MEJORAMIENTO SUPERFICIAL DE LA ALEACIÓN DE MAGNESIO AZ31B MEDIANTE EL PROCESAMIENTO POR FRICCIÓN-AGITACIÓN

J. A. Ávila [(1), (3)], K. J. Quintana [(1), (3)], N. A. De Sánchez [(1), (2)], F. Franco [(3), (4)].

(1) Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales,
(2) Departamento de Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente,
(3) Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle,
(4) Grupo de Investigación de Materiales Compuestos, Universidad del Valle.

E-mail: ffrancoa@univalle.edu.co

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos de la evaluación del comportamiento del procesamiento superficial por fricción-agitación (PFA) en la aleación de magnesio AZ31B, mediante los análisis de microdureza, análisis metalográfico en niveles macro y micro, análisis de desgaste y coeficiente de fricción utilizando el Ball on Disk, con el objetivo de caracterizarla y cuantificar los efectos superficiales que este tipo de soldadura tiene sobre el material, comparándolos con el metal base.

Tópico 2: Materiales Metálicos
Palabras clave: Procesamiento por fricción-agitación, Aleación de magnesio, Desgaste superficial.

1. INTRODUCCIÓN

La técnica de modificación superficial de aleaciones metálicas mediante el procesamiento por fricción-agitación, PFA, es una alternativa tecnológica de fácil aplicación, que permite mejorar superficialmente las propiedades mecánicas y químicas del material, como consecuencia del refinamiento microestructural resultante de la severa deformación plástica y la recristalización dinámica sufrida por el material procesado a alta temperatura.
Este proceso está basado en la técnica de soldadura por fricción-agitación [1,2] (FSW, por sus siglas en ingles), en la cual se usa una herramienta rotacional, que consiste en un cuerpo cilíndrico roscado en su extremo, con el fin de permitir el calentamiento por fricción y la subsiguiente mezcla del material en estado sólido, pero a diferencia del proceso de soldadura en el que se obtienen uniones soldadas, en esta técnica se trabaja sobre la superficie de una lámina para generar una capa o "recubrimiento" con propiedades mejoradas.
El creciente interés por el uso del magnesio en la industria del transporte aéreo y terrestre para reducir el consumo de combustible y de emisiones contaminantes, ha tenido como limitación la baja resistencia mecánica y la pobre ductilidad de estas aleaciones en estado de fundición, debido a la presencia de porosidad, estructuras dendríticas bastas y fases eutécticas en el material. [3, 4].
Recientemente, la investigación del PFA aplicado sobre aleaciones base Magnesio ha demostrado que puede conseguirse la homogenización microestructural efectiva y el refinamiento del grano como resultado de la severa deformación plástica en caliente y la consecuente recristalización dinámica. [5, 6]. La modificación microestructural del material depende de los parámetros del proceso tales como temperatura, velocidad rotacional, velocidad de avance, profundidad, sostenimiento y geometría de la herramienta; estos parámetros permiten disminuir el tamaño de grano y homogenizar su distribución, adicionalmente afecta propiedades mecánicas como la dureza y la resistencia del material [7].
Gracias a las ventajas obtenidas mediante este procesamiento se está aplicando extensamente en diferentes aleaciones a nivel industrial. La modificación microestructural mediante FSP ha sido aplicado exitosamente sobre aleaciones fundidas de aluminio A356 y A319, produciendo un significativo incremento en la resistencia mecánica y en la ductilidad y en la vida a fatiga como resultado del extensivo refinamiento de grano, la fractura y disolución de las partículas de segundas fases gruesas y la eliminación de la porosidad.[8].
La modificación microestructural mediante FSP ha resultado también una efectiva manera de mejorar las propiedades de laminas metálicas de aleaciones de magnesio AZ31B a través del refinamiento del grano por

efecto de la recristalización dinámica y la homogenización microestructural que se refleja en una mejora sustancial en la formabilidad del material especialmente a altas temperaturas. [9].
Debido a las ventajas que ofrece el FSP, en esta investigación se estudio el efecto superficial de esta técnica en la aleación de magnesio AZ31B, comparándola con el material en estado de suministro, este comportamiento logró determinarse mediante análisis macro y micro del material procesado y el metal base, pruebas de microdureza y ensayo de Ball-on-Disk a partir del cual fue posible determinar el coeficiente de fricción y el desgaste del material por análisis de perfilometría.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se utilizaron laminas de la aleación de magnesio AZ31B, cortadas de perfiles extruidos en caliente, con dimensiones de 90 x 120 x 3.2 mm de espesor. La composición química del material base obtenida por análisis de fluorescencia se presenta en la Tabla 1.
Se depósito sobre las laminas una primera capa de cordones adyacentes y luego una segunda capa superpuesta de tres cordones cada una, como se observa en la Figura 1, usando una Fresadora Universal marca Cervinia de 4HP, bajo los siguientes parámetros: velocidad de rotación de 1800 rpm, velocidad de avance de 250 mm/mm y una herramienta de acero rápido con dureza mínima de 50 HRC con un pin cilíndrico roscado de 4,5 mm de diámetro y 2,9 mm de altura.

Tabla 1. Composición química (% peso) de la aleación de magnesio AZ31B

Al	Mg	Fe	Mn	Si	Zn
2.8	Balance	0.007	0.52	0.09	0.52

El análisis metalográfico se realizó sobre la sección transversal a los cordones de soldadura de las muestras. El desbaste inicial de la superficie se hizo con papeles de lija de carburo de silicio con grano decreciente hasta la No. 2000. El pulido mecánico se realizó sobre paños con abrasivo de alúmina de grano 3, 1 y 0,05 micras para dar un acabado espejo y finalmente fue atacada para revelar la microestructura con reactivo acético-picral (10mL de acido acético (99%), 4.2 g acido pícrico, 10mL H_2O, 70mL de etanol (95%)). El análisis microestructural se realizo mediante un microscopio óptico Olympus PMEU.
Las pruebas de microdureza se realizaron sobre probetas realizadas de un solo cordón y de dos cordones superpuestos, para determinar el efecto de la segunda pasada sobre la microestructura refinada de la primera pasada. Se realizaron barridos lineales a través de los cordones a la altura de un cuarto del espesor desde la superficie de la placa en un Micro-durómetro Zwick/Roell Indentec ZHV1-m con carga de 100g y tiempo de sostenimiento de 10s.
El ensayo de Ball-on-Disk se realizó a la aleación AZ31B en estado de suministro y al material procesado, con el fin de evaluar el efecto del PFA sobre el coeficiente de rozamiento del material sobre un recorrido de 100 m y la tasa de desgaste sobre una distancia de 10m. Para la ejecución de los ensayos se usó un equipo marca CSEM, con carga normal aplicada de 1N, radio de 3mm, velocidad lineal de 10cm/s y una contraparte de acero inoxidable tipo 440 de 6mm de diámetro. El análisis de desgaste del material se realizó en un recorrido de 0.4 mm a través de la huella, mediante un perfilómetro XP-2 Ambios Instruments a una velocidad de 0.05mm/s y 0.1mg de carga.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se muestra la sección transversal de la lámina procesada por fricción- agitación, PFA, en la cual se puede apreciar los cordones sucesivos traslapados y en dos pasadas superpuestas, que generan una superficie totalmente modificada con zonas alternadas de microestructuras refinadas sin defectos aparentes; de igual forma en la parte inferior es notorio las porciones de metal base sin afectar que quedan entre los cordones.

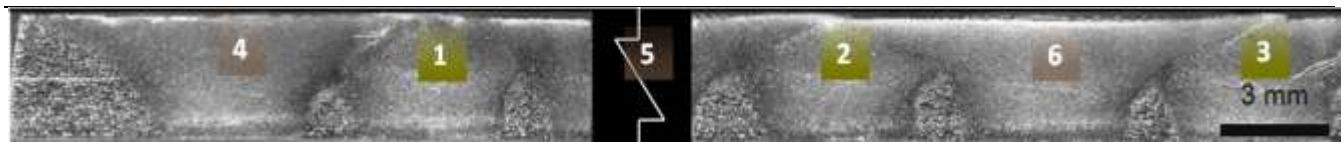
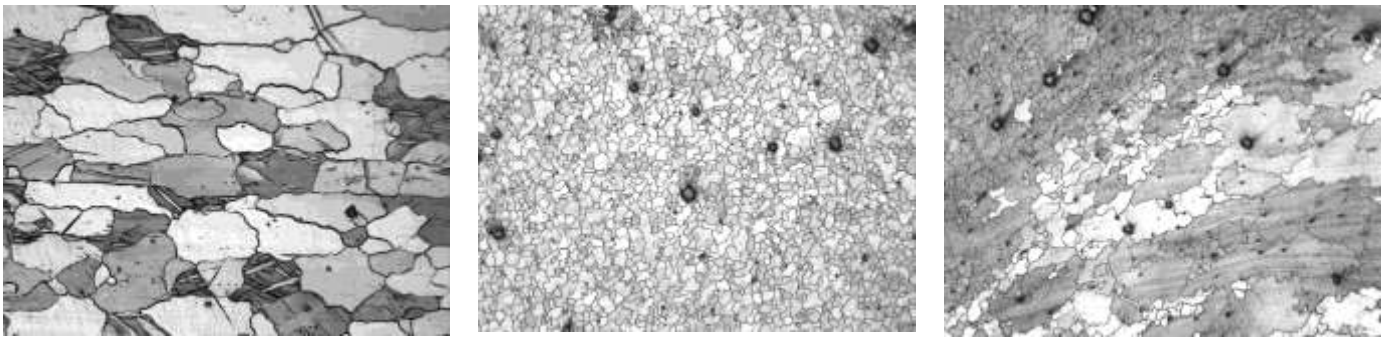


Figura 1. Macrografía con la disposición de los cordones sucesivos sobre una cara de la lámina procesada. Primera pasada: cordones 1,2 y 3; segunda pasada: cordones 4, 5 y 6.

La microestructura característica del metal base, Figura 2(a), presenta granos grandes de solución sólida ligeramente alargados con múltiples maclas e inclusiones no-metálicas. Mientras que en la zona agitada de cada cordón se presentan granos equiaxiales finos y homogéneos sin maclas y con algunas inclusiones dispersas. Ver Figura 2(b). En la transición entre el metal base y la zona agitada de cada cordón se encuentra una mezcla de granos grandes y finos, correspondiente a la zona termomecánicamente afectada.



a.) b.) c.)

Figura 2. (a) Micrografía del material base con grandes granos maclados, 50X. (b) Microestructura característica de la zona agitada compuesta de finos granos equiaxiales con inclusiones no-metálicas, 100X. (c) Microestructura mixta en la zona de transición o termomecánicamente afectada, 100X.

Por efecto de la superposición de los cordones, se presentan sobre la superficie de la lámina las zonas refinadas por una pasada, separadas por zonas doblemente refinadas por la segunda pasada. En la Tabla 2 se presenta los tamaños de grano medidos en el metal base y en diferentes puntos de las zonas con una y dos pasadas, indicados en la Figura 3.

Es notorio el refinamiento de grano obtenido sobre todos los cordones con respecto al material base original. Los puntos A, B y C muestran que el tamaño de grano aumentó desde la superficie hacia el interior de un cordón. Los puntos en la superficie del material que corresponden a zonas de dos pasadas (H, I y J), presentan un tamaño de grano similar comparados con las zonas de una pasada (C y E). Algo muy parecido se observa al comparar las mediciones a ¼ del espesor para los puntos de dos pasadas (F y G) con el punto de una pasada (B). El punto K, con tamaño de grano próximo al del metal base, representa las zonas intermedias no refinadas en la cara posterior de la lámina.

Tabla 2. Tamaño de grano ASTM en diferentes puntos de la sección transversal respecto del material base

Zona	Número ASTM	Diámetro (µm)	Zona	Número ASTM	Diámetro (µm)
A	9.8	12	G	10.2	10.5
B	10.0	11.1	H	10.6	9.1
C	10.5	9.2	I	10.5	9.4
D	9.8	11.8	J	10.4	9.8
E	10.4	9.6	K	5.8	47.6
F	10.2	10.3	MB	5.7	50

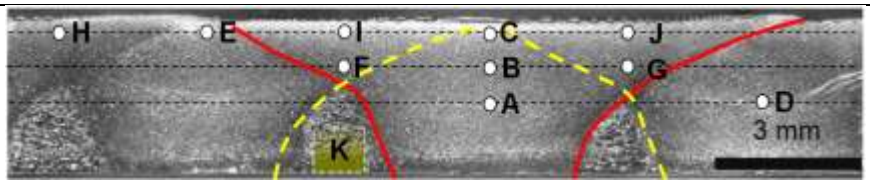


Figura 3. Medición de tamaño de grano en diferentes regiones de la superficie tratada

En la figura 4 se muestran los resultados de microdureza obtenidos del material procesado con uno y dos cordones de soldadura. Se puede notar que la dureza del material con una sola pasada, es ligeramente superior a la resultante de las dos pasadas, con valores promedios de 55 y 52Hv respectivamente. Es evidente que con la primera pasada, el material incrementa su dureza frente a la condición en estado de suministro, debido al refinamiento del tamaño de grano que se presenta en su microestructura; sin embargo, la segunda pasada produce un efecto de recuperación del material, con mínima reducción del tamaño de grano pero con aparente disminución en la densidad de dislocaciones que justifica la disminución de la dureza del material. No obstante, estos resultados de microdureza en ambos casos muestran valores superiores a los del material en estado de suministro, el cual tiene una dureza de 50Hv, revelando un ligero endurecimiento superficial del material a causa del PFA.

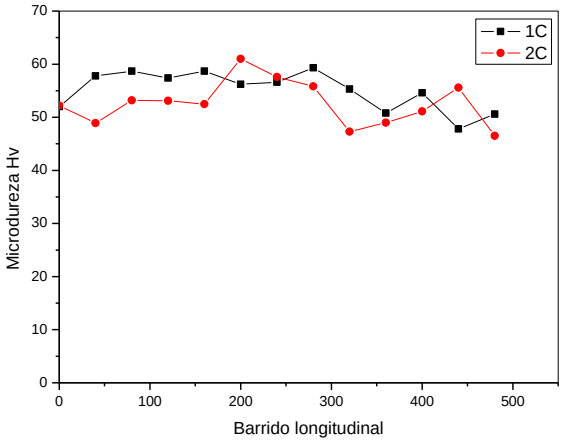


Figura 4. Perfiles de Microdureza de la aleación de magnesio AZ31B a ¼ de la superficie de tratada, para una pasada (1C) y dos pasadas (2C). 100g/10s.

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos del ensayo Ball-on-Disk para la aleación AZ31B modificada y en estado de suministro, en la cual es posible observar que el coeficiente de fricción para las dos condiciones del material permanece aproximadamente constante con un valor promedio alrededor de 0.4, cercano a lo reportado por Zahmatkesh et.al., [10]. Se puede observar también una ligera tendencia a la disminución del coeficiente de fricción del material PFA frente al material en estado de suministro. [10, 11].

Las fluctuaciones del coeficiente de fricción que se presentan en ambas curvas durante el recorrido se deben a un ciclo periódico de acumulación y eliminación de partículas producto del desgaste en la pista de desgaste, conocidas como debris, este comportamiento característico del SFA/PFA sobre materiales blandos ha sido reportado por diferentes autores [10, 12, 13, 14].

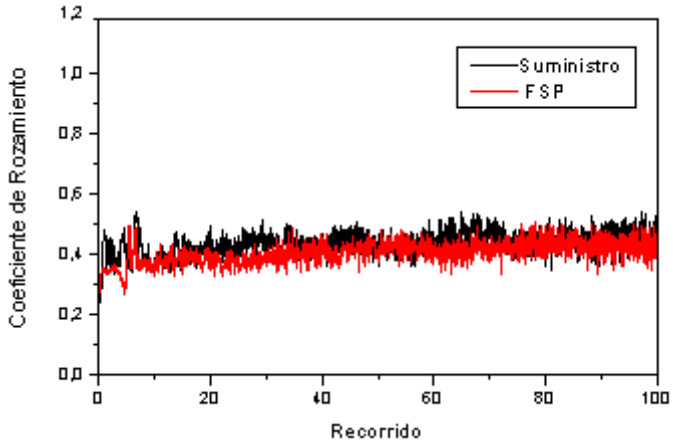


Figura 5. Resultados del ensayo Ball-on-Disk sobre el material modificado, (FSP) y el material de suministro.

La tasa de desgaste del material, en las condiciones estudiadas, se obtuvo por diferencia de volumen de acuerdo a la ecuación de Archard:

$$k[mm^3 / Nm] = \frac{A \times S}{P \times D}$$

Donde: *k*: tasa de desgaste,

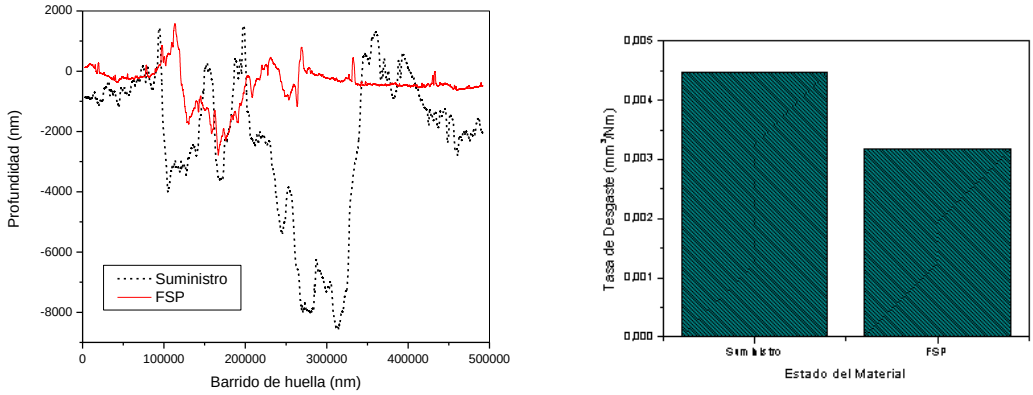
A: área proyectada del surco, mm2

S: longitud de la pista, en mm.

D: distancia recorrida, en m.

P: carga en N.

En la figura 6(a) se puede apreciar la amplia diferencia entre la profundad de la huella producida durante el ensayo de desgaste del material en estado de suministro y el material procesado, siendo mayor para la primera condición, lo cual se evidencia en los resultados que se muestran en la figura 6(b), de acuerdo a los cuales es posible afirmar que el PFA produce una reducción en la tasa de desgaste del material modificado respecto al estado de suministro, de un 28%.



a.) b.)

Figura 6. Imágenes de desgaste a.) Profundidad de la huella dejada en el ensayo de desgaste sobre el material de suministro y en el material modificado con PFA, b.) Tasa de desgaste del material suministrado comparado con el material modificado.

Este incremento de la resistencia al desgaste del material como resultado de la modificación superficial mediante PFA se atribuye a mejoras en la microdureza del material procesado como lo establecen Essam [13], Aldajah [11] y Chen y Nakata [15] en sus investigaciones.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados, es posible afirmar que el procesamiento por fricción agitación de la aleación de Magnesio AZ31B produce un refinamiento de grano del orden del 80%, por efecto de fenómenos de recristalización dinámica ocurridos durante la severa deformación plástica en caliente, lo cual no se refleja en un cambio grande de la dureza superficial, ni en el coeficiente de fricción con respecto al material de suministro. Sin embargo, se presentó un incremento ligero en la dureza superficial gracias al PFA, al igual que una disminución considerable en la tasa de desgaste frente al material en estado de suministro, aunque el coeficiente de fricción no cambia, lo que permite considerar la viabilidad de la aplicación de esta técnica de procesamiento superficial, con el fin de optimizar el comportamiento superficial del material, incrementando la vida útil de las piezas y elementos de máquina producidos a partir de este.

5. AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de mecánica de sólidos de la Universidad Autónoma de Occidente y al Laboratorio de Recubrimientos Duros y Aplicaciones Industriales, RDAI, Escuela de ingeniería de Materiales y a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, por el uso de los laboratorios de mecánica industrial.

REFERENCIAS

[1] F. Franco, H. Sánchez , D. Betancourt, O. Murillo; “Soldadura por fricción-agitación de aleaciones ligeras – una alternativa a nuestro alcance”; Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S1 (3) (2009), p.1369-1375.

[2] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, S. D. Smith, “FSW-Tool developments”; TMS Annual Meeting and exhibition Al joining, 2001, p. 1-12.

[3] A. Wendt, K. Weiss, A. Ben-Dov, M. Bamberger, B. Bronfin, “Magnesium Technology”; TMS Warrendale, 2005, p. 269–73.

[4] H. Schumann, “Effect of Friction Stir Processing on Microstructure and Mechanical Properties of a Cast-Magnesium”; Rare Earth Alloy. Mater. Sci. Forum, vol. 51 (2003), p. 419–22.

[5] Z.Y. Ma: Metall. Mater. Trans. Vol. 39A (2008), p. 642–58.

[6] C. I. Chang, C. J. Lee, J. C. Huang, Scripta Mater, vol. 51 (2004), p. 509–14.

[7] B. M. Darras, M. K. Khraisheh, F. K. Abu-Farha, M. A. Omar, “Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy”; Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191 (2007), p. 77–81

[8] Z. Y. Ma, A. L. Pilchak, M. C. Juhas, J. C. Williams, Scripta Mater, Vol 58 (2008), p. 361–66.

[9] Y. N. Wang, C. I. Chang, C. J. Lee, H. K. Lin, J. C. Huang, Scripta Mater, Vol. 55 (2006), p. 637–640

[10] B. Zahmatkesh, M. H. Enayati, F. Karimzadeh. “Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed Al2024 alloy”; Materials and design, Vol. 31 (2010), p. 4891-4896.

[11] S.H. Aldajah, O.O. Ajayi, G.R. Fenske, S. David, “Effect of friction stir processing on the tribological performance of high carbon steel”; Wear. Vol. 267 (2009), p. 350–355.

[12] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, “Friction stir welding and processing”; Mater Sci Eng R, Vol. 50 (2005), p. 1-78.

[13] R. Essam, T Takahashi, T Shibayanagi, K. Ikeuchi, “Wear characteristics of surface-hybrid-MMCs layer fabricated on aluminum plate by friction stir processing”; Wear, Vol. 268 (2010), p.1111–1121.

[14] H. Schmidt, T. Dickerson, J. Hattel, “Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3”; Acta Mater. Vol. 54 (2006), p. 1199–1209.

[15] Y. Chen, K Nakata. “Evaluation of microstructure and mechanical properties in friction stir processed SKD61 tool steel”; Mater Charact. Vol. 60 (2009), p. 1471–1475.