

Estudio tribológico de aceros austeníticos tipo Hadfield: influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste

A. García*, Á. Varela*, J.L. Mier*, C. Camba* y F. Barbadillo*

Resumen En este estudio se analiza la respuesta frente al desgaste de aceros austeníticos tipo Hadfield, en función del contenido de manganeso, partiendo de aceros con proporciones dentro del intervalo del 4 al 6 % de manganeso. El análisis tribológico se ha realizado mediante ensayos *pin on disk*, según norma ASTM G99-05, y los resultados obtenidos se han relacionado con la dureza y con la microestructura de cada muestra determinándose que, para este tipo de aceros, la resistencia al desgaste no sólo depende de la dureza del material sino que se ve muy influida por el tipo y distribución de precipitados existentes.

Palabras clave Aceros Hadfield; Manganeso; Desgaste; *Pin-on-disk*.

Tribological study of Hadfield austenitic steels: influence of manganese on its wear response

Abstract This study analyzes the wear behavior of austenitic Hadfield steels with different manganese contents (4 to 6% of manganese). The tribological analysis has been carried out by pin on disk tests according to ASTM G99-05 standard. The results have been related to the hardness and to the microstructure of every sample. The wear resistance of these steels depends on the hardness of the material and is very influenced by the type and distribution of the precipitates.

Keywords Hadfield steel; Manganese; Wear; *Pin-on-disk*.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros austeníticos al manganeso se emplean cuando se requieren tanto buenas características de tenacidad como una buena respuesta frente al desgaste. El alto contenido de manganeso de estas aleaciones consigue estabilizar la austenita aunque el contenido en carbono sea alto. Además, la adición de otros elementos aleantes, como molibdeno y silicio, facilita el tratamiento térmico de estos aceros y la posibilidad de endurecerlos mediante la formación de carburos precipitados en la matriz austenítica. Otra posibilidad, para aumentar la dureza de los aceros austeníticos al manganeso, es el trabajo en frío: la austenita tiende a transformarse en martensita, en la superficie, a causa de la fricción.

El primer acero austenítico al manganeso contenía en torno a 1,2 % de carbono y 12 % de manganeso y fue inventado por Sir Robert Hadfield, en 1882, por lo que se denominó acero Hadfield. Este

acero combina características de alta tenacidad y ductilidad, a la vez que capacidad de endurecimiento por trabajo en frío y resistencia al desgaste. En la actualidad, todavía, se emplea ampliamente el acero Hadfield, con algunas modificaciones en su composición que implican, fundamentalmente, modificaciones en el contenido en carbono y manganeso, así como el empleo de diferentes proporciones de elementos aleantes, como cromo, vanadio, níquel, molibdeno, etc.

En combinación con el carbono, el manganeso puede formar distintos carburos: Mn_7C_3 , Mn_5C_2 , $Mn_{23}C_6$ y $Mn_{15}C_5$; sin embargo, generalmente, para los contenidos habituales de manganeso los únicos carburos que aparecen son $(Fe,Mn)_3C$ y, principalmente, Mn_3C .

Las propiedades mecánicas de los aceros austeníticos se ven modificadas, tanto por el contenido en manganeso como por el contenido en carbono. Según aumenta el carbono de la aleación, se hace

* Escuela Politécnica Superior, Universidade da Coruña, C/Mendizábal, s/n, 15403 Ferrol. E-mail: agd@cdf.udc.es.

más difícil su retención en solución, lo cual implica que la resistencia a tracción no aumente y la ductilidad disminuya. Por el contrario, la resistencia al desgaste aumenta cuando lo hace el porcentaje de carbono, por lo que las cantidades de este elemento que se emplean, frecuentemente, no son las óptimas en cuanto a características mecánicas, sacrificando, en parte, la resistencia a tracción y la ductilidad en favor de la respuesta frente al desgaste. Contenidos superiores a 1,4 % de carbono se utilizan con poca frecuencia, puesto que es complicado obtener, con esa composición, una estructura austenítica libre de carburos precipitados en el borde de grano lo que, también, influye en el descenso de resistencia y ductilidad.

Un elemento que aparece, normalmente, en la composición química de los aceros austeníticos al manganeso es el silicio. Puede emplearse con porcentajes entre 1 y 2 % para incrementar el límite elástico, sin embargo, no es frecuente y no suele encontrarse silicio en proporciones superiores al 1 %. Si se supera un 2,2 % de silicio, la resistencia mecánica disminuye bruscamente. Por otra parte, cuando el contenido en silicio es menor de 0,1 %, se empeora el proceso de moldeo.

Los elementos de aleación más frecuentes en los aceros austeníticos al manganeso son cromo, molibdeno y níquel. La adición del níquel, en porcentajes en torno a 2 - 4 % tiene un efecto estabilizador sobre la austenita, puesto que permanece en solución sólida. También, se consigue evitar la formación de láminas de carburos para un rango de temperaturas de 300 a 500 °C y se incrementa la ductilidad, mientras que el límite elástico disminuye, ligeramente. En cuanto a la resistencia al desgaste también disminuye cuando se adiciona níquel.

El cromo y el molibdeno se añaden para incrementar el límite elástico de los aceros austeníticos. Puesto que las adiciones de cromo resultan más baratas, son más frecuentes los aceros austeníticos aleados con cromo que con molibdeno. La formación de carburos de cromo, que no llegan a desaparecer mediante el tratamiento normal de solubilización (calentamiento en torno a 1.050 °C), aumentan la resistencia al desgaste, notablemente, por lo que este tipo de materiales se emplean con frecuencia en los procesos de molienda de minerales.

En cuanto al molibdeno, se añade en proporciones, en el rango de 0,5 a 2 %, con el objetivo de mejorar la tenacidad, disminuir la formación de grietas y aumentar el límite elástico. En este tipo de aceros, durante el revenido, precipitan carburos pequeños y redondeados (en lugar de agujas) que no afectan a la tenacidad del material. Cuando el contenido en manganeso se reduce en torno al 6 - 8 %, es preciso añadir un 1 % de molibdeno, con el fin de

que las propiedades del acero se mantengan en valores aceptables. En estos aceros, la austenita es menos estable, la tenacidad disminuye con respecto al acero austenítico al 12 % de manganeso, pero la capacidad de endurecimiento mediante el trabajo en frío se incrementa.

Otros elementos de aleación son el vanadio, que incrementa la formación de carburos y, por tanto, aumenta el límite elástico y disminuye la ductilidad, y el cobre, que se emplea en porcentajes del 1 al 5 % para estabilizar la austenita^[1-13].

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1. Material ensayado

Para el estudio tribológico de aceros austeníticos tipo Hadfield, llevado a cabo en este trabajo, se han empleado cuatro aceros diferentes obtenidos en la planta piloto de fundición de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, con composiciones variables en manganeso, silicio y molibdeno. En todos los casos, dado el contenido medio en manganeso que presentan las muestras, se ha añadido la misma proporción de cobre, con el objetivo de estabilizar la austenita.

La composición del lecho de fusión es la que se muestra en la tabla I.

2.2. Procedimiento experimental

El estudio tribológico se ha llevado a cabo mediante ensayos *pin on disk*, siguiendo las directrices marcadas en la norma ASTM G99-05 "Standard test method for wear testig with a pin on disk apparatus"^[14].

Previamente a la ejecución de los ensayos de desgaste se ha realizado una preparación superficial de

Tabla I. Composición química media de los aceros analizados

Table I. Mean chemical composition of the analyzed steels

	C(%)	Mn(%)	Si(%)	Cu(%)	Mo(%)
Acero 1	1,50	4,00	0,50	3,00	2,00
Acero 2	1,30	6,00	0,65	3,00	1,10
Acero 3	1,50	6,00	0,20	3,00	2,00
Acero 4	1,00	5,00	0,50	3,00	1,50

las muestras, consistente en un proceso de rectificación, con el objetivo de minimizar al máximo la influencia del acabado superficial de los aceros en los resultados obtenidos y disminuir la rugosidad superficial de los mismos hasta valores inferiores a 0,9 mm.

Los parámetros de ensayo empleados, en todos los casos, son los siguientes:

- Pin en forma de esfera de carburo de wolframio con radio de 4 mm y dureza de 75 HRC.
- Carga de 10 N.
- Radio de giro de 8 mm.
- Velocidad lineal de 0,25 m/s.
- Distancia lineal total, 905 m.
- Ensayos a temperatura ambiente.

Para cada ensayo se ha determinado:

- El coeficiente de desgaste, calculado en función de la pérdida de volumen experimentada durante el ensayo según la expresión:

$$k = \frac{W}{F_N s},$$

donde, W es el volumen desgastado, F_N es la fuerza normal aplicada en el ensayo y s es la distancia lineal total.

- El coeficiente de fricción durante los mismos.

Para completar el estudio se ha analizado la dureza de cada muestra, medida mediante un durómetro Vickers, con una carga aplicada de 100 kg.

Además, se ha estudiado la microestructura de los cuatro aceros, empleando como reactivo de ataque Nital-3.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las medidas de resistencia al desgaste se han realizado mediante el ensayo *pin on disk*, determinándose el coeficiente de desgaste a partir de la pérdida de masa experimentada por la muestra. También, se ha medido el coeficiente de fricción desarrollado a lo largo de los ensayos.

La figura 1 representa el coeficiente de fricción medido en uno de los ensayos realizados para el acero 4. Puede observarse cómo el valor del coeficiente de fricción permanece, prácticamente, constante a lo largo del ensayo, por lo que se puede tomar como valor el valor medio medido durante el mismo.

Este comportamiento se repite para todos los ensayos realizados sobre el mismo acero y, en las otras muestras ensayadas, la evolución del coeficiente de fricción, a lo largo del ensayo de desgaste, sigue un patrón similar.

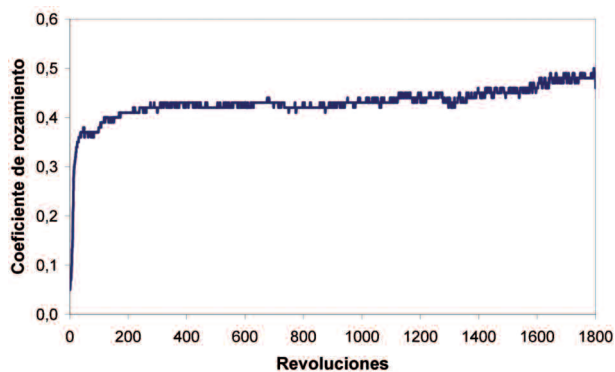


Figura 1. Evolución del coeficiente de fricción a lo largo de un ensayo de desgaste *pin on disk*.

Figure 1. Evolution of the friction coefficient in a pin on disk wear test.

En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos para los ensayos de desgaste, en función del coeficiente de desgaste calculado para cada acero junto con el resultado obtenido para el valor medio del coeficiente de fricción y la dureza Vickers de cada uno de los aceros ensayados.

Los datos representados gráficamente son los valores medios obtenidos en cada caso, teniendo en cuenta que para que un ensayo se considere válido se ha exigido un valor del coeficiente de Pearson (cociente entre el valor medio y la desviación estándar) inferior a 0,20. En todos los casos, se han incluido un mínimo de cinco ensayos válidos.

En esta representación gráfica se puede observar que no hay una variación significativa entre el valor obtenido para el coeficiente de fricción, en los

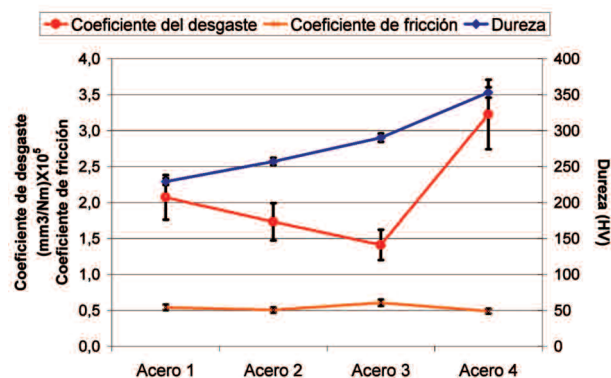


Figura 2. Resultados de desgaste y dureza obtenidos para cada acero ensayado.

Figure 2. Wear and hardness results for the tested steels.

distintos aceros, siendo el valor más alto, el del acero 3, en torno a 0,6 y, el menor, el del acero 4, que está muy próximo a 0,5.

Tal y como se puede observar, la dureza obtenida para el acero 1 y 2 es muy semejante, aunque es algo mayor la de este último, mientras que el acero que presenta el valor más elevado es el 4.

Asimismo, en cuanto a la resistencia al desgaste, se puede ver que para los aceros 1, 2 y 3 la tendencia del coeficiente de desgaste es inversa que para la dureza, es decir, decrece cuando la dureza aumenta. Esto significa que la resistencia al desgaste aumenta con la dureza del material. El coeficiente de desgaste disminuye desde un valor de k de $2,1 \times 10^{-5}$ para el acero 1 hasta $1,4 \times 10^{-5}$ para el acero 3, siendo el valor más alto de todos los alcanzados el del acero 4 a pesar de que su dureza, también, es mayor.

En la microestructura del acero 4 (Fig. 3) se puede observar el grano austenítico junto con gran cantidad de agujas de martensita, que aparecen como consecuencia de la fricción a la que se somete a la muestra en las etapas previas a la observación microscópica de lijado y pulido. Esta gran cantidad de martensita presente en el acero 4 puede explicar los valores más altos de dureza.

El acero que presenta la microestructura más parecida a la mostrada en la figura 3, para el acero 4, es el acero 3 y se muestra en la figura 4.

En este caso, se aprecia, de nuevo, la aparición de martensita, aunque la proporción presente en la microestructura es menor que en el caso anterior, lo que se explica por el mayor contenido de este acero en carbono, manganeso y molibdeno, y lo que refuerza que el valor de dureza del acero 4 sea mayor.

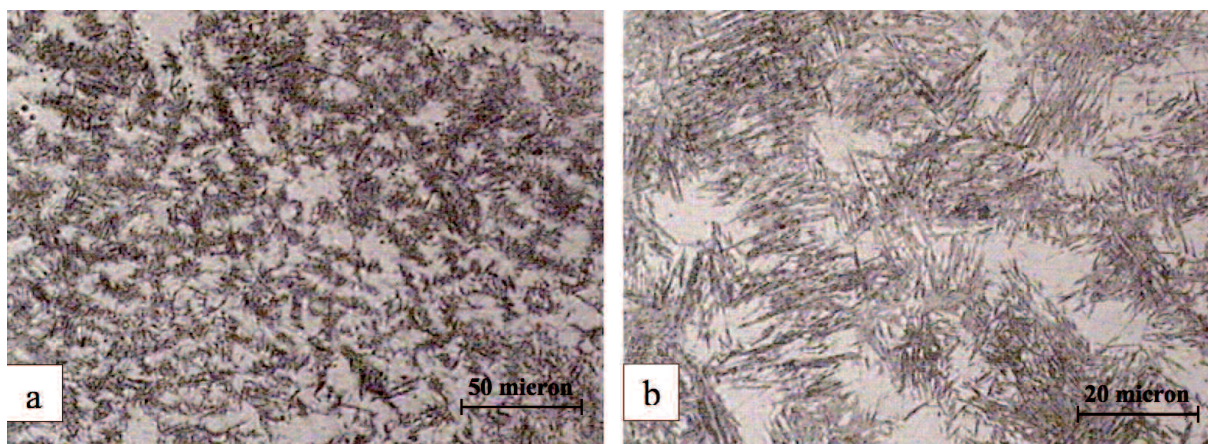


Figura 3. Microestructura del acero 4, (a) X50 y (b) X200.

Figure 3. Microstructure of the steel 4, (a) X50 and (b) X200.

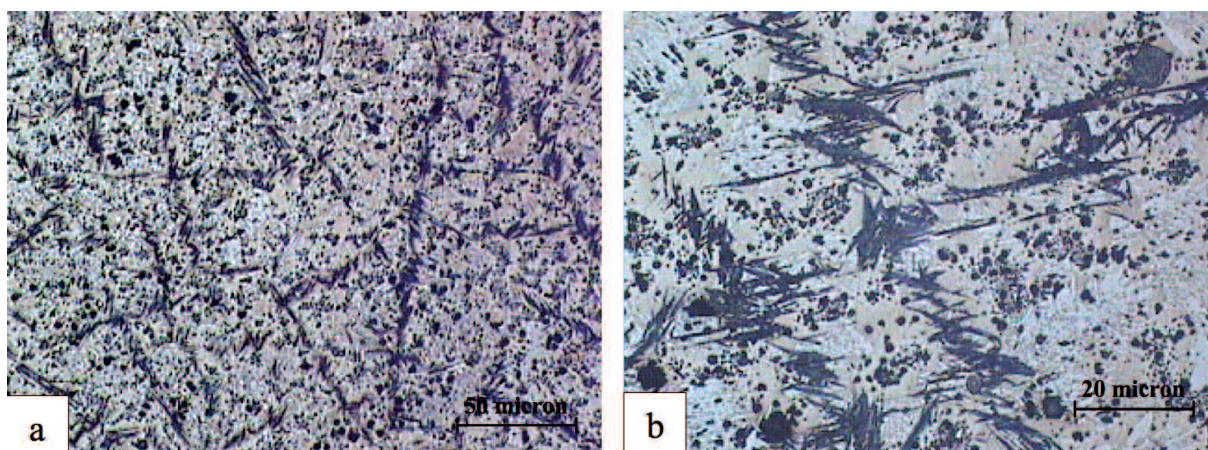


Figura 4. Microestructura del acero 3, (a) X50 y (b) X200.

Figure 4. Microstructure of the steel 3, (a) X50 and (b) X200.

A diferencia del caso anterior, aparecen carburos precipitados distribuidos uniformemente, que no existían en el acero 4 debido a su menor contenido en carbono.

Las figuras 5 y 6 muestran las microestructuras observadas para los aceros 1 y 2, respectivamente.

En el caso del acero 1 (Fig. 5), se puede observar una estructura austenítica con precipitación de pequeños carburos, distribuidos en grupos, en el borde de grano y en el interior del mismo. Además, se observan otro tipo de carburos, de mayor tamaño que los anteriores, en el interior del grano austenítico, que pueden explicarse por el mayor contenido en carbono y molibdeno que tiene este acero con respecto a los demás.

En la figura 6 se muestra que el acero 2 presenta, de nuevo, estructura austenítica y, en este caso, la

precipitación de carburos de pequeño tamaño se limita, principalmente, al borde de grano, aunque también se observan en el interior del mismo y la distribución es más uniforme que la que se aprecia en el caso anterior.

Analizando conjuntamente los resultados obtenidos y mostrados en las figuras anteriores, se puede afirmar que las muestras 1 y 2 tienen, tal y como se comentó, un valor de dureza no muy diferente y que, además, son los aceros que presentan una microestructura más parecida.

También, la mayor dureza de los aceros 3 y 4 se puede explicar por la aparición de martensita como consecuencia del trabajo en frío, que es mayor en el acero 4 debido a la mayor inestabilidad de la austenita, dados los contenidos menores en carbono y elementos aleantes gammágenos.

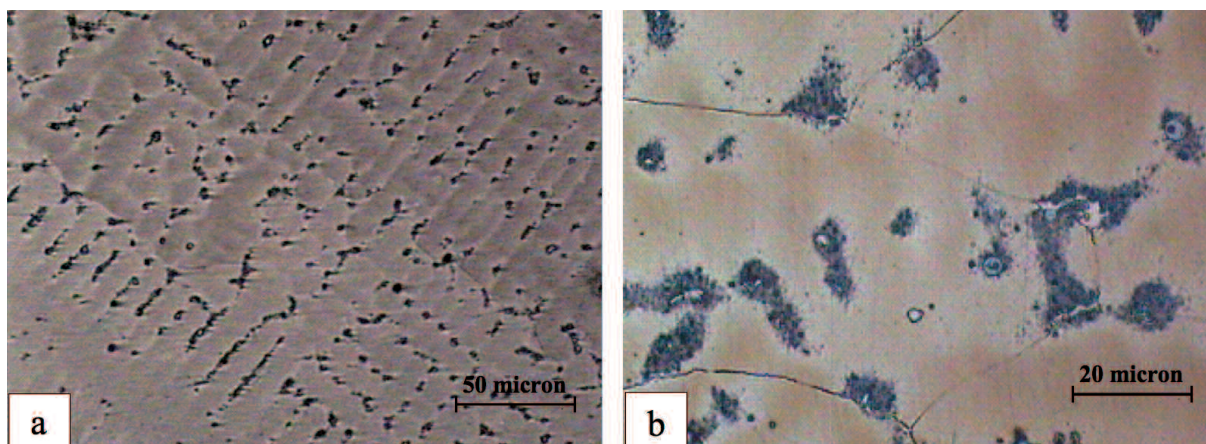


Figura 5. Microestructura del acero 1, (a) X50 y (b) X200.

Figure 5. Microstructure of the steel 1, (a) X50 and (b) X200.

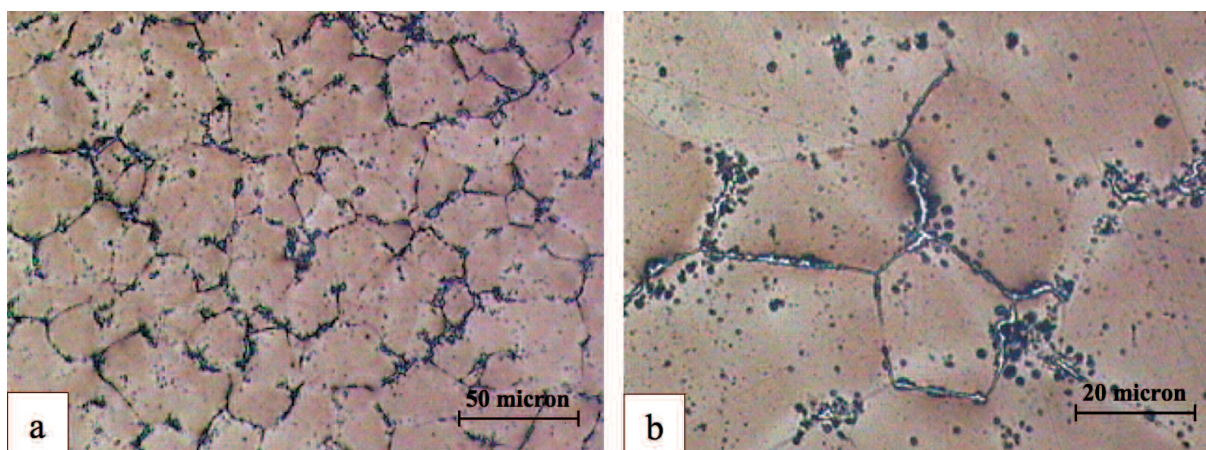


Figura 6. Microestructura del acero 2, (a) X50 y (b) X200.

Figure 6. Microstructure of the steel 2, (a) X50 and (b) X200.

En este último acero, se obtienen los peores resultados en cuanto a resistencia al desgaste y es el único que no presenta precipitación de carburos en su estructura (el contenido en carbono es el menor de todos).

Para el resto de los aceros (1, 2 y 3), la pérdida de masa experimentada en los ensayos de desgaste es inversamente proporcional a la dureza, es decir, la resistencia al desgaste aumenta cuando la dureza lo hace. Así, la distribución más uniforme de los carburos en la estructura del acero 3 explica la mayor resistencia al desgaste, que se mide en éste.

4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio tribológico de cuatro aceros al manganeso tipo Hadfield con contenidos, en este elemento, entre el 4 y el 6 % y con cantidades variables de carbono y de elementos aleantes como silicio y molibdeno.

Los resultados obtenidos para los ensayos de desgaste se han relacionado con la dureza de los aceros y con su microestructura.

No se han podido observar diferencias importantes en el coeficiente de fricción medido a lo largo de los ensayos de desgaste para los diferentes aceros.

Se ha determinado que el acero que presenta mayor dureza es el 4, que tiene un contenido menor en elementos aleantes, lo que provoca una mayor inestabilidad de la austenita y, por tanto, favorece la transformación de la austenita en martensita.

En contra de lo esperado, por su dureza, el peor comportamiento al desgaste lo presenta, también, el acero 4, mientras que para el resto de los aceros analizados, la pérdida de masa medida en los ensayos de desgaste crece cuando disminuye el valor de dureza.

El acero 3 presenta en su microestructura una proporción menor de martensita que el acero 4, por lo que la dureza que se puede medir es inferior. Sin embargo, la aparición, en su microestructura, de pequeños carburos precipitados distribuidos uniformemente provoca que sea el acero con mayor resistencia al desgaste de los analizados.

En la microestructura de los aceros 1 y 2 no se aprecia martensita, pero sí se puede observar la aparición de carburos precipitados. En el caso del acero 1, estos carburos precipitan tanto en borde como en el interior de grano y lo hacen agrupados, sin que exista distribución uniforme de los mismos por toda la estructura, lo que puede explicar tanto el menor valor de dureza como el peor comportamiento al desgaste medido entre todos los aceros, exceptuando el 4.

En el acero 2 aparecen carburos, fundamentalmente, en el borde de grano pero también en el interior, de manera más distribuida que en el caso anterior pero sin ser tan uniformes como los encontrados para el acero 3, por lo que tanto el valor de dureza como la resistencia al desgaste medidos tienen valores intermedios con respecto a los medidos para los aceros 1 y 3.

REFERENCIAS

- [1] I. Finnie, A.V. Levy y D.H. McFadden, *Fundamental mechanisms of erosive wear ductile metals by solid particles in Erosion, prevention and useful applications* (W.F. Adler, ed.), Special Publication STP-664, ASTM, Philadelphia, EE. UU., 1979, pp. 36-57.
- [2] I. Karakaya y W.T. Thompsom, *Alloy phase diagrams, ASM Handbook, Vol. 3*, ASM International, Ohio, EE. UU., 1992, pp. 1.23-1.25.
- [3] A. Mammeri, F. J. Belzunce, C. Rodríguez, M. Torre, S. Poveda y J. García, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 107-113.
- [4] L.G. Korshunov, Y.N. Goikheberg y N.L. Chumenko, *Phys. Metals Metallogr.* 96 (2003) 535-540.
- [5] A. García, A. Varela, L. García, M.C. Río, S. Naya y M. Suárez, *Wear* 258 (2005) 203-207.
- [6] M.M. Kruschov, *Proc. Conf. Lab. Wear*, Institution of Mechanical Engineers, Londres, Inglaterra, 1957, pp. 655-659.
- [7] F.C. Zhang y T.Q. Lei, *Wear* 212 (1997) 195-198.
- [8] M. Campos, L. Blanco, J. Sicre-Artalejo y J.M. Torralba, *Rev. Metal. Madrid* 44 (2008) 2-5.
- [9] S. Zhongliang, G. Mingyuan, L. Junyou e Y. Yausheng, *J. Mater. Sci. Technol.* 11 (1995) 102-108.
- [10] J. Goodman, *Recent researches in friction*, Vol. XXV, Institution of Civil Engineers, Londres, Inglaterra, 1886, pp. 376-392.
- [11] J.H. Tylczak, J.A. Hawk y R.D. Wilson, *Wear* 225-229 (1999) 1.059-1.069.
- [12] H. Liu, M. Sakamoto, M. Nomura y K. Ogi, *Wear* 250 (2001) 71-75.
- [13] I.I. Kositsyna, Y.I. Filippov y V.V. Sagaradze, *Protect. Met.* 36 (2000) 461-465.
- [14] ASTM Standard G99-05, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin on Disk Apparatus*, ASTM International, West Conshohocken, PA, California, EE. UU., 2008, pp. 408-412.