

VALORACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN Cu-8Sn REFINADA CON ZIRCONIO

Marco A. Paniagua ^{1*}, J. Marcelo Rojas ²

1: Estudiante de maestría en ingeniería de materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

2: Profesor del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Medellín, Colombia.

* E-Mail: marco.paniagua@udea.edu.co

RESUMEN

El refinamiento de grano realizado a través de inoculación de aleaciones de bronce fosforados "as-cast" ha sido estudiado durante varios años con el propósito de establecer una metodología efectiva que permita obtener aleaciones con estructura de granos refinados y sin la necesidad de aplicar tratamientos térmicos a las aleaciones producidas. En la presente investigación se estudió el efecto refinador del zirconio en el tamaño de grano y en las propiedades mecánicas (dureza y tracción) de la aleación (Cu8% peso Sn) "as cast"; para ello se fabricaron dos aleaciones Cu8Sn y Cu8Sn0,32Zr. Estas se produjeron por medio de fundición y vaciado en molde de arena aglomerada con resina fenólica; una vez producidas las aleaciones se fabricaron piezas de acuerdo con la norma ASTM B208-14. Las piezas obtenidas fueron cortadas y maquinadas para producir probetas de tensión, con el propósito de realizar ensayos de tensión y dureza, además de realizar análisis fractográfico. Los resultados arrojaron que la resistencia última a la tensión, el límite de cedencia, la dureza Brinell y el esfuerzo de rotura de la aleación Cu8Sn0,32Zr fue mayor que la de Cu8Sn. De igual manera se obtuvo una reducción de 85% en el tamaño medio de grano en la aleación Cu8Sn0,32Zr.

Palabras clave: "As cast", inoculación, bronce, zirconio, ensayos mecánicos.

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE Cu-8Sn ALLOY REFINED WITH ZIRCONIA

ABSTRACT

The grain refinement carried out through in-situ inoculation of bronze as-cast has been studied for several years with the purpose of establishing an effective methodology that allows obtaining alloys with a refined grain structure and without the need for applying heat treatments to the obtained alloys. In the present investigation the refining effect of zirconium on the grain size and the mechanical properties (hardness and tensile) of the alloy (Cu8%wtSn) "as cast" was studied; for this, two Cu8Sn and Cu8Sn0,32Zr alloys were manufactured. These alloys were produced by casting in sand mold agglomerated with phenolic resin; once the alloys were produced, test specimens were manufactured according to ASTM B208-14. The obtained pieces were cut and machined to produce tension specimens, with the purpose of performing tensile and hardness tests, in addition to performing fractographic analyzes. The results showed that the ultimate tensile strength, yield point, Brinell hardness and breaking stress of the Cu8Sn0,32Zr alloy were greater

than that of Cu8Sn. Similarly, a reduction in the average grain size in the Cu8Sn0,32Zr alloy of 85% was obtained.

Keywords: "As cast", inoculation, bronzes, zirconium, mechanical tests.

1. INTRODUCCIÓN

Los mecanismos presentes en la refinación de grano de las estructuras de solidificación “as cast” han sido muy estudiadas para el aluminio y sus aleaciones [1,2]. Los dos principales mecanismos que explican esta refinación son el efecto de la relación de orientación entre el núcleo y el sustrato y la restricción al crecimiento de los granos. Esta propuesta del parámetro δ se basa en la hipótesis de que el sólido formado tiene una relación de orientación cristalográfica definida con el sustrato sobre el cual se forma. La relación de orientación establece que las direcciones y planos más compactos entre el sustrato y el núcleo que se forman son paralelos, teniendo ambos la misma estructura cristalina [3].

$$\delta = \frac{a_T - a_S}{a_S} \quad (1)$$

Donde a_T es el parámetro de la red cristalina del inoculante y a_S es el parámetro reticular del núcleo sólido que crece. Algunos investigadores sugirieron que los elementos de aleación tienen influencia sobre el mecanismo de refinación de grano, ya que estos elementos durante la solidificación son segregados por el sólido hacia el líquido delante de la interfase sólido-líquido. Como el proceso de difusión depende del tiempo, esta difusión retarda el avance de la interfase sólido-líquido y a mayor cantidad de estos elementos, mayor es el efecto retardador [4,5]. Estos autores sugieren que cuando el crecimiento de los granos es retardado y el sistema sólido-líquido está a menor temperatura, el líquido remanente se vuelve más sobre-enfriado. Este sobreenfriamiento promueve un aumento del número de sustratos sobre los cuales ocurre la nucleación heterogénea, aumentando así el número de núcleos formados. Este efecto causa refinación de grano y es denominado como restricción al crecimiento y está cuantificado por medio de dos parámetros denominados P y Q [6,7].

$$P = \frac{m(k - 1)C_0}{k} \quad (2)$$

$$Q = m(k - 1)C_0 = kP \quad (3)$$

Donde P es el factor potencia y Q el índice de restricción al crecimiento.

Para el caso de las aleaciones de cobre-estaño, los estudios de Rojas Arango [8] han demostrado que el parámetro δ entre el ZrC y Cu- α es de 4,5% y que el incremento de Sn promueve la restricción al crecimiento de grano. La evaluación de las propiedades mecánicas de la aleación Cu8Sn con Zr “as cast”, en molde de arena aglomerada con resina fenólica, es poco conocida.

2. METODOLOGÍA

Inicialmente la aleación de composición nominal Cu8Sn fue producida mediante la norma ASTM B208-14 [9], utilizando cargas de cobre laminado en caliente (99,2%peso) y estaño electrolítico grado A (99,92%peso). Las cargas fueron colocadas en el interior de un crisol de grafito, protegidas con una capa de grafito y fundidas en un horno de inducción. La aleación fundida fue

desoxidada con una aleación de Cu-15% peso P y al alcanzar la temperatura de 1250°C fue vaciada dentro del molde de arena-resina. Para la obtención de la aleación Cu₈Sn_{0,32}Zr se procedió de igual manera que para la aleación de Cu₈Sn, pero adicionando una carga de la aleación Cu-50% peso Zr en una cantidad que proporcionara 0,32% peso de Zr. Después de la adición del zirconio esta carga fue mantenida en el horno (protegida con el grafito) durante 30 minutos hasta alcanzar la temperatura de 1250°C y finalmente el baño líquido fue vaciado dentro del molde de arena.

Dos lingotes inferiores (A y B) fueron maquinados hasta dimensiones dadas por la norma ASTM E8 [10], (ver Figura 1) para obtener las probetas del ensayo de tracción. Un lingote superior fue preparado mediante técnicas metalográficas tradicionales y posteriormente atacado para revelar la macroestructura (500 ml de etanol, 25 g de FeCl₃, 15ml de HCl). La medida del tamaño medio de grano fue realizada por medio del método del intercepto circular según la norma ASTM E112-13 [11]. Las muestras para la observación microscópica fueron preparadas mediante técnicas metalográficas tradicionales y utilizando el ataque químico (5 g Fe(NO₃)₃, 25 ml HCl, 30 ml H₂O). Para analizar el tipo de fractura fue utilizada microscopia electrónica de barrido (SEM).

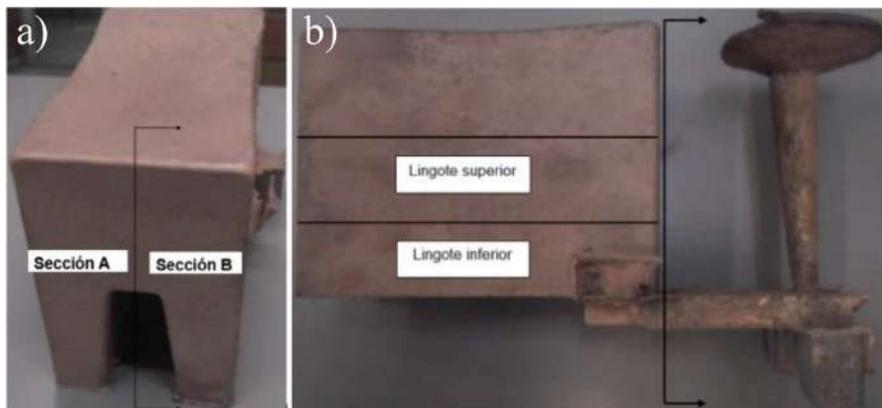


Figura 1. Lingotes en pieza fundida.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Efecto de la adición del zirconio en la macroestructura de los granos

En la Figura 2 se muestra una imagen de la macroestructura de las dos aleaciones obtenidas y en la Tabla 1 se presentan los resultados de la medición del tamaño de grano. Se observa una reducción del 85% en el tamaño de grano con la adición del contenido de Zr.

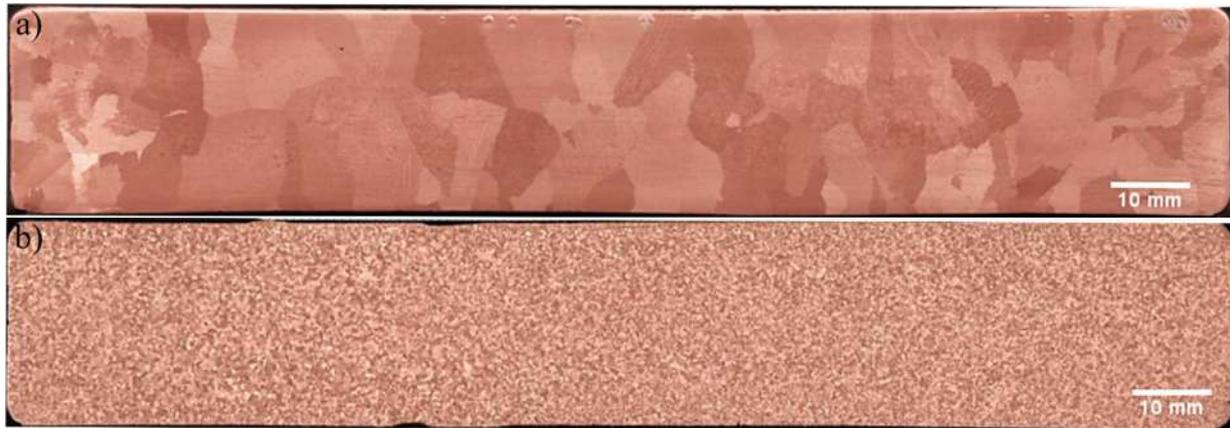


Figura 2. Macroestructura de granos de la Aleación: a) Cu8%Sn-0%Zr b) Cu8%Sn-0,32%Zr.

Tabla 1. Tamaño de grano medio (mm) de las aleaciones.

Aleación	Tamaño de grano medio (mm)
Cu8Sn(A)	4,82
Cu8Sn(B)	4,61
Cu8Sn0,32%Zr(A)	0,744
Cu8Sn0,32%Zr(B)	0,732

3.2. Efecto de la adición del zirconio sobre las propiedades mecánicas de Cu8Sn

En la Figura 3 se muestran los diagramas esfuerzo-deformación ingenieril de las probetas ensayadas en tracción y en la Tabla 2 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas mediante los ensayos de tracción para estas probetas. Se puede observar que tanto el punto de fluencia, la resistencia última, el esfuerzo de rotura y la dureza aumentan con la reducción del tamaño de grano, a medida que se adiciona el Zr [5]. El alargamiento de las aleaciones Cu8Sn fue mayor que el de las aleaciones Cu8Sn0,32Zr; este resultado según algunos investigadores [12] es atribuido a la presencia de compuestos intermetálicos como lo es el ZrC.

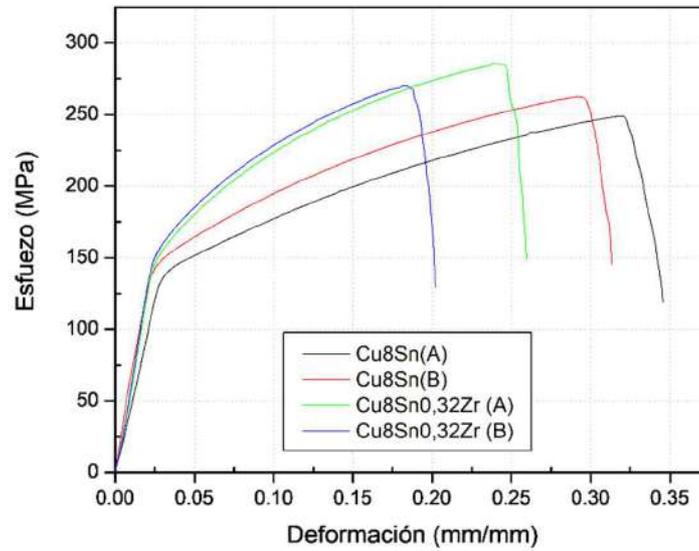


Figura 3. Diagrama ingenieril $\sigma - \epsilon$ para las probetas de aleación Cu-Sn-Zr.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de aleaciones Cu-8%Sn.

Aleación	σ_y (MPa)	UTS (MPa)	σ_{rot} (MPa)	Alargamiento (%)	Dureza (HB)
Cu8Sn(A)	132,4	249,0	123,08	34,6	67,4
Cu8Sn(B)	133,8	262,41	145,42	31,5	66,8
Promedio	133,1±0,7	255,71±6,71	134,3±11,2	33,1±1,6	67,1±0,3
Cu8Sn0,32Zr(A)	145,18	285,9	148,9	26,3	76,4
Cu8Sn0,32Zr(B)	149,35	270,2	141,7	20,4	70,2
Promedio	147,3±2,1	278,1±7,9	145,3±3,6	23,4±3,0	73,3±3,1

3.2.1 La relación esfuerzo de cedencia y el tamaño de grano

Graficando el esfuerzo de fluencia contra el recíproco de la raíz cuadrada del grano ($d^{-1/2}$) como se muestra en la Figura 4, se encuentra que el esfuerzo de cedencia obedece la relación de Hall-Petch [13]. Basado en la Figura 4, la relación de HP para este sistema sería:

$$\sigma = 123,9 + 19,88d^{-1/2} \quad (4)$$

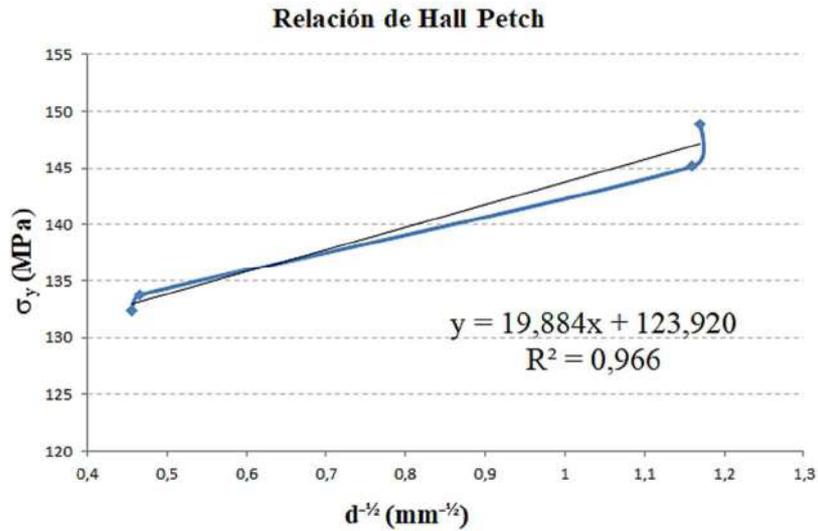


Figura 4. Relación de Hall-Petch para el sistema Cu8Sn-Zr.

3.3. Análisis estructural

Se observaron zonas de fractura correspondiente a la coalescencia de microcavidades en ambos sistemas de aleación como se aprecia en las imágenes SEM de la Figura 5. Éstas se forman como producto de la deformación plástica debido a la aplicación de tensiones en el material. Estas microcavidades se inician por decohesión y fluencia del material alrededor de inclusiones, partículas de segunda fase o cualquier discontinuidad que produzca una concentración de tensiones y aumento del flujo plástico. Este tipo de superficie de fractura presentado, es propio de materiales que obedecen un modo de fractura dúctil [14].

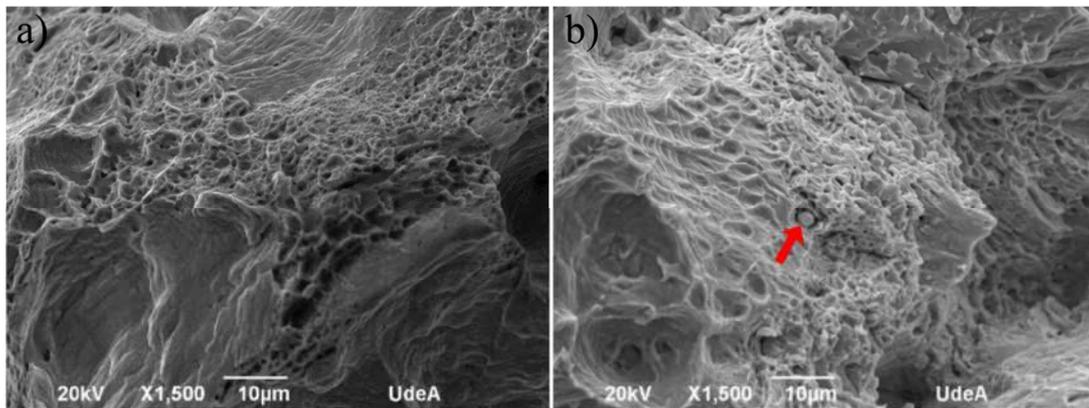


Figura 5. Micrografía SEM de las superficies de fractura. a) Cu8Sn-0%Zr y b) Cu8Sn-0,32%Zr.

4. CONCLUSIONES

Se obtuvo una reducción en el tamaño de grano para la aleación Cu8Sn0,32Zr mediante la adición del Zr al baño fundido.

Tanto la Resistencia última como la cedencia y la dureza Brinell de la aleación Cu8Sn0,32Zr, mostraron un aumento con respecto a las mismas propiedades de la aleación Cu8Sn debido a la adición del Zr.

Para el sistema Cu₈Sn-Zr se obtuvo una relación entre el esfuerzo de cedencia y el tamaño de grano, de acuerdo con la relación empírica de Hall-Petch.

La aleación Cu₈Sn_{0,32}Zr mostró valores de alargamiento menores que la aleación Cu₈Sn, debido tal vez a la presencia de compuestos intermetálicos.

El sistema Cu₈Sn-Zr presentó un comportamiento dúctil en los ensayos de tracción, lo cual se evidenció por la estricción que presentaron las probetas ensayadas.

5. AGRADECIMIENTOS

A la universidad EAFIT por la financiación de la maestría, al grupo GIPPIME, laboratorio de fundición UDEA, laboratorio de materiales EAFIT por su apoyo, al profesor Marcelo Martorano de la Universidad de São Paulo por la consecución del inoculante.

6. REFERENCIAS

- [1] W. Reif and G. Weber, "Grain refining copper alloys, UK patent GB2179673A." pp. 1–13, 1985.
- [2] Maxwell, I. and A. Hellawell, *Simple Model for Grain Refinement During Solidification*. Acta Metallurgica, 1975. 23(2): p. 229-237.
- [3] Turnbull, D.; Vonnegut, B. "Nucleation catalysis", *Industrial and Engineering chemistry*, Vol. 44, n. 6, pp. 1292-1298, 1952.
- [4] M. Johnsson, L. Backerud, and G. K. Sigworth, "Study of the mechanism of grain refinement of aluminum after additions of Ti- and B-containing master alloys," *Metall. Trans. A*, vol. 24, no. 2, pp. 481–491, 1993.
- [5] Greer, A.L., et al., *Modeling of inoculation of metallic melts: Application to grain refinement of aluminum by Al-Ti-B*. Acta Materialia, 2000. 48(11): p. 2823-2835.
- [6] Tarshis, L.A., J.L. Walker, and J.W. Rutter, *Experiments on Solidification Structure of Alloy Castings*. Metallurgical Transactions, 1971. 2(9): p. 2589-&.
- [7] A. Couture and J. O. Edwards, *Grain refinement of sand cast bronzes and its influence on their properties.*, AFS transactions.1973; 32: 453-461
- [8] J. M. Rojas Arango, "REFINO DE GRÃO DAS LIGAS DO SISTEMA COBRE-ESTANHO" Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.
- [9] ASTM, "ASTM B208-140: "Standard Practice for preparing tension test specimens for Copper Alloy Sand, Permanent Mold, Centrifugal and Continuous Castings1", ASTM, vol. 96, no Reapproved, pp. 1-9,2015
- [10] ASTM, "ASTM E8: Standard, A., E8," *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Annual book of ASTM standards, 2004. 3: p. 57-72.
- [11] ASTM, "ASTM E112-13: Standard test methods for determining average grain size," *ASTM Int.*, pp. 1–28, 2013.
- [12] Garcia, Amauri, "Macroestruturas de solidificação", In: "Solidificação Fundamentos e Aplicações", Livro Texto, 1sted., ch. 8, Editora da Unicamp, Brasil, 2001.
- [13] A. Green, J. Wesemael: Die cast eng., 2009, vol. 03, pp. 56-56
- [14] M. Möser, "Chapter 15 Fractography with the SEM (Failure Analysis)," *Mater. Sci. Monogr. 40 Electron Microsc. Solid State Physics.*, 2007.