

Incremento de dureza y resistencia al desgaste de un acero al manganeso para la industria minera

Lorena Córdova, Julio Villavicencio
Escuela de Ingeniería Mecánica, ESPOCH
lore.cordova.morales@gmail.com, julio.villavicencio@esPOCH.edu.ec

Resumen—Los aceros al manganeso son ampliamente utilizados en aplicaciones que requieren gran dureza y resistencia como por ejemplo en tractores, moledoras, trituradoras, martillos de impacto y dientes de excavadoras. Este reporte estudia la aplicación de tres tratamientos térmicos (TT) a un acero con 0,7% de carbono y 13,3 % de manganeso, utilizado en los elementos moledores que utiliza la empresa minera ENGINE en el proceso de triturado. Los TT aplicados incluyen: normalizado, temple en aceite más revenido y temple en agua más revenido. La temperatura de austenización para todos los TT fue de 925°C por 30 minutos. La temperatura de revenido ensayada luego de los temple en aceite y agua fue de 705°C por 45 minutos seguido de enfriamiento en horno. Luego de aplicados los TT se realizó la observación de las microestructuras, análisis de espectrometría de rayos X (EDS), mediciones de dureza Brinell y ensayos de desgaste. Las microestructuras en todos los TT aplicados presentaron fases completamente austeníticas, sin embargo, se observaron precipitados distribuidos intergranularmente e intragranularmente dependiendo del TT. Los análisis de EDS mostraron que estos precipitados contienen carbono y manganeso lo que promueve el aumento de la dureza del material. Las durezas más altas fueron alcanzadas con los TT que incluyeron temple y revenido siendo el temple en agua el que mayor dureza alcanzó con un valor de 248 HBW. El temple en aceite más revenido alcanzó un valor de 235 HBW. Los ensayos de desgaste fueron altamente favorables para el TT de temple en agua más revenido con un volumen perdido de 56 mm³. Este comportamiento fue atribuido a distribución de precipitados intergranulares e intragranulares lo cual mejora la resistencia al desgaste a diferencia del TT de temple en aceite más revenido cuya resistencia al desgaste no es tan alta por solo presentar precipitados intergranulares.

Palabras Claves—Acero al manganeso, tratamientos térmicos, dureza Brinell, resistencia al desgaste.

Abstract—Manganese steels are widely used in applications where hardness and toughness are required. Examples of its use are tractors, milling machines, impact hammers and dipper bucket teeth. This report studies the influence of three heat treatments applied on steel with 0,7% of carbon and 13,3% of manganese. The samples studied are part of a grinding mill liner utilized in the milling process at ENGINE mining company. Heat treatments like normalizing, oil quenching plus tempering and water quenching plus tempering were applied on several steel samples. The austenitizing temperature employed was 925 °C for 30 minutes. After oil and water quenching, the samples were tempered at 705 °C for 45 minutes and followed by furnace cooling. Next, microstructure observations, energy dispersion X-ray Spectroscopy (EDS), Brinell hardness plus wear resistance tests were performed on several samples. All the samples showed an austenitic microstructure independently from the kind of heat treatment applied. Nonetheless, the presence of intergranular and intragranular precipitates varied for every heat treatment. EDS analysis indicated that the particles were made of carbon and manganese. As a result, hardness measurements increased over the regions where these precipitates were allocated.

Water and oil quenching plus tempering reached the highest hardness among all heat treatments practiced. However, water quenching plus tempering achieved the highest Brinell hardness at 248 HBW. Oil quenching, on the other hand, reached 235 HBW. Besides, water quenching plus tempering showed the best wear resistance results. Volume lost for water quenching plus tempering resulted in 56 cubic millimeters. This beneficial behavior was attributed to an even intergranular and intragranular distribution of precipitates resulting in an improved wear resistance compared to oil quenching plus tempering where the same precipitates were distributed only along the austenitic grain borders.

Keywords—Manganese steels, heat treatments, Brinell hardness, wear resistance.

I. INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad económica muy importante en muchos países alrededor del mundo. Esta actividad conocida como primaria extrae minerales de la tierra, de yacimientos que están al aire libre o diferentes niveles del subsuelo [1], [2].

Existen muchos equipos y maquinaria que facilitan la extracción de minerales [3]. Uno de los equipos más importantes es el molino [4]. Involucrados a este molino se encuentran otros elementos como las muelas. Estas ayudan a triturar, aplastar y pulverizar la roca. Por sus condiciones de trabajo, estos elementos están sometidos a varios esfuerzos que provocan el deterioro significativo del molino [5].

Para resistir el deterioro, el material más popular utilizado para este tipo de equipos es el acero al manganeso, el mismo que es ideal por su excelente resistencia y dureza.

Debido a que la microestructura del acero al manganeso es netamente austenítica y que la aplicación de tratamientos térmicos no modifica esta microestructura, se cree que no es posible mejorar sus propiedades mecánicas [6].

Existen investigaciones que han estudiado los efectos de la aplicación de tratamientos térmicos en aceros al manganeso. Por ejemplo, la referencia [7] estudió los efectos de la aplicación de temple en salmuera con hielo a partir de 1100 °C en un acero con 1.13% de carbono y 11.4 % de manganeso. Los resultados demostraron el incremento de la resistencia a la fluencia del material atribuidos al envejecimiento artificial y la precipitación de carburos.

Otra investigación también estudió la influencia de la aplicación de temple en agua para un acero con 1,18% carbono y 12,9% de manganeso desde una temperatura de austenización de 1180 °C en una atmosfera de argón. Los resultados también demostraron el incremento de la dureza y resistencia del material debido a la formación de una pseudo-fase con propiedades similares a martensita bct (body centered tetragonal) [8].

Pese a que las investigaciones mencionadas anteriormente han estudiado los efectos de la aplicación de tratamientos térmicos, estos no incluyen el análisis de resistencia al desgaste.

Este trabajo tiene como objetivo la aplicación de tres tratamientos térmicos con el fin de incrementar la dureza y mejorar la resistencia al desgaste de los elementos moledores utilizados para el proceso de triturado.

II. EQUIPOS Y METODOLOGÍA

A. Extracción de muestras.

El material para las muestras fue extraído de los elementos moledores de las placas de un molino utilizado por la empresa minera ENGINE. Muestras pequeñas se cortaron en frío para obtener 24 probetas de una pulgada de ancho por tres de largo y media pulgada de espesor.

B. Composición Química.

El análisis químico fue realizado con un espectrómetro de chispa BRUKER ION 2 con alimentación de argón. La superficie de las muestras se preparó utilizando lijas número 50, 80 y 120. La composición final se obtuvo del promedio de dos ensayos realizados con el espectrómetro. Los resultados de la composición química se presentan en la Tabla I.

TABLA I
RESULTADOS DE ESPECTROMETRÍA

Elemento	Simbología	Porcentaje (%)
Carbono	C	0,700
Silicio	Si	0,267
Manganeso	Mn	13,300
Molibdeno	Mo	0,065
Níquel	Ni	0,119
Hierro	Fe	Balance

C. Tratamiento térmico.

Se realizaron tres tratamientos térmicos: normalizado, temple en aceite más revenido y temple en agua más revenido. La temperatura de austenización aplicada fue 925°C y el tiempo de permanencia para todos los tratamientos térmicos fue de 30 minutos.

Para las probetas revenidas, se definió una temperatura de revenido de 705°C por 45 minutos y enfriamiento hasta la temperatura ambiente dentro del horno. Temperaturas similares de revenido se presentan en base al contenido de manganeso en la referencia [6].

D. Análisis microestructural

Después de realizar los tratamientos térmicos propuestos, las muestras fueron preparadas utilizando lijas número 100, 240, 320, 400, 600, 1000, 1500 y 2000. A continuación, se realizó el pulido mecánico utilizado alúmina Buehler de 1 µm. El ataque químico aplicado a las probetas fue con Nital al 2%. Para la observación de microestructura se usó un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-IT 100.

E. Propiedades mecánicas

Los ensayos de dureza Brinell se realizaron usando un durómetro Huayin. La carga aplicada fue de 187,5 kilogramos con un indentador de bola de 2,5 milímetros. Los ensayos de desgaste se efectuaron con un equipo que trabaja con flujo constante de arena. La arena desciende

tangente entre un disco de caucho y la probeta que soporta una carga de 30 Newtons. El cálculo de volumen perdido se obtuvo relacionando las masas antes y después del ensayo. El ensayo de desgaste realizado fue tipo B. Este ensayo establece un tiempo de permanencia de 10 minutos por muestra y flujo de abrasivo de arena de sílice (AFS 50-70) [9].

III. RESULTADOS

F. Espectrometría

El análisis espectrométrico arrojó 13.3% de manganeso y 0.7% de carbono. Con estos datos se estableció que el material en estudio es un acero Hadfield tipo D [10].

G. Microestructura de las muestras

La microestructura del acero en estado de suministro se presenta en la Fig. 1(a). Esta microestructura es totalmente austenítica.

En la Fig. 1(b) se observa la microestructura luego del aplicado el tratamiento térmico de normalizado. La microestructura es similar a la microestructura de la Fig. 1(a), con la diferencia que existe una mayor presencia de partículas claras distribuidas aleatoriamente en la matriz.

La Fig. 1(c) corresponde a la microestructura de una muestra luego de templearla en aceite y revenirla. La microestructura resultante contiene austenita y precipitados en los límites de grano. La Fig. 1(d) corresponde a la microestructura del acero en estudio luego templearla en agua y revenirla. La microestructura resultante está compuesta de granos austeníticos más precipitados intragranulares e intergranulares.

Comparando las micrografías anteriores se puede evidenciar que la microestructura del acero en estudio no alteró luego de aplicados algunos tratamientos térmicos. Aunque la microestructura permaneció invariable, el número y ubicación de precipitados cambió significativamente. Para determinar los elementos químicos que conforman estos precipitados, se realizó varios análisis EDS usando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-IT 100.

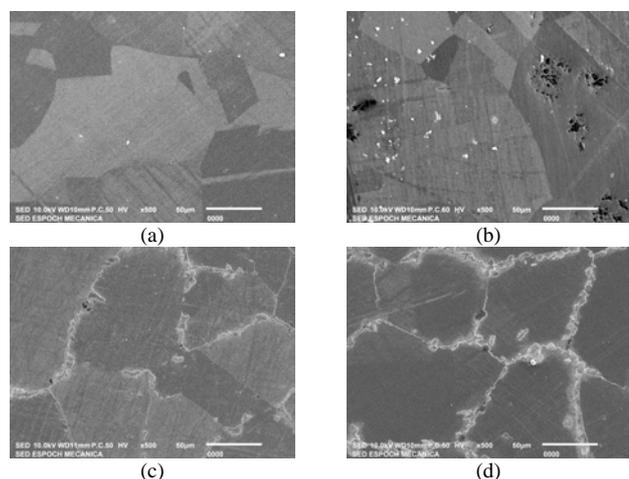


Fig. 1. Microestructura de un acero al manganeso (a) Estado de suministro, (b) Normalizado, (c) Templado en aceite y revenido, (d) Templado en agua y revenido

H. Análisis Cualitativo de Inclusiones

El análisis cualitativo de los precipitados distribuidos intragranularmente e intergranularmente en las microestructuras templadas se llevó a cabo a través de ensayos EDS. La Figura 2 muestra un acercamiento hacia uno de los precipitados analizados y los elementos químicos que componen esta partícula. Estos precipitados están compuestos de cantidades significativas de carbono y manganeso.

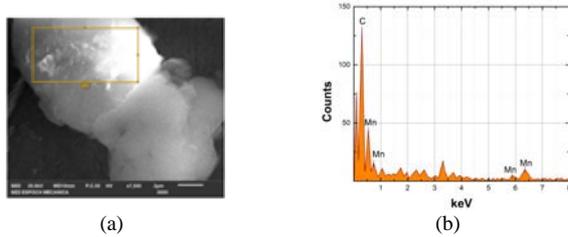


Fig. 2. (a) Precipitado luego de templado en agua y revenido. (b) Resultados de espectrometría con presencia de C y Mn.

I. Propiedades Mecánicas

La dureza obtenida para la muestra en estado de suministro fue 202 HBW 2,5/187,5. La dureza de la muestra normalizada no varió con respecto a la probeta en estado de suministro. La dureza de la muestra templada en aceite y revenida fue de 235 HBW 2,5/187,5, mientras que la dureza alcanzada para la muestra templada en agua y revenida fue de 248 HBW 2,5/187,5. Un resumen de las durezas alcanzadas se presenta en la Figura 3.

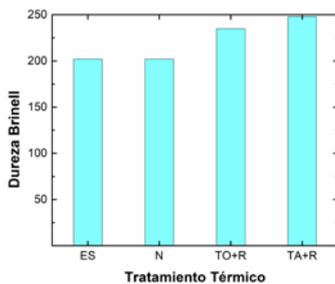


Fig. 3. Durezas luego de la aplicación de varios TT. ES: Estado de Suministro; N: Normalizado; TO+R: Temple en aceite y revenido; TA+R: Temple en agua y revenido.

Las pruebas de desgaste se desarrollaron solamente en las muestras cuyos tratamientos térmicos aumentaron la dureza del material. De esta manera, las muestras templadas y revenidas fueron seleccionadas para las pruebas de desgaste siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G65. Los resultados alcanzados luego de los ensayos de desgaste se exhiben en la Fig. 4.

La resistencia al desgaste de la probeta en estado de suministro medida a partir del volumen perdido fue 250 milímetros cúbicos. El temple en aceite y revenido sufrió mayor desgaste que la muestra en estado de suministro. El volumen perdido para este tratamiento térmico fue 324 milímetros cúbicos. Finalmente, la muestra templada en agua y revenida presentó la mejor resistencia al desgaste con un volumen perdido de 56 milímetros cúbicos.

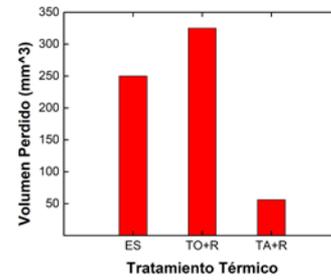


Fig. 4. Ensayos de desgaste. ES: Estado de Suministro; TO+R: Temple en aceite y revenido; TA+R: Temple en agua y revenido.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La microestructura del acero austenítico de la Figura 1 es típica del material en estudio. Micrografías similares se pueden encontrar en la referencia [11] para muestras en estado de suministro.

La aplicación de varios tratamientos térmicos no varió la microestructura del acero al manganeso. Esto se debió al alto contenido de manganeso presente en el material. Tanto el manganeso como el carbono promovieron la formación de austenita y permitieron conservar esta fase a temperatura ambiente independientemente de la tasa de enfriamiento de los tres tratamientos térmicos aplicados en este trabajo [12].

Por otro lado, la dureza obtenida para la muestra en estado de suministro es usual para el tipo de material estudiado. Se pueden hallar valores de dureza similares en las referencias [10] y [13]. La aplicación de los tratamientos térmicos de temple y revenido permitieron incrementar la dureza del material en relación a la probeta en estado de suministro. La aparición de precipitados con cantidades significativas de carbono y manganeso, muy probablemente combinados en forma de carburos, incrementaron esta propiedad mecánica en el material. De hecho, la referencia [14] soporta este argumento al relacionar el aumento en la dureza de un acero austenítico por la presencia de precipitados en su microestructura.

La ubicación de los precipitados en los tratamientos térmicos de temple en agua más revenido y temple en aceite más revenido jugó un papel muy importante tanto en el incremento de dureza como en la resistencia al desgaste. Se ha demostrado en este trabajo que estos precipitados están compuestos principalmente de carbono y manganeso. Si estos se encuentran combinados en forma de carburos formarían compuestos muy duros que contribuirían a incrementar la dureza y resistencia al desgaste del material [15].

La resistencia al desgaste y dureza fue mayor para las muestras templadas en agua y revenidas si las comparamos con las muestras en estado de suministro y las muestras templadas en aceite y revenidas. El incremento de estas propiedades mecánicas se atribuyó a la distribución tanto intergranular como intragranular de precipitados en toda la microestructura.

Las muestras templadas en aceite y revenidas no demostraron una buena resistencia al desgaste comparadas con las muestras en estado de suministro y templadas en agua y revenidas. La baja resistencia al desgaste se atribuyó a que la microestructura del tratamiento térmico de temple en aceite y revenido solamente formó precipitados en los límites de grano lo cual no mejoró esta propiedad.

No obstante, la muestra templada en aceite y revenida sí incrementó su dureza con respecto a la muestra en estado de suministro. En el caso de la dureza la ubicación de precipitados fue indiferente al momento de medir esta propiedad mecánica, ya que el indentador de bola para el ensayo de dureza Brinell cubre una región de la microestructura que abarcó muchos granos con gran cantidad de precipitados que de todas maneras incrementan esta propiedad mecánica.

V. CONCLUSIONES

Luego de aplicados los tratamientos térmicos de normalizado, temple en aceite más revenido y temple en agua más revenido, se determinó que este último es el mejor tratamiento para incrementar la dureza y resistencia al desgaste del acero al manganeso en estudio. Los tratamientos térmicos de temple y revenido promovieron la formación de precipitados que contienen carbono y manganeso tanto intergranularmente como intragranularmente dependiendo del medio de temple. Estos precipitados generaron el aumento de la dureza del material. La mejor resistencia al desgaste se obtuvo cuando se formó precipitados intergranulares e intragranulares. La formación de estos precipitados dentro de los granos y en los bordes solo se presentó para el tratamiento térmico de temple en agua y revenido.

REFERENCIAS

- [1] monreal saavedra, r., & hernández rábago, p. y. (2015). *Mi Mexico es minero*. Mexico: Bienio.
- [2] Químico Global S.A. y C.V. (16 de Diciembre de 2014). *La Mineía en Mexico*. Recuperado el 10 de mayo de 2017, de <https://quimicoglobal.mx/la-mineria-en-mexico/>
- [3] Banco Central del Ecuador. (enero de 2017). *REPORTE DE MINERIA*. Recuperado el 18 de Mayo de 2017, de <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero012017.pdf>
- [4] INDUSTRIAS I. (Enero de 2015). *Apunte Molienda*. Recuperado el 2 de Abril de 2017, de Molienda - Universidad de Buenos Aires: http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf
- [5] RIVERA M., I. E., QUINTERO, F., & BUSTAMANTE, O. (2012). *Análisis del desgaste de medios moledores de acero en un molino de bolas de la compañía Argos S.A.* Recuperado el 11 de Noviembre de 2017, de [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/402-754-1-SM%20\(4\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/402-754-1-SM%20(4).pdf)
- [6] HIGUERA, O. F., TRISTANCHO, J. L., & FLOREZ, L. C. (Mayo de 2007). *Fundamentos teóricos de los aceros auteníticos al manganeso (aceros hadfield)*. Recuperado el 24 de Agosto de 2017, de <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5599/3091>
- [7] ADLER, P. H., OLSON, G. B., & OWEN, W. S. (1986). *Strain hardening of Hadfield manganese steel*. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 17(10), 1725-1737.
- [8] DASTUR, Y. N., & LESLIE, W. C. (1981). *Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel*. *Metallurgical transactions A*, 12(5), 749-759.
- [9] ASTM G65-04. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*.
- [10] ASM International Committee on Standards. (1995). *Steel Castings Handbook*. s.l., Estados Unidos.
- [11] ASM Committee on Metallography of Steel Castings. *Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*. En *Metals Handbook* (Vol. VII). s.n. Estados Unidos: American Society for Metals.
- [12] GARCÍA, A., VARELA, A., MIER, J. L., CAMBA, C., & BARBADILLO, F. (2010). *Estudiotribológico de aceros austeníticos tipo Hadfield: influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste*. Recuperado el 25 de Mayo de 2017, de

- <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/1158/1169>
- [13] ALRO. (s.f.). *ALRO Online Store*. Recuperado el 3 de Octubre de 2017, de [STEEL SMART GRID: https://myalro.com/SmartGrid.aspx?PT=Steel&Clear=true](https://myalro.com/SmartGrid.aspx?PT=Steel&Clear=true)
 - [14] HIGUERA COBOS, Ó. F., MORENO TÉLLEZ, C. M., & SUÁREZ TOVAR, B. A. (06 de octubre de 2010). *Evolución microestructural del acero austenítico al manganeso sometido a tratamiento térmico de temple y revenido*. Recuperado el 12 de noviembre de 2017, de <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v9n17/v9n17a17.pdf>
 - [15] CALLISTER JR, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, New York, 362-363