

Efecto de la modificación superficial por Fricción Agitación (PFA) en la dureza y el desgaste de la aleación de aluminio de la serie 6000

Effect of surface modification by Agitation Friction (FSA) on the hardness and wear of the aluminum alloy of the 6000 series

Recibido: 29- 12 - 2015 Aceptado: 14-11-2017

Vanessa Gil Ledesma¹
Andrés Torres²
Nelly Alba de Sánchez³

¹ Colombiana. Estudiante Ingeniería. Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Valle del Cauca, Colombia. e-mail: vanne182_9@hotmail.com.

² Colombiano. Msc. Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA - ASTIN - Tecnoparque. Grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales y Productos GIDEMP. Cali, Valle del Cauca, Colombia. e-mail: torresrecalde84@gmail.com.

³ Colombiana. PhD. Universidad Autónoma de Occidente. Grupo Ciencia Ingeniería de Materiales GCIM. Cali, Valle del Cauca, Colombia. e-mail: nalba@uao.edu.co.

Resumen

En el presente artículo se reportan los efectos de la modificación superficial mediante la técnica de procesamiento por fricción agitación (PFA) o Fricción Stir Processing (FSP) sobre una aleación de aluminio de uso arquitectónico de la serie 6063. Se evaluó el comportamiento del material en estado de suministro y del material modificado por PFA, se realizó análisis de microdureza, análisis metalográfico en niveles macro y micro, análisis de desgaste y coeficiente de fricción utilizando la técnica de Pin on Disk. Se encontró que en general la modificación superficial produce un mejoramiento sustancial de las propiedades mecánicas como la dureza, al pasar de 42 HV A 62 HV en las muestras modificadas por (FSP) y la resistencia al desgaste en términos de pérdida de masa se redujo en un 39 %. Ofreciendo una alternativa tecnológica importante para mejorar el desempeño en servicio de estos materiales sometidos a condiciones de operación similares.

Palabras clave: Pin on disk; metalografía; fricción agitación.

Abstract

This article presents the results obtained from the evaluation of the effects of the surface modification by Friction Stir processing (FSP) on an aluminum alloy of architectural use of the series 6063 are reported. The behavior of the material in the state of supply and of the modified material by FSP, microhardness analysis, metallographic analysis at macro and micro levels, wear analysis and coefficient of friction were performed using the Pin on Disk dynamic test. It was found that in general the surface modification produces a substantial improvement of the mechanical properties such as hardness when passing from 42 HV to 62 HV in the samples modified by (FSP) and the

wear resistance in terms of mass loss was reduced in a 39% offering an important technological alternative to improve the in-service performance of these materials subjected to similar operating conditions.

Keywords: Pin on disk; metallographic; friction.

Introducción

La alta demanda de componentes en el área automotriz y aeronáutica impulsa el desarrollo de componentes más livianos (Cavaliere, 2005). Las aleaciones de aluminio incluida la serie 6000 tienen una gran demanda debido a su baja densidad y alta resistencia a la corrosión (Charit y Mishra, 2003). Para ciertas aplicaciones se requiere que los componentes tengan condiciones superficiales especiales tales como alta resistencia al desgaste (Karthikeyan, Senthilkumar, Balasubramanian y Natarajan, 2009; Nascimento, Santos, Vilaça, Miranda y Quintino, 2009), la modificación superficial por fricción agitación PFA se ha convertido en una técnica de procesamiento en estado sólido para la modificación superficial de materiales con base a los principios de la soldadura por fricción agitación (SFA) (Darras, Khraisheh, Abu-Farha, y Omar, 2007; Wang y Mishra, 2007). La modificación superficial por fricción agitación (PFA) tiene la capacidad de mejorar diversas propiedades del material como la resistencia al desgaste, la corrosión, la fatiga y la dureza (Mahoney, Rhodes, Flintoff, Bingel, y Spurling, 1998) lo que le da una ventaja sobre procesos tradicionales de modificación superficial como algunos tratamientos térmicos donde al mejorar una propiedad se pierde otra (Poggie y Wert, 1992).

El coeficiente de fricción y el comportamiento al desgaste de los diferentes tipos de aluminio en condiciones de no lubricación están asociados a las propiedades mecánicas, así como a la reactividad de la superficie, una primera aproximación supone que un aumento en la dureza se traducirá en un aumento en la resistencia al desgaste (Elangovan, y Balasubramanian, 2007).

Desarrollo experimental

La modificación superficial de la aleación de la serie 6063, se realizó sobre láminas de 60mm*200*mm*4,7mm, extraídas de una platina obtenida por extrusión de 25,4 cm de ancho por 6 metros de longitud y 4,7 milímetros de espesor. La caracterización tribológica se realizó sobre la superficie del cordón; mientras que se efectuaron

mediciones de microdureza y el análisis metalográfico sobre la sección transversal de los cordones.

Procedimiento de soldadura

La modificación superficial de las láminas se realizó generando un cordón sobre una de las caras de la lámina con la ayuda de una fresadora convencional marca JHONFORD de 4HP, con los parámetros que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de PFA y relación de velocidad

Muestra No.	Velocidad de rotación (RPM)W	Velocidad de avance (mm/min)V	Relación de velocidad (rev/mm)
			W/V
1186	1120	86	13
1163	1120	63	17,7
1686	1600	86	18,6
1663	1600	63	25,3

Fuente: Los autores

Se utilizó una herramienta fabricada con acero H13 templado y revenido para una dureza mínima de 50HRC, con hombro plano de 18 mm de diámetro, con pin cilíndrico roscado de 6 mm de diámetro y 3,3 mm de altura. Los cordones se hicieron con rotación de la herramienta en el sentido anti-horario. Figura 1.

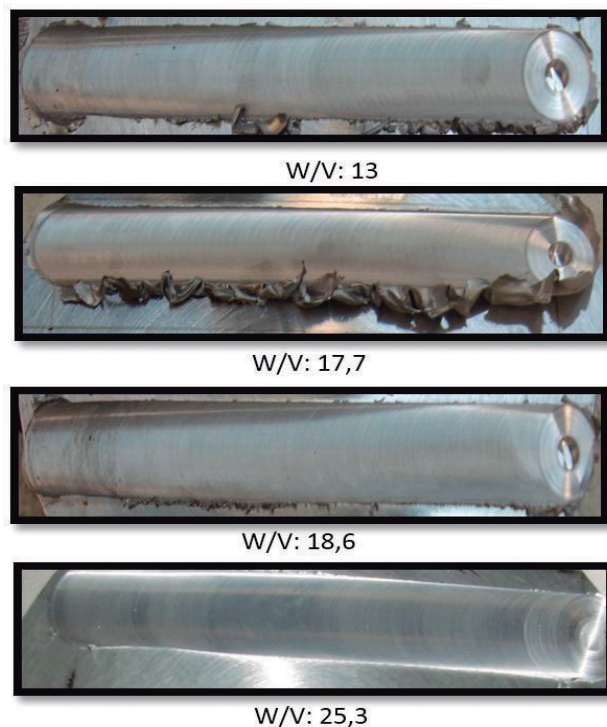


Figura 1. Cordones de aluminio procesados por FSP.

Fuente: Los autores

Ensayo de caracterización

Las láminas modificadas mediante procesamiento por fricción-agitación, se caracterizaron mediante los ensayos mecánicos de microdureza, ensayos de desgaste y el análisis metalográfico para determinar el tamaño de grano y los cambios micro estructurales generados.

El análisis metalográfico se realizó sobre la sección transversal de la cara modificada por PFA; las muestras fueron desbastadas con lijas hasta el número 2000, luego pulidas en paños utilizando alúmina de 0,05 micras y finalmente se atacaron con reactivo Poulton para revelar y analizar la microestructura de las diferentes zonas del material modificado en un microscopio óptico Olympus.

Al igual que las muestras para metalografía los perfiles de microdureza se realizaron sobre la sección transversal de cada cordón de las superficies modificadas por PFA, se hizo un barrido longitudinal y transversal sobre las muestras para determinar la microdureza en un Microdurómetro Zwick/Roell Indentec ZHV1-m con carga de 100g y tiempo de sostenimiento de 15 s.

La resistencia al desgaste y el coeficiente de fricción se evaluó mediante el ensayo de Pin-on-Disk sobre las superficies modificadas por PFA, así como para el material base.

El ensayo se realizó bajo los siguientes parámetros: recorrido de 1000 m, carga aplicada 10N, diámetro de la huella 1 cm y un pin de acero al cromo duro con un diámetro de 6 mm.

Resultados

Caracterización

En la Figura 2 se muestra la microestructura de la aleación de aluminio modificada superficialmente por FSP. La Figura 2a corresponde al corte transversal de la superficie modificada por PFA, se puede apreciar las zonas típicas: una zona agitada (ZA), la zona afectada térmicamente (ZAT), la zona afectada termo-mecánicamente (ZATM), y el material base, MB. En la Figura 2b se presenta la microestructura gruesa del material base MB, característica de las fundiciones de aluminio con una formación dendrítica con inclusiones y segregación en los bordes de grano. La zona agitada ZA, se presenta en la Figura 2c, compuesta por granos finos y equiaxiales con un tamaño de grano promedio de 6,7µm, resultantes de la recrystalización dinámica en comparación

con el material base. A medida que nos acercamos a la zona de transición ZATM, ver Figura 2d, se observa la presencia de granos alargados orientados en la dirección de flujo del material, producto de la alta deformación que se produce en esta zona y el insuficiente aporte de calor que trae como resultado una recrystalización parcial de los granos (Elangovan y Balasubramanian, 2007).

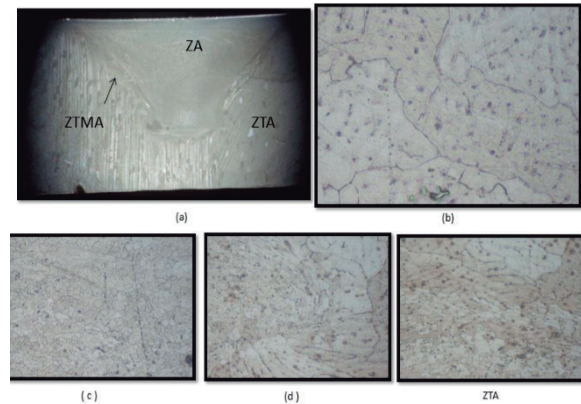


Figura 2. (2a) Micrografías de la sección transversal de la superficie modificada por FSP, (2b) zona agitada a 50X (2c) zona de transición a 50X (2d) Microestructura del Metal base 50X.

Fuente: Los autores

Microdureza

La evolución en la microdureza del material base (MB) con y sin modificación superficial se presenta en la Figura 3. Se aprecia que al disminuir la relación de velocidad durante el PFA se produce un incremento en la microdureza del material modificado, como resultado del refinamiento del tamaño de grano por fenómenos de recrystalización que tienen lugar durante el proceso PFA. Las muestras modificadas por PFA alcanzan valores de microdureza máxima de 62 HV, muy por encima de los valores del material base que oscilaron en 42 HV.

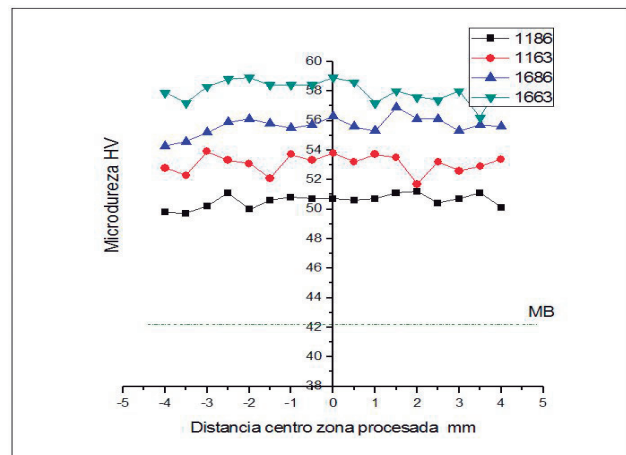


Figura 3. Perfil de microdureza en la sección transversal de superficies modificadas por PFA.

Fuente: Los autores

El efecto de la modificación superficial PFA sobre la microdureza en aleaciones de aluminio ha sido estudiada ampliamente. Rajakumar, Muralidharan y Balasubramanian (2011), examinaron los perfiles de microdureza asociados a la microestructura en la zona agitada (ZA) de aleaciones de Al 6063-T5. Y han reportado que el perfil de microdureza se vio fuertemente afectado por la distribución de precipitados en regiones con tamaño de grano pequeño en la soldadura.

Recientemente, (Zahmatkesh, Enayati, y Karimzadeh, 2011) investigaron el efecto de la PFA en la microestructura de la aleación de aluminio 7050-T7451. Reportando que el proceso SFA tiene un efecto directo sobre el tamaño de la sub granos en la frontera de la zona afectada térmicamente (ZAT), provocando un engrosamiento de los precipitados y endurecimientos, causando la variación de la microdureza en esta zona de frontera. Observaciones similares fueron hechas también por Siddiqui, Abdullah, y Al-Belushi (2000) en un examen detallado con TEM de las SFA en la aleación de Al 7050 -T651. El engrosamiento de los precipitados y la ampliación de (FSP) son evidentes (Morgado, Branco, e Infante, 2007).

Desgaste

En la Tabla 2 se muestra el comportamiento del material base y modificado por PFA en la prueba de pin on disk; se observa una ligera disminución del coeficiente de fricción en las muestras modificadas superficialmente en relación con las muestras del material base (MB). Las muestras modificadas por PFA mostraron una pendiente inicial de coeficiente de fricción más pronunciada, que la presenta el material sin tratamiento alguno o material base, el coeficiente de fricción promedio de las muestras con PFA fue de 0,7, menor que las muestras de MB que presentaron un coeficiente de fricción de 1,2.

Tabla 2. Comportamiento del Coeficiente de fricción en función de la relación de velocidad para cada muestra.

Muestra	Velocidad de rotación (RPM)/W	Relación de velocidad (rev/mm)	Coeficiente de fricción
1186	1120	13	0,58
1163	1120	17,7	0,68
1686	1600	18,6	0,64
1663	1600	25,3	0,7
MB	N/A	N/A	1,2

Fuente: Los autores

El aumento inicial en el coeficiente de fricción del MB puede deberse al aumento de la fuerza de fricción necesaria para superar el contacto altamente adhesivo entre el Pin y la superficie de prueba (Padmanaban y Balasubramanian, 2010). Las diferencias en la amplitud de la deformación plástica localizada en áreas reales de contacto que pueden llevar a la diferencia en el coeficiente de fricción, dado que las superficies son más difíciles de separar (Chowdhury, Chen, Bhole, y Cao, 2010; Pérez, Ortiz Albuixech, Moglioni y de Vedia, 2003).

Esta disminución en el coeficiente de fricción fue más notoria para las relaciones de velocidad relacionadas con un mayor aporte de calor, que obtuvieron los valores de microdureza más altos. El endurecimiento de la superficie fortalece y reacomoda las áreas reales de contacto entre el par tribológico favoreciendo así no solo el coeficiente de fricción sino también el desgaste de la superficie como lo reportan Zahmatkesh, Enayati, y Karimzadeh (2010).

En las imágenes de microscopía electrónica de barrido SEM, se observaron fenómenos de desgaste Figura 4, como de laminación y surcos de abrasión en el material base o sin modificación superficial (Figura 4a y Figura 4c) mientras que las muestras modificadas superficialmente por PFA presentaron grietas y delaminación (Figura 4b y Figura 4d).

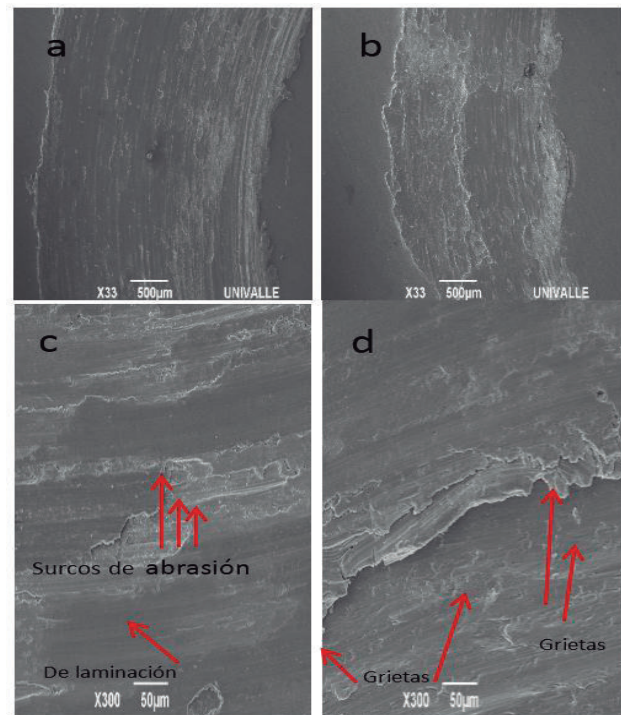


Figura 4. Microscopía electrónica de barrido, huella de desgaste, (a y c material base) (c y d) relación de velocidad (25,3)

Fuente: Los autores

La presencia de grietas y delaminación en las muestras modificadas superficialmente por PFA obedece principalmente a la diferencia de dureza entre el par tribológico, si bien el proceso de modificación superficial por PFA mejora la dureza superficial del material en relación con el material base, la dureza del pin es superior y durante la dinámica de desgaste el desprendimiento progresivo de material y la deformación continua del mismo produce la generación de grietas por fatiga (Alidokht, Abdollah-zadeh, Soleymani, Saeid, y Assadi, 2012).

En la Figura 5 se muestra cómo varía la pérdida de masa con respecto a la relación de velocidad, se aprecia una disminución notable en la pérdida de masa en las muestras modificadas superficialmente por PFA a medida que aumenta la relación de velocidad, alcanzando una reducción en la pérdida de masa de un 39 % en las muestras con relaciones de velocidad de (25,3) en comparación al MB; esto se debe a que presenta mayor microdureza la cual disminuye el desgaste. Se observa que para una velocidad de rotación del pin constante el aumento en la velocidad de avance provoca un aumento en la pérdida de masa. Un comportamiento similar se ha reportado por Ren, Ma y Chen (2007), en aluminio A 390 reforzado con grafito por (FSP).

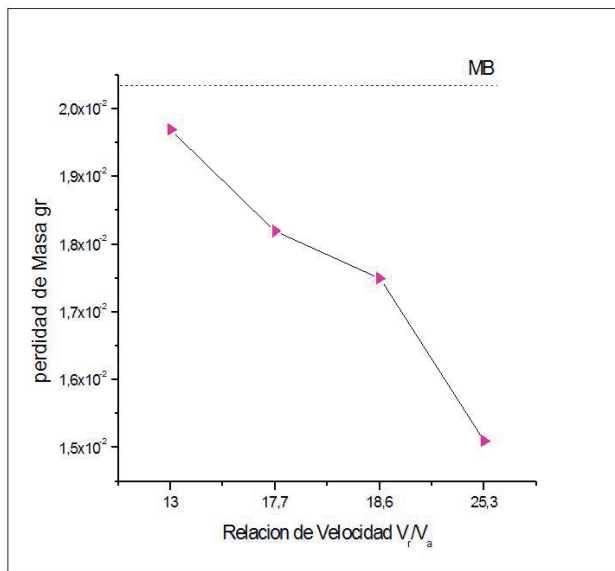


Figura 5. Pérdida de masa con respecto a la relación de velocidades para MB y muestras con (FSP)
Fuente: Los autores

El menor tiempo de exposición del material con el pin, se traduce en menos aporte de calor. Esto afecta el refinamiento de grano que tiene un efecto preponderante en la resistencia al desgaste del material.

Discusión

Se concluye que la modificación superficial tiene un efecto benéfico sobre la microdureza de aleaciones de aluminio 6063 en estado de fundición, al pasar de 42 HV a 62 HV, asociado principalmente al refinamiento del tamaño de grano por la modificación superficial del material por PFA.

Conclusiones

La pérdida de masa y el coeficiente de desgaste disminuyeron para las muestras modificadas superficialmente por PFA con respecto al material base. lo que permite pensar que la disolución de precipitados y el refinamiento de las partículas de Si que se produce durante el proceso de PFA tiene un mayor efecto sobre el comportamiento tribológico del material que la microdureza al conferirle un comportamiento más ductal a la matriz de aluminio.

Referencias

- Alidokht, S. A., Abdollah-zadeh, A., Soleymani, S., Saeid, T., y Assadi, H. (2012). Evaluation of microstructure and wear behavior of friction stir processed cast aluminum alloy. *Materials Characterization*, 63, 90-97. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.11.007>
- Cavaliere, P. (2005). Mechanical properties of friction stir processed 2618/Al 2 O 3/20p metal matrix composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(12), 1657-1665. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.016>
- Charit, I., y Mishra, R. S. (2003). High strain rate superplasticity in a commercial 2024 Al alloy via friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*, 359(1), 290-296. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00367-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00367-8)
- Chowdhury, S. M., Chen, D. L., Bhole, S. D., y Cao, X. (2010). Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch. *Materials Science and Engineering: A*, 527(21), 6064-

6075. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.06.012>
- Darras, B. M., Khraisheh, M. K., Abu-Farha, F. K., y Omar, M. A. (2007). Friction stir processing of commercial AZ31 magnesium alloy. *Journal of materials processing technology*, 191(1), 77-81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.045>
- Elangovan, K., y Balasubramanian, V. (2007). Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 459(1), 7-18. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.124>
- Karthikeyan, L., Senthilkumar, V. S., Balasubramanian, V., y Natarajan, S. (2009). Mechanical property and microstructural changes during friction stir processing of cast aluminum 2285 alloy. *Materials & Design*, 30(6), 2237-2242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.09.006>
- Mahoney, M. W., Rhodes, C. G., Flintoff, J. G., Bingel, W. H., y Spurling, R. A. (1998). Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum. *Metallurgical and materials transactions A*, 29(7), 1955-1964. doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0021-5>
- Morgado, T. L. M., Branco, C. M., e Infante, V. (2007). Previsão de vida à fadiga dos engates (rabetas) dos vagões de transporte de carvão. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões ISSN*, 1646, 7078, 14, 35-43
- Nascimento, F., Santos, T., Vilaça, P., Miranda, R. M., y Quintino, L. (2009). Microstructural modification and ductility enhancement of surfaces modified by FSP in aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 506(1), 16-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.01.008>
- Padmanaban, G., y Balasubramanian, V. (2010). Fatigue performance of pulsed current gas tungsten arc, friction stir and laser beam welded AZ31B magnesium alloy joints. *Materials & Design*, 31(8), 3724-3732. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.03.013>
- Pérez, C. R., Ortiz Albuixech, M., Moglioni, A., y de Vedia, L. A. (2003). Evaluación de tensiones residuales en soldadura de aluminio AA6061-T6 obtenida por el método de fricción-agitación (FSW). *Simposio Materia 2003*. Red Latinoamericana de Materiales. Bariloche, Argentina.
- Poggie, R. A., y Wert, J. J. (1992). The role of oxidation in the friction and wear behavior of solid solution Cu-Al alloys in reciprocating sliding contact with sapphire and D2 tool steel. *Wear*, 156(2), 315-326. doi: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90225-W](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90225-W)
- Rajakumar, S., Muralidharan, C., y Balasubramanian, V. (2011). Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T 6 aluminium alloy joints. *Materials & Design*, 32(2), 535-549. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.025>
- Ren, S. R., Ma, Z. Y., y Chen, L. Q. (2007). Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy. *Scripta Materialia*, 56(1), 69-72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.054>
- Siddiqui, R. A., Abdullah, H. A., y Al-Belushi, K. R. (2000). Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 102(1), 234-240. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00476-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00476-8)
- Urbano Bedoya, L., y Arnaldo Ávila, J. (2011). Evaluación de la resistencia a la tensión de las juntas soldadas de la aleación de aluminio 6261-T5 por el proceso de soldadura por fricción-agitación. *Informador Técnico*, 75, 1517 - 22. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.15>
- Wang, Y., y Mishra, R. S. (2007). Finite element simulation of selective superplastic forming of friction stir processed 7075 Al alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 463(1), 245-248. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.118>

Zahmatkesh, B., Enayati, M. H., y Karimzadeh, F. (2010). Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed Al2024

alloy. *Materials & Design*, 31(10), 4891-4896. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.054>

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional
.....
www.4-72.com.co

El servicio de **envíos**
de Colombia

