

Evaluación de la resistencia al desgaste adhesivo del acero austenítico al manganeso sometido a ciclos térmicos

Evaluation of the adhesive wear resistance of manganese austenitic steel submitted to thermal cycle

Oscar Fabián Higuera Cobos*

Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia)

Carlos Mauricio Moreno Tellez**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Manuela Gutiérrez Ramirez***

Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia)

* M.Sc. Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigaciones en Materiales Avanzados (GIMAV-UTP), Profesor asistente, Universidad Tecnológica de Pereira. *osfahico@utp.edu.co*.

Correspondencia: Vereda la Julita, Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia).

** Ph.D. Ingeniería Metalúrgica, CEIT, Universidad de Navarra (España). Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Grupo de Integridad y Evaluación de Materiales - UPTC. *carlosmauricio.moreno@uptc.edu.co*.

*** Ingeniera Mecánica, Grupo de Investigaciones en Materiales Avanzados (GIMAV-UTP), Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia).

manuguti13@gmail.com

Resumen

Este artículo presenta el resultado de una investigación acerca del efecto de ciclos térmicos de temple y revenido sobre la resistencia al desgaste adhesivo del acero austenítico al manganeso (9.4Mn1C1.9Cr1Si). El material se caracterizó química y metalográficamente. Posteriormente, el material fue sometido a la prueba de cilindros cruzados según norma ASTM G-83, con el fin de determinar su comportamiento al desgaste adhesivo. Los resultados indican que la probeta revenida a 200°C tiene un mayor periodo de endurecimiento por deformación que las revenidas a 400 y 800°C, lo cual la hace más resistente al desgaste, mejorando así las características de la muestra en estado de suministro.

Palabras clave: Descargas parciales, aislamientos poliméricos, Etileno-Propileno.

Abstract

In this research we studied the effect of thermal cycles of quenching and tempering on the adhesive wear resistance of austenitic manganese steel (9.4Mn1C1.9Cr1Si). The material was characterized chemically and metallographically. Subsequently the material was tested by cross cylinder ASTM G-83 with the aim of determining the adhesive wear behavior. The results indicate that the specimen tempered at 200 ° C has a longer period of strain hardening than the ones tempered at 400 and 800 ° C, making it more resistant to wear, thus improving the characteristics of the sample in a state of supply.

Keywords: Manganese austenitic steel, tribology, wear.

Fecha de recepción: 4 agosto de 2009
Fecha de aceptación: 24 de enero de 2010

1. INTRODUCCIÓN

El acero austenítico al alto manganeso fue el primer acero de aleación descubierto por *sir* Robert Hadfield, precursor del desarrollo en la industria de construcción de maquinarias; de ahí que en el mundo entero este material es más conocido por el nombre de su creador y denominado comúnmente como acero Hadfield. Comenzó a utilizarse en la industria desde 1882 aproximadamente. Su principal característica, desde el punto de vista de la composición, es poseer una relación % Mn / % C > 10 [1]. El acero Hadfield es considerado en la práctica industrial como el único material que combina elevada tenacidad-ductilidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación, y una resistencia al desgaste extraordinariamente alta, a pesar de su relativa baja dureza cuando es sometido al trabajo de golpe

continúo combinado con fricción. Con un contenido de carbono de 1,2% a 1,5% y de manganeso de 9% a 15% posee después de temple en agua una estructura completamente austenítica. Bajo acción de fuertes presiones en frío experimenta su superficie un gran aumento de dureza por formación de martensita y segregación de carburos a lo largo de las líneas de deslizamiento, a lo que debe su elevada resistencia a desgaste. [7], [14]

A nivel regional hay empresas que producen acero austenítico al manganeso ASTM A128 grado C con relación Mn/C \approx 13, el cual muestra buenas características al desgaste pero debido a su alto grado de aleación presenta un elevado costo. En vista de su amplio rango de aplicabilidad y a que sus propiedades mecánicas varían con la relación (Mn/C), se ve la necesidad de estudiar variaciones en dicha relación y determinar su comportamiento durante la aplicación de ciclos térmicos, con el fin de obtener una microestructura lo más aproximada posible al del material original (13%Mn) y lograr una reducción en los costos de producción. En este trabajo se determinó el efecto de la temperatura de revenido sobre la resistencia al desgaste adhesivo, según la norma ASTM G-83 de un acero austenítico (9Mn1C1.9Cr1Si); para esto se caracterizó química y metalográficamente y se determinó su coeficiente de resistencia al desgaste adhesivo.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Desgaste adhesivo [3]. El desgaste adhesivo invariablemente se asocia con la formación de uniones adhesivas en la interface. Para que una unión adhesiva se forme, las superficies que actúan recíprocamente deben estar en contacto íntimo. La fuerza de estas uniones depende en mayor grado de la naturaleza fisicoquímica de las superficies puestas en contacto. Se pueden identificar tres tipos de desgaste adhesivo, según su mecanismo; por fatiga, elástico y por micro corte; además, estos se pueden presentar en dos cuerpos o en tres cuerpos. El volumen de material removido por el proceso de desgaste adhesivo puede ser estimado con el modelo propuesto por Archard [2].

$$V = \left(\frac{KPL}{3H} \right) \quad (1)$$

Donde V es la pérdida volumétrica del material más blando después del deslizamiento a una distancia L a una carga normal a la superficie de desgaste P . H es la dureza Brinell del material más blando y K es el coeficiente adimensional de desgaste estándar. La distancia de deslizamiento puede ser calculada según la expresión [8]:

$$L = 2\pi rR \quad (2)$$

Donde R son las revoluciones a las cuales gira la máquina y r el radio de la probeta en milímetros. Para valores conocidos de V , L , P y H , el coeficiente de desgaste K se puede calcular según la ecuación (1). Para un material en particular puede apreciarse que V puede ser calculado con la pérdida de masa en gramos y la densidad en gramos por centímetro cúbico. El coeficiente de desgaste es una función de varias propiedades de los materiales en el contacto. La ecuación (1) es válida para contactos secos únicamente. El desgaste adhesivo está influenciado por los siguientes parámetros: estructura electrónica, estructura cristalina, orientación de la estructura cristalina y fuerza cohesiva.

La pérdida por desgaste puede ser determinada midiendo el cambio de pesos o el cambio dimensional. Es necesario que un espécimen en estado de suministro u original sea pesado, y que el peso del objeto después de la exposición al desgaste sea determinado y restado del original para determinar la diferencia en el peso (es decir, el cambio de masas). La cantidad de desgaste puede ser descrita por la cantidad absoluta de pérdida de peso (en gramos), o por la tasa de pérdida de masas por unidad de uso (gramos por día), o por un cambio fraccionario de la masa de la parte involucrada (el cambio del 1 % por 100 horas de operación). En la mayor parte de las normas ASTM, la unidad que se utiliza para describir el desgaste son los milímetros cúbicos de volumen, más que la masa, de modo que los materiales con densidades diferentes pueden ser comparados [2]. La pérdida volumétrica de material puede ser calculada usando la siguiente expresión [15]:

$$\text{Volumen material perdido} = \left(\frac{\text{masa perdida [gr]}}{\text{densidad} \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]} \right) * 1000 \quad (3)$$

La velocidad a la cual se desgasta el material puede ser calculada según la siguiente expresión:

$$\text{Volumen de desgaste} = \left(\frac{\text{masa perdida [gr]}}{\text{tiempo [min]}} \right) \quad (4)$$

Los resultados de los cálculos anteriores se presentan en una curva típica de desgaste vs tiempo, como se observa en la figura 1. Durante el deslizamiento seco de sistemas metal – metal, se distinguen tres etapas de desgaste. [16]

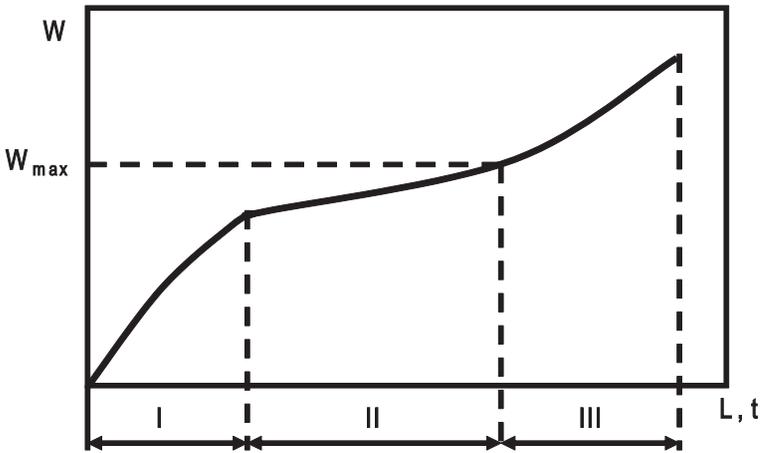


Figura 1. Curva típica de desgaste vs tiempo. [16]

Etapa I. Mejor conocida como etapa de asentamiento; no hay equilibrio en el proceso, representa solo una pequeña porción del tiempo total de operación del par deslizante y se caracteriza por seguir una función exponencial.

Etapa II. Es la etapa más larga y estable del proceso y se caracteriza por su régimen de desgaste lineal.

Etapa III. Es la etapa de desgaste catastrófico; el régimen de desgaste es de incremento constante y se asume el volumen de material removido de la superficie como partículas de desgaste.

Acero austenítico al manganeso. Estos aceros son metaestables con solución sólida de carbono, manganeso y silicio en hierro gamma (γ). Por lo tanto, el desarrollo de una microestructura simple de austenita depende de la rapidez y efectividad del temple en agua durante el tratamiento térmico. La microestructura es caracterizada por una matriz austenítica con carburos precipitados y pequeñas colonias de perlita resultado del rechazo del carbono por parte de la austenita durante el enfriamiento.

En la figura 2 se muestra la variación debido al efecto del Mn sobre el punto eutectoide en el diagrama Fe-C. El Mn es un elemento que expanden la zona austenita (γ) hasta temperatura ambiente, por lo que se puede ver que a bajos contenidos de Mn (2,5%) la temperatura eutectoide se mantiene a 727°C, pero el punto eutectoide cambia pasando de 0,77 a 0,65%C; se produce una zona metaestable ($\alpha + \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$), producto de la baja velocidad de difusión del carbono de la austenita hacia la cementita, inhibiendo parcialmente el cambio alotrópico a ferrita.

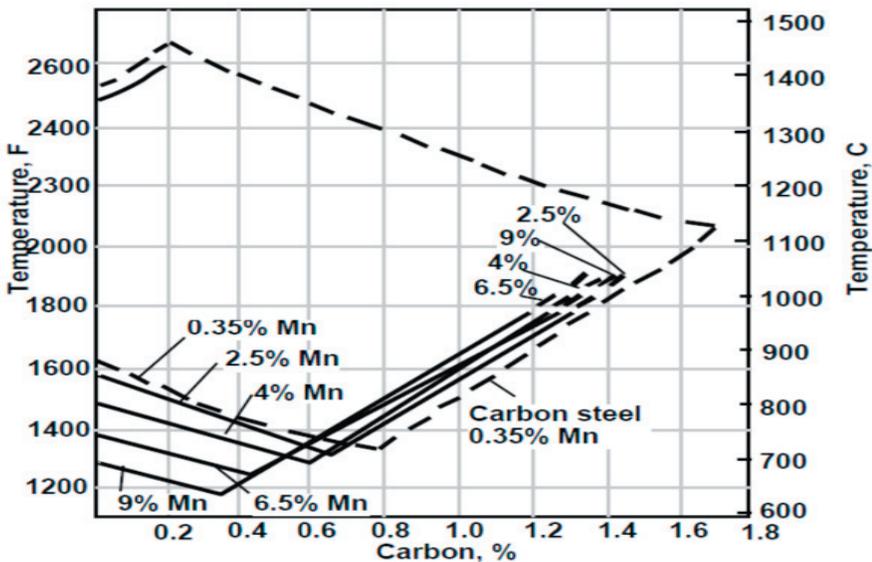


Figura 2. Efecto del porcentaje de manganeso sobre el punto eutectoide en el sistema Fe- C. [1], [5]

Con un aumento mayor en el contenido de manganeso (9%Mn), la temperatura eutectoide presenta una disminución leve, de 727°C a 650°C, produciendo una disminución el contenido de carbono de 0,77% a 0,35%, aproximadamente. Se puede observar que la reacción eutectoide ha sido prácticamente inhibida, con la cual se produce una zona metaestable ($\alpha + \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) a temperatura ambiente. Desplazando la zona perlítica a altas concentraciones de carbono. [4], [5]

3. METODOLOGÍA

Caracterización fisicoquímica del acero. El material se caracterizó mediante las técnicas de espectrometría de emisión óptica por medio del Espectrómetro de Emisión Óptica ARL ASSURE, microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X utilizando el difractómetro de rayos-X PW1700 de Philips, equipado con un generador PW1825 y con monocromador de grafito con un ángulo de 26°, utilizando radiación de Cu .

Tratamientos térmicos. La temperatura de austenización fue de 1050 °C con un tiempo de sostenimiento de 1 hora y el medio de enfriamiento agua. Los tratamientos de revenido se efectuaron en un rango de 200 °C a 800 °C con intervalos de 200 °C y tiempo de permanencia 2 horas. Los tratamientos térmicos empleados son resumidos en la figura 3. Para las tomas de dureza se utilizó un micro durómetro WILSON WOLPERT 401 MVA.

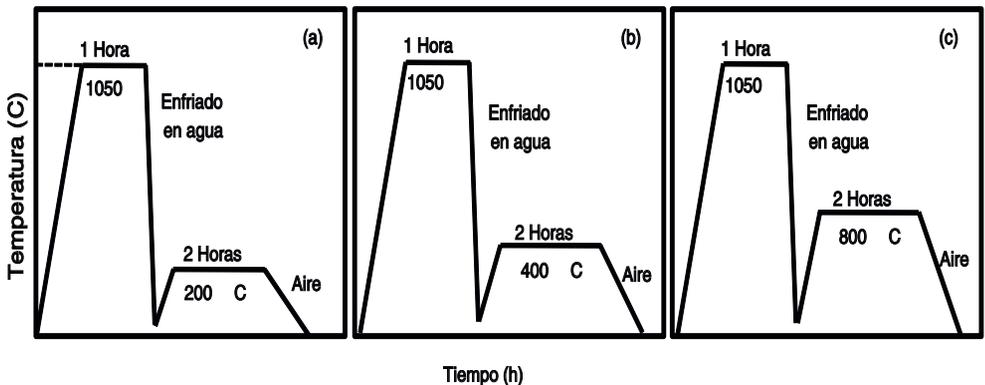


Figura 3. Tratamiento térmico de bonificado a diferentes temperaturas de revenido.

Ensayo de desgaste. Los ensayos fueron realizados según los requerimientos de la norma ASTM G-83-96; las dimensiones de las probetas se plantean en la figura 4. Además, en la tabla 1 presentan los parámetros de prueba del tribómetro con el cual se realizaron los ensayos. Los parámetros de prueba que han de ser seleccionados para la determinación del coeficiente de desgaste son: la carga (P), la distancia de deslizamiento (L), la velocidad de rotación y el tiempo de duración de la prueba.

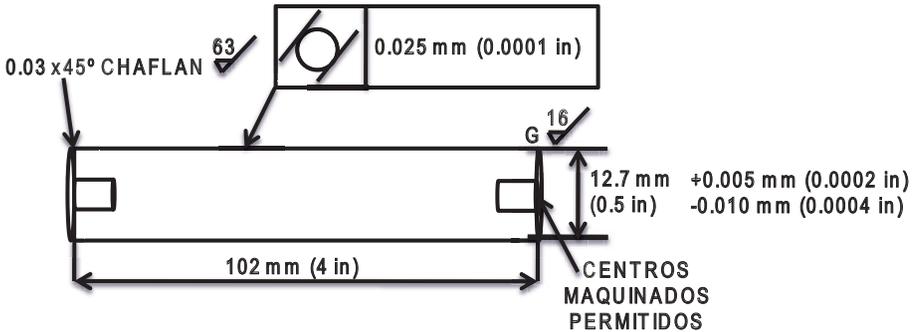


Figura 4. Especificaciones probeta ASTM G-83 [14,15]

Tabla 1. Parámetros de prueba para el tribómetro utilizado. [14], [15]

Procedimiento	Carga (Kg-F)	Revoluciones	Velocidad (Rpm)	Distancia Deslizada (Mm)	Tiempo (Min)
A	7.19	80.000	442	3191865.6	181
B	7.19	40.000	442	1595932.8	90.5
C	7.19	10.000	110	398982.3	91

Las velocidades del tribómetro son ligeramente superiores a las expuestas por la Norma ASTM G83- 96; sin embargo, para equilibrar esto se ajustó el tiempo de ensayo. Debido a que la dureza del material es intermedia, el procedimiento B fue el empleado para la realización de las pruebas de desgaste. Las medidas de desgaste son reportadas como la pérdida de volumen por procedimiento.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Caracterización del acero austenítico al manganeso. Se realizó la caracterización del material desde el punto de vista químico y metalográfico en estado de suministro y tratado térmicamente.

- *Espectrometría de emisión óptica.* Las pruebas se realizaron por triplicado y los resultados se presentan en la tabla 2. Relación Mn/C \approx 8.89.

Tabla 2. Composición química del acero austenítico al manganeso.

Elemento	Porcentaje en peso		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Fe	86.47	86.73	86.6
C	1.069	1.038	1.0535
Mn	9.347	9.294	9.3205
Cr	1.976	1.828	1.902
Si	1.007	0.9664	0.9867
Al	0.0521	0.0412	0.04665
Cu	0.0356	0.03	0.328

- *Difracción de rayos X.* En la figura 5 se muestra el espectro del acero austenítico al manganeso en estado de suministro. Se observan los picos típicos de reflexión en los planos (111), (200), (220), (311) y (222) de la fase austenítica de muy baja intensidad. Además, se puede apreciar la presencia de fase ferrita, lo cual se corrobora por el pico de reflexión en el plano (110) y carburos de hierro y aleados del tipo $(Fe, Cr)_7C_3$ o $(Fe, Cr, Mn)_3C$. La presencia de la fase ferrita y los carburos es indeseable por lo tanto debe eliminarse o en su defecto reducirse mediante tratamiento térmico (ver figura 5).
- *Microscopía electrónica de barrido.* En la figura 6 se observa la microestructura y el espectro de composición para la material en estado de suministro.

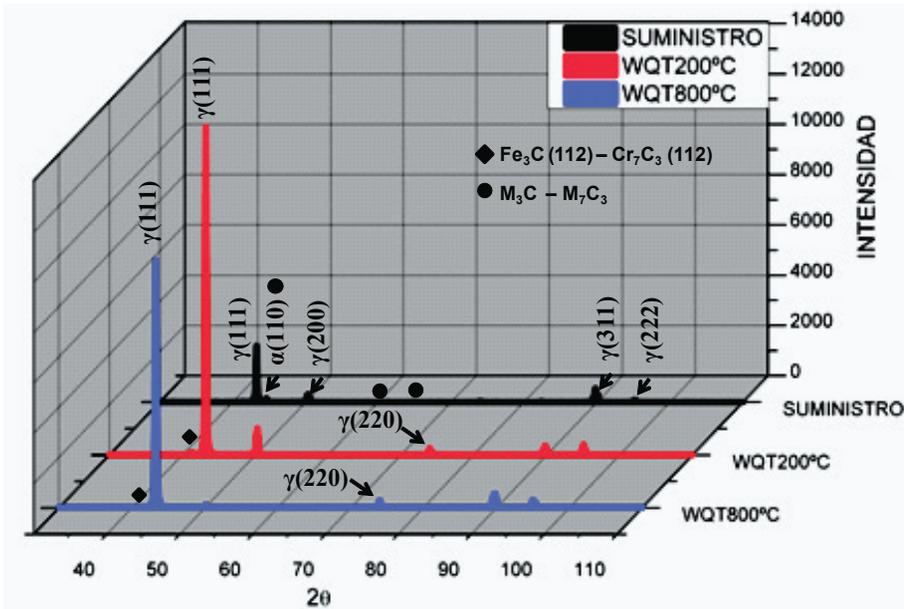


Figura 5. DRX acero austenítico al manganeso en estado de suministro, templado en agua y revenido a 200 y 800°C.

El SEM muestra una estructura austenítica con presencia de carburos en los límites de grano, lo cual se corrobora con el incremento en el porcentaje de cromo en dichas zonas, pasando de 2.34%Cr en el grano austenítico a 9.06%Cr en el límite, como se observa en el espectro EDS.

Tratamientos térmicos. En la figura 5 se presenta el espectro de difracción de rayos X para el material templado en agua y revenido a 200 °C durante dos horas. Se observa un comportamiento austenítico homogéneo, en el cual se aprecia un aumento significativo en la intensidad del pico de reflexión en el plano (111) de la fase austenítica comparado con el presentado en estado de suministro. Este comportamiento es el indicado para este material, aunque se observa la presencia de carburos aleados del tipo M_7C_3 , los cuales podrían disminuir su resistencia al desgaste, dichos carburos se forman durante el revenido a bajas temperaturas, o son carburos no disueltos durante el proceso de austenización durante el temple.

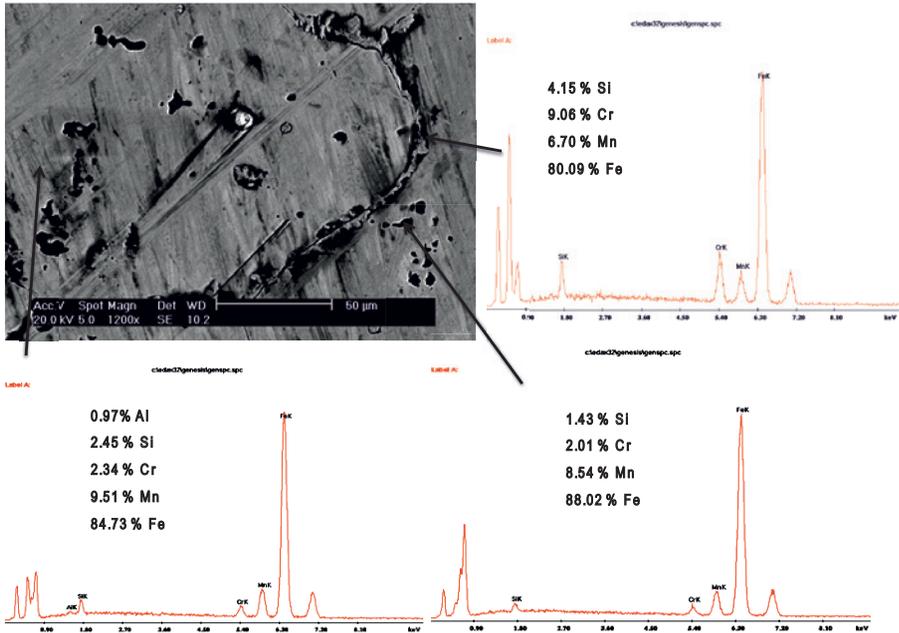


Figura 6. Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDAX) acero austenítico al manganeso en estado de suministro.

Además, se presenta el espectro de difracción de rayos x para el material templado en agua y revenido a 800 °C durante dos horas. La fase austenítica es mucho menor que en la muestra templada y revenida a 200 °C. Este resultado indica que el cromo en la aleación no es suficiente para lograr un refuerzo del par C-Mn y aumentar la actividad del carbono en la austenita, evitando la presencia de compuestos eutectoides (α +Fe₃C) en el acero, lo cual produce una estructura austenítica estable.

Estudios previos han mostrado que los átomos de carbono están localizados en el centro de la celda cúbica centrada en las caras de la fase austenítica en el acero austenítico, y los átomos de manganeso tienden a ocupar el centro de las caras en estas celdas FCC. Este comportamiento se resume en la figura 7. [11], [14]. Los átomos de carbono y manganeso se unen formando un par ordenado C-Mn, el cual juega un importante papel en el endurecimiento por trabajo del acero austenítico al manganeso. En promedio, hay aproximadamente un átomo de manganeso en dos celdas FCC y un átomo de carbono en tres celdas FCC para estas composiciones. Con el fin

de asegurar los pares ordenados de Mn -C debido a las fluctuaciones en composición de las aleaciones, se sugiere que debe existir, por lo menos, un átomo de carbono y manganeso en la celda FCC. Debido a esto, se debe mantener un alto contenido de carbono en las aleaciones. La unión entre el manganeso y carbono no es muy fuerte y tiende a romperse fácilmente debido a cambios de temperatura. Una forma de reforzar dicha unión es agregar un elemento que tenga una fuerza de atracción relativamente alta con el carbono (cromo): por lo tanto, los átomos de cromo se convierten en el centro de unión de los pares más débiles del Mn-C próximos y forman una estructura austenítica mucho más estable.

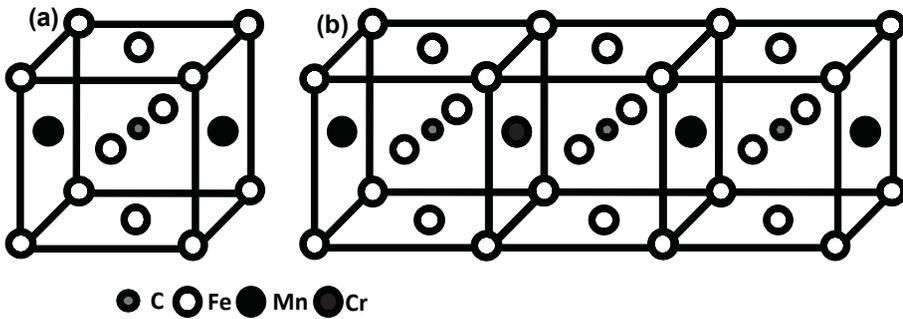


Figura 7. Modelos estructurales (a) Par C-Mn, (b)
Par C-Mn reforzado con cromo. [11]

Evaluación de la resistencia al desgaste adhesivo. En la figura 8 se presenta el perfil comparativo de las probetas ensayadas. Como se puede observar, la probeta revenida a 200°C tiene un mayor periodo de endurecimiento por deformación, lo cual la hace más resistente al desgaste, y mejora así las características de la muestra en estado de suministro.

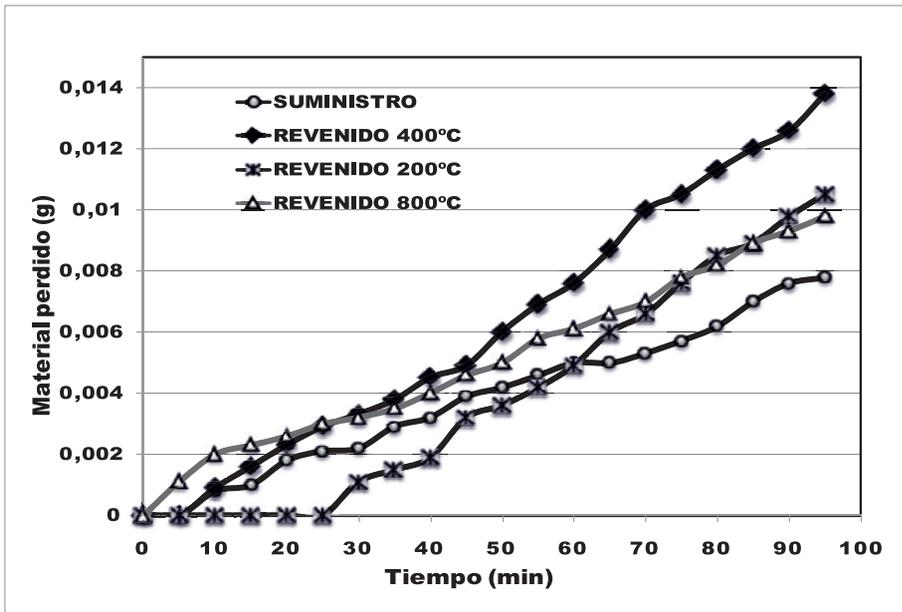


Figura 8. Perfil comparativo de desgaste del acero en estudio

Además, se puede apreciar que no es viable realizar revenidos a altas temperaturas a este material, ya que no presenta un endurecimiento por deformación lo que hace que sea menos resistente al desgaste y la pérdida de material sea mayor. Esto se debe principalmente a la presencia y fase ferrítica y carburos en los límites de grano, como lo plantea la termodinámica del sistema (figura 2). En la figura 9 se observan las probetas con las respectivas huellas producto del desgaste al que fueron sometidas, en los cuales se presenta un comportamiento coherente con lo planteado antes. En la figura 9 (a) se presenta la micrografía de la huella de la muestra en estado de suministro, en la cual se pueden apreciar surcos no muy pronunciados. En la figura 9 (b) se observa la muestra revenida a 200 °C, la que no presenta arrastre de material en su superficie; esto es acorde con lo presentado en los perfiles de desgaste que indican que la muestra es más resistente al desgaste debido al endurecimiento por deformación. La figura 9 (c) corresponde a la muestra revenida a 400 °C, en la cual se puede apreciar que los surcos en su superficie no son muy pronunciados pero se presenta arrastre de material debido a las juntas metal-metal. En la figura 9 (d) se observan las huellas de desgaste en la superficie de la muestra revenida a 800 °C; la capa

superficial se ve afectada, los surcos son más gruesos y se produce arrastre de material debido a las presiones de contacto. Este comportamiento es menos favorable y corresponde a un proceso de desgaste mayor.

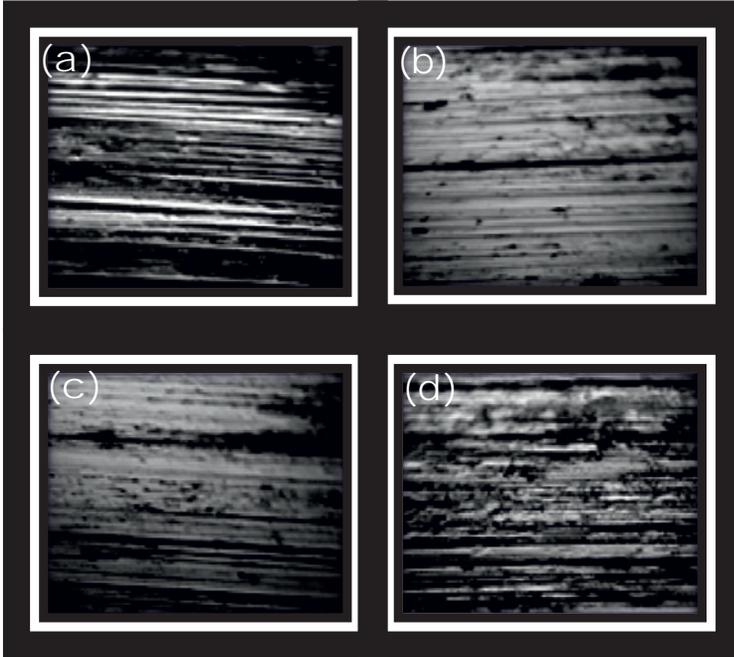


Figura 9. Micrografía de la huella de las muestras sometidas a desgaste

Coefficiente de desgaste. El volumen de material perdido, la velocidad de desgaste y el coeficiente de desgaste de cada una de las muestras ensayadas con la máquina de cilindros cruzados fueron calculados como se indica a continuación. De la ecuación (3) y los siguientes datos podemos determinar el volumen de material perdido.

$$Masafija = 103.17265 \text{ gr}$$

$$Masamovil = 103.165 \text{ gr}$$

$$Masaperdida = 103.17265 - 103.165 = 0.0077 \text{ gr}$$

$$Volumen = \pi r^2 h \quad (5)$$

$$Volumenfijo + volumenmovil = 2\pi r^2 h \quad (6)$$

$$r = 0.635 \text{ cm}$$

$$h = 10.2 \text{ cm}$$

$$Volumenfijo + volumenmovil = 2\pi(0.635^2) * 10.2 = 25.84 \text{ cm}^3$$

$$Densidad = \left(\frac{masafija + masamovil}{volumenfijo + volumenmovil} \right) \quad (7)$$

$$Densidad = \left(\frac{103.17265 + 103.165}{25.84} \right) = 7.9846 \text{ gr/cm}^3$$

$$Volumenmaterialperdido = \left(\frac{0.0077 \text{ gr}}{7.9846 \text{ gr/cm}^3} \right) * 1000 = 0.9581 \text{ cm}^3$$

De la ecuación (4) podemos determinar velocidad de desgaste. El tiempo de prueba se determina de la tabla 2. De la ecuación (1), despejando K podemos determinar el coeficiente de desgaste así:

$$Velocidaddedesgaste = \left(\frac{0.0077 \text{ gr}}{90 \text{ min}} \right) = 0.0000850 \text{ gr/min}$$

De la tabla 2 y la ecuación (2) podemos determinar la carga aplicada y la distancia deslizada respectivamente.

$$P = 7.19 \text{ Kgf}$$

$$L = 2\pi R = 2\pi * 6.35 \text{ mm} * 40000 = 1595929.068 \text{ mm}$$

De la tabla 3 podemos tomar las durezas para cada una de las muestras. Se debe tener en cuenta que para calcular el coeficiente de desgaste es necesario que la dureza esté en Brinell y se tomaron en Vickers, así que hay realizar la conversión. Esto se hace según la norma ASTM E-140.

Tabla 3. Durezas de las probetas posteriores a la prueba de desgaste.

Muestra	HB Cuerpo	HB Huella	HB Camino
Suministro	575	578	601
Revenido a 200 °C	581	584	615
Revenido a 400 °C	550	577	605
Revenido a 800 °C	463	556	520

$$K = \left(\frac{3 * 0.9580 \text{ mm}^3 * 575 \text{ HB}}{7.19 \text{ Kgf} * 1595929.068 \text{ mm}} \right) = 0.0008962$$

En la tabla 4 se observan los coeficientes de desgaste para cada una de las muestras calculados en el cuerpo, la huella y el camino. Como se puede apreciar, el coeficiente de desgaste es ligeramente mayor en el camino para las muestras en estado de suministro, revenido a 200 °C y 400 °C, lo que quiere decir que la muestra se endurece por deformación.

Tabla 4. Resultados de los cálculos realizados

Tratamiento	Densidad	Masa perdida	Volumen de material perdido	Velocidad de desgaste	K Cuerpo	K Huella	Kamino
Suministro	7.9846	0.0077	0.9581	0.0000850	0.00089625	0.00090092	0.00093677
Revenido a 200 °C	8.0018	0.0050	0.66249	0.0000556	0.00059062	0.00059367	0.00062519
Revenido a 400 °C	8.0070	0.0071	0.8867	0.0000789	0.00079341	0.00083236	0.00072850
Revenido a 800 °C	8.0271	0.0051	0.6353	0.0000567	0.00047857	0.00057470	0.00053749

5. CONCLUSIONES

Durante el revenido del acero austenítico se observa la descomposición parcial de la fase austenítica a fase ferrita y carburos de hierro que nuclean en los límites de grano de la fase austenítica original. Este comportamiento no es favorable debido a que se presenta la fase más blanda de los aceros y, por ende, se obtendrán bajas durezas y bajas propiedades mecánicas.

A partir del DRX se puede observar que al aumentar la temperatura de revenido se presenta una reducción en la fase austenítica y un aumento de la fase ferrítica, debido a que el contenido del cromo en la aleación no es suficiente para evitar la transformación de la austenita a ferrita al reforzar el par formado entre el carbono y el manganeso, lo cual evita la salida del carbono de la austenita.

La resistencia al desgaste de los aceros austeníticos se debe al endurecimiento por deformación del grano al someter el material a trabajo y no está relacionado con la dureza del material después de tratamiento térmico.

No se recomienda realizar revenidos a altas temperaturas, ya que se precipitan carburos en los límites de grano, lo cual reduce la zona de endurecimiento por deformación y trae como consecuencia que el material sea menos resistente al desgaste.

Referencias

- [1] D.T. Llewelyn and R.C. Hudd. *Steels: Metallurgy and Applications*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [2] C. Iglesias y B. Schulz. "Posible influencia del nitrógeno en aceros Hadfield," en Jornadas sam/Conamet/ Simposio Materia, 2003, pp. 323-326.
- [3] H. Idrissi, et al., "On the mechanism of twin formation in Fe-Mn-C TWIP steels", *Acta Materialia*, vol. 58, pp. 2464-2476, 2010.
- [4] M.J. Neale, Ed., *The Tribology Handbook*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.
- [5] P. J. Blau et al., *ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. 2nd ed. vol. 18. USA: ASM International Handbook Committee 1992.
- [6] L. J. YAN, "A Test Methodology for the Determination of Wear Coefficient," *Wear*, vol. 259, pp. 1453-1461, 2005.

- [7] ASTM international., *Standard Test Method for Wear Testing with a Crossed-Cylinder Apparatus*. USA: American Society For Testing And Materials., G 83. 1996.
- [8] J. Van-strahlen, "Evaluación de la Resistencia al Desgaste Adhesivo de Materiales por Medio de la Norma ASTM G83-96", Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.; Bucaramanga, Colombia, 2004.
- [9] G.E. Totten, Ed., *Steel Heat Treatment, Metallurgy and technologies*. 2nd ed. Boca ratón: Taylor & Francis Group, 2007.
- [10] H. Baker et al., *ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams*. 2nd ed. Vol. 3, USA: ASM International Handbook Committee, 1992.
- [11] L. Hea et al. "Modulated structures of Fe-10Mn-2Cr-1.5C alloy," *Materials and Design*, vol. 23 pp. 717-720, 2002.
- [12] R. E. Smallman and A. H.W. Ngan, *Physical Metallurgy and Advanced Materials*. 7th ed. Amsterdam: Elsevier, 2007.
- [13] W.Yan et al. "Effect of surface nanocrystallization on abrasive wear properties in Hadfield steel". *Tribology International*, vol. 42, pp. 634-641, 2009.
- [14] G. Saller et al. "Microstructural evolution of Cr-Mn-N austenitic steels during cold work hardening", *Materials Science and Engineering A*, vol. 427, pp. 246-254, 2006.
- [15] E. Mahallawi et al. "Evaluation of effect of chromium on wear performance of high manganese steel", *Materials Science and Technology*, vol 17, pp. 1385-1390, Nov. 2001.
- [16] A. Garcia et al. "Comparing the tribological behaviour of an austenitic steel subjected to diverse thermal treatments," *Wear*, vol. 258, pp. 203-207, 2005.