de la Soldadura Industrial impartido en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales en Saltillo, Coahuila, México. Actualmente trabajadora en la gerencia de Desarrollo Humano de Corporación, en el área de Desarrollo de Proyectos.

La Dra. Argelia Fabiola Miranda Pérez es Ingeniero Químico con Doctorado en Ingeniería Industrial realizado en la Università Degli Studi Di Padova en Padua Italia, es actualmente Profesor-Investigador en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales así como investigador perteneciente del Sistema Nacional de Investigadores, nivel 1.

La Dra. Gladys Yerania Pérez Medina es Ingeniero Industrial con Doctorado en Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Actualmente se desempeña como profesor investigador del programa de Posgrado en Soldadura Industrial y pertenece al Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1.

La Dra. Irene Calliari, es Física de formación y Profesora Asociada de la Universidad de Padua en Italia. Colabora en el Departamento de Ingeniería Industrial en el área de metalurgia y bienes culturales. Cuenta con más de 110 publicaciones en revistas de alto prestigio y es investigadora internacional consolidada.

El Dr. David Salvador González González es Ingeniero Industrial con Doctorado en Ingeniería Industrial y de Manufactura, egresado del Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología en la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales en Saltillo, Coahuila, México. Actualmente es profesor-investigador en el área de Posgrado de la Corporación y docente en la Facultad de Sistemas de la Universidad Autónoma de Coahuila.