Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (2): 707-711

EFECTO DE PRECIPITADOS FINOS Y DISPERSOIDES DURANTE LA RECRISTALIZACION EN ALEACIONES COMERCIALES DE ALUMINIO

Benjamín Hidalgo-Prada, Solange Y. Paredes-Dugarte

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (2): 707-711

EFECTO DE PRECIPITADOS FINOS Y DISPERSOIDES DURANTE LA RECRISTALIZACION EN ALEACIONES COMERCIALES DE ALUMINIO

Benjamín Hidalgo-Prada, Solange Y. Paredes-Dugarte

Laboratorio de Caracterización de Materiales, Departamento de Ciencia de los Materiales, Universidad de Oriente. Cumaná, Venezuela

E-mail: bhidalgo@sucre.udo.edu.ve, sparedes@sucre.udo.edu.ve

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

El control del tamaño de grano y la textura durante los procesos termomecánicos (PTM) de aleaciones de aluminio, tiene una gran importancia industrial, particularmente la forma en que las partículas grandes y pequeñas influencian el tamaño y la textura de los granos recristalizados, durante el procesamiento comercial de estas aleaciones. En el presente trabajo se utiliza la microscopía electrónica de transmisión para estudiar el efecto de precipitados finos y dispersoides sobre la evolución de la subestructura en aleaciones comerciales de aluminio endurecibles y no endurecibles por precipitación durante diversos PTM característicos. Para el estudio se utilizaron las aleaciones comerciales de aluminio 7475 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr), 6201 (Al-Mg-Si), 3105 (Al-Mg-Mn) y 3003 (Al-Mn). Los resultados permitieron establecer que durante los procesos termomecánicos de fabricación de las aleaciones comerciales estudiadas, el proceso de recristalización es altamente influenciado no solo por partículas grandes (> 1 μm) sino también por precipitados finos y dispersoides con tamaños menores de 1 μm, los cuales interactúan con los subgranos o con los bordes de grano de ángulo alto, produciendo un efecto de anclaje sobre los mismos, el cual inhibe su migración durante la recuperación y crecimiento. Se concluye que la presencia de estos dispersoides puede afectar el crecimiento normal de los subgranos y por lo tanto, la textura de recristalización del material, lo cual podría tener efectos sobre la evolución de la microestructura afectando a su vez los procesos de extrusión y trabajo mecánico en etapas subsiguientes.

Palabras clave: Aleaciones de aluminio, recristalización, subgranos, anclaje por dispersoides.

Abstract

The control of grain size and texture during thermomechanical processing (TMP) of aluminum alloys is of the highest importance for industrial applications, particularly the way in which large and small particles influence the size and texture of recrystallised grains during commercial processing of these alloys. In the present work transmission electron microscopy is used to study the effect of fine precipitates and dispersoides on the evolution of the substructure in heat treatable and non heat treatable commercial aluminum alloys 7475 (Al-Zn-Mg-Cu-Cr), 6201 (Al-Mg-Si), 3105 (Al-Mg-Mn) and 3003 (Al-Mn). The results show that during the thermomechanical fabrication process of these commercial alloys, the recrystallization behavior is influenced not only by large particles (> 1 μm), but also by fine precipitates and dispersoides with sizes of less than 1 μm, which interact with the subgrains structure and with the grain boundaries, producing a drag force that inhibit their migration during recovery and growth. From the observation and analysis it was concluded that the presence of small particles and dispersoides could affect the normal migration of the substructure and thus, the recrystallization texture of the material, with further effects on microstructure evolution during other processes such as extrusion and hot working of the material.

Keywords: Aluminum alloys, recrystallization, subgrains, dispersoides pinning.

1. INTRODUCCIÓN

El control del tamaño de grano y la textura durante los procesos termomecánicos (PTM) de aleaciones comerciales de aluminio, tiene una gran importancia industrial en el control de la microestructura durante la fabricación de las mismas y en procesos aguas abajo. En el caso de las aleaciones comerciales de aluminio que contienen elementos formadores de dispersoides tales como, Zr, Fe, Mn, Cr, V, Hf, Ti, Nb, Y y Sc y combinaciones, la optimización de sus

propiedades vía PTM no solo depende de las partículas de segunda fase > 1 μm las cuales pueden actuar como sitios preferenciales para la nucleación de recristalización y de los regimenes de deformación, a través de gradientes de orientación reticular (Humphreys [1]), sino también de los elementos formadores de dispersoides, los cuales pueden encontrarse parcialmente en solución sólida por encima de los puntos de saturación y parcialmente formando partículas de aluminatos (Hallem et al. [2], Forbord et al. [3]), con tamaños promedios < 1 μm. Los dispersoides son precipitados incoherentes que se forman durante el tratamiento térmico hasta o a la temperatura de homogenización. Ellos interactúan con la subestructura de granos de ángulos altos y con los subgranos durante el PTM, actuando como obstáculos a la migración de las interfases y pueden afectar así la recuperación y recristalización del material (Humphreys [1], Humphreys [4], Huang y Humphreys [5]). Por otra parte, el efecto del anclaje sobre la microestructura resulta en una textura de forma y orientación, debido a que los bordes de los granos y subgranos se encuentran sometidos a diferentes intensidades de anclaje por parte de las partículas, resultando en una migración no homogénea (Samadjar y Doherty [6], Miroux et al. [7]). Adicionalmente, la presencia de los dispersoides tiene también un efecto importante sobre la evolución de la textura de recristalización, sobre todo cuando estas pequeñas partículas se precipitan durante la etapa inicial del recocido (Vatne et al. [8], De La Chapelle y Duval [9]). La efectividad de los dispersoides en cumplir este rol depende de su tamaño, del espacio entre ellos y de su distribución (Humphreys y Ardakani [10]). En el presente trabajo se utiliza la microscopía electrónica de transmisión (MET) para estudiar el efecto de precipitados finos y dispersoides sobre la evolución de la subestructura en aleaciones comerciales de aluminio endurecibles y no endurecibles por precipitación.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Para el estudio se utilizaron las aleaciones de Al-Zn-Mg-Cu-Cr (ALCANVEN- 7475), homogeneizada, a 482 ºC por 8 horas, laminada en caliente a 220 ºC y 90% reducción en área y recristalizada a 482 ºC durante 30 minutos y la aleación Al-Mg-Si (SURAL – 6201) en forma de alambrón, con tratamiento de disolución a temperatura de 580º por 30 minutos, envejecida a 450 ºC por 2 minutos (Tratamiento de Envejecimiento Rápido a Alta Temperatura - TERAT). Las aleaciones Al-Mg-Mn (ALCASA - 3105) y Al-Mn (ALCASA – 3003) fueron ambas obtenidas por colada semicontínua y luego homogeneizadas a temperatura de 500 ºC por 8 horas. Posteriormente laminadas en caliente a temperatura inicial de 500 ºC, hasta un espesor de 6 mm. Finalmente laminadas en frío con recocido estático intermedio (aleación 3105) hasta los temples (espesores) de interés. Las composiciones de las aleaciones comerciales de aluminio utilizadas en el presente estudio se presentan en la Tabla 1.

Para las observaciones por microscopía electrónica de transmisión (MET) se desbastaron mecánicamente secciones del material hasta aproximadamente 0,15 mm de espesor, de las cuales se troquelaron discos de 3,0 mm de diámetro y se electro pulieron por el método de doble chorro en una unidad Tenupol-Polipower – 2, utilizando una solución de 75% metanol y 25% ácido nítrico a una temperatura de -20 ºC y un voltaje de 12 V. Las muestras preparadas con esta técnica fueron observadas en campo claro en un microscopio electrónico de transmisión marca Hitachi, modelo H-600, operado a 100 KV.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aleaciones tratables térmicamente

De los resultados experimentales y las observaciones por MET fue posible establecer que en el caso de la aleación comercial de aluminio 7475 con la historia termomecánica señalada, el proceso de recristalización es influenciado por precipitados de segunda fase (> 1 μm) los cuales actúan como sitios preferenciales de nucleación de nuevos granos, ya que este tipo de partículas induce fuertes gradientes de deformación, los cuales se revelan en las áreas que rodean las partículas, tal como se ilustra en la Figura 1. En esta misma aleación se encuentra que las partículas pequeñas (< 1 μm) inhiben el crecimiento de los granos o interactúan con los subgranos a través del efecto Zener, tal como se ilustra en la Figura 2. Para la aleación comercial de aluminio 6201 procesada a través del PTM señalado, se observa igualmente el efecto de interacción de los dispersoides (< 1 μm) con los bordes de grano, como se ilustra en la Figura 3. Debido a que la recristalización está asociada con la migración de los bordes de granos y subgranos, es evidente que la presencia de estas partículas pequeñas finamente dispersas en la matriz, retardará

Tabla 1. Composición química en % de peso de las aleaciones comerciales de aluminio (AA) estudiadas

Aleaciones	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cu	Ni	Cr	Ti	B	Ga	Al
AA7475	0.14	0.12	0.03	2.1	5.6	1.4		0.2	0.02			Balance
AA6201	0.68	0.27		0.67			0.0001	0.001	0.01	0.007	0.02	Balance
AA3105	0.12	0.53	0.32	0.54	0.001	0.18		0.0009	0.006	0.0009		Balance
AA3003	0.20	0.65	1.042	0.003	0.0075	0.128	0.0028	0.0007	0.013	0.0022		Balance

la nucleación y crecimiento de los granos recristalizados, ya que los mismos tendrán gran dificultad para salir de la zona de deformación a causa del anclaje de Zener producido por los dispersoides.



Figura 1. Micrografía por MET ilustrando el campo de e esfuerzo alrededor de una partícula de segunda fase de tamaño > 1 µm en la AA 7475.

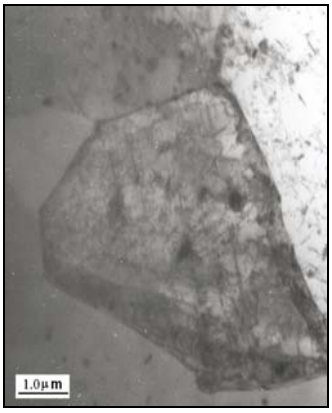


Figura 2. Micrografía por MET. Efecto Zener sobre subgranos en la aleación de aluminio 7475.

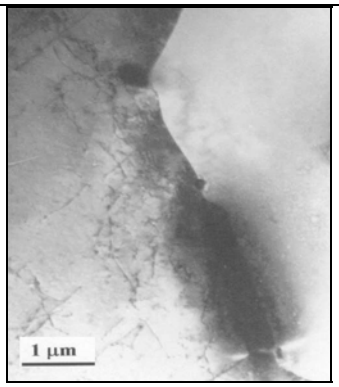


Figura 3. Micrografía por MET. Dispersoide anclando borde de grano en la aleación 6201. (Alcalá [11]).



Figura 4. Micrografía por MET de partículas > 1 µm produciendo campo de esfuerzo débil en la AA 3003.

Aleaciones no tratables térmicamente

En el caso de las aleaciones comerciales de aluminio 3105 (Al-Mg-Mn) y 3003 (Al-Mn) procesadas a través de las rutas termomecánicas indicadas, se observó que durante el proceso de laminado en caliente ocurren recuperación y recristalización dinámicas. Sin embargo, las partículas de segunda fase mayores de 1 µm tienen poco o ningún efecto sobre la evolución estructural del material, como era de esperarse, ya que estas aleaciones no endurecen por precipitación y en ellas los intermetálicos grandes (> 1 µm) producen un campo de esfuerzo débil, como se ilustra en la Figura 4. En contraste, las observaciones por MET permiten establecer que los dispersoides con tamaños menores de 1 µm interactúan fuertemente

con la subestructura de dislocaciones, particularmente con los bordes de subgranos, controlando la migración de los mismos e influenciando, por lo tanto, la recristalización, particularmente el proceso de recuperación que tiene lugar mediante el crecimiento de los subgranos. Esto causa que la recristalización tenga lugar a través de un proceso anormal de migración de los bordes de los subgranos, lo cual afecta la textura final del material. [Humphreys, 1997a]. La fuerte interacción entre los dispersoides y los bordes de subgranos para este régimen del PTM se ilustra en las micrografías por MET de la Figura 5 (a y b). Debido al endurecimiento por deformación ocasionado por la reducción de área durante la etapa de laminación en frío de la aleación 3105, esta fue sometida a un recocido estático en el espesor 1.5 mm a 400 ºC por 16 horas, para recuperar y recristalizar la estructura, a fin de continuar el proceso de laminación a espesores menores. Como resultado del recocido se obtiene una estructura que muestra un marcado efecto de interacción entre los bordes de grano de ángulo alto recristalizados y los dispersoides, lo cual sugiere el efecto que tienen estas pequeñas partículas en la evolución de la microestructura, tanto en el proceso de recuperación, como en el tamaño final de los granos recristalizados. La micrografía por MET de la Figura 6 ilustra la forma de esta interacción partícula-borde de grano, para la aleación comercial de aluminio 3105.

4. CONCLUSIONES

Se concluye que durante los procesos termomecánicos de fabricación de las aleaciones comerciales Al-Zn-Mg-Cu-Cr (7475), Al-Mg-Si (SURAL 6201), Al-Mg-Mn (ALCASA 3105) y Al-Mn (ALCASA 3003), el proceso de recristalización es altamente influenciado por precipitados finos y dispersoides con tamaños menores de 1 μm, los cuales interactúan con la subestructura de subgranos o con los bordes de grano de ángulo alto. La presencia de estos dispersoides puede afectar la recuperación y el crecimiento normal de los subgranos y por lo tanto, la textura de recristalización del material, lo cual podría tener efectos sobre la evolución de la microestructura afectando a su vez los procesos de extrusión y trabajo mecánico en etapas subsiguientes a la fabricación de las aleaciones.

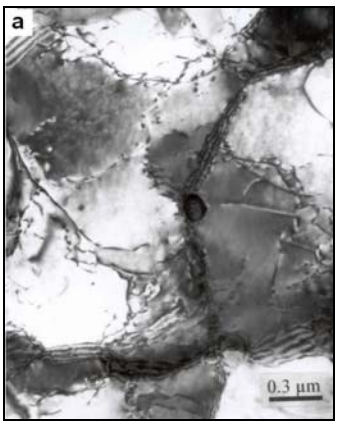


Figura 5a. PTM: Laminación en caliente. Micrografía por MET que ilustra la interacción de dispersoides con subgranos en las aleaciones comerciales de aluminio 3003.

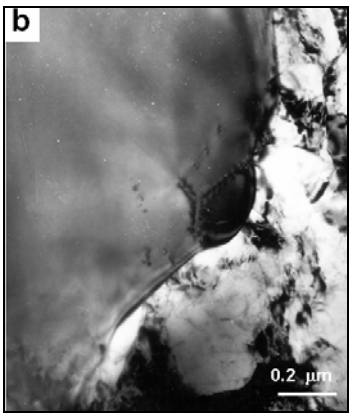


Figura 5b. PTM: Laminación en caliente. Micrografía por MET que ilustra la interacción de dispersoides con subgranos en las AA 3105. (Navarro [12]).

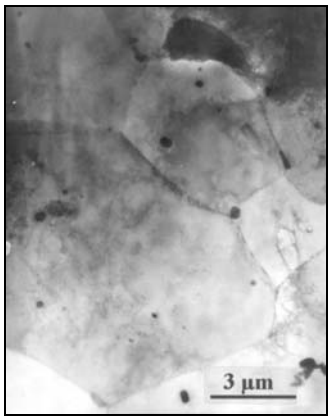


Figura 6. Efecto de dispersoides sobre bordes de grano durante recocido estático en la aleación comercial de aluminio 3105.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Humphreys F. J. Acta Mater. 1997; **45**: 5031-5039.

[2] Hallem H, Forbord B. and Marthinsen. 2004; Proc. 9th International Conference on Aluminium Alloys, Aug. 2-5, Brisbane, Australia. Nie J.F., Morton A.J., Muddle B.C. (eds), p. 240-245.

[3] Forbord B., Hallem H., Ryum N., Marthinsen K. Mat. Sci. and Eng. A 2004; **387-389**: 936-939.

[4] Humphreys F. J. Acta Mater. 1997; **45**: 4231-4240.

[5] Huang Y y Humphreys F.J. Acta Mater. 1999; **47**: 2259-2268.

[6] Samadjar I. y Doherty R.D. Acta Mater. 1998; **46**: 3145-3158.

[7] Miroux A., Anselmo E., van der Zwaag S. Materials Forum. 2004; **28**: 1104-1109.

[8] Vatne H.E., Benum S., Daaland O., and Nes E. Texture and Microstructures. 1996; **26-27**: 385-412.

[9] De La Chapelle S and Duval P. Texture and Microstructures. 2002; **35**: 55-70.

[10] Humphreys F.J. y Ardakani M.G. Acta Mater. 1996; **44**: 2717-2727.

[11] Alcalá E. Influencia de un Tratamiento de Envejecimiento Rápido a Altas Temperaturas (TERAT) Sobre las Propiedades Mecánicas y Estructurales de la Aleación de Aluminio 6201, Tesis de M.Sc. Puerto Ordaz (Venezuela): Universidad Nacional Experimental de Guayana, 2003.

[12] Navarro HJ. Evaluación y Caracterización de la Aleación de Aluminio CVG ALCASA durante el Proceso de la Laminación en Frío, Tesis de M.Sc. Puerto Ordaz (Venezuela): Universidad Nacional Experimental de Guayana, 2003.