Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Integración de un sistema de control electromecánico y protección del fuelle metálico a un horno eléctrico de arco para la síntesis de aleaciones metálicas vítreas

Integration of an electromechanical control system and protection of the metallic bellows to an electric arc furnace for the synthesis of glassy metallic alloys

Borja-Soto, C.E.[a*], Zuno, J.[a], Pacheco, J.S.[a], Verduzco, J.A.[b]

[a] Escuela Superior de Ciudad Sahagún, UAEH; C.P. 43990; Cd. Sahagún, Hidalgo.
[b] Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, UMSNH; C.P. 58030, Morelia, Michoacán.
carlos_borja@uaeh.edu.mx*; jorge_zuno@uaeh.edu.mx; sergio_pacheco@uaeh.edu.mx; verduzco@umich.mx

Innovación tecnológica: Integración de un sistema electromecánico para el control atmosférico de la cámara y el sistema de colado por succión de un horno eléctrico usado para la síntesis de aleaciones metálicas vítreas. Incluye la modificación del ensamble del fuelle metálico del horno para protegerlo de chispas de material incandescente producidas durante la fundición.

Área de aplicación industrial: Mecánica y metalúrgica.

Recibido: 20 mayo 2022
Aceptado: 11 enero 2023

Abstract

This work presents the integration of an electromechanical control system and protection of the metallic bellows to an electric arc furnace for the synthesis of vitreous metallic alloys. The furnace allows the application of electric arc casting and suction casting techniques. The electromechanical system was implemented to control the atmosphere inside the chamber and the furnace suction casting system. We do this to facilitate the handling of the equipment and promote the rapid solidification of the processed alloys. Since the furnace bellows is susceptible to perforations when in contact with sparks of incandescent material during casting, its assembly was modified in order to extend its useful life. The functionality of the equipment was determined through the synthesis and structural characterization of the $Cu_{58.1}Hf_{16.9}Zr_{8.1}Ti_{16.9}$, and $Cu_{61.48}Hf_{18.52}Zr_{6.45}Ti_{13.52}$ alloys. Both alloys solidified rapidly using the suction casting technique, which were characterized by X-ray diffraction, XRD. The diffraction patterns of the alloys were diffuse. Therefore, the manufactured equipment was suitable for obtaining glassy metallic alloys with high glass forming ability. The improvements implemented in the equipment allowed to improve its functionality.

Keywords: Metallic alloys, Suction casting, Electric arc furnace, Rapid solidification, Bulk metallic glass.

Resumen

El artículo presenta la integración de un sistema de control electromecánico y protección del fuelle metálico a un horno eléctrico de arco para la síntesis de aleaciones metálicas vítreas. El horno permite aplicar las técnicas de fundición con arco eléctrico y colado por succión. El sistema electromecánico fue implementado para controlar la atmósfera al interior de la cámara y el sistema de colado por succión del horno. Esto con la finalidad de facilitar el manejo del equipo y promover la solidificación rápida de las aleaciones procesadas. Debido a que el fuelle del horno es susceptible a perforaciones al contacto con chispas de material incandescente durante la fundición, fue modificado el ensamble del mismo con la finalidad de alargar su vida útil.

La funcionalidad del equipo fue determinada mediante la síntesis y caracterización estructural de las aleaciones $Cu_{58.1}Hf_{16.9}Zr_{8.1}Ti_{16.9}$, y $Cu_{61.48}Hf_{18.52}Zr_{6.45}Ti_{13.52}$. Ambas aleaciones solidificadas rápidamente mediante la técnica de colado por succión, las cuales fueron caracterizadas mediante difracción de rayos X, DRX.

Los patrones de difracción de las aleaciones fueron difusos. Por lo tanto, el equipo manufacturado resulto adecuado para la obtención de aleaciones metálicas vítreas con alta habilidad de formación vítrea. Las mejorar implementadas en el equipo permitieron mejorar su funcionalidad.

Palabras clave: Aleaciones metálicas, Colado por succión, Horno de arco eléctrico, Solidificación rápida, Vidrios metálicos en volumen.

Introducción

Síntesis de aleaciones metálicas vítreas

Las aleaciones metálicas con estructura vítrea se caracterizan por presentar orden de corto alcance y exhibir propiedades físicas y químicas superiores respecto a aquellas aleaciones cuya estructura presenta cristalinidad. Los materiales metálicos con estructura vítrea son clasificados en vidrios metálicos, MGs y vidrios metálicos en volumen, BMGs, esta clasificación se basa en el espesor máximo, d_c, que una aleación puede alcanzar manteniendo la estructura vítrea. Los MGs y BMGs se obtienen en espesores $d_c < 1$ mm y $d_c \geq 1$ mm, respectivamente. Dichos materiales tienen características estructurales metaestables y sus aplicaciones dependen de su estabilidad térmica. La síntesis de aleaciones vítreas debe ser llevada a cabo mediate técnicas de solidificación rápida, RSP, con la finalidad de evitar el fenómeno de cristalización durante la solidificación. Los aspectos más importantes que influyen en la obtención de aleaciones metálicas vítreas son la composición química del sistema de aleación, la velocidad de enfriamiento y el tipo de atmósfera usada en su procesamiento, principalmente. La composición química de las aleaciones debe ser cercana o igual al punto "eutéctico"; las altas velocidades de enfriamiento del líquido promueven la formación de la estructura vítrea al interferir en el fenómeno cinético de cristalización; mientras que una atmósfera inerte durante su procesamiento permite evitar la formación de puntos de nucleación para la formación de cristales durante la solidificación. Los vidrios metálicos en volumen han sido obtenidos a partir de sistemas de aleación multicomponentes que exhiben propiedades sobresalientes, tales como las propiedades mecánicas, térmicas, magnéticas, resistencia a la corrosión y biocompatibilidad, entre otras[1].

Habilidad de formación vítrea

La habilidad de formación vítrea, GFA, de las aleaciones metálicas puede ser determinada a partir de su espesor crítico y los valores de parámetros térmicos. El espesor crítico, d_c, es el máximo espesor que puede alcanzar una aleación manteniendo la estructura vítrea. Por otra parte, los parámetros térmicos están basados en modelos matemáticos que relacionan las temperaturas de transición vítrea, T_g, temperatura de cristalización, T_x, temperatura liquidus, T_l y temperatura solidus, T_s. Los parámetros térmicos de habilidad de formación vítrea ΔT_x, T_{rg}, γ, α, β y Φ, han sido ampliamente reportados en la literatura[1-7]. Las aleaciones con alta GFA, potencialmente podrían usarse en técnicas de impresión tridimensional para la obtención de piezas de cualquier tamaño y geometría[8]; por esto, resulta importante la investigación científica en la síntesis de nuevas aleaciones y la aplicación adecuada de las técnicas de procesamiento.

Colada por succión

Los procesos de solidificación rápida se han desarrollado para generar altas velocidades de enfriamiento de aleaciones líquidas con la finalidad de obtener sólidos no cristalinos. Sin embargo, la obtención de las aleaciones vítreas depende fuertemente de la GFA del sistema de aleación. Por lo tanto, una aleación solidificada rápidamente puede presentar microestructura vítrea, cristalina o compuesta[1].

Las técnicas de fundición con arco eléctrico y colada por succión han sido usadas para la obtención de vidrios metálicos en volumen en sistemas de aleación multicomponentes[9-11]. La técnica de fundición por arco eléctrico consiste en generar un arco eléctrico por medio de una diferencia de potencial eléctrico, el material a procesar al estar polarizado eléctricamente tiene contacto con el arco eléctrico, por consiguiente, su temperatura es incrementada hasta alcanzar la temperatura de fusión[1]. Por otra parte, la técnica de colado por succión consiste en fundir un lingote por medio de un arco eléctrico y colar el material líquido al interior de un molde de Cu refrigerado. El líquido es forzado a introducirse dentro de la cavidad del molde mediante una diferencia de presión al comunicar un sistema de vacío a la cámara del horno. Las aleaciones que han sido obtenidas con estructura vítrea por medio de la técnica de succión, son aleaciones con composiciones químicas con alta GFA cuyas velocidades críticas de enfriamiento se encuentran por debajo de 885 Ks^{-1}, aproximadamente[1].

La técnica de colado por succión permite la obtención de lingotes metálicos con geometría cilíndrica, los cuales han sido usados para llevar a cabo ensayos de caracterización microestructural, propiedades mecánicas, térmicas y estructurales. Por otro lado, los lingotes cónicos de aleaciones vítreas han sido usados para realizar análisis de caracterización microestructural mediante la observación del perfil de solidificación por medio de técnicas de microscopía[11-12].

El presente trabajo muestra la integración de un sistema electromecánico para el control atmosférico de la cámara y el sistema de colado por succión a un horno eléctrico usado para la obtención de aleaciones metálicas vítreas. Incluye la modificación del ensamble del fuelle metálico del horno para evitar su perforación al contacto con chispas de material incandescente que son generadas durante la fundición. La perforación del fuelle metálico permite la entrada de aire al interior de la cámara del horno, por lo tanto, es una falla que debe evitarse para prevenir la oxidación de los materiales al ser procesados. Las mejoras implementadas fueron llevadas a cabo para obtener una mayor funcionalidad en el manejo del equipo y promover la rápida solidificación de las aleaciones procesadas.

La efectividad de las mejoras implementadas en el horno fue determinada a partir de los resultados experimentales.

Métodos experimentales

Fue fabricado un horno eléctrico de atmósfera controlada para llevar a cabo las técnicas de fundición con arco eléctrico y colado por succión mediante la implementación de mejoras de funcionamiento, esto de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- Controlar la atmósfera del interior de la cámara del horno mediante el accionamiento controlado de válvulas solenoide (electroválvulas) para evitar el uso de válvulas de operación manual.
- Activar y desactivar el arco eléctrico del horno mediante pulsadores tipo pedal para facilitar la operación manual en el posicionamiento del electrodo y la regulación de la intensidad del arco eléctrico.
- Desactivar el arco eléctrico cuando la aleación es depositada dentro del molde de cobre al aplicar la técnica de colado por succión; esto mediante el control electromecánico encendido - apagado.
- Implementar una protección al fuelle metálico mediante la unión de un disco perforado de acero inoxidable en el extremo más cercano a la zona de fusión de la carga metálica; esto para evitar la perforación del fuelle que puede ocurrir al contacto con chispas de material incandescente durante la fundición.

El horno eléctrico fabricado fue puesto en marcha de acuerdo a los siguientes parámetros de operación: La capacidad máxima de los materiales a procesar en volumen, $V = 2.5\ cm^3$, el nivel de vacío en la cámara del horno para la extracción de aire, $P_{vac} = 1x10^{-5}$ mm Hg, el nivel de presión de argón dentro de la cámara del horno antes de la fusión, $P_{Ar} = 300$ mm Hg, el nivel de vacío para la succión del líquido al interior de molde de Cu, $P_{suc} = 1x10^{-2}$ mm Hg y la intensidad de corriente máxima para generar el arco eléctrico, I = 300 A.

La funcionalidad del horno fue determinada a partir del procesamiento de materiales metálicos de alta pureza (>99.8) mediante la técnica de fundición por arco eléctrico y colado por succión en atmósfera de Ar para la obtención de las aleaciones metálicas $Cu_{58.1}Hf_{16.9}Zr_{8.1}Ti_{16.9}$ y $Cu_{61.48}Hf_{18.52}Zr_{6.45}Ti_{13.52}$ solidificadas rápidamente. La fusión de los materiales metálicos para la obtención de las aleaciones fue posterior a la fusión de un lingote de Ti, esto con la finalidad de asegurar la eliminación de O_2 en la atmósfera interior de la cámara del horno. Posteriormente, los lingotes de $Cu_{58.1}Hf_{16.9}Zr_{8.1}Ti_{16.9}$ y $Cu_{61.48}Hf_{18.52}Zr_{6.45}Ti_{13.52}$ fueron fundidos por cinco veces para promover su homogeneidad química. Las composiciones químicas de las aleaciones representan los valores nominales ya que las pérdidas de peso por la fusión correspondieron a valores < 0.1% en peso. Fueron obtenidos lingotes cilíndricos con 2 mm de diámetro x 30 mm de largo y lingotes cónicos con 1 mm de diámetro menor, 6 mm de diámetro mayor y 30 mm de largo mediante la técnica de colado por succión, con la finalidad de determinar funcionalidad del sistema de succión. Los lingotes cilíndricos fueron analizados estructuralmente mediante ensayos de difracción de rayos X, DRX, en un difractómetro Siemens D5000. Los patrones DRX fueron analizados para determinar la estructura de los materiales obtenidos y por consecuencia; la efectividad del horno para la síntesis de BMGs.

Discusión de resultados

La figura 1 muestra esquemáticamente los sistemas del horno eléctrico con atmósfera controlada. El control eléctrico encendido – apagado permite activar o desactivar los

sistemas eléctricos, hidráulicos y neumáticos del equipo. El control atmosférico de la cámara interior del horno es posible mediante el control de los cambios de estado en las válvulas solenoides V_1, V_2, V_3 y V_4. Estas últimas tienen un estado normalmente cerrado, NC, y cambian al estado normalmente abierto, NA, cuando sus bobinas son energizadas por la aplicación de una diferencia de potencial.

El sistema de vacío está constituido por una bomba mecánica y una difusora que sirve para extraer el aire del interior de la cámara del horno cuando se encuentra herméticamente sellada y es activada la válvula V_1, mientras que las válvulas V_2, V_3 y V_4 permanecen en el estado NC.

El sistema de inyección de gas Ar permite generar una atmósfera inerte en el interior de la cámara del horno para evitar la oxidación de los materiales cuando incrementan su temperatura debido a su exposición al arco eléctrico. El gas Ar es introducido al interior de la cámara del horno hasta alcanzar una presión entre de 300 mm Hg, aproximadamente. Lo anterior es posible cuando la válvula V_2 se encuentra en el estado NA y las válvulas V_1, V_3 y V_4 permanecen en el estado NC.

El sistema de colado por succión es controlado por medio del sistema de control eléctrico encendido - apagado, el cual permite simultáneamente desactivar el arco eléctrico y activar la válvula V_4 al estado NA mientras que las válvulas V_1, V_2 y V_3 permanecen en el estado NC. La despresurización de la cámara del horno es llevada a cabo cuando la válvula V_3 permanece en el estado NA, mientras que las válvulas V_1, V_2 y V_4 se encuentran cerradas. La despresurización de la cámara es necesaria cuando se requiere introducir o extraer materiales de la cámara del horno, esta operación debe realizarse cuando la cámara del horno se encuentra en condiciones de vacío.

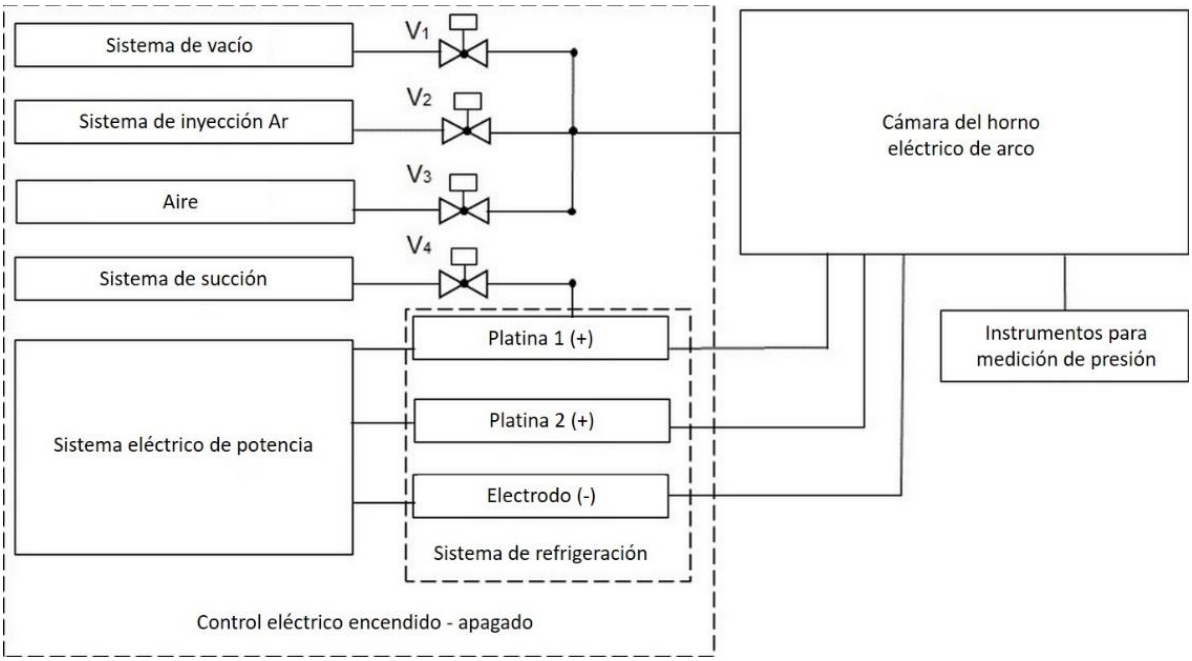


Figura 1. Sistemas del horno eléctrico con atmósfera controlada.

La figura 2 muestra la cámara del horno eléctrico que fue fabricado. La figura 2a-c) muestra el interior de la cámara del horno. La figura 2b) muestra el fuelle metálico y el

disco de acero inoxidable que fue unido al fuelle metálico mediante soldadura (ensamble). El disco de acero fue adaptado para funcionar como protección del fuelle respecto a las chispas de material incandescente que se producen durante la fundición de los materiales al ser procesados. La figura 2c) muestra la vista inferior de la cámara del horno en donde es mostrada la protección del fuelle.

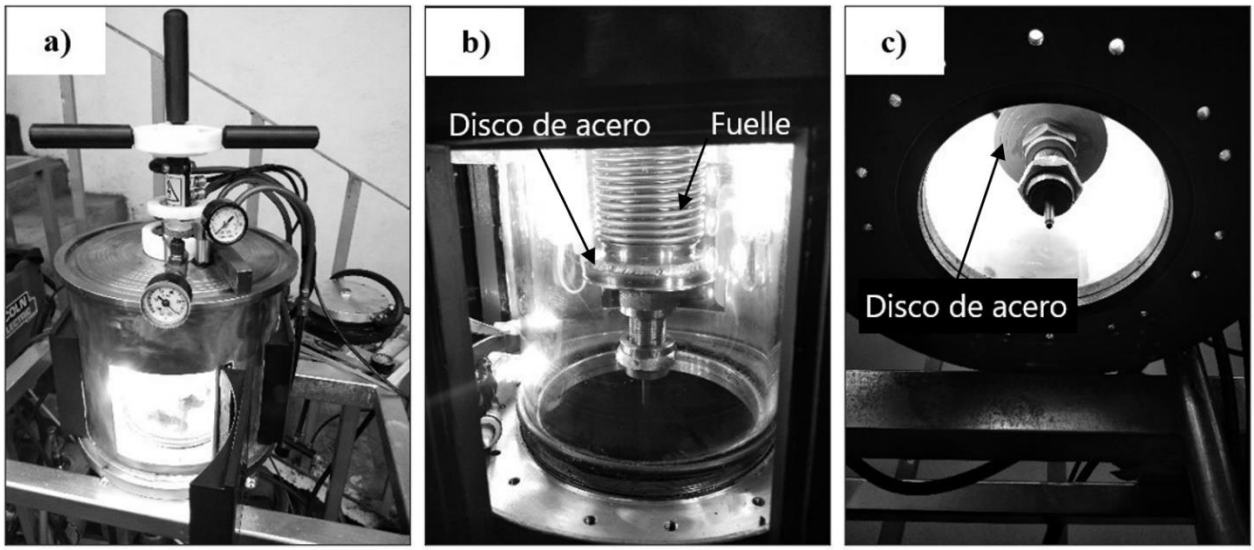


Figura 2. Cámara del horno.

La figura 3 muestra el proceso de fundición para la obtención de las aleaciones metálicas $Cu_{58.1}Hf_{16.9}Zr_{8.1}Ti_{16.9}$, y $Cu_{61.48}Hf_{18.52}Zr_{6.45}Ti_{13.52}$. La figura 3a) muestra los materiales a procesar sobre la platina de cobre en el interior de la cámara del horno. La figura 3b) muestra el arco eléctrico generado para incrementar la temperatura de la carga metálica y transformarla al estado líquido. La figura 3c) muestra las aleaciones metálicas con forma de botón, los cuales fueron procesados posteriormente mediante la técnica de colado por succión para obtener lingotes cónicos y cilíndricos.

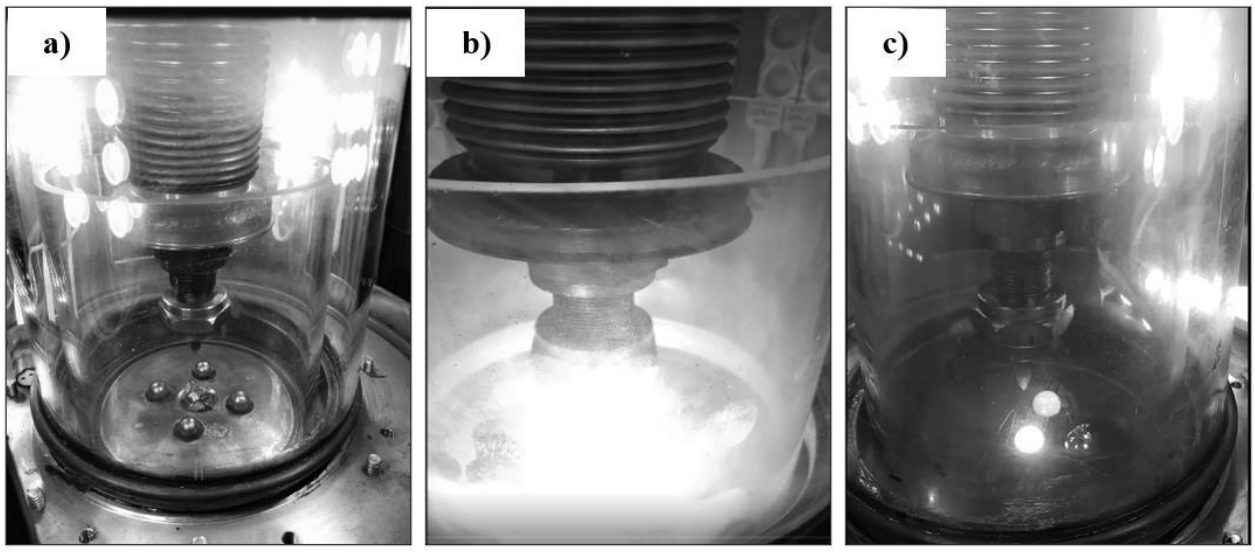


Figura 3. Obtención de aleaciones metálicas mediante la técnica de fundición con arco eléctrico.

La figura 4 muestra dos lingotes de Ti con forma de botón. Es posible observar que la superficie del botón a) se encuentra oxidada, debido a la presencia de aire en el interior de la cámara del horno. La figura 4, también muestra un lingote b) con forma de botón que se encuentra libre de oxidación y lustre metálico por haber sido obtenido a partir de la fusión del material en presencia de una atmósfera inerte de Ar. De ahí la importancia del sistema de control atmosférico de la cámara del horno para el procesamiento de materiales metálicos. Los objetivos de usar una atmósfera protectora durante el procesamiento de materiales para la obtención de BMGs es alcanzar la composición química nominal en los lingotes obtenidos y evitar la formación de puntos de nucleación de fases cristalinas.

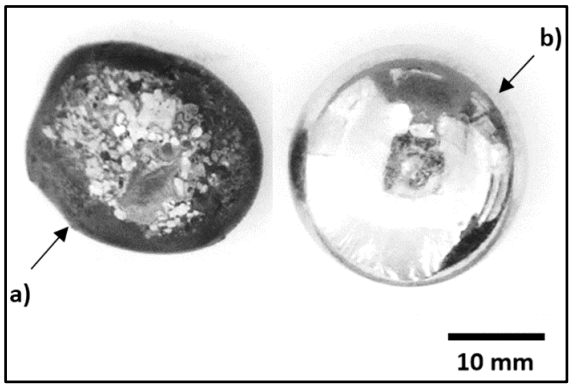


Figura 4. Lingotes con forma de botón. a) Lingote oxidado y b) Lingote libre de oxidación.

La figura 5 muestra los lingotes obtenidos con la técnica de colado por succión, cuyas superficies muestran lustre metálico al encontrarse libres de oxidación. Por lo tanto, los parámetros para la operación del horno y la implementación de mejoras en las características del horno, resultaron adecuadas para la obtención de aleaciones metálicas solidificadas rápidamente.

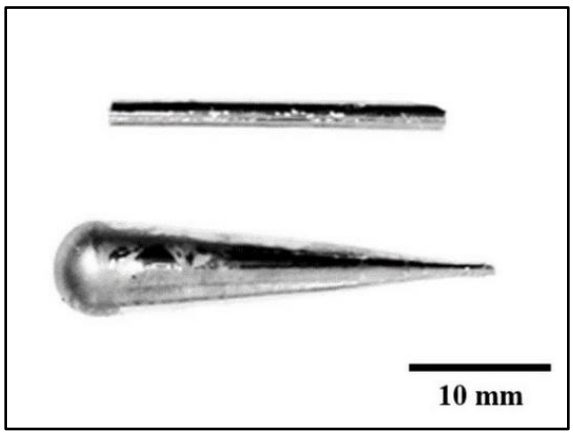


Figura 5. Lingotes obtenidos con la técnica de colado por succión.

La figura 6 muestra los patrones de difracción de rayos X de los lingotes cilíndricos de 2 mm de diámetro de las aleaciones $Cu_{58.1}Hf_{16.9}Zr_{8.1}Ti_{16.9,}$ y $Cu_{61.48}Hf_{18.52}Zr_{6.45}Ti_{13.52}$, ambos patrones son difusos en el rango 2Θ = 40° - 60°. Las aleaciones obtenidas experimentalmente presentan estructura vítrea, lo cual corresponde con los resultados reportados en la literatura, ya que son aleaciones de alta GFA[13].

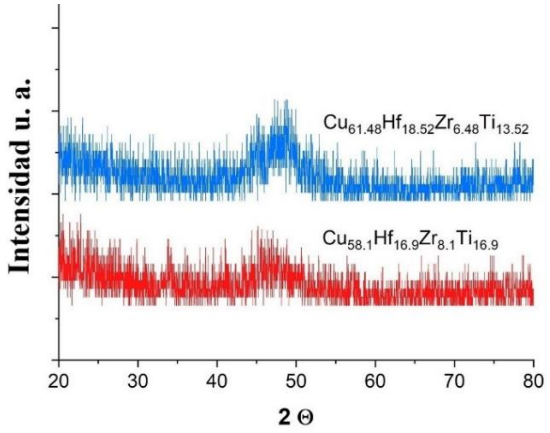


Figura 6. Patrones de difracción de rayos X difusos.

Conclusiones

La integración del sistema electromecánico en el horno permitió controlar la atmósfera al interior de la cámara, controlar el accionamiento del sistema de succión mediante el uso de electroválvulas y el

accionamiento del arco eléctrico. El uso de pedales para el control de los sistemas del horno facilitó el posicionamiento electrodo y regulación de la intensidad de corriente en forma manual. Por otra parte, fue posible implementar una protección al fuelle metálico para evitar su falla por perforación. De acuerdo los resultados en la caracterización estructural de las aleaciones obtenidas, el funcionamiento del horno fabricado es adecuado para la síntesis de vidrios metálicos en volumen con alta GFA.

Agradecimientos

Gracias al proyecto SEP PRODEP 2019 0064 por los fondos destinados a la adquisición de bombas mecánicas de vacío.

Referencias

1. Inoue, A. y Suryanarayana, C. (2017) *Bulk Metallic Glasses.* CRC Press. 10.1201/9781315153483

2. Inoue, A. (1995). High strength bulk amorphous alloys with low critical cooling rates. *Mater. Trans. JIM*. 36 (7), 866-875. 10.2320/matertrans1989.36.866

3. Turnbull, D. (1969). Under what conditions can a glass be formed? *Contemp. Phys.* 10 (5), 473-488. 10.1080/00107516908204405

4. Lu, Z.P. y Liu, C.T. (2004). A new approach to understanding and measuring glass formation in bulk amorphous materials. *Intermetallics*. 12 (10), 1035-1043. 10.1016/j.intermet.2004.04.032

5. Mondal, K. y Murty, B.S. (2005). *J. Non-Crystalline. Solids*.351 (16), 1366-1371. 10.1016/j.jnoncrysol.2005.03.006

6. Fan, G.J., Choo, H. y Liaw, P.K. (2007). A new criterion for the glass-forming ability of liquids. *J. Non-Cryst. Solids.* 353 (1), 102–107. 10.1016/j.jnoncrysol.2006.08.049

7. Chen, Q.J., Shen, J., Zhang, D., Fan, H.B., Sun J.F. y McCartney, D.G. (2006) A new criterion for evaluating the glass-forming ability of bulk metallic glasses. *Mater. Sci. Eng. A.* 433 (1-2), 155-160.

8. Shen, Y., Li, Y., Chen, C. y Tsai, H. (2017). 3D printing of large, complex metallic glass structures. *Materials and Design*. 117, 213-222. 10.1016/j.matdes.2016.12.087

9. Borja, C.E., Figueroa, I.A., Lozada-Flores, O., Estrada M., Lara-Rodríguez, A. y Verduzco J.A. (2018). Glass formation, thermal and mechanical properties of ZrCuAlNi bulk metallic glasses. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 28 (6), 1157-1165. 10.1016/S1003-6326(18)64753-3

10. Figueroa, I.A., Davies, H.A. y Todd, I. (2007). Proceedings of the 12th International Symposium on Metastable and Nano-Materials. *Journal of Alloys and Compounds*. (434-435), 164-166.

11. Borja, C.E., Figueroa, I.A., Lara-Rodríguez, A. y Verduzco J.A. (2016). Glass Forming Ability and Mechanical Properties of $Zr_{57.52}Co_{21.24}Al_{9.24}Ag_{12}$ bulk metallic glass. *Materials Research*. 19 (1), 86-91. 10.1590/1980-5373-MR-2015-0617

12. Zhang, C., Zhang, H., Sun, Q. y Liu, K. (2018). Mechanical properties of Zr41.2Ti13.8Ni10Cu12.5Be22.5 bulk metallic glass with different geometric confinements. *Results in Physics*.8, 1-6. 10.1016/j.rinp.2017.09.059

13. Lozada-Flores, O. y Figueroa, I.A. (2019). Glass Formation of Null-Matrix Cu-Hf-(Zr, Ti) Alloys. *Materials Research*. 22 (5), 1-5. 10.1590/1980-5373-MR-2019-0404.