Transformaciones de fase en aleaciones Zn-22%Al-2%Cu y Zn-22%Al-2%Cu-X (X = 1, 2 y 3%Ag) envejecidas isotérmicamente

Alfredo Flores-Ramos^{a,✉}, Héctor J. Dorantes-Rosales^a, Víctor M. López-Hirata^a,
Felipe Hernández-Santiago^b, Jorge L. González-Velázquez^a,
Alberto A. Torres-Castillo^c, Diego I. Rivas-López^a

^aInstituto Politécnico Nacional, ESIQIE-DIMM, Apartado Postal 118-430, Admon. GAM, D.F. 07738, México

^bInstituto Politécnico Nacional, ESIME-AZC, Av. de las Granjas 682, Col. Santa Catarina, Azcapotzalco, México

^cFacultad de Ingeniería-Instituto de Metalurgia UASLP, C/ Sierra Leona 550, SLP, 78210, México

✉ Autor para la correspondencia: alfredofloresipn@outlook.es

Enviado: 10 Diciembre 2013; Aceptado: 28 Agosto 2014; Publicado on-line: 13 November 2014

RESUMEN: En el presente estudio sobre las transformaciones de fase en las aleaciones Zn-22%Al-2%Cu y Zn-22%Al-2%Cu-X (X = 1, 2 y 3%Ag) se utilizó Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Las aleaciones fueron homogeneizadas a 350 °C durante 10 días, templadas a ~2 °C y posteriormente envejecidas a 200 °C durante diferentes tiempos. Todas las aleaciones ensayadas presentaron una microestructura inicial formada por una matriz de granos finos y equiaxiales de las fases α y η . Además, para las aleaciones sin Ag se observa la presencia de partículas de la fase ϵ (CuZn_4) y de Φ ($(\text{Ag, Cu})\text{Zn}_4$) en las que se adicionó Ag. Durante el envejecido, ocurre la reacción de cuatro fases, $\alpha + \epsilon \rightarrow \eta + \tau'$, para obtener las fases de equilibrio η , α y τ' . Sin embargo, la adición de Ag promueve la formación de la fase Φ , la cual retarda e incluso inhibe la reacción de cuatro fases. La estabilidad de la fase Φ se obtiene con 3%Ag, lo que podría mejorar la estabilidad dimensional de la aleación para futuras aplicaciones industriales.

PALABRAS CLAVE: Adiciones de Ag; Aleaciones Zn-Al-Cu; Precipitación; Reacción de cuatro fases; Transformaciones de fase

Citation / Cómo citar este artículo: Flores-Ramos, A., Dorantes-Rosales, H.J., López-Hirata, V.M., Hernández-Santiago, F., González-Velázquez, J.L., Torres-Castillo, A., Rivas-López, D.I. (2014) "Transformaciones de fase en aleaciones Zn-22%Al-2%Cu y Zn-22%Al-2%Cu-X (X = 1, 2 y 3%Ag) envejecidas isotérmicamente". *Rev. Metal.* 50(4): e026. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.026>.

ABSTRACT: *Phase transformations in Zn-22%Al-2%Cu and Zn-22%Al-2%Cu-X (X = 1, 2 and 3%Ag) alloys during aging treatments.* The study of phase transformations that take place in Zn-22%Al-2%Cu and Zn-22%Al-2%Cu-X (X = 1, 2 and 3%Ag) alloys was carried out using X-Ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM). Alloys were homogenized at 350 °C during 10 days and quenched at ~2 °C. Subsequently, samples were aged at 200 °C for different times. The initial microstructure consists in a matrix of fine equiaxial grains of α and η phases for all the alloys. Besides isolated particles of ϵ and Φ were observed without and with Ag addition, respectively. During the aging, the four phase reaction, $\alpha + \epsilon \rightarrow \eta + \tau'$, takes place to obtain the equilibrium η , α and τ' phases. However, the Ag addition promotes the formation of the Φ phase, which retards or inhibits the four phase reaction. The stability of the Φ phase is obtained with 3%Ag, which could improve the dimensional stability of the alloy for future industrial applications.

KEYWORDS: Ag addition; Four phases reaction; Phase transformations; Precipitation; Zn-Al-Cu alloys

Copyright: © 2014 CSIC. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial (by-nc) Spain 3.0 License.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones base zinc (Zn) emplean aluminio (Al) como su principal elemento aleante. Estas aleaciones han sido producidas principalmente con fines estructurales, debido a su resistencia mecánica, gran capacidad de deformación, buena resistencia a la corrosión y a otros beneficios, tales como la baja temperatura de trabajo y el bajo costo de las matrices (Ruano, 1982; Torres-Villaseñor *et al.*, 1985; Pérez-Prado *et al.*, 1998). Adicionalmente, es posible obtener otras propiedades útiles cuando se agregan pequeñas cantidades de cobre (Cu) y/o magnesio (Mg), que en combinación incrementan tanto la resistencia mecánica como la corrosión. Sin embargo, la cantidad de estos elementos debe ser controlada, ya que en exceso se puede reducir la ductilidad y, para el caso de forja, tener una disminución en el grado de conformación (Ciach *et al.*, 1969; Houghton y Murray, 1984; Torres-Villaseñor y Negrete, 1994).

Es conocido que la aleación eutectoide del sistema Zn-Al posee propiedades superplásticas, aun cuando es modificada con un porcentaje de cobre (Cu) entre el 2 y 5% en peso (Ciach *et al.*, 1969; Houghton y Murray, 1984; Mykura *et al.*, 1986; Torres-Villaseñor y Negrete, 1994; Rivas-López, 2001). Una de las principales condiciones de las propiedades superplásticas es un tamaño de grano fino similar al obtenido mediante tratamientos de homogeneizado a 350 °C seguido de un temple (Pérez-Prado *et al.*, 1998; McNelley, 2010). Con la adición de cobre se incrementa la resistencia de la aleación; esto es atribuido a que se promueve la formación del intermetálico metaestable CuZn_4 (ϵ). Al aplicar tratamientos térmicos de envejecido por debajo de 250 °C, ϵ se transforma en la fase ternaria estable rica en aluminio τ' ($\text{Al}_4\text{Cu}_3\text{Zn}$), por medio de la reacción de cuatro fases, α (rica en Al) + $\epsilon \rightarrow \eta$ (rica en Zn) + τ' (Ciach *et al.*, 1969; Murphy, 1980; Zhu, 1994; Dorantes Rosales, 2000). Sin embargo, esta transformación provoca cambios dimensionales indeseables en la aleación con un aumento de volumen cercano al 4% y una expansión lineal del orden de 1,6% (Lohberg, 1983; Mykura *et al.*, 1986). Esto resulta problemático para aplicaciones que requieren una alta precisión y buen control dimensional. Actualmente se estudia el efecto de la adición de plata (Ag) en la aleación Zn-22%Al (eutectoide). Se ha publicado que para las composiciones de 4,24% y 6,15% en Ag, se forma el intermetálico AgZn_3 y en aleaciones con contenidos de 1% en Ag se obtiene un refinamiento de grano de alrededor del 50% con respecto a los granos de la aleación Zn-22%Al. Se ha concluido que con la adición de plata es posible obtener altos niveles de deformación (Zhu, 1999; Dorantes Rosales, 2000; Casolco *et al.*, 2003; Casolco *et al.*, 2006).

La importancia del presente trabajo reside en que no se ha descrito hasta ahora el efecto combinado

de la adición de Cu y Ag sobre las transformaciones de fase en la aleación eutectoide Zn-Al. En base a lo anterior, el objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de la adición de Ag sobre las transformaciones de fase de la aleación Zn-22%Al-2%Cu que ocurren durante tratamientos térmicos de envejecimiento artificial. Asimismo, la adición de plata permitirá la formación de la fase intermetálica Φ para inhibir la presencia de la fase ϵ , lo que favorecerá que no ocurra la reacción de cuatro fases, $\alpha + \epsilon \rightarrow \eta + \tau'$, responsable de la inestabilidad dimensional de la aleación.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Muestras de las aleaciones Zn-22%Al-2%Cu, Zn-22%Al-2%Cu-1%Ag, Zn-22%Al-2%Cu-2%Ag y Zn-22%Al-2%Cu-3%Ag con dimensiones de 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm fueron pulidas a espejo mediante el método convencional metalográfico, para posteriormente ser homogeneizadas a 350 °C durante 10 días y templadas a ~ 2 °C en agua helada. La caracterización mediante DRX se llevó a cabo en un difractómetro BRUKER D8 Focus con radiación Cu K α , barrido 2 θ de 35° a 48°, velocidad de 0,66° min⁻¹, 35 V y 25 mA. La caracterización mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se realizó en un microscopio JEOL 6701F a 20 kV. Las imágenes fueron obtenidas mediante electrones retrodispersados para lograr un contraste composicional. Las imágenes fueron complementadas con microanálisis puntuales y mapeos elementales mediante un espectrómetro NORAN de energía dispersiva de rayos X (EDS).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización mediante Difracción de Rayos X

La Figura 1 muestra la evolución de los patrones de difracción de las aleaciones Zn-22%Al-2%Cu-X (X = 0, 1, 2 y 3%Ag) durante el envejecimiento artificial a 200 °C para diferentes tiempos. En el caso de la aleación Zn-22%Al-2%Cu, las fases presentes en la condición inicial son η , α y ϵ . En el envejecimiento, los picos característicos de la fase ϵ desaparecen después de 5 horas y aparecen los picos de difracción de la fase τ' . La descomposición de la fase ϵ y la aparición de la fase τ' , ha sido asociado con la reacción de cuatro fases $\alpha + \epsilon \rightarrow \eta + \tau'$ (Hillert, 1998) y es la responsable de la inestabilidad dimensional de la aleación (Murphy, 1975; Mykura *et al.*, 1986; Zhu, 1999; Casolco *et al.*, 2006). Después de 10 horas a 200 °C se obtienen las fases de equilibrio η , α y τ' (Baker, 1992; Zhu, 2004).

En el caso de las aleaciones con adición de Ag (Figs. 1b, 1c y 1d), las fases iniciales son η , α y Φ . Los picos de difracción de rayos X correspondientes a la fase Φ fueron identificados mediante la ficha

FIGURA 1. Diagramas de difracción de rayos X de las aleaciones (a) Zn-22%Al-2%Cu, (b) Zn-22%Al-2%Cu-1%Ag, (c) Zn-22%Al-2%Cu-2%Ag y (d) Zn-22%Al-2%Cu-3%Ag, envejecidas a 200 °C durante diferentes tiempos.

PDF 51-0642 con una composición $(\text{Cu,Ag})\text{Zn}_4$. Es decir, la adición de Ag promueve la formación de la fase Φ con una estructura *hcp* (Casolco *et al.*, 2003; Casolco *et al.*, 2006).

La Figura 1b muestra la evolución de los diagramas de difracción de rayos X de la aleación Zn-22%Al-2%Cu-1%Ag. Se observa que los picos de difracción de la fase Φ se desplazan hacia ángulos menores durante los envejecimientos isotérmicos a 200 °C durante 5, 10 y 25 horas. Posteriormente, los picos de difracción de la fase Φ mantienen la misma

posición angular hasta 100 horas de envejecimiento. Esto se atribuye a que en la condición de temple, se tiene una solución sólida sobresaturada, Φ' , y durante los envejecimientos a 200 °C el exceso de Cu es expulsado de la estructura de la fase hasta obtener la fase estable Φ . Cabe señalar que, el desplazamiento hacia ángulos menores lleva consigo una expansión de la red, la cual se produce si el elemento de menor tamaño sale de la red, es decir, el Cu ($a_{\text{Ag}}=0,4086$ y $a_{\text{Cu}}=0,3615$) (Fawzy y Nada, 2006). Asimismo, se observa la aparición de la fase τ' después de 5 horas

a 200 °C. La presencia de la fase τ' está asociada a la reacción de cuatro fases, $\alpha + \varepsilon \rightarrow \eta + \tau'$ (Gervais *et al.*, 1980; Houghton y Murray, 1984; Mykura *et al.*, 1986). Por lo tanto, es posible establecer que entre 1 y 5 horas a 200 °C ocurre la descomposición, $\Phi' \rightarrow \Phi + \varepsilon$, y da lugar a la formación de la fase ternaria estable τ' . Finalmente, la adición de 1%Ag no retiene la transformación de cuatro fases. En el caso de la adición de 2%Ag (Fig. 1c), también se obtiene la fase sobresaturada Φ' , y durante los envejecimientos se observa un ligero desplazamiento hacia ángulos menores. Sin embargo, la aparición de la fase τ' se observa después de 50 horas a 200 °C. Aparentemente, la adición de 2%Ag permite obtener una fase Φ más estable que con la adición del 1%Ag, y por lo tanto, la rapidez con que los átomos de Cu salen para formar ε es menor. La Figura 1d muestra la evolución de las fases presentes de la aleación Zn-22%Al-2%Cu-3%Ag durante el envejecimiento a 200 °C a diferentes tiempos. La posición angular de los picos de difracción de rayos X correspondientes a la fase Φ , no cambia hasta 100 horas a 200 °C. Asimismo, no se observaron los picos característicos correspondientes a la fase τ' . Por lo tanto,

la adición de 3%Ag estabiliza la fase Φ desde la condición de temple y durante los envejecimientos a 200 °C y por consiguiente, inhibe completamente la transformación de cuatro fases.

3.2. Caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La Figura 2 muestra la evolución microestructural de las aleaciones Zn-22%Al-2%Cu-X (X=0, 1, 2 y 3%Ag) durante el envejecimiento artificial a 200 °C para 0, 10 y 100 horas, respectivamente. Las micrografías fueron obtenidas utilizando electrones retrodispersados para conseguir un contraste composicional de las fases presentes.

La Figura 2a muestra la evolución microestructural de la aleación Zn-22%Al-2%Cu envejecida a 200 °C durante diferentes tiempos. En la condición inicial, la microestructura consiste en partículas entre 5 y 20 μm de la fase ε (CuZn_4) y granos equiaxiales de las fases α y η . Durante el envejecimiento a 200 °C, se observa la descomposición de la fase ε , dando lugar a la formación de la fase τ' , la cual ha sido descrita que ocurre mediante la

FIGURA 2. Efecto de la adición de Ag en la evolución microestructural durante el envejecimiento a 200 °C para 0, 10 y 100 horas. (a–c) Zn-22%Al-2%Cu, (d–f) Zn-22%Al-2%Cu-1%Ag, (g–i) Zn-22%Al-2%Cu-2%Ag, y (j–l) Zn-22%Al-2%Cu-3%Ag. (a, d, g, j) 0 horas, (b, e, h, k) 10 horas, y (c, f, i, l) 100 horas.

reacción de cuatro fases, $\alpha + \varepsilon \rightarrow \eta + \tau'$ (Figs. 2b y 2c) (Dorantes-Rosales *et al.*, 1999; Dorantes-Rosales *et al.*, 2007). Estos resultados confirman la identificación de las fases presentes mediante difracción de rayos X. Además se puede observar que después de 10 horas, la fase τ' se forma completamente, y se promueve el engrosamiento de los granos equiaxiales y la fase τ' .

Por su parte, las Figuras 2d-2j muestran el efecto de la adición de 1, 2 y 3%Ag en la microestructura durante el envejecimiento a 200 °C. De acuerdo a los resultados de DRX, las fases presentes inicialmente son α , η y Φ' , donde partículas de la fase Φ' se encuentran embebidas en granos equiaxiales de las fases α y η . Durante el envejecimiento a 200 °C

y 10 horas se puede observar el engrosamiento de los granos equiaxiales de α y η , y la existencia de una descomposición homogénea dentro de la fase Φ' para adiciones de 1 y 2%Ag (Figs. 2e y 2h), la cual da lugar a la formación de la fase τ' . Como se mencionó anteriormente, la formación de la fase τ' proviene de la reacción, $\alpha + \varepsilon \rightarrow \eta + \tau'$. Es decir, debe producirse la formación de la fase ε previa a la formación de la fase τ' . Aparentemente, en condición de temple existe una sobresaturación de Cu dentro de la fase Φ' , y durante el envejecimiento, el Cu sale de la red de la fase Φ' para formar la fase ε , mediante una reacción del tipo $\Phi' \rightarrow \Phi + \varepsilon$. Después de 100 horas a 200 °C (Fig. 2f), se observa la descomposición de una partícula inicial de la fase Φ' ,

FIGURA 3. Mapeo elemental de las aleaciones Zn-22%Al-2%Cu-1%Ag (columna izquierda), Zn-22%Al-2%Cu-2%Ag (columna media) y Zn-22%Al-2%Cu-3%Ag (columna derecha) después de un envejecido a 200 °C durante 100 horas. (a-c) Contraste composicional, (d-f) Zn, (g-i) Al, (j-l) Cu y (m-o) Ag.

la cual muestra en el centro un contraste más claro por la presencia de la fase Φ (Cu,Ag)Zn₄, rodeada de regiones menos claras y grises, correspondientes a las fases η y τ' , respectivamente. Asimismo, en la aleación con 2%Ag envejecida a 200 °C durante 100 horas (Fig. 2i), se observa la misma descomposición homogénea que después de 10 horas. Cuando la adición es del 3%Ag a la aleación Zn-22%Al-2%Cu, no se observa descomposición en la fase Φ , lo cual permite establecer que la adición del 3%Ag estabiliza la fase Φ (Cu,Ag)Zn₄, inhibiendo completamente la reacción de cuatro fases.

La Figura 3 muestra un análisis composicional mediante espectrometría de energías dispersas (EDS) y MEB. Dicha figura muestra tres columnas correspondientes a las aleaciones Zn-22%Al-2%Cu-1%Ag, Zn-22%Al-2%Cu-2%Ag y Zn-22%Al-2%Cu-3%Ag después de 100 horas de envejecimiento a 200 °C. En cada columna se muestra una imagen de la microestructura obtenida por electrones retrodispersados para lograr un contraste composicional (Zn, Cu, Ag zonas claras y Al zonas oscuras), y los análisis elementales donde la presencia del elemento se resalta en diferentes colores. Los resultados confirman la presencia de la fase τ' (Al₄Cu₃Zn), en contraste gris (Figs. 3a y 3b) para las aleaciones Zn-22%Al-2%Cu-1%Ag y Zn-22%Al-2%Cu-2%Ag, mientras que las partículas claras en contraste composicional (Figs. 3a y 3c), ricas Zn, Cu y Ag, corresponden a la fase Φ ((Cu,Ag)Zn₄).

La Figura 4 muestra la evolución de la composición de la fase Φ mediante análisis puntuales por EDS durante el envejecimiento a 200 °C de la aleación Zn-22%Al-2%Cu-3%Ag. Claramente a 200 °C, existe movimiento de átomos por difusión para este tipo de aleaciones (Avner, 1988). Se puede apreciar un enriquecimiento de Zn, mientras que

los contenidos de Ag y Cu disminuyen, conforme el tiempo de envejecimiento aumenta. La composición química se homogeneiza después de 10 horas a 200 °C. Esto confirma la presencia de una fase metaestable de (Cu,Ag)Zn₄ (Φ') inmediato al temple, la cual se estabiliza durante el envejecimiento a 200 °C después de 10 horas. La composición química después de 100 horas a 200 °C fue de 86,5; 8,6 y 4,9% atómico de Zn, Cu y Ag, respectivamente. De acuerdo a los diagramas de fases binarios Cu-Zn y Ag-Zn, ambos elementos forman fases hexagonales denominadas también como fases ϵ (Baker, 1992). En el caso del Cu-Zn, el intervalo en composición es de Cu₂₂Zn₇₈ – Cu₁₂Zn₈₈, mientras que en el sistema Ag-Zn es Ag₃₄Zn₆₆–Ag₁₁Zn₈₉. Es decir, de 12 a 22% Cu y de 11 a 34% Ag en Zn. Por lo tanto, la composición final de Ag+Cu es de 13,5%, lo cual se encuentra dentro de los intervalos para ambos sistemas Cu-Zn y Cu-Ag.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el estudio mediante DRX y MEB de las aleaciones Zn-22%Al-2%Cu-X (X=0, 1, 2 y 3%Ag) durante el envejecimiento artificial a 200 °C para diferentes tiempos, se concluye que:

- La adición de Ag promueve la formación de la fase Φ ((Cu,Ag)Zn₄) en el sistema de aleación Zn-22%Al-2%Cu. La estabilidad de esta fase se obtiene después de 350 horas y 10 horas de envejecimiento a 200 °C, con adiciones de 2 y 3%Ag, respectivamente.
- La cinética de la reacción de cuatro fases se retarda de 5 hasta 25 horas con la adición de 2%Ag, mientras que la adición de 3%Ag inhibe completamente la formación de la fase de equilibrio τ' . Es decir, impide la reacción de cuatro fases $\alpha + \epsilon \rightarrow \eta + \tau'$, la cual está asociada con la inestabilidad dimensional de la aleación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido por CONACyT e IPN-SIP-PIFI.

REFERENCIAS

- Avner Sydney, H. (1988). *Introducción a la Metalurgia Física*, 2ª ed., Mc Graw Ed., Hill, USA, p. 197.
- Baker, H. (1992). *ASM Metals Handbook*, Vol. 3, *Alloy Phase Diagram*, ASM International, USA, pp. 56, 40, 182.
- Casolco, S., Negrete-Sánchez, J., Torres-Villaseñor, G. (2003). Influence of silver on the mechanical properties of Zn-Al eutectoid superplastic alloy. *Mater. Charact.* 51 (1), 63–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2003.09.011>.
- Casolco, S., López-Parra, M., Torres-Villaseñor, G. (2006). High strain rate superplasticity of a Zn–22wt.%Al–x wt.%Ag alloys. *J. Mater. Process. Tech.* 174 (1–3), 389–393. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.271>.

FIGURA 4. Evolución de la composición de la fase Φ en la aleación Zn-22%Al-2%Cu-3%Ag durante su envejecimiento a 200 °C.

- Ciach, R., Król, J., Wegrzyn-Tasior, K. (1969). Studies on Four Phases Transformation in AlZn78 Alloy Containing 1-3 percent of Copper. *Bull. Acad. Pol. Sci. Sér. Sci. Tech.* 17 (4), 13.
- Dorantes Rosales, H.J. (2000). *Estudio de las transformaciones de fase de la aleación Zn-22%Al-2%Cu*, Tesis Doctoral, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Dorantes-Rosales, H., López-Hirata, V., Hua Zhu, Y. (1999). Decomposition process in Zn-22wt%Al-2%wt Cu alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 271 (1-2), 366-370. [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00255-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00255-5).
- Dorantes-Rosales, H., López-Hirata, V., Moreno-Palmerin, J., Cayetano-Castro, N., Saucedo Muñoz, M., Torres Castillo, A. (2007). β' phase decomposition in Zn-22mass%Al and Zn-22mass%Al-2mass%Cu alloys at room temperature. *Mater. Trans.* 48 (10), 2791-2794. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.MRP2007058>.
- Fawzy, A., Nada, R.H. (2006). Effect of grain diameter on the tensile characteristics of thermally deformed Ag4.4 wt% Cu alloy. *Physica B*, 371 (1), 5-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physb.2005.08.045>.
- Gervais, E., Levert, H., Bees, M. (1980). *American Foundrymen's Society, 84th Casting Congress and Exhibition*, St. Louis, MO, USA.
- Hillert, M. (1998). *Phase Equilibria. Phase Diagrams and Phase Transformations, their thermodynamic basis*, Ed. Cambridge University Press, New York, USA, pp. 294-296.
- Houghton, M.E., Murray, M.T. (1984). An introduction to Zinc Alloys. *Met. Forum* 6 (4), 211-225.
- Lohberg, K. (1983). Über das System Zinn-Antimon-Indium. *Metall.* 74, 456-457.
- McNelly, T.R. (2010). Procesado por fricción batida (FSP): afino de la microestructura y mejora de propiedades, *Rev. Metal.* 46 (No. Extra), 149-156. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalmadrid.19XIIPMS>.
- Murphy, S. (1975). The structure of the T' phase in the system. Al-Cu-Zn. *Met. Sci.* 9 (1), 163-168. <http://dx.doi.org/10.1179/030634575790444414>.
- Murphy, S. (1980). Solid-phase reactions in the low copper part of the Al-Cu-Zn system. *Z. Metallkde* 71 (2), 96-102.
- Mykura, N., Zhu, H., Murphy, S. (1986). Solid-State Reactions in Zn-Al Based Alloys. *Can. Metall. Quart.* 25 (2), 152-159.
- Pérez-Prado, M.T., Ibáñez, J., Morris, M., Cristina, M.C., Ruano, O.A., González-Doncel, G. (1998). Estructura y textura de la fase Al_3CaZn en una chapa laminada de la aleación superplástica Al-5 % Ca-5 % Zn. *Rev. Metal.* 34 (No. Extra), 324-328. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.iExtra.763>.
- Rivas-López, D. (2001). *Evolución microestructural durante la deformación plástica de la aleación Zn-22%Al-2%Cu*, Tesis de licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Ruano, O. (1982). Superplasticidad. *Rev. Metal.* 18, 275-285.
- Torres-Villaseñor, G., Negrete, J., Valdés, I. (1985). Propiedades y usos del Zinalco. *Rev. Mex. Fis.* 31 (3), 489-501.
- Torres-Villaseñor, G., Negrete, J. (1994). Recent Advances in Science, Technology and Applications of Zn-Al Alloys, *Proc. 3rd International Conference of Zn-Al Alloys*, Distrito Federal, México.
- Zhu, Y.H. (1994). Phase Transformations of Eutectoid Zn-Al Alloys, *Proc. 3rd International Conference of Zn-Al Alloys*, Recent Advances in Science, Technology and Applications of Zn-Al Alloys, Distrito Federal, México.
- Zhu, Y.H. (1999). Microstructure dependence of damping behavior of eutectoid Zn-Al based alloy (ZA27). *J. Mater. Sci. Technol.* 15 (2), 178-180.
- Zhu, Y.H. (2004). General rule of phase decomposition of Zn-Al based alloys (II)—One effects of external stress on phase transformation. *Mater. Trans.* 45 (11), 3083-3097.