

Desgaste de aleaciones de hierro Cr-Mo-V-Ti para medios de molienda de minerales

Simitrio Maldonado¹, Víctor Baltazar², Enrique López³, Pilar Orozco⁴, Omero Alonso⁵

¹ Unidad Académica de Ingeniería

Universidad Autónoma de Zacatecas, smald@uaz.edu.mx

² Unidad Académica de Ingeniería

Universidad Autónoma de Zacatecas, victor.baltazar@uaz.edu.mx

³ Unidad Académica de Ingeniería

Universidad Autónoma de Zacatecas, ealopezb@gmail.com

⁴ Unidad Académica de Ingeniería

Universidad Autónoma de Zacatecas, orozco_pilar@yahoo.com

⁵ Unidad Académica de Ingeniería

Universidad Autónoma de Zacatecas, omeroag@hotmail.com

Recibido: 27-12-2014. Aceptado después de revisión: 21-03-2015

Resumen. El efecto de la composición química de elementos formadores de carburos sobre la resistencia al desgaste de hierros colados fueron evaluados por medio de ensayo con bolas de molienda. Cuatro aleaciones de hierro blanco al cromo-molibdeno, para medios de molienda con un porcentaje de cromo de 3.5 a 6.0% fueron fundidas en un horno de inducción de 20 kg en atmósfera normal y coladas en moldes de arena para producir bolas de molienda de minerales metálicos con un diámetro de 51 mm. Las aleaciones han sido sometidas a desgaste en seco en un molino experimental de pruebas de 200L×200φ mm. Los factores de aleación fueron carbono de 3.9 a 5.3%, molibdeno de entre 0.5 a 1.2%, vanadio y titanio de entre 0.25 a 0.5%, manganeso de 1.8 a 3.6%; para observar su efecto en la resistencia al desgaste en la conminución de minerales metálicos de plata, oro, zinc, hierro y cobre. El mineral de prueba, presenta grandes cantidades de cuarzo, del orden del 30%, lo que lo hace ser de difícil trituración y pulverización. El propósito de los elementos de aleación, fue el de producir "in situ" una gran cantidad de carburos masivos del tipo cementita, carburos hexagonales de alto cromo y carburos de titanio y vanadio. Las aleaciones con un mayor porcentaje de manganeso, cromo y molibdeno, aunque con un menor porcentaje de carbono, fueron las que obtuvieron las mejores respuestas al desgaste. La composición de 4C6Cr4MnMo0.5V0.5Ti obtuvo los mejores resultados.

Palabras Claves: desgaste, hierro blanco aleado, medios de molienda.

Abstract. The effect of the chemical composition of carbide forming elements on the wear resistance of cast irons was evaluated by means of grinding balls. Four alloys for high chromium white iron grinding media with chromium content of 3.5 to 6.0% percent were melted in an induction furnace of 20 kg. It was performed in standard atmosphere and they were introduced into sand molds for producing metal ore grinding balls with a diameter of 51 mm. The alloys were subjected to dry attrition in an experimental test mill 200L×200φ mm. The alloy factors were: carbon alloy of 3.9 to 5.3%, molybdenum of 0.5 to 1.2%, vanadium and titanium of between 0.25 to 0.5%, manganese of 1.8 to 3.6%. It was shown their effects on the resistance wear in metallic ore conminution of silver, gold, zinc, iron and copper. The test metallic ore has large quantities of quartz up to 30%, making it difficult to be crushing and pulverizing. The purpose of these alloyings, were to produce "in situ" a large amount of massive cementite and hexagonal carbides of high chromium and titanium and vanadium refractory carbides. Alloys with a higher percentage of manganese, chromium and molybdenum, however, lower carbon percentage, had the best responses to the wear process. A composition 4C6Cr4MnMo0.5V0.5Ti obtained the best results.

Keywords: grinding media, wear, white iron alloy.

1. Introducción

Hierros blancos y aceros colados de alta aleación han sido ampliamente usados en las industrias de procesamiento y manejo de minerales, minería, metalurgia, del cemento y energética [1]-[5], es decir, en aplicaciones que requieren excelente resistencia a la abrasión, erosión e impacto de ligero a moderado. Aleaciones de alto carbono-cromo y moderada cantidad de molibdeno, generalmente son empleadas en estas industrias presentando buenos resultados en la práctica con un adecuado rango de seguridad tecnológica en la manufactura de partes resistentes al desgaste. Sin embargo, al considerar el proceso de molienda de minerales, las bolas y otros medios considerados son expuestos severamente a la acción abrasiva de minerales que contienen cuarzo, alúmina, feldspatos y otros minerales, produciendo un fuerte desgaste abrasivo sobre la superficie expuesta de las bolas [3], [4]. Dentro de estas aleaciones, los hierros colados son caracterizados por una combinación de adecuadas propiedades mecánicas e importantes ventajas económicas y de manufactura. Estas aleaciones son ampliamente usadas en aplicaciones mecánicas como quebrado primario, molienda y equipos de bombeo de pulpa mineral usados en el procesamiento de materiales duros tales como minerales con cuarzo, coque y grava [6].

1.1 Aspectos metalúrgicos

La solidificación de los hierros colados consiste de nucleación y crecimiento de diferentes fases presentes, tales como: austenita, grafito y diferentes carburos como cementita, M_7C_3 , MC o $M_{23}C_6$. Con la adición de elementos de aleación, el carbono se estabiliza formando carburos y por tanto hierro colado blanco. El severo contacto metal-metal en fases austeníticas con alto manganeso conduce a un incremento importante de la dureza debido a la deformación superficial, produciendo un endurecimiento por la transformación de la austenita a martensita, incrementando su resistencia al desgaste abrasivo [7]. La fase martensítica también se presenta con un tratamiento térmico adecuado: templado desde $850^\circ C$ + revenido a $250^\circ C$.

Experimentos a nivel de laboratorio permiten realizar pruebas confiables, económicas, rápidas y la posibilidad de introducir y controlar variables de operación y materiales. En un típico procedimiento de prueba, se varía el tipo y granulometría de los abrasivos, además se evalúa su efecto contra un grupo particular de materiales, o contra condiciones fijas de operación y de abrasivos, así el desempeño de un rango de materiales puede ser medido [8],[9].

2. Materiales y métodos

En la Figura 1 podemos observar la esquina enriquecida en hierro del diagrama de fases Fe-Cr-C [9], en el que se ubica un mapa de las aleaciones estudiadas con anterioridad por los autores del presente estudio y por otros investigadores [1]-[9]. La localización de las aleaciones del presente estudio, en dicho mapa, se encuentra marcada con una estrella. Habiéndose decidido la región mencionada por su bajo contenido de elementos aleantes como cromo, en el orden de 3.5 a 6%, aproximadamente; bajos contenidos de molibdeno, vanadio y titanio, con manganeso suficiente para producir una matriz austenítica. Estos bajos contenidos de elementos de aleación presuponen un bajo costo de estos materiales para manejo de minerales.

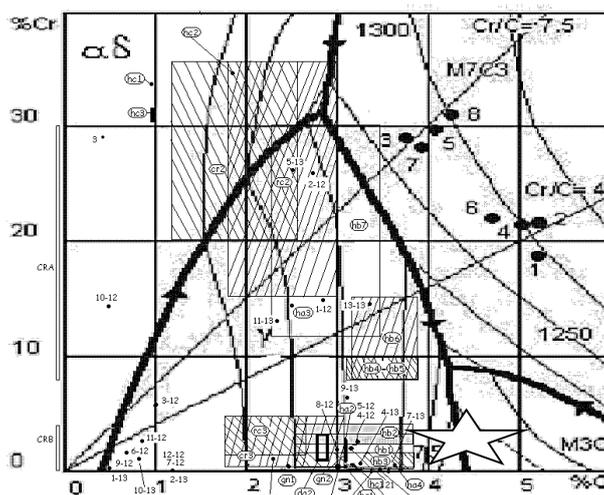


Figura 1. Mapa de aleaciones de hierro para medios de molienda [10], el presente estudio se localiza en la zona indicada por el símbolo de una estrella.

Tabla 1. Composición química de las aleaciones.

No	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ti	V	Cu
1	5.30	1.77	2.38	3.43	0.61	0.23	0.24	0.75
2	5.18	1.89	2.04	4.56	0.53	0.23	0.26	0.85
3	3.89	3.62	0.30	5.76	1.19	0.47	0.58	0.94
4	3.91	3.59	0.25	6.05	1.21	-	-	0.93

Cuatro aleaciones de hierro blanco, especiales para medios de molienda con morfología de esferas, fueron consideradas en el presente estudio. La composición química de las muestras puede ser vista en la Tabla 1. Fueron fundidas en horno de inducción de 20 kg con atmósfera normal y coladas en moldes de arena sílica con aglutinante de silicato de sodio y precalentados antes del colado por gravedad. Se fabricaron bolas de molienda con un diámetro ~51 mm. Las bolas fueron sometidas a desgaste en seco en un molino experimental de pruebas de laboratorio de 200L×200φ mm. La velocidad de rotación a 97 rpm, fue ligeramente superior a la sub-crítica, produciendo un movimiento en forma de cascada [7], [8], como se observa en la Figura 2 [12].

2.1 Mineral de prueba

El mineral de plata, oro, cobre, zinc y plomo; proporcionado por una mina del distrito minero de Zacatecas, México; presenta un elevado porcentaje de cuarzo, del orden del 30%. Adicionados a este compuesto, se presenta smectita-kaolinita y óxido de calcio. El cuarzo presenta elevada dureza, de 7-8 Mohs y por tanto es de difícil trituración. Este compuesto fue determinado mediante la técnica de difracción de rayos-X para polvo.

2.2 Metodología técnica

Plantas piloto a escala reducida han sido introducidas en la última década en orden de desarrollar un desempeño controlado de la prueba de desgaste abrasivo para bolas de molienda de minerales, tal como aquellas empleadas en plantas industriales. La ventaja de emplear una planta piloto a escala reducida para probar aleaciones de bolas para molino en pruebas de desgaste estándar es que algunos parámetros (relacionados con

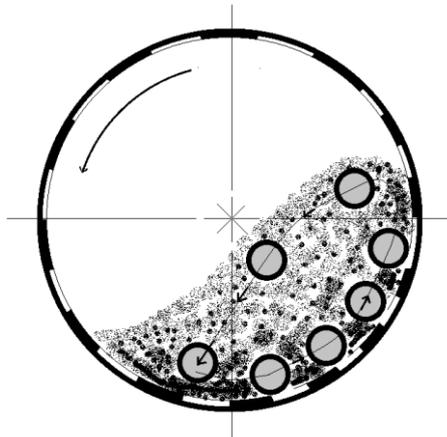


Figura 2. Diagrama de movimiento en cascada de las bolas [12].

aplicaciones industriales) pueden ser simulados bajo condiciones de laboratorio, las cuales pueden ser directamente correlacionadas al consumo de bolas [9].

2.3 Elementos de aleación

En este estudio, las aleaciones a ensayar cuentan entre los elementos principales de aleación, con un alto contenido de carbono del orden de 3.9 a 5.3%, alto cromo entre 3.5 a 5.7% y una cantidad de molibdeno de entre 0.3 a 1.2% [11]; los cuales se han considerado para observar una mejora en la resistencia al desgaste en la conminución de minerales metálicos de plata, zinc, hierro y cobre; con el propósito de producir al interior de la aleación, un gran volumen de carburos primarios del tipo cementita (M_3C), hexagonales de alto cromo (M_7C_3) y de molibdeno (Mo_2C). Se agregaron además, cantidades de vanadio y titanio entre 0.25 a 0.5%; para producir carburos refractarios (M_2C) y (MC), que le den una alta resistencia al desgaste abrasivo de manera adicional a los carburos ya mencionados [8], [9], [11].

La matriz metálica deberá contar con una alta estabilidad mecánica, para lo cual se les ha agregado una adecuada cantidad de manganeso de hasta 3.6%, para producir endurecimiento durante el proceso de desgaste inducido por el trabajado mecánico de la trituración de minerales [6], [9]. Una muestra adicional, sin vanadio ni titanio fue probada como aleación de referencia.

3. Resultados y Discusión

Las muestras fueron caracterizadas mediante microscopías óptica y electrónica de barrido, dureza y ensayos de desgaste por abrasión.

3.1 Resultados

Las micrografías de las muestras atacadas químicamente con agente Beraha's, las podemos observar en la Figura 3, en donde se aprecia en todos los casos una estructura dendrítica con carburos inter-dendríticos del tipo eutéctico; en la aleación 1, Figura 3a, se observa carburo inter-dendrítico (M_3C) con estructura ledeburítica en algunos puntos; en la aleación 2, Figura 3b, se aprecian carburos (M_3C) con un porcentaje ledeburítico reducido; en la aleación 3, Figura 3c, los carburos inter-dendríticos complejos (M_7C_3 - M_3C) aparecen en forma de placas; y en la aleación 4, Figura 3d, los carburos inter-dendríticos (M_3C) muestran una marcada forma ledeburítica.

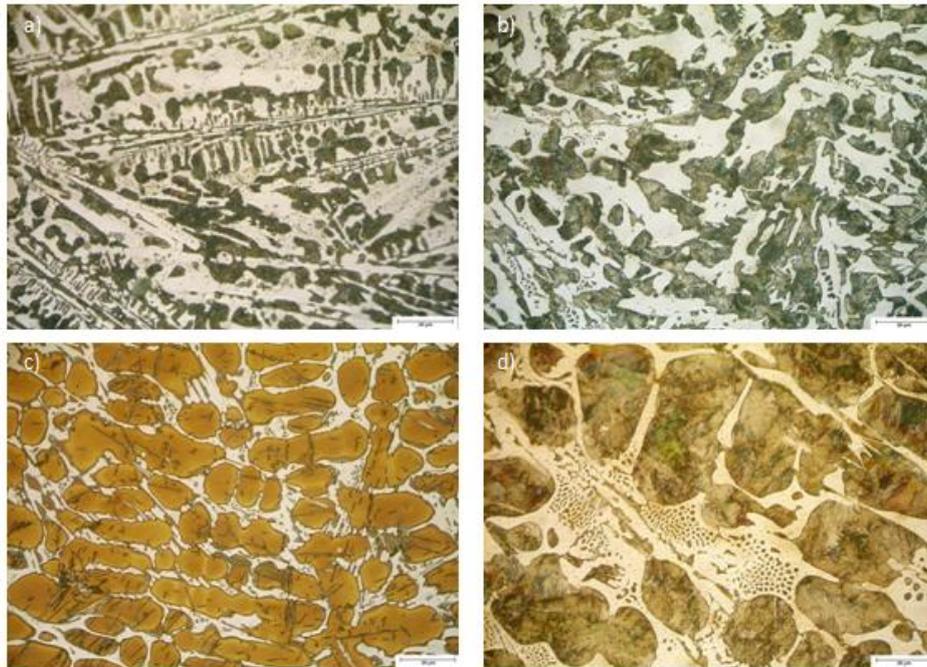


Figura 3. (a) Microestructura dendrítica de la aleación 1; (b) microestructura dendrítica de la aleación 2; (c) microestructura dendrítica de la aleación 3; (d) microestructura dendrítica de la aleación 4.

En la figura 4, se observan dos imágenes de electrones retro-dispersados de las aleaciones 3 y 4, en donde se muestran austenita y martensita en la matriz, así como carburos tipo cementita (M_3C) y de vanadio-titanio (MC), ver figura 4a. Se presentan carburos de molibdeno (Mo_2C) en la aleación 4 y se observa mayor cantidad de ledeburita (M_3C) y de martensita, ver figura 4b.

En la Figura 5, se muestra el comportamiento de la dureza en función del contenido de carbono de las aleaciones. La dureza es mayor cuando el contenido de carbono se incrementa de aproximadamente de 4 a 5.5%, ver Figura 5a. Sin embargo, una vez que se ha realizado el tratamiento térmico propuesto por la literatura especializada [8], [16], para este tipo de aleaciones, se incrementa la dureza de las aleaciones de más bajo contenido de carbono, ver Figura 5b, aun por encima de la dureza de la aleaciones con más alto contenido de carbono, las cuales permanecen constantes; llegando a alcanzar valores de aproximadamente 70 HRC, los cuales son bastante altos. Estas durezas solo es posible alcanzarlas mediante tratamientos térmicos.

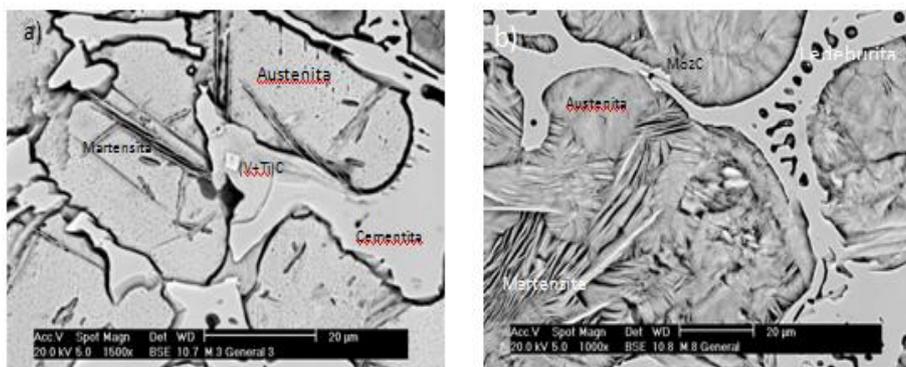


Figura 4. (a) Micrografía con imágenes de electrones retro-dispersados de la aleación 3; (b) micrografía con imágenes de electrones retro-dispersados de la aleación 4.

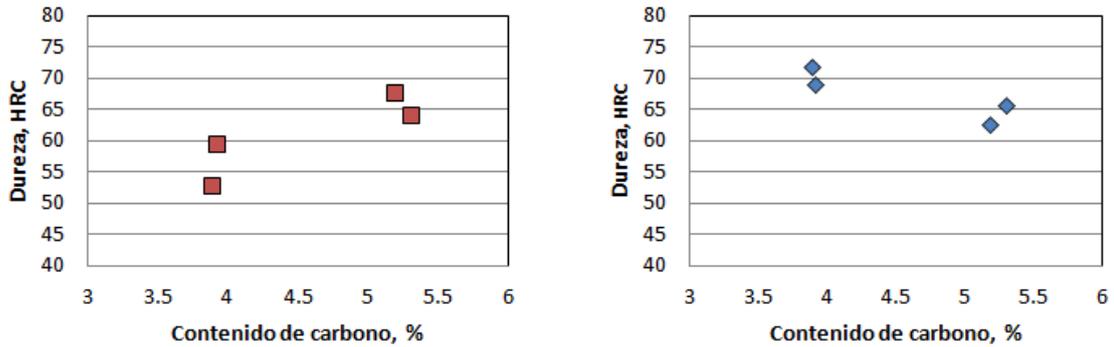


Figura 5. (a) Se muestran las durezas obtenidas para las aleaciones en condición de colado; (b) en condición de tratamiento térmico de templado+revenido.

En la Figura 6 se observa el desgaste ocurrido en las bolas, en condición de colado y con tratamiento térmico de templado mas revenido, según condición referida en el punto 1.1; para un lapso de ensayo total de 120 horas, con intervalos de 24 hrs, en donde se pesaban las muestras, previamente limpiadas, y se recargaba con mineral recién quebrado y un tamaño menor de 12 mm en diámetro. Las aleaciones 3 y 4 son las que obtuvieron el menor desgaste, tanto en condición de colado como en condición de tratamiento térmico.

3.2 Discusión

Las aleaciones 1 y 2 presentan una mayor cantidad de austenita dendrítica con carburos inter-dendríticos tipo cementita (M_3C) lo que produce un mayor desgaste abrasivo en estas aleaciones, esto al considerar que este tipo de carburos son de menor dureza que los carburos complejos del tipo M_7C_3 - M_3C , como los que se presentan en la aleación 3 [4], [16]. En contraposición, la aleación 3 presenta carburos inter-dendríticos complejos en forma de placas. La aleación 4 muestra los carburos en forma de ledeburita con forma de

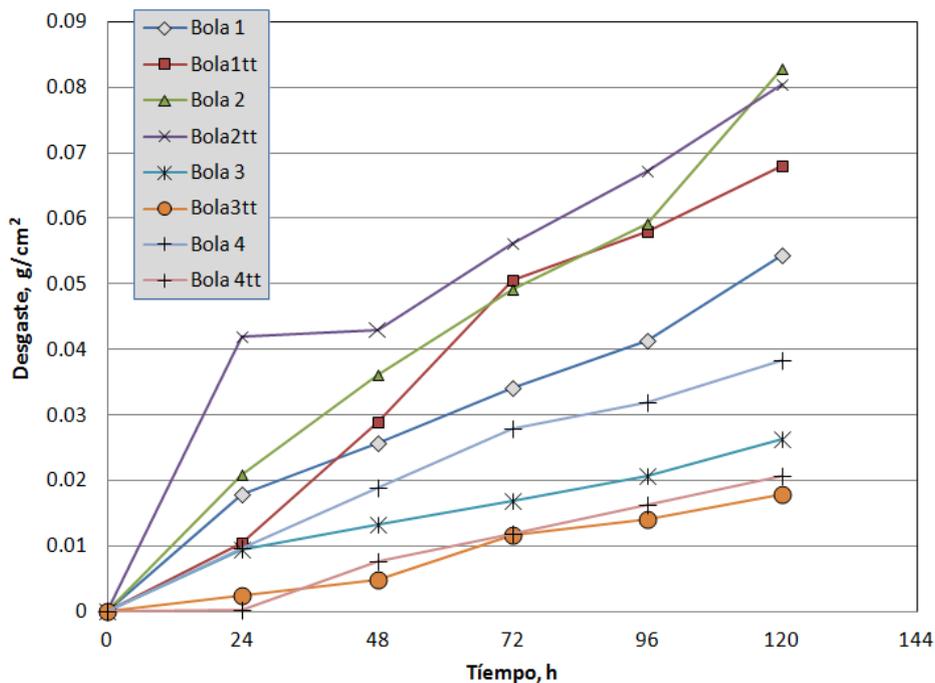


Figura 6. Desgaste de las aleaciones en condición de colado y con TT de templado + revenido.

panal de abejas, Estas dos últimas microestructuras ofrecen una mayor resistencia al desgaste y se presentan cuando el contenido de carburos es superior a 20%, y la austenita primaria no interfiere con la formación del eutéctico [16].

La aleación 3, presenta además una mayor cantidad de carburos de vanadio-titanio (V,Ti)C [4], [17], [17] los cuales refuerzan a los carburos inter-dendríticos complejos del tipo M_7C_3 - M_3C , en forma de placas; siendo esta configuración más resistente al desgaste que la de ledeburita con morfología de panal de abejas [4], en la aleación 4. La estructura ledeburítica, de la aleación 4, se encuentra ligada a austenita más martensita en la matriz, con alta resistencia al desgaste.

Los tratamientos térmicos, produjeron una mayor cantidad de fase martensítica en las aleaciones tres y cuatro, acrecentando la dureza de estas aleaciones e incrementando por tanto la resistencia al desgaste.

Este efecto, de un incremento de la fase martensita, creemos que no se presentó en las aleaciones 1 y 2 debido a que los elementos de aleación; en especial el cromo y el molibdeno, con bajos contenidos en estas aleaciones, no obstante su alto contenido de carbono, del orden de 5.18 y de 5.3%, respecto a las aleaciones 3 y 4; se asociaron a los carburos inter-dendríticos y no favorecieron un incremento en la formación de la fase martensita, manifestándose en una dureza quasi-constante tanto en condición de colado como en condición de tratamiento térmico (ver Figuras 5a y 5b).

4. Conclusiones

La aleación, con una composición de 4C6Cr4MnMo0.5V0.5Ti (aleación 3), seguida de la 4C6Cr4MnMo (aleación 4), fueron las que obtuvieron los mejores resultados.

La aleación 3, con una micro-estructura de carburos inter-dendríticos en forma de placas, y una matriz dendrítica con elevado contenido de martensita, producto de un tratamiento térmico de templado y revenido, alcanza una alta resistencia al desgaste.

La aleación 4, sin vanadio ni titanio presentó una estructura con alto contenido de martensita y mayor cantidad de carburos en forma de ledeburita, que las aleaciones 1 y 2; también con tratamiento térmico; le dio una buena resistencia al desgaste, ligeramente menor a la aleación tres.

Las aleaciones 1 y 2, aunque tienen más alto contenido de carbono, presentaron una menor resistencia al desgaste; debido a la presencia mayoritaria de carburos tipo cementita. No se incrementó su dureza con el tratamiento térmico.

Agradecimientos

Los autores agradecen la asistencia del Ing. Maximino Burgos, comercializador y fabricante de bolas de molienda en México por sus contribuciones a la discusión de la composición química de las aleaciones en el presente estudio. Se agradece al Profr. Arnoldo Bedolla Jacuinde, del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo las facilidades para fundir y colar las aleaciones. Se agradece al Profr. Marco Antonio Ludovic Hernández Rodríguez, del Doctorado en Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, las facilidades otorgadas en la caracterización de las aleaciones. Los autores agradecen al Fondo FoMix-ZAC-CoNaCyT-México por el patrocinio para esta investigación.

Referencias

- [1] A. Studnicki, J. Kilarski, M. Przybył, J. Suchoń y D. Bartocha, «Wear resistance of chromium cast iron— research and application», *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 16, (1-2), pp. 63-73, 2006.
- [2] V. Rajagopal, y I. Iwasaki, «Corrosion Properties of Cast Iron Ball Materials in Wet Grinding», *CORROSION*, vol. 48, (2), pp. 124-131, 1993.
- [3] D. Čikara, M. RAKIN y A. Todić, «Cast Steel-SiC Composites as Wear Resistant Materials», *FME Transactions*, vol. 37, pp.151-155, 2009.
- [4] S. I. Maldonado, P. Orozco, V. H. Baltazar, A. Bedolla, M. A. Hernández, «Effect of V-Ti on the Microstructure and Abrasive Wear Behavior of 6CrC Cast Steel Mill Balls», *Journal of Minerals & Materials Characterization and Engineering*, vol. 2, pp. 383-391, 2014.
- [5] M. Mazar, S. Jafariiv, H. Abdollah, «Abrasive Wear Behavior of High Chromium Cast Iron and Hadfield Steel- A Comparison», *Journal of Iron and Steel Research, International*. vol. 19, (4), pp. 43-50, 2012.
- [6] Ö. N. Doğan, G. Laird II y J. A. Hawk, «Abrasion resistance of the columnar zone in high Cr white cast irons», *Wear*, vol. 181-183, pp. 342-349, 1995.
- [7] J. J. Coronado y A. Sinatora, «Abrasive wear study of white cast iron with different solidification rates», *Wear*, vol. 267, pp. 2116-2121, 2009.
- [8] E. B. Albertin y A. Sinatora, «Effect of carbide fraction and matrix microstructure on the wear of cast iron balls tested in a laboratory ball mill», *Wear*, vol. 250, pp. 492-502, 2001.
- [9] E. Albertin y S. L. De Moraes, «Maximizing wear resistance of balls for grinding of coal», *Wear*, vol. 263, pp. 43-47, 2007.
- [10] W. Thorpe, y B. Chicco, «The Fe-rich Corner of the Metastable C-Cr-Fe Liquidus Surface», *Metallurgical Transactions A*, vol. 16A, pp. 1541-1549, 1985.
- [11] K. Weber, D. Regener, H. Mehner, y M. Menzel, «Characterization of the microstructure of high-chromium cast irons using Mössbauer spectroscopy», *Materials Characterization*, vol. 46, pp. 399-406, 2001.
- [12] Internet forum. Wikipedia: The Free Encyclopedia. 23 December 2014, 12:19 Disponible en: http://en.wikipedia.org/wiki/Ball_mill.
- [13] C. P. Tabrett, y I. R. Sare, «Effect of high temperature and sub-ambient treatments on the matrix structure and abrasion resistance of a high-chromium white iron», *Scripta Materialia*, vol. 8, (12), pp. 1747-1753, 1998.
- [14] P. Atanda, A. Okeowo, y O. Oluwole, «Microstructural study of heat treated chromium alloyed grey cast iron», *Journal of Minerals & Materials Characterization and Engineering*, vol. 9, (3), pp. 263-274, 2010.
- [15] J. O. Agunsoye, V. S. Aigbodion y O. S. Sanni, «Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of NF6357A cast alloy for wear resistance application», *Journal of minerals and materials characterization and engineering*, vol. 10, (11), pp. 1077-1086, 2011.
- [16] J. P. Breyer y G. Walmag, «Metallurgy of high chromium-molybdenum white iron and steels rolls», *Rolls for the metalworking industries-ISS*. 2002, Arrendale, pp. 29-40.
- [17] M. M. Arikan, H. Cimenoglu y E. S. Kayali, «The effect of titanium and the abrasion resistance of 15Cr-3Mo white cast iron», *Wear*, vol. 247, pp. 231-235.