

CARACTERIZACIÓN DE ALEACIONES NO FERROSAS PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ, AERONÁUTICA Y METAL-MECÁNICA

Aguilar Maruri, Saúl Alejandro (1), Moreno Palmerin, Joel (2)

1 Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: saulmaruri22@gmail.com

2 Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: jmoreno@ugto.mx

Resumen

Aleaciones de Aluminio 6061 fueron sometidas a diferentes presiones de lavado hidráulico (500, 1000 y 1500 psi), haciendo un seguimiento de las propiedades mecánicas y microestructurales tanto para las condiciones de presión efectuadas y su contraste con las de la aleación original. Se observó que con el incremento de la presión de lavado disminuye el tamaño de grano en la superficie y en el interior de la pieza, así como el porcentaje de deformación de la cara sometida a la presión de lavado es mayor con el incremento de la presión. La dureza en la superficie tratada aumenta proporcionalmente con la presión aplicada, mientras que la dureza interna presenta el mismo comportamiento, y su valor es muy cercano al de la muestra original.

Abstract

Aluminum alloys 6061 were subject to different pressures of hydraulic wash (500, 1000 y 1500 psi), and from these resulting pieces were determined the mechanical and microstructural properties for the different applied pressures, these properties were contrasted with respective properties from the original alloy. We observe a grain size inversely proportional to the increased pressure washing both the washed surface as inside the piece analyzed, also the increased pressure washing increases deformation of face subject to hydraulic wash. The hardness of the analyzed surface increases proportionally with the increased pressure like the internal hardness present a equal behavior as described with the surface hardness, the internal hardness has measurements similar to the original alloy.

Palabras Clave

Aluminio 6061; Microestructura; Tamaño de grano; Presión; Dureza HV

INTRODUCCIÓN

El aluminio es de los elementos más abundantes de la corteza terrestre al tener una proporción del 7.4% en ésta, es un metal ligero, de color blanco plateado, relativamente blando, resiste a la corrosión (debido a la capa de óxido de aluminio con autorreparación rápida, llamada alúmina, que impide la corrosión del metal, se trata de una capa refractaria). El aluminio puro es blando, débil y pierde resistencia a temperaturas cercanas a los 300°C [1].

Las aleaciones de aluminio son obtenidas a partir de la combinación de su con otros elementos (cobre, magnesio, zinc, silicio, manganeso, etc.) que mejora sus propiedades mecánicas y mejorar aspectos como la dureza. La combinación de propiedades que presentan el aluminio en sus aleaciones, hacen de este material uno de los más versátiles, económicos y atractivos para una amplia gama de usos y aplicaciones; desde la fabricación de papel de aluminio hasta aplicaciones de ingeniería más exigentes, como la industria del transporte y la automotriz al ocupar desde hace más de 30 años un lugar destacado en este giro industrial [3].

Hoy en día existen más de 300 aleaciones de aluminio conocidas y otras que están en desarrollo para nuevas aplicaciones.

Aleaciones de aluminio

En la tabla 1 y 2 se muestran las aleaciones utilizadas actualmente:

Tabla 1: Codificación de aluminos laminados. Tomada de [2]

Aluminio puro 99.0 pureza	1XXX
Aluminio aleado principalmente con Cobre.	2XXX
Aluminio aleado principalmente con Manganeso.	3XXX
Aluminio aleado principalmente con Silicio.	4XXX
Aluminio aleado principalmente con Magnesio.	5XXX
Aluminio aleado principalmente con Magnesio y Silicio.	6XXX
Aluminio aleado principalmente con Zinc.	7XXX
Aluminio aleado con otros elementos (Litio)	8XXX

Tabla 2: Codificación de fundiciones de aluminio. Tomada de [2]

Aluminio puro 99.0 pureza	1 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Cobre.	2 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Silicio y adiciones de Cobre y/o Magnesio.	3 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Silicio.	4 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Magnesio.	5 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Zinc.	7 xx.x
Aluminio aleado principalmente con Estaño.	8 xx.x
Aluminio aleado con otros elementos.	9 xx.x

Es importante mencionar que los productos de aluminio puro y sus aleaciones son codificados de acuerdo con la norma H35.1 de la American National Standard Institute (ANSI), mientras que las aleaciones fundidas se codifican de acuerdo con la norma ASTM B275, ambas emitidas por EE.UU [2].

Serie 6XXX [4].

Las aleaciones de este tipo de serie contienen 0.5% Magnesio y 0.5% Silicio siendo las proporciones requeridas para la formación de siliciuro de magnesio (Mg_2Si), este compuesto hace que puedan ser tratadas térmicamente al mejorar su resistencia mecánica. Estas aleaciones presentan las siguientes características:

- Resistencia a la corrosión ocasionada por el aire.
- Aptas para procesos de extrusión y forja en caliente.
- Permite trabajos de deformación en frío.

Estas son ampliamente usadas en estructuras, marcos y ventanas, entre otros, al servicio de la industria arquitectónica.

- *Aluminio 6061-T6*

La aleación 6061, tratada térmicamente con un tratamiento especial del tipo T6, es obtenida por envejecimiento artificial y tratada por solución. Es una aleación dúctil, ligera, alta resistencia a la tensión hasta 45000 psi, esfuerzo de cedencia hasta 40000 psi [5], un porcentaje de elongación del 15%, resistencia a la corrosión aleación es utilizada en estructuras tubulares en la mayoría de aeronaves experimentales como ultralivianos y aeronaves semejantes [6]. Se utiliza en productos extruidos, perfiles arquitectónicos, marcos de bicicletas, fabricación de equipos de transporte y estructuras soldadas, entre otras [7] Este aluminio

es ideal para trabajos con un buen acabado superficial, presenta facilidad de maquinado, posee excelentes características para soldadura, además de no ser tóxico.

Esta aleación puede ser templada inmediatamente a la salida de la prensa por enfriamiento al aire soplado o por un chorro de agua [6]. Hacer dicho proceso presenta ventajas como: reducir el riesgo de formación de tamaño de grano en la zona cortical (límites del material).

La composición química de esta aleación es la siguiente, de acuerdo a la norma ASTM B221M-05:

- 0.4%-0.8% de Si.
- 0.7% máximo de Fe.
- 0.15% - 0.40% de Cu.
- 0.8%-1.2% de Mg.
- 0.04%-0.35% de Cr.
- 0.25% máximo de Zn.
- 0.015% máximo de Ti.
- 0.05% máximo de otros elementos.
- 95.8%-98.6% de Al.

Los tratamientos térmicos como el envejecimiento artificial (T6, endurecimiento por precipitación), influye de manera significativa en las propiedades mecánicas extraídas del ensayo de tracción de la aleación de aluminio AA6061, por ejemplo; el esfuerzo de fluencia, resistencia a tensión, esfuerzo de corte, la resistencia a torsión y la dureza Brinell es mucho mayor cuando el material es sometido a este tratamiento térmico T6 (además, existe una reducción de la deformación máxima) debido a la formación de siliciuros de magnesio (Mg_2Si), en forma de precipitados, en determinada cantidad y distribución de acuerdo al tratamiento térmico aplicado [8].

El estudio de Skolianos, S., et. ál., ha determinado que varias partículas de Mg_2Si presentan deformaciones debido a la variación de la aplicación de presión a la muestra. Algunas de estas partículas son cuasi-esféricas o completamente alargadas, lo cual indica una proporcionalidad entre la morfología y cantidad de fases con respecto a la presión aplicada. Para una muestra sometida a una presión de 20 MPa se notó la formación fases dendríticas con partículas esféricas definidas, mientras que para una presión de 40 MPa se observó un eutéctico ternario (observaciones similares a piezas sometidas a 60, 80 y 100 MPa). Por tanto, la proporción de siliciuros de magnesio disminuye con respecto al

incremento de la presión considerando una alta temperatura de vertido, 850°C. La presión al fundir la pieza disminuye tanto la fracción volumétrica de la porosidad y el tamaño de microporo, así como el tamaño de las dendritas y las zonas interdendríticas, pero aumenta la resistencia última a la tracción. La resistencia de la pieza decrece con la presencia de eutécticos ternarios ($FeCrMn$)₃SiAl₁₂ y aumenta cuando la fase de Mg_2Si se encuentra dispersa.

Tamaño de grano

El tamaño de grano tiene considerable influencia en las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones, por eso es de gran interés conocerlo. Resulta evidente que dicho tamaño de grano es inversamente proporcional al número de granos presentes en la muestra. El procedimiento para determinar esta propiedad se basa en la norma ASTM E-112 "STANDARD TEST METHODS FOR DETERMINING AVERAGE GRAIN SIZE", se puede determinar mediante el método de intercepción lineal, en donde se cuentan los granos que son cortados por las rectas trazadas sobre una imagen obtenida mediante microscopía. Se calcula el número de granos por milímetro empleando la ecuación 1:

$$\overline{N_L} = \frac{N_t}{L/M} \quad \dots(\text{ec. 1})$$

Donde N_L = granos por mm

L = la suma total de la longitud de cada recta

M = magnificación

Este trabajo se basa en un análisis por medio de microscopía óptica y pruebas mecánicas (dureza) de piezas de aluminio 6061, proporcionadas por la industria aeronáutica y automotriz, sometidas a presiones (que no propicien una deformación en la pieza de limpieza hidráulica de 500, 1000 y 1500 psi) mayores a la estándar industrial de 100 psi. Se espera que una adecuada preparación metalográfica permita un análisis adecuado de la microestructura de la muestra, y con ello determinar presiones óptimas de limpieza hidráulica que no afecten las propiedades macroscópicas originales de la pieza analizada.

MATERIALES Y MÉTODOS

A las muestras proporcionadas de aluminio 6061, sometidas a 500, 1000 y 1500 psi y la pieza

original, fueron preparadas mediante preparación metalográfica para poder determinar la dureza y visualizar la microestructura:

- Selección de la muestra: se marcó la superficie expuesta al lavado hidráulico a presión, facilitando su manejo para la etapa posterior.
- Corte: se decidió utilizar un corte por medio de un disco abrasivo de diamante en húmedo, con ayuda de una cortadora de muestras y con ello obtener un corte más limpio. Las piezas resultantes corresponden un corte longitudinal y un transversal.
- Montaje: se optó por un montaje en frío, para evitar daños por efecto de presión y temperatura de montaje en caliente. Para ello se preparó una mezcla 2:1 de EXTEC® Fast Cure Acrylic. Montado la muestra longitudinal y transversal en una probeta (como se muestra en la imagen 1) y dejándola endurecer por una hora (permitiendo además la disipación del calor generado por la reacción de polimerización).
- Desbaste: esta etapa permitió preparar la superficie de las muestras para su pulido, al eliminar caras o capas y generar superficies planas. Para ello se aplicaron desbastes burdos, intermedios y finales con lijas comerciales de agua del tamaño de grano de 120, 220, 320, 400, 600, 800 y 1200. El procedimiento consistió en lijar la pieza, inicialmente con lija 120, en un sentido hasta generar rayas en un solo sentido y posteriormente girar la pieza 90° con respecto a las rayas anteriores y generar las rayas correspondientes a ese sentido, hasta sólo visualizar la nueva dirección empleada, en seguida se cambia de lija y se continúa con el procedimiento descrito hasta terminar con la lija 1200.
- Pulido: se efectuó el pulido mecánico (con ayuda de una pulidora operada a 400 rpm) con alúmina de 0.3 μm en suspensión, jabón líquido comercial y paño para pulir. La operación finaliza hasta obtener una superficie pulida sin rayas.
- Ataque químico: para este paso se atacó con el reactivo propuesto por la norma ASTM E407, una solución acuosa de ácido fluorhídrico (concentrado) 5% v/v, el ataque resultante de este reactivo fue nulo para

visualizar la microestructura. Por tanto, se optó por una solución de 50 mL de reactivo de Poulton (12 partes de $\text{HCl}_{(\text{ac})}$, 6 partes de $\text{HNO}_{3(\text{ac})}$, 1 parte de $\text{HF}_{(\text{ac})}$ y 1 parte de agua destilada), 25 mL de $\text{HNO}_{3(\text{ac})}$, y 40 mL de 30 g/L de ácido crómico (1.2 gr de dicromato de potasio, 2 mL de ácido sulfúrico concentrado y 46 mL de agua destilada), lo cual permitió resultados favorables. Las probetas (por la cara pulida) se sumerge de manera intermitente en 5 mL del reactivo por 10 segundos (para las piezas: original, 1000 psi y 1500 psi) o 25 segundos (pieza a 500 psi), posteriormente se enjugaban con agua corriente, se inmergían en alcohol metílico y se secan por 5 segundos con aire seco.

La prueba de dureza se realizó después de que las muestras fueran sometidas al ataque, en un microdurómetro Vickers modelo Dura Scan 20, para ello se hicieron 7 mediciones por muestra, en base a la norma **NMX-B-118-197** y la **ASTM E384**. El equipo se programó para hacer mediciones en serie, en la escala HV (dureza Vickers) con carga de 200 gr por medio de la conversión de la medición en HB (dureza Brinell).

La microestructura se observó con ayuda del microscopio metalográfico modelo MA200 de NIKON, el cual permitió obtener imágenes de las muestras a diferentes aumentos y enfoques. Además se obtuvieron imágenes del borde sometido al lavado a presión (del corte transversal) para visualizar posibles deformaciones en éste.

La determinación del tamaño de grano se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM E-112 con el método de intercepción lineal.



IMAGEN 2: Microestructura de la pieza de Aluminio 6061 a 500 psi, cara longitudinal.

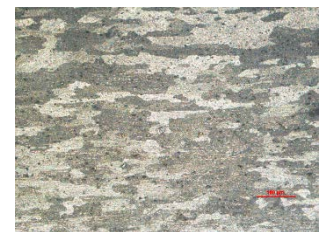


IMAGEN 3: Microestructura de la pieza de Aluminio 6061 a 1500 psi, cara transversal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las durezas obtenidas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Dureza HV, piezas Aluminio 6061-T6.

Pieza de aluminio 6061-T6		Dureza HV	
Aluminio 6061 original (imagen 1)	L	38.0 ± 0.3	38.0 HV 0.2
	T	38.9 ± 0.8	38.9 HV 0.2
Aluminio 6061 a 500 psi	L	37.5 ± 1.4	37.5 HV 0.2
	T	37.8 ± 2.1	37.8 HV 0.2
Aluminio 6061 a 1000 psi	L	38.3 ± 0.3	38.3 HV 0.2
	T	38.2 ± 0.8	38.2 HV 0.2
Aluminio 6061 a 1500 psi	L	38.3 ± 0.3	38.3 HV 0.2
	T	38.6 ± 0.8	38.6 HV 0.2

*L (Pieza longitudinal); T (Pieza transversal)

Los valores obtenidos por los ensayos de dureza HV muestran que la dureza longitudinal es menor para la pieza sometida al lavado de 500 psi con respecto a la muestra original, al contrario las piezas sometidas a 1000 y 1500 psi muestran mayor dureza respecto a la original (siendo sus valores muy cercanos para las piezas sometidas a la presión de lavado). La dureza transversal se ve afectada dado que decrece significativamente para una presión de 500 psi, mientras que para 1000 y 1500 psi no es tan evidente, pero inferior a la original. La microestructura no muestra cambios significativos, ya que se observa una microestructura de grano equi-axial sobre la superficie longitudinal, mientras que la superficie transversal se observa granos deformados debido al proceso de manufactura de la lámina.



IMAGEN 1: Ensayo de dureza, pieza de Aluminio 6061-T6 original.

Como se muestra en la imagen 2 tomada de la microestructura, de cara longitudinal, se puede visualizar incremento del tamaño de grano, proporcional a la presión, el cual se define por las periferias más grandes para la presión de 1500 psi.

Mientras que la imagen 3 de la cara transversal también muestra una proporcionalidad entre el incremento de la presión y el tamaño de grano (alargado), pero siendo más uniforme y definido

para la presión de 1000 psi, dado que para 500 y 1500 psi el alargamiento distorsiona considerablemente los bordes del grano. Los resultados de las mediciones de deformación (imagen 4) del borde expuesto al lavado se obtuvieron como se muestra en la tabla 4.

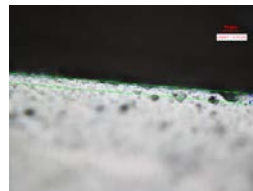


IMAGEN 4: Deformación de la cara transversal sometida a presión de la pieza de Aluminio 6061 a 500 psi.

Tabla 4: Tamaño de deformación del borde expuesto al lavado hidráulico a presión, piezas Aluminio 6061.

Pieza de aluminio 6061		No. de grano ASTM 112-13
Aluminio 6061 original	L	4
	T	5.3
Aluminio 6061 a 500 psi	L	4.8
	T	5.5
Aluminio 6061 a 1000 psi	L	4.4
	T	3.5
Aluminio 6061 a 1500 psi	L	3.3
	T	3.1

Los resultados de los tamaños de grano (número de grano, G) para cada pieza analizada se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Número de grano (G), piezas Aluminio 6061.

Pieza de aluminio 6061	Tamaño de deformación (μm)
Aluminio 6061 a 500 psi	4.19 ± 1.98
Aluminio 6061 a 1000 psi	5.26 ± 2.47
Aluminio 6061 a 1500 psi	3.93 ± 2.54

*L (Pieza longitudinal); T (Pieza transversal)

Los resultados del número de grano, tanto para el corte transversal como longitudinal, muestran una relación inversamente proporcional entre el aumento de la presión de lavado y el G. En el caso del corte transversal muestra un decrecimiento en el número de grano al pasar de 500 a 1000 psi. Para el corte longitudinal es proporcional el decaimiento del G, aunque a 500 y 1000 psi el G es superior al G de la aleación original, el mismo caso para el G de 500 psi en el corte longitudinal. Esto indica que con el incremento de la presión se genera deformación sobre el grano, lo cual puede afectar de manera directa las propiedades mecánicas de dureza.

CONCLUSIONES

El efecto de la presión sobre la microestructura de la aleación y las propiedades mecánicas se describe a continuación.

La presión de lavado afecta la superficie expuesta, sin embargo, el porcentaje de deformación no influye de manera significativa sobre las propiedades del material.

Los valores de dureza presentan cambios sobre todo en la sección transversal para las tres presiones utilizadas. Sin embargo, la variación no es considerable, ya que la variación no es mayor a los 10 puntos de dureza.

El tamaño de grano sufre cambios conforme se incrementa la presión de trabajo, a mayor presión se observa una pequeña disminución en comparación con la muestra original.

REFERENCIAS

- [1] Kotz, J., Treichel, P., Weaver, G. and Aguilar Ortega, M. (2005). Química y reactividad química. Mexico: Thomson.
- [2] Castro P., Luisa F., (20014). Aleaciones de Aluminio y su Importancia en la Industria Aeroespacial. Revista Metal Actual, 1(31), 12-20.
- [3] Banhart, J. (2012). Light-Metal Foams-History of Innovation and Technological Challenges. Advanced Engineering Materials, 15(3), pp.82-111.
- [4] Bogotá Anzola, M. and Galindo Pabón, M. (2013). PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL SECTOR AERONÁUTICO. [online] pp.1-16. Available at: https://www.academia.edu/4984205/Propiedades_de_Materiales_en_Aeronautica [Accessed 14 Jul. 2016].
- [5] Askeland, D. and Sánchez García, G. (1998). Ciencia e ingeniería de los materiales. Mexico: International Thomson Editores.
- [6] Professional Plastics, Aluminio 6061-T6 (2016). [online] Available at: <http://www.professionalplastics.com/professionalplastics/Aluminum6061DataSheet.pdf> [Accessed 14 Jul. 2016].
- [7] Kalpakjian, S. (2001). Manufacturing engineering and technology. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [8] Zambrano, J., Pereira, J., Durán, L. and Van Deventer, D. (2008). COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TORSIÓN DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA6061 TRATADA TÉRMICAMENTE. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales (RLMM), (S1), pp.183-190.
- [9] Skolianos, S., Kiourtsidis, G. and Xatzifotou, T. (1997). Effect of applied pressure on the microstructure and mechanical properties of squeeze-cast aluminum AA6061 alloy. Materials Science and Engineering: A, 231(1-2), pp.17-24.