

Endurecimiento por rodadura de pasadores de esteras en equipos mineros

Dayanis Alcántara Borges
Tomás Fernández Columbié
Isnel Rodríguez González

Resumen

Se evaluó el comportamiento microestructural del acero martensítico AISI 1045 en los pasadores de las esteras de rodaje de los equipos de laboreo minero de la industria cubana del níquel, con el fin de esclarecer las causas de la deformación de los pasadores. Se realizaron ensayos tanto en pasadores nuevos como en los retirados de servicio; se empleó el método de microscopía óptica para el análisis microestructural de los pasadores y se hicieron perfiles de microdureza para analizar el efecto del endurecimiento por deformación. Se encontró que en la estructura martensítica del acero tiene lugar una disminución gradual del tamaño de los granos desde la superficie hacia el núcleo del pasador por el efecto de la rodadura, lo que provoca un endurecimiento adicional en frío.

Palabras clave

Rodadura; deslizamiento; pasador; desgaste; deformación; acero 1045.

Track pin hardening due to rolling movement in mining equipment

Abstract

The work presents an evaluation of the microstructural behavior of martensitic AISI 1045 steel; which is the material of construction of track pin on the existing crawler equipment operating in the Cuban Nickel Mining and Processing Industry. The objective is to identify what causes track pin deformation. Several tests were conducted using new pins and pins retired of service. The microstructural analysis was carried out using the technique of optical microscopy and micro-hardness profiles were developed to assess hardening effects by deformation. It was found that the grain size in martensitic structure of steel decreases gradually from the surface towards the core of the pin as a result of rolling movements; hence leading to additional cold working.

Key words

Rolling; sliding; pin; wear; deformation; steel 1045.

1. INTRODUCCIÓN

Los equipos de laboreo minero utilizados por la industria cubana del níquel para el acopio de mineral laterítico operan en terrenos de topografía irregular, lo que ocasiona un desgaste progresivo de elementos indispensables para su funcionamiento, siendo los más afectados los elementos de las esteras de rodaje y, dentro de ellos, el pasador. El desgaste abrasivo de los pasadores (Figura 1) provoca que las esteras no sincronicen el movimiento entre un pasador y otro lo que deforma este elemento. Vale destacar que la reparación de los pasadores o la sustitución de las esteras completas encarecen notablemente el proceso de producción industrial.



Figura 1. Pasador desgastado.

En el desgaste abrasivo influyen la dureza y la tenacidad del material (Álvarez 1993), entendiendo por esta última la resistencia a la rotura que opone el material deformado por la acción de las partículas abrasivas. El desgaste depende también del coeficiente de fricción, fuerza de unión adhesiva entre partículas de la superficie del metal y las partículas abrasivas. Los valores del coeficiente de fricción elevados favorecen el proceso de microcorte.

El desprendimiento de material en un componente mecánico (Verdeja 1996) puede variar notablemente, de muy intenso a despreciable; en cualquier caso ello puede significar una pérdida de eficiencia y la inutilidad completa del sistema.

Los procesos deformacionales que tienen lugar en las microirregularidades de las superficies en contacto dependen de las presiones que se originen en las áreas que contactan. Si el valor de estas presiones no alcanza el límite de fluencia del material más blando las deformaciones que predominan son elásticas y el mecanismo de desgaste predominante es el de fatiga superficial (Kalousek *et al.* 1985).

Por otro lado, el desgaste por deslizamiento guarda relación con el mecanismo de desgaste por fatiga de contacto por rodadura ya que un aumento en el porcentaje de deslizamiento/rodadura puede causar una mayor pérdida de masa de las superficies en contacto (Bhushan 2001; Clayton 1996).

Según el criterio de Caubet (1971), lo anterior puede provocar el efecto de endurecimiento debido a las tensiones normales y tangenciales que se crean; esto se traduce en un aumento de la acritud en las subcapas del material.

Cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, el material se rompe por fractura frágil; durante este proceso las tensiones de cizalladura producen deslizamiento en el interior de los granos cristalinos o la ruptura de los mismos y crean tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto, apareciendo deformaciones permanentes o fracturas, punto a partir del cual se inicia el fallo del material.

Han sido varias las vías utilizadas para combatir el desgaste abrasivo y disminuir los perjuicios que el mismo ocasiona. La resistencia al desgaste se consigue con una alta dureza superficial (Clauser 1985).

La fatiga de contacto por rodadura ha sido identificada como la propagación de grietas iniciadas en la superficie alrededor de defectos superficiales, como asperezas o dientes. La iniciación de la grieta alrededor de tales defectos se supone que esté controlada por el campo de los esfuerzos normales y de cortante. La presión de contacto está representada por una serie de cargas puntuales que actúan en cada nodo de la superficie. La deflexión en cualquier punto del modelo puede ser determinada mediante la superposición de las deflexiones causadas por cada carga discreta (Cheng 2000).

Comparado con las condiciones de rodadura pura, el deslizamiento junto con la rodadura proporciona efectos de extremo adicionales. La presencia de deslizamiento puede incrementar la concentración de tensiones en el extremo de salida. El extremo de entrada (Pero-Sanz 2000) puede beneficiarse por una reducción en la presión local en condicio-

nes de deslizamiento, por tanto, la influencia del deslizamiento en los esfuerzos sub-superficiales y las fallas de contacto pueden encontrarse a través de las alteraciones de la presión de contacto y no por la fricción superficial.

En la microtextura, las intercaras marcan cualquier tipo de desorientación y permiten caracterizar el cambio de orientación de los granos. Wilkinson (1991) define la orientación de la microestructura en aleaciones recocidas; Humphreys & Ferry (1997) y Nakashina *et al.* (2001) lo hacen en acero martensítico 9 Cr–1 Mo, mientras Randle (1994) lo ha hecho en diferentes procesos de producción de aceros.

El estudio de la microtextura permite comprender los fenómenos relacionados con los procesos de deformación, como en el caso de la recristalización dinámica en el acero AISI 304 (Bocher & Jonas 1999) y en aceros inoxidable austeníticos (Gavard & Montheillet 2000), además, aporta nuevos conocimientos en aspectos como la propagación de fisuras, los mecanismos de fatiga, la relación de orientación entre segundas fases y la matriz en las aleaciones, los que dependen de la desorientación entre los granos.

Se ha podido observar que los pasadores, una vez desgastados por el uso, presentan mayor dureza que aquellos tratados térmicamente. El objetivo de este trabajo fue caracterizar, en pasadores desgastados de equipos de laboreo minero, la microestructura del acero AISI 1045 para esclarecer su mecanismo de endurecimiento.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Preparación de muestras

Para el análisis metalográfico se tomaron, en tres zonas del pasador, muestras de aproximadamente 30 x 30 mm; la primera muestra se tomó de la parte no expuesta a cargas de trabajo; la segunda, de la superficie desgastada y la tercera, donde el borde del casquillo tiene mayor fricción. El corte se realizó con cuchilla de tronzar del tipo SANDVIK, código del vástago 151.2 – 21 - 20 16 16, con plaquita N 151.2 - 200 - 5E, de calidad T - MAX Q-cut (Coromant Corokey 2008),

con refrigeración constante y a baja velocidad de corte para evitar el calentamiento excesivo.

2.2. Análisis químico

Para determinar la composición química del material del pasador se realizaron tres pruebas por muestra para obtener el valor promedio. Se empleó un espectrómetro cuántico óptico de masa ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

2.3. Pulido de las muestras

Se emplearon papeles abrasivos del tipo N°- 180, 400 y 600 según ISO 9001. El papel abrasivo se montó sobre una placa de vidrio y se hizo el pulido cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un papel a otro, de manera que se eliminara la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior; para lograr el acabado final, las muestras se pasaron por una pulidora metalográfica con paño de fieltro grueso y óxido de cromo para garantizar un pulido de espejo.

2.4. Examen micrográfico

Se realizó a las probetas del pasador desgastado y deformado y a una muestra patrón. Las superficies después de pulidas se atacaron con nital al 4 % (mezcla de 5 ml de ácido nítrico (HNO₃) y 100 ml de etanol). Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100, dotado de una cámara instalada en el hardware, IMI.VIDEOCAPTURE.exe, que refleja la micrografía en el computador. Para observar las probetas, se nivelaron en un dispositivo con plastilina (ASTM E 3 – 95; NC 10 – 55: 86 y NC 04 – 77: 86).

La microestructura se analizó en el centro del pasador correspondiente a la muestra patrón, a la que se le practicó un corte transversal, así como en el centro del pasador endurecido superficialmente por el tratamiento térmico y en el borde del pasador endurecido por el efecto del desgaste.

2.5. Análisis de dureza

Se consideró la dureza de los elementos que incidían directamente en la fricción por contacto con el pasador, o sea, del buje o casquillo y

del eslabón de la cadena. El método elegido para realizar el ensayo fue el de Dureza Rockwell en un durómetro modelo SOELAN. En el mismo se calcula la dureza basado en la profundidad de penetración y la carga total no se aplica en forma continua.

3. RESULTADOS

3.1. Composición química

Según la composición química obtenida (Tabla 1), el material empleado en la fabricación del pasador está en el rango establecido para un acero AISI 1045, según norma ASTM.

Tabla 1. Composición química de pasador

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,46	0,24	0,98	0,01	0,019	0,19	0,02
Ni	Al	Co	Cu	Ti	W	Fe
0,06	0,005	0,01	0,16	0,0047	0,01	97,82

Los resultados del análisis químico (Tablas 2 y 3) revelaron que el casquillo y el eslabón de la estera que componen el tren de rodaje son, según la AISI, de acero 1345. Por la cinemática tribológica se considera un par directo donde el elemento de mayor dureza se mueve con respecto al más blando cumpliéndose además que el área nominal del más duro es menor que la del más blando.

Tabla 2. Composición química del buje o casquillo

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,40	0,34	1,15	0,015	0,019	0,27
Ni	Al	Cu	Ti	Mo	Fe
0,03	0,0118	0,03	0,033	0,01	97,6

Tabla 3. Composición química del eslabón de la cadena

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0,45	0,26	1,54	0,016	0,011	0,22	0,02	97,2
Ni	Al	Co	Cu	Ti	Sn	W	
0,05	0,0165	0,01	0,09	0,0024	0,011	0,01	

Esto demuestra que, durante la acción de la carga, la deformación plástica del elemento de menor dureza obstaculiza el funcionamiento normal del par, motivo por el cual aumenta la fricción e incrementa el grado de deterioro de la superficie, lo que provoca la rotura.

3.2. Dureza

Se comprobó que el pasador no presenta igual dureza en todo su volumen al obtener diferentes valores de la misma en cada capa en contacto con otro elemento del par tribológico. En la superficie desgastada y endurecida alcanzó un valor de hasta 48 HRC y en la del ajuste por interferencia de hasta 40 HRC, no siendo así en el núcleo, donde la dureza se mantiene constante ya que no ha sufrido el efecto del tratamiento térmico, ni el de la dureza inducida por la fricción (Tabla 4).

Tabla 4. Dureza volumétrica del pasador deteriorado

Zona	Capa	Dureza (HRC)
Centro o parte desgastada y deformada por rodadura	superficie	47 - 48
	núcleo	12 - 14
Extremo o parte deformada por presión debido al ajuste por interferencia	superficie	39 - 40
	núcleo	12 - 14

A los pasadores fabricados de acero con contenido menor de 0,8 % de carbono se les imprime, mediante tratamiento térmico, una dureza de 48 HRC hasta una profundidad de 4 mm, con lo que se logra mayor durabilidad y resistencia al desgaste. Posteriormente, durante la fricción producto del trabajo de la estera, el pasador adquiere una nueva dureza, debido a la deformación en frío por la fricción metal-metal que provoca dislocaciones y endurecimiento por acritud, lo que conduce a la deformación de las capas superficiales.

3.3. Microestructura

La Figura 1 corresponde a la muestra patrón, compuesta por una estructura bifásica de perlita más ferrita, típica de acero de medio contenido de carbono sin tratamiento térmico. Los granos se presentan equiaxiales, distribuidos aleatoriamente, sin deformación.

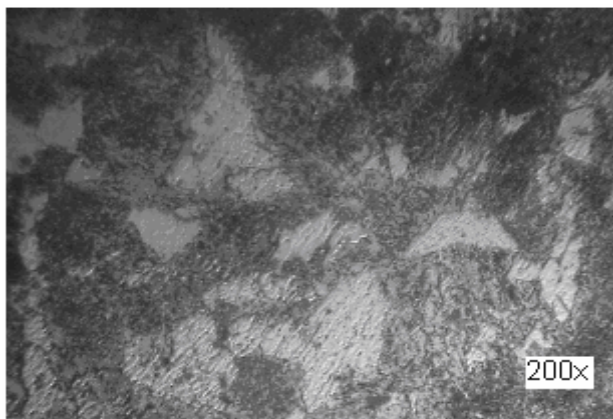


Figura 1. Corte transversal del pasador sin tratamiento térmico.

La Figura 2 muestra la microestructura del pasador tratado térmicamente, pero sin deformar; se corresponde con la martensita más austenita residual, obtenida por calentamiento a una temperatura de 850 °C y enfriada luego más o menos rápidamente en agua. La estructura se presenta con granos homogéneos, conformada por una solución sólida sobresaturada de carbono o carburo de hierro en ferrita derivada del enfriamiento rápido.

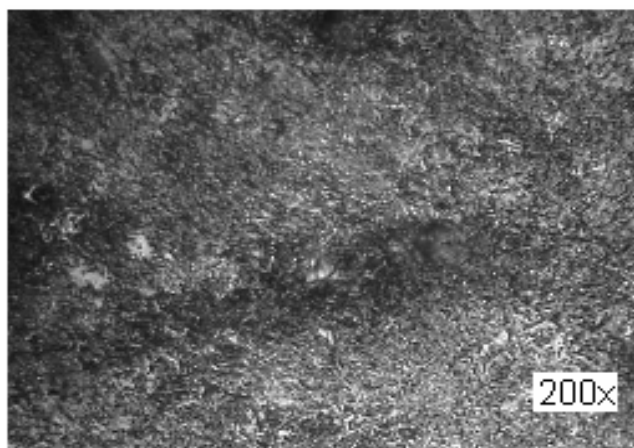


Figura 2. Corte transversal en la superficie del pasador tratado térmicamente.

Cuando un acero es templado, la formación de martensita le proporciona alta dureza y baja tenacidad, lo que propicia que sea muy frágil. Por otro lado, la transformación austenita-martensita introduce en el material esfuerzos que pueden generar fractura. Los fenómenos de fricción y desgaste provocan deformación en la red cristalina (Figura 3).

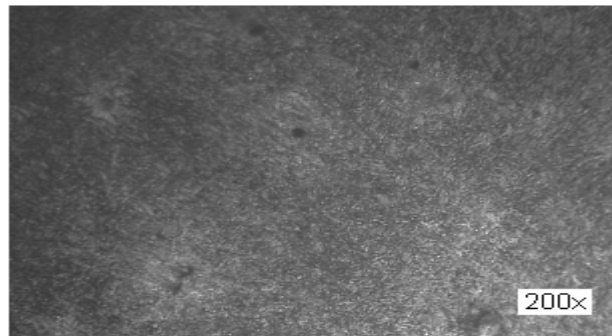


Figura 3. Corte transversal en la superficie del pasador tratado térmicamente y deformado en frío.

El pasador desgastado y deformado (Figura 3) exhibe una estructura martensítica deformada, ocasionada por el proceso al que está expuesto el pasador como consecuencia de la carga de trabajo y de la fricción del par tribológico. A nivel microestructural se manifiesta un aumento de la densidad de las dislocaciones, activando las fuentes que generan dislocaciones Frank-Red y la formación de celdas de subgranos.

La estructura martensítica deformada es de granos más finos, los que disminuyen su espesor según se incrementa la profundidad desde la superficie hacia el núcleo. Esta estructura tiene su origen en los procesos de deformación al que se somete la superficie del pasador durante las operaciones de minado, lo que provoca una disminución en el tamaño de los granos y la aparición ocasional de bloques de mosaico que permiten delimitar una zona de la otra.

La consecuencia negativa que produce el desgaste del pasador conlleva a su vez un efecto positivo adicional de dureza después de un largo tiempo de servicio, lo que pudiera aprovecharse como alternativa de tratamiento superficial para prolongar la vida útil de los pasadores; como se pudo observar, en las estructuras analizadas existe mayor compactación de los granos debida a la acritud.

4. CONCLUSIONES

1. Se pudo determinar que después del proceso de deformación el pasador está compuesto por tres capas superficiales, las cuales surgen por el esfuerzo de fricción entre los elementos del par tribológico en correspondencia con el desgaste al que está expuesto el mismo.

2. Aunque los pasadores poseen alta dureza, sobre ellos influye también la deformación plástica debido a que las superficies en contacto (pasador-casquillo) incrementan su dureza mientras se desgastan.
3. Los pasadores antes de ser utilizados muestran en su superficie una microestructura martensítica; después de retirados del servicio presentan la misma estructura, pero con una disminución en el tamaño de los granos debida a la deformación plástica por el efecto de la rodadura.

5. REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, L. & GONZÁLEZ, J. 1993: Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. *Construcción de maquinaria*. 2: 69–76.
- BOCHER, P. & JONAS, J. 1999: Characteristics of nucleation and growth during the dynamic recrystallization of a 304 stainless steel, Proc. of 4th Conf. on recrystallization and related phenomena. 25–35.
- BHUSHAN, B. 2001: *Modern Tribology Handbook*. Materials, Coatings & Industrial Applications, CRC Press. (2): 1275–1297.
- CAUBET, J. 1971: *Teoría y práctica industrial del rozamiento*. Editorial Aguilar, Madrid.
- COROMANT, COROKEY. 1996: Guía de aplicación de herramientas. Catálogo comercial. pp 38–43. Disponible en: (<http://www.coromant.sandvik.com>)
- CLAYTON, P. & SU, X. 1996: Surface initiated fatigue of pearlite & bainite steels under water lubricated rolling/sliding contact, *Wear* 200: 63-73.
- CLAUSER, H. 1985: *Diccionario de materiales y procesos de ingeniería*. Editorial Labor S. A. Barcelona.
- CHENG, Z. 2000: Yield Surfaces of FCC Crystals with Crystallographic Slip and Mechanical Twinning *Transactions of Nonferrous Metals*. University of Science and Technology. 10(1) 34-39. Disponible en: <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical/index.htm>.
- GAVARD, L. & MONTHEILLET, F. 2000: Dynamic recrystallization and grain refinement in a high purity 304L type austenitic stainless steel. *Matériaux & Techniques* 5(6): 65–68.
- HUMPHREYS, F. & FERRY, M. 1997: Applications of electron backscattered diffraction to studies of annealing of deformed metals. *Materials Science and Technology*. 13(2): 85-90.

- KALOUSEK, J.; FEGREDO, D.; LAUFER, E. 1985: The wear resistance and worn metallography of pearlite, bainite and tempered martensite rail steel: microstructure of high hardness, *Wear* 105: 199-222.
- NAKASHINA, H.; TERADA, D.; YOSHIDA, F.; HAYAKAWA, H.; ABE, H. 2001: EBSD analysis of modified 9 Cr–1 Mo martensitic steel, *ISIJ International*. 41(5): 97–100.
- PERO-SANZ, E. 2000: *Ciencia e ingeniería de materiales. Estructura, transformaciones, propiedades y selección*. 3ª Edición. Editorial DUSSAT, Madrid.
- RANDLE, V. 1994: Application of electron backscatter diffraction to steel products, *Ironmaking and Steelmaking*. 21(3): 209–214.
- VERDEJA, L. & GONZÁLEZ, R. 1996: El Desgaste de Materiales en el Crisol de Horno Alto: Conceptos Generales. *Revista de Minas*. 13(14): 34-38.
- WILKINSON, A. 1991: Deformation studies of metal matrix composites using electron backscatter patterns, *Materials Science and engineering*. 135(23): 189–193.

Dayanis Alcántara Borges

Ingeniera mecánica. Profesora Asistente. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

dalcantara@ismm.edu.cu

Tomás Fernández Columbié

Máster en Ciencias. Profesor Asistente. Departamento de Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

tfernandez@ismm.edu.cu

Isnel Rodríguez González

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Auxiliar Departamento de
Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Cuba.

irgonzales@ismm.edu.cu