## ESTUDIO DE LA RECRISTALIZACIÓN DE ALEACIONES DE AI y Al-Mg; EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ANÁLISIS CRISTALOGRÁFICO

## <u>D. Bartumeus</u>, M.D. Abad

IQS School of Engineering - Universidad Ramon Llull, Barcelona danielbartumeusv@iqs.url.edu, manuel.abad@iqs.url.edu

**Resumen:** Este trabajo investiga la recristalización de diferentes aleaciones de aluminio; Al 1050 (serie 1xxx), 5754 y 5083 (serie 5xxx). Estas dos últimas aleaciones contienen Mg como principal elemento aleante en distinta proporción. Para ello, se realizan tratamientos térmicos entre 100 y 550°C durante 1, 2 y 12 h. Se utiliza la difracción de rayos X para el estudio de las fases cristalinas y se llevan a cabo ensayos mecánicos, ensayos de tensión-deformación y de dureza Vickers. Tras el análisis de los resultados se pudo comprobar cómo la aleación Al 1050 recristaliza alrededor de los 200-300°C, apareciendo nuevos granos en diferente orientación cristalográfica que las muestras prístinas. Las aleaciones Al-Mg, sin embargo, no ven modificadas sus propiedades mecánicas en gran medida hasta los 400-500°C. Es a partir de los 500°C donde se empieza a apreciar la formación de óxidos de magnesio que pueden ir en detrimento de las propiedades mecánicas.

**Palabras clave:** Recristalización, resistencia a la tracción ( $\sigma$ ), deformación ( $\varepsilon$ ), dureza Vickers, difracción de rayos X

## 1. INTRODUCCIÓN.

El aluminio es el material metálico no ferroso más utilizado por la industria metalmecánica en todo el mundo [1]. El aluminio y sus aleaciones son materiales metálicos con estructura cúbica centrada en las caras (FCC), con alta ductilidad y baja temperatura de fusión (~660°C). Debido a su alta relación resistencia/peso y capacidad de conformación [2,3], las aleaciones de aluminio son ampliamente utilizadas en la fabricación estructural, principalmente en substitución del acero en multitud de industrias especializadas (aeroespacial, naval, automovilística, etc.).

Los aluminios de la serie 5xxx son principalmente aleaciones de Al y Mg endurecidas por dos mecanismos; solución sólida y deformación [4,5]. Estas aleaciones se utilizan generalmente en construcción naval y en recipientes de almacenamiento. Su contenido en magnesio no supera 5% en peso y su presencia en solución sólida permite un aumento apreciable de la resistencia a la tracción (entre 150 y 250 MPa), conservando una aceptable ductilidad próxima al 25%.

La recristalización es un proceso que implica el calentamiento de un material a una temperatura específica y el posterior enfriamiento controlado para producir un cambio en la estructura cristalina del material. En el caso de las aleaciones de aluminio, la recristalización se utiliza a menudo para mejorar sus propiedades mecánicas y eléctricas.

El objetivo de este trabajo consiste en investigar la recristalización de los Al 1050 (serie 1xxx), 5754 y 5083 (serie 5xxx) mediante el análisis de las propiedades mecánicas y el estudio cristalográfico de las fases cristalinas mediante difracción de rayos X (DRX). Para ello, se tratan térmicamente probetas de aluminio de las tres aleaciones bajo diferentes

temperaturas y tiempos y se llevan a cabo ensayos de tracción para obtener diagramas de tensióndeformación, la resistencia máxima a la tracción y la deformación en la fractura; ensayos de dureza para medir la resistencia a la deformación plástica en la base y en la punta de las probetas; y análisis mediante difracción de rayos X para identificar el patrón que más se ajusta a las muestras y distinguir los granos orientados en una dirección cristalográfica particular.

## 2. TRABAJO EXPERIMENTAL.

Se han seleccionado las aleaciones de Al 1050, 5754 y 5083, cuya composición elemental se muestra en la Tabla 1. Se han sometido tres probetas de cada tipo de aleación a tratamientos térmicos de entre 100 y 500°C durante 1, 2 y 12 h para realizar el estudio de las propiedades mecánicas, y hasta 550°C para el análisis cristalográfico.

 Tabla 1. Composición química de las aleaciones

 estudiadas en porcentaje atómico.

	Elemento [%]											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Bi	Mn+Cr	Otros	AI
AI 1050	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	-	0,07	0,05	-	-	0,03	99,5
AI 5754	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6-3,6	0,3	0,2	0,15	-	0,1-0,6	0,15	Resto
AI 5083	0,4	0,4	0,1	0,4-1	4-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15	-	-	0,15	Resto

En primer lugar, se ha obtenido el diagrama de tensióndeformación de las probetas mediante ensayos de tracción (ISO-6892-1:2009) en una máquina universal de ensayos a tracción MTS Insight 100SL. Tras estirar las probetas, se han cortado en una cortadora Struers Discotom 2 con el fin de separar la base de la pieza (zona no estirada) y las puntas de las probetas (zona estirada o deformada) para su posterior estudio. A continuación, se han calculado los valores de dureza (ISO-6507-1:2018) en las piezas cortadas de las probetas, tanto con y sin deformación, mediante un Durómetro Centaur.

Finalmente, se ha llevado a cabo un análisis mediante difracción de rayos X con el fin de obtener información cristalográfica tras cada calentamiento. Dicho análisis se ha realizado en un equipo Panalytical Empyrean con un detector PIXcel Medipix 3 utilizando una fuente de radiación Cu-K $\alpha$  en la configuración de Bragg-Brentano. Además, se ha empleado el software Highscore Plus y las bases de datos JCPDS-International Centre for Diffraction Data (ICDD) para la correcta identificación de las fases cristalinas.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

# 3.1. Resistencia máxima a la tracción y deformación en la fractura.

En la Figura 1 se representan las curvas obtenidas de tensión-deformación para las piezas calentadas durante 12 h a diferentes temperaturas (a modo de ejemplo). En términos generales, el Al 1050 es la aleación donde se aprecian mayores variaciones en sus curvas tras someterlo a diferentes temperaturas.



**Figura 1.** Diagramas de tensión-deformación tras 12 h de calentamiento de los Al a) 1050, b) 5754 y c) 5083.

A partir de las curvas de tensión-deformación de todas las muestras se ha calculado la resistencia máxima a la tracción y la deformación en el punto de rotura y se han representado en la Figura 2 y Figura 3, respectivamente. Comparando los valores de las probetas prístinas, se puede observar que el Al 5083 presenta una mayor resistencia a la deformación alrededor de 285 MPa, seguido del Al 5754 con 200 MPa y, por último, el Al 1050 con 105 MPa. Los resultados de las probetas calentadas 1 y 2 h son prácticamente idénticos entre sí, mientras que las calentadas 12 h presentan una menor resistencia a la tracción en todos los casos. Se puede concluir que el tiempo de calentamiento influye en las propiedades mecánicas, aunque en menor medida que la temperatura.

En el Al 1050 se observa una gran caída en la resistencia máxima conforme se aumenta la temperatura, especialmente a partir de 300°C. El Al 5754 presenta cierta bajada en los valores de resistencia máxima, aunque sin gran variación entre ellos, siendo la

pérdida máxima de tan solo 30 MPa. El Al 5083 apenas presenta diferencias en los valores hasta los 400-450 °C.

Analizando los datos de la deformación en la fractura de la Figura 3 se puede observar que el Al 1050 presenta un gran aumento en la ductilidad con la temperatura, especialmente a partir de 300°C. Por otro lado, las aleaciones Al-Mg apenas varían con la temperatura hasta 450°C, donde se produce una notable disminución.



**Figura 2.** Resistencia máxima a la tracción de los Al a) 1050, b) 5754 y c) 5083.



**Figura 3.** Deformación en la fractura de los Al a) 1050, b) 5754 y c) 5083.

#### 3.2. Dureza Vickers (zona sin deformación).

Se han medido las durezas en las bases de la probetas o zonas sin deformar y se han representado en la Figura 4. Se puede observar una disminución de la dureza con la temperatura para todas las muestras. También se puede apreciar la similitud con la tendencia obtenida en los valores de resistencia máxima a la tracción, donde la dureza del Al 1050 cae más de un 50% a partir de 300°C y donde se produce una pequeña pérdida de dureza para ambas aleaciones Al-Mg.

En la Figura 4e se muestra la correlación entre la resistencia máxima y la dureza para cada aleación y tratamiento térmico. El Al 5083 arroja los mayores valores, el Al 5754 valores intermedios y el Al 1050 los menores valores separados en dos grupos (tras el calentamiento a 300°C).



**Figura 4.** Dureza Vickers en la base de la probeta de a) todos los aluminios, b) del Al 1050, c) 5754 y d) 5083 ( $\Box$  1h,  $\circ$  2h,  $\Delta$  12 h) y e) relación de la resistencia máxima y la dureza de las probetas.

# 3.3. Incremento de dureza Vickers entre la base y la punta de la probeta.

En los ensayos de tracción, la parte central de la probeta se deforma plásticamente generando un endurecimiento del material, conocido como acritud. Se han medido los valores de dureza obtenidos en la parte central de las probetas tras su deformación para todas las muestras. En la Figura 5 se representan los valores de dureza de las muestras con y sin deformación en las muestras calentadas durante 12 h (a modo de ejemplo). Los valores de dureza en la punta de la probeta obtenidos son superiores a los medidos en la base de la probeta en todos los casos. No se observan grandes diferencias en el Al 1050 hasta los 300°C, dado que las probetas apenas se han deformado antes de rotura (~ 10%), y, por tanto, apenas hubo acritud. Las aleaciones Al-Mg han mostrado siempre mayores valores en las zonas deformadas, siendo el aumento respecto a la base menor a partir de 400°C para el Al 5754 y 500°C para el Al 5083.



**Figura 5.** Dureza de la base y la punta de las probetas tras 12 h de calentamiento del Al a) 1050, b) 5754 y c) 5083.

## 3.4. Difracción de rayos X.

Se han analizado las muestras mediante DRX entre 30 y 80°  $\theta/2\theta$ . En la Figura 6 se muestran los difractogramas obtenidos para las probetas sin tratar y tratadas tras 12 h de calentamiento hasta 550°C.



**Figura 6.** Difractogramas tras 12 h de calentamiento del Al a) 1050, b) 5754 y c) 5083. Los índices de Miller y sus posiciones para el Al 00-002-1109 y para el MgO 04-016-2776 se han representado en azul y rojo, respectivamente.

El análisis de los difractogramas obtenidos permitió la identificación del patrón de aluminio (JCDPS card 00-002-1109). El pico obtenido a 38,6° se asocia al plano cristalográfico (111), el de 44,8° al (200), el de 65,2° a (220) y, por último, el de 78,3° al (311). En los difractogramas de las aleaciones Al-Mg se puede

observar la aparición de nuevos picos a 500°C en torno a 42,8° y 62,1°. Estos picos se han identificado con los planos cristalograficos (200) y (220) de MgO (JCDPS card 04-016-2776). Estos nuevos picos son apreciables en los difractogramas a partir de 500°C debido a la formación de MgO. Además, su intensidad es mayor en la muestra Al 5083 que en la de Al 5754, y cuanto mayor es la temperatura y el tiempo de calentamiento, probablemente por la mayor cantidad de Mg en la muestra.

El índice de textura permite determinar la dirección [h, ky l] o plano (h, k y l) cristalográfico en la que se orientan principalmente los granos cristalinos [6]. El índice de textura para las muestras tras calentamiento de 12 h se ha representado en la Figura 7. El Al 1050 sin tratar presenta granos orientados principalmente en el plano cristalográfico (220). El Al 5747 sin tratar presenta una mayor orientación en el plano (200). El Al 5083 sin tratar muestra orientaciones preferenciales muy semejantes en los planos (111) y (220).

Al analizar las muestras tras los calentamientos se puede apreciar cómo el Al 1050 muestra un cambio de textura alredor de 300°C con un cambio de tendencia a la orientación (200). Este cambio se ve reflejado cada vez más conforme aumenta la temperatura. En los Al 5754 y 5083 no se observan cambios en las orientaciones preferenciales, solamente la aparición de oxidos de Mg. Durante la recristalización se forman núcleos de nuevos granos que reemplazan los granos ya existentes del material deformado. Tras ello, tiene lugar el crecimiento de los granos en unas direcciones o planos cristalográficos determinados que pueden o no diferir de las orientaciones presentes inicialmente en el material, como puede observarse en el Al 1050.



**Figura 7**. Índice de textura tras 12 de calentamiento en el Al a) 1050, b) 5754 y c) 5083.

### 4. CONCLUSIONES.

Se ha realizado un estudio sobre la recristalizacion de diferentes aleaciones de aluminio bajo determinadas condiciones atendiendo a las propiedades mecánicas y las fases cristalográficas reveladas por DRX.

Las curvas de tensión-deformación indican una disminución de la tensión máxima y un aumento en la

deformación para la muestra de Al 1050 con la temperatura y el tiempo. Tales cambios no se observan en las muestras de Al-Mg. Para el Al 1050, los mayores cambios en las propiedades mecánicas se producen en el rango de 200 a 300°C.

La dureza muestra una tendencia acorde a la resistencia máxima con una gran bajada para el Al 1050 en torno a 200-300°C. El Al 5083 presenta una mayor resistencia a la tracción y dureza y una menor ductilidad que el Al 5754, que a su vez presenta una mayor resistencia a la tracción y dureza y una menor ductilidad que el Al 1050. Las medidas de dureza en la parte estirada de las probetas evidencian el aumento de dureza por deformación plástica en todas las muestras, siendo menor el aumento de dureza en las aleaciones Al-Mg calentadas por encima de 400°C.

El análisis cristalográfico mediante DRX muestra las orientaciones preferenciales para las diferentes muestras. En el caso del Al 1050 se observa un cambio de orientación cristalográfica preferente a partir de 200°C. En el caso de las muestras Al-Mg no se observa un cambio en el índice de textura, pero sí la formación de MgO, especialmente en el Al 5083 el cual presenta un mayor aporte de Mg.

### 5. REFERENCIAS.

- Davis, J. R., "Aluminum and Aluminum Alloys book. ASM specialty handbook", Ed. ASM International, 1993.
- [2] Totten, G. E., Mackenzie, D. S., "Handbook of aluminum vol. 1: Physical Metallurgy and Processes", CRC Press, 2003
- [3] Schweitzer, P. A., "Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties", CRC Press, 2003.
- [4] Zander, J., Sandström, R.S., "Modelling technological properties of commercial wrought aluminum alloys", Materials & Design, 30, 3752-3759, 2009.
- [5] Unfried-Silgado, J., López del Río, J., Machuca Vargas, D., Pérez Caicedo, E., Zambrano Pinedo, C., Niebles Núñez, E.E., "Efectos de la aplicación de tratamientos térmicos sobre el tamaño de grano y la dureza de aleaciones de aluminio AA5083-H116", Revista Materia V22 N01, 2017
- [6] Sala, N., Abad, M.D., Sánchez-López, J.C., Crugeira, F., Ramos-Masana, A., Colominas, C., "Influence of the carbon incorporation on the mechanical properties of TiB<sub>2</sub> thin films prepared by HiPIMS", International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 107, 105884, 2022