

Incidencia del endurecimiento mediante explosivos en el desempeño del acero Hadfield

*Miguel Ángel Caraballo Núñez**

Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez, Reparto Las Coloradas s/n, Moa. Holguín. Cuba. CP 83329.

(Recibido el 17 de noviembre de 2005. Aceptado el 4 de septiembre de 2006)

Resumen

Se exponen los resultados obtenidos en la investigación sobre el efecto que provocan las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva, en el endurecimiento del acero Hadfield. Se evalúa el comportamiento de las propiedades mecánicas y funcionales del material, en relación con las variables del proceso tecnológico de endurecimiento mediante explosivos; y se establece el correspondiente procedimiento tecnológico de endurecimiento de piezas de equipos de laboreo minero fabricadas de acero Hadfield, utilizando una fuente de energía técnicamente factible y económicamente racional. Los resultados del trabajo constituyen un aporte hacia una mayor comprensión del comportamiento del acero austenítico al alto manganeso del tipo Hadfield, en condiciones de aplicación de cargas explosivas; y al mismo tiempo ofrecen alentadoras perspectivas para la introducción de los resultados prácticos de la investigación en el sector industrial.

----- *Palabras Clave:* acero hadfield; deformación plástica; endurecimiento mediante explosivos; tensiones residuales; dureza superficial; desgaste gravimétrico

Incidence of the explosive hardening in the performance of the Hadfield steel

Abstract

Results of studies about the effect of impact loads generated by detonation energy of an explosive substance on Hadfield steel hardening are shown. The behavior of mechanical and functional properties of this material related to explosive hardening

* Autor de correspondencia. Teléfono: +53 +246 44 76, fax: +53 +246 22 90, correos electrónicos: macaraballo@ismm.edu.cu, mcaraballon@yahoo.es.

parameters is evaluated. The technological procedure of hardening mining work pieces manufactured of Hadfield steel was established using an energy source technically feasible and economically rational. Results constitute an important contribution for understanding the behavior of high manganese austenitic steel, type Hadfield for explosive loads and at the same time they offer encouraging perspectives for their application in the industrial sector.

----- *Key words:* Hadfield Steel; Plastic Deformation; Explosive Hardening; Residual Tensions; Superficial Hardness; Gravimetric Waste.

Introducción

Una cantidad importante de los equipos de laboreo minero utilizan para la construcción de gran parte de sus piezas el acero austenítico al alto manganeso del tipo Hadfield, teniendo en cuenta la propiedad que este posee de incrementar su dureza en la zona de trabajo por trabajo de deformación en frío. Tal es el caso de los martillos de las trituradoras, los dientes de las palas excavadoras, y las paletas de las lavadoras de mineral, entre otros. Por razones tecnológicas, en los procesos minero metalúrgicos este equipamiento estará sometido a condiciones de operación extremadamente exigentes, caracterizadas por la acción simultánea de la abrasión e impactos repetidos; y requiere de propiedades que aseguren su funcionalidad; las mismas que no han podido ser totalmente resueltas por los procedimientos tecnológicos tradicionales.

Se han realizado trabajos dirigidos a potenciar las propiedades de este material, en las condiciones de trabajo referidas. Las referencias más cercanas en este sentido, se relacionan con la caracterización de la estructura de este tipo de aleación [1], [2], y los esfuerzos para lograr una estructura de austenita homogénea, requisito indispensable en el éxito de cualquier proceso ulterior de deformación plástica, mediante propuestas para la optimización de la tecnología de tratamiento térmico [3]. Para piezas y componentes desgastados, el empleo de depósitos de soldadura de acero Hadfield [4] plantea buenas perspectivas en un futuro inmediato.

Entre los métodos de endurecimiento por deformación, resalta por su bajo costo y posibilidades de empleo para tamaños y formas de piezas que son inapropiados por los métodos tradicionales, el método de endurecimiento con el empleo de la energía a alta velocidad que resulta de la detonación de una sustancia explosiva.

La investigación realizada ha permitido obtener los modelos matemáticos estadísticos que describen el comportamiento de las tensiones residuales, la macrodureza y la resistencia al desgaste abrasivo gravimétrico, cuando se aplica sobre el

material una carga explosiva. Se logró además establecer los parámetros tecnológicos del proceso de endurecimiento mediante explosivos de piezas de acero Hadfield con miras a incrementar su tiempo de vida útil.

Materiales y métodos

Para la realización de la investigación se utilizaron probetas cilíndricas de acero al alto manganeso fundidas y austenizadas [5], [6], y piezas reales del equipamiento industrial en el sector de la minería [7], [8], las cuales se sometieron a la acción de cargas explosivas en diferentes condiciones a fin de evaluar el comportamiento de propiedades mecánicas y funcionales del material, en relación con las variables del proceso tecnológico de endurecimiento mediante explosivos.

Como variables del proceso, se escogieron: el número de impactos (k) y el espesor de carga explosiva alrededor de las probetas (δ). El número de impactos (k) es una variable cuantitativa, fácil de controlar, se puede repetir cuantas veces sean necesarias (obteniéndose un nuevo resultado en cada impacto) y se ajusta a la característica que posee el acero Hadfield de variar sus propiedades mecánicas por impactos repetidos. El espesor de la carga explosiva alrededor de la probetas (δ) se relaciona con las propiedades energéticas de la sustancia explosiva empleada y los parámetros de detonación, en la medida en que se incrementa su valor desde una magnitud crítica y hasta un valor límite; estando vinculado en primer lugar con la velocidad de detonación del paquete explosivo y en segundo lugar con las presiones que se generan en las proximidades del frente de detonación, entre otros factores. A cada una de las variables se le fijaron tres niveles, teniendo como base para la selección la información proporcionada por la firma comercializadora de explosivos, y la experiencia de trabajo acumulada por el Grupo de Tratamiento de Metales con el Uso de Explosivos radicado en el Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez de Moa.

Una vez definidas las variables y sus niveles, se procedió a la realización de los ensayos de

aplicación de carga explosiva en las probetas y las piezas escogidas (martillos de las trituradoras de mineral y dientes de las palas excavadoras), utilizando un diseño de experimentos factorial completo. El número de experimentos (N) resultó igual a 9. Se diseñaron y fabricaron previamente cámaras de prueba en las cuales serían ubicadas las probetas y la carga explosiva a emplear; cada cámara de prueba tiene diámetros interiores diferentes dependiendo del espesor escogido de carga explosiva alrededor de la probeta. El procedimiento de aplicación de las cargas explosivas se describe en la referencia [9]. Como sustancia explosiva se empleó el Tectron-100, cuyos parámetros de detonación se establecen en la referencia [10].

Una vez que se aplican a las probetas, las cargas de impacto generadas por la energía de detonación de una sustancia explosiva en diferentes condiciones según el diseño de experimentos, se procede a la realización de los diferentes ensayos para la caracterización del comportamiento de las tensiones residuales, la macrodureza, y la resistencia al desgaste abrasivo del acero al alto manganeso (Hadfield).

La difracción por rayos x que permite la determinación de las tensiones residuales, se realizó en un Difractómetro HZG – 4A de la Freiburger Präzisionsmechanik. La medición se realizó bajo las siguientes condiciones: $I = 30$ mA, $V = 30$ kV. Se empleó la radiación de una lámpara de cobre con una longitud de onda (λ) de 0,15182 nm (1,54182 Å). El análisis cuantitativo se realizó desde un valor $2\theta = 67^\circ$ hasta $2\theta = 79^\circ$ correspondiente a la reflexión (220), con un paso de $0,05^\circ$ y un tiempo de 15 s.

La metodología utilizada para la medición del incremento de las tensiones producto del trabajo de compresión dinámica de las cargas explosivas aparece descrita en las referencias [11], [12], [13] y [14]. Se utilizó el método que prevé el empleo de muestra patrón.

Para la medición de la macrodureza se utilizó un durómetro universal marca IBERTEST MODELO

DU-200, de fabricación española. La medición de macrodureza se realizó en la escala Brinell, utilizando una bola de acero de diámetro 2,5 mm y cargas de 1.875,0 N (187 kgf) y 625 N (62,5 kgf). El tiempo de aplicación de las cargas fue de 15 s. La incertidumbre del equipo es de $\pm 2,30\%$. La medición de la huella se realizó con la ayuda del microscopio Neophot 30, sobre el plano superior de la probeta; este plano recibe directamente el impacto generado por la energía de detonación de la sustancia explosiva, considerando para la misma el comportamiento típico de cargas cilíndricas.

Los experimentos para la evaluación de la macrodureza, en las probetas de acero al alto manganeso, se realizaron de acuerdo a la norma cubana: NC 04 - 10: 72 (ensayos de dureza Brinell en materiales metálicos).

El ensayo de desgaste abrasivo se realizó en una instalación de tipo FARGO. El método utilizado fue el gravimétrico o de diferencia de peso. Las probetas se limpiaron cuidadosamente antes y después de cada prueba. Para el pesaje de las probetas, se utilizó una balanza analítica con una precisión de 0,0005 g. Se utilizó un tiempo de desgaste para todas las probetas, de 1 hora, equivalente a 3600 vueltas del rodillo de goma de 98 mm de diámetro, girando a 60 r. p. m., para un recorrido total de 1108 m. El peso colocado en el brazo de la máquina de ensayo fue de 1,03 kg, lo cual asegura una fuerza de presión sobre la probeta de 3,347 kg. Como abrasivo se empleó arena sílice (SiO_2). El experimento para la evaluación del desgaste abrasivo gravimétrico, se realizó de acuerdo a la norma cubana: NC 04-79: 87 (ensayos de desgaste abrasivo en aceros) y la norma ASTM: G 65-94.

Las piezas del equipamiento minero endurecidas mediante explosivos fueron sometidas a la explotación industrial. La prueba con los martillos, se realizó colocando en la máquina trituradora nueve martillos tratados con explosivos y nueve sin tratar, con el objetivo de exponer todos los martillos al mismo régimen. La ubicación dentro de la trituradora de cada martillo, se dispuso de modo que estuvieran uniformemente distribuidos en las seis secciones del equipo: martillos tratados y sin

tratar con explosivos. En el caso de las excavadoras de mineral, estas utilizan cuatro dientes para extracción del mineral laterítico; y para evaluar el efecto de los explosivos en su comportamiento se dispusieron de forma alternada dos dientes tratados con explosivos y dos sin tratar, en cada pala excavadora sometida a prueba.

Resultados y discusión

En la primera parte de la investigación se obtuvo el comportamiento de propiedades mecánicas (tensión principal normal de primer género y macrodureza) y funcionales (desgaste abrasivo gravimétrico), y con posterioridad se evaluó el trabajo de las piezas endurecidas mediante el procedimiento desarrollado con el empleo de explosivos.

Comportamiento de propiedades mecánicas y funcionales

El comportamiento de las tensiones principales normales de primer género se obtuvo a través de

un modelo experimental de mínimos cuadrados, a partir de las bases de datos que proporciona el análisis cuantitativo de la difracción por rayos X.

Para la realización del análisis cuantitativo de la difracción por rayos X, se registraron los parámetros correspondientes a los difractogramas de cada una de las muestras tratadas con explosivos; particularmente la distancia interplanar.

Modelo estadístico de la tensión principal normal de primer género ($\sigma 1^{\circ} gen$), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva.

$$\sigma 1^{\circ} gen = 629,14 + 7,32 \delta + 140,54 k \quad (1)$$

El modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación.

En la figura 1 se muestra gráficamente el comportamiento de la tensión principal normal de primer género.

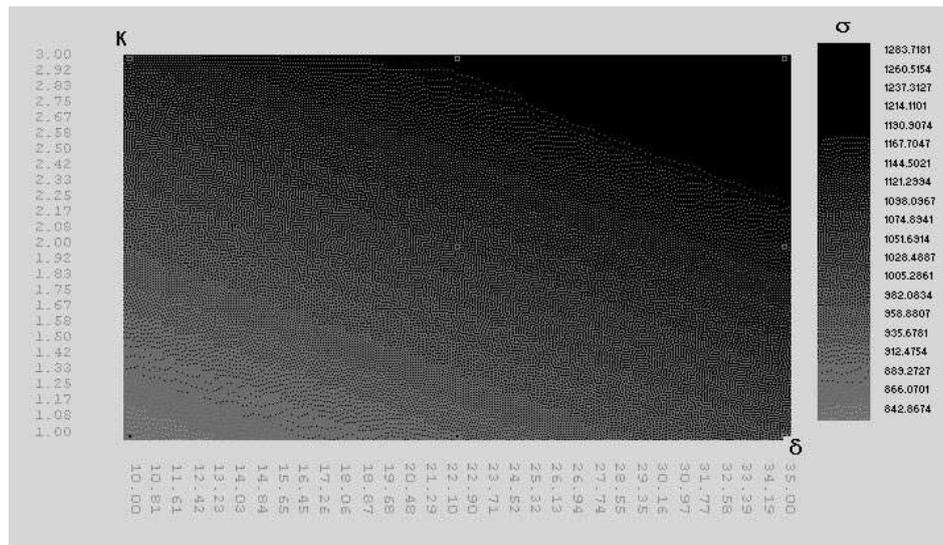


Figura 1 Gráfico del comportamiento de la tensión principal normal de primer género, respecto a las variables δ y k

Como se puede apreciar en la expresión del modelo matemático estadístico y el gráfico de tendencia correspondiente, la tensión principal normal de

primer género tiene un comportamiento creciente (de 872 a 1.315 MPa) siguiendo una ley lineal con un coeficiente de correlación (R) de 0,93.

De acuerdo con el modelo experimental y como se puede observar en el gráfico correspondiente, el incremento de las variables del proceso de experimentación que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva empleada, trae consigo un aumento del tensionamiento de la red en las muestras fundidas de acero austenítico al alto manganeso del tipo Hadfield. Este aumento es consecuencia directa del trabajo de deformación en frío provocado por la acción de las cargas explosivas y obedece

a la reducción en las distancias interplanares del metal tensionado.

Se obtuvo un modelo de mínimos cuadrados que expresa estadísticamente el comportamiento de la macrodureza en función de las variables independientes del proceso (δ y k), cuya expresión general está dada por la ecuación 2.

$$HB = 194,67 + 2,21\delta + 42,84k \quad (2)$$

En la figura 2 se muestra gráficamente el comportamiento de la macrodureza

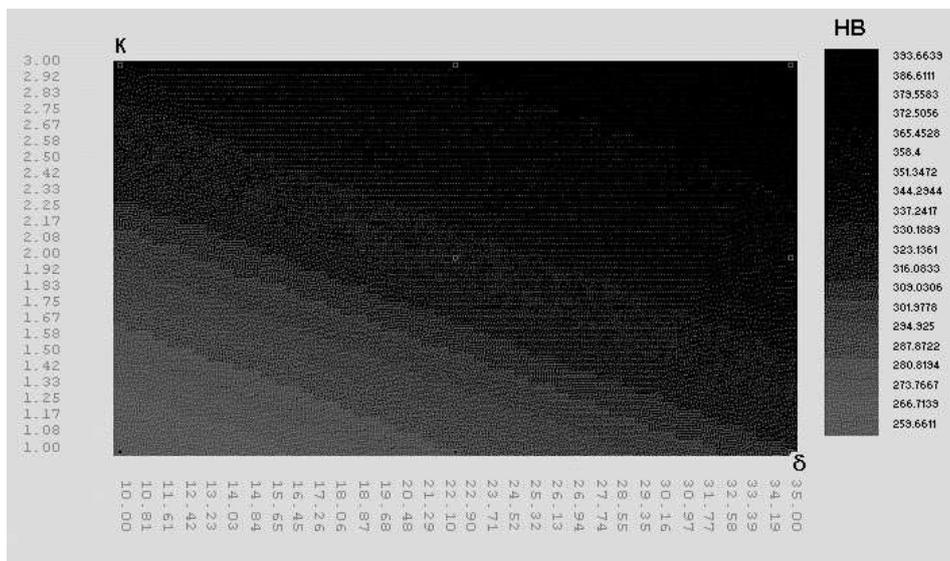


Figura 2 Gráfico del comportamiento de la macrodureza, respecto a las variables δ y k

De acuerdo con el modelo experimental obtenido y como se puede observar en el gráfico correspondiente, el incremento de las variables del proceso de experimentación que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva, trae consigo un aumento de la macrodureza en las muestras fundidas de acero Hadfield. Este aumento tiene lugar siguiendo una ley lineal con un coeficiente de correlación (R) de 0,94. El modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación. La macrodureza se incrementa de 270 a 400 HB, a partir de un valor inicial promedio igual a 190 HB en las probetas patrón.

Como el comportamiento de la dureza es función del estado tensional del material, se obtuvo el modelo experimental de macrodureza en relación a la tensión principal normal de primer género. El modelo de mínimos cuadrados obtenido tiene un coeficiente de correlación (R) de 0,97. Este modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación.

En la expresión 3 y la figura 3, se muestra la tendencia de crecimiento de la macrodureza respecto a la tensión.

$$HB = 23,25 + 0,28\sigma \text{ 1º gen} \quad (3)$$

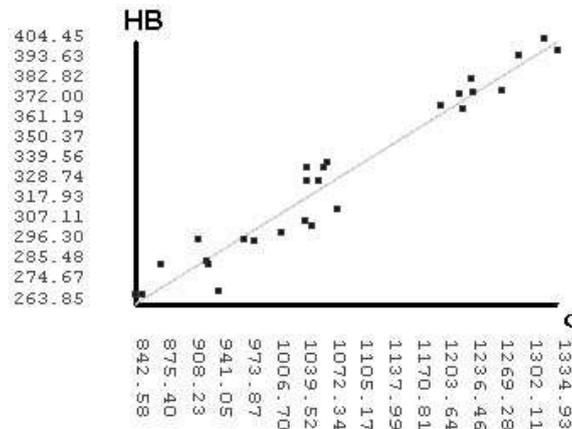


Figura 3 Gráfico del comportamiento de la macrodureza, respecto a la tensión

Según el modelo experimental descrito por la expresión 4 y el gráfico de tendencia correspondiente (figura 4), se establece que al ser sometidas las muestras fundidas de acero Hadfield a las cargas de impacto que genera la energía de detonación de una carga explosiva, el incremento de las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva trae consigo una disminución del desgaste gravimétrico de 0,02524 a 0,00981 g (aumento de la resistencia al desgaste abrasivo). La disminución del desgaste

gravimétrico tiene lugar de acuerdo a una ley lineal, con un coeficiente de correlación (R) de 0,95. El modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación.

El modelo estadístico de desgaste abrasivo gravimétrico (*PP*), con respecto a las variables que representan los parámetros de detonación de la sustancia explosiva es:

$$PP = 3,28 \times 10^{-2} - 2,04 \times 10^{-4} \delta - 5,75 \times 10^{-3} k \quad (4)$$

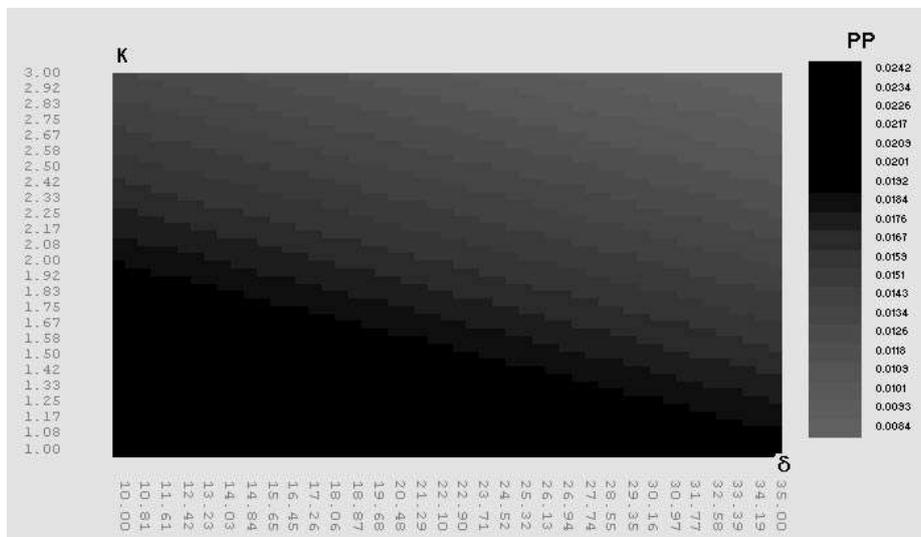


Figura 4 Gráfico del comportamiento del desgaste abrasivo gravimétrico, respecto a las variables δ y k

La causa fundamental de la disminución del desgaste gravimétrico como resultado del incremento de la presión de detonación y la energía de golpeo acumulada por las probetas, es el aumento de la dureza de las mismas; que relaciona el incremento de la dureza, con el efecto provocado por una deformación por compresión del enrejado cristalino, en el aumento del valor de la suma de las tensiones principales de primer género y del endurecimiento por acritud de la matriz austenítica.

Esto se explica mediante los modelos experimentales de mínimos cuadrados (expresiones 5 y 6) y los gráficos correspondientes (figuras 5 y 6) que relacionan el desgaste gravimétrico con la macrodureza de las muestras y las tensiones principales normales de primer género.

El modelo de desgaste gravimétrico respecto a macrodureza se describe según una ley lineal, con un coeficiente de correlación (R) de 0,96; el mismo también cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación.

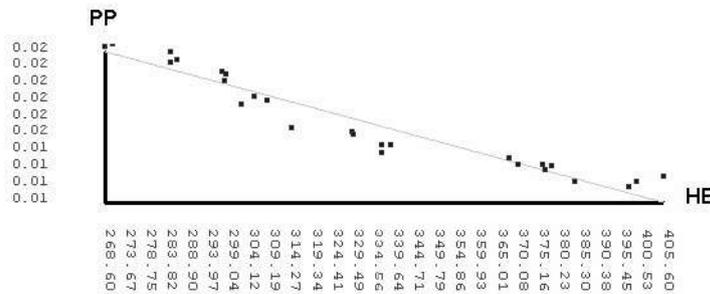


Figura 5 Comportamiento del desgaste abrasivo gravimétrico, respecto a la macrodureza

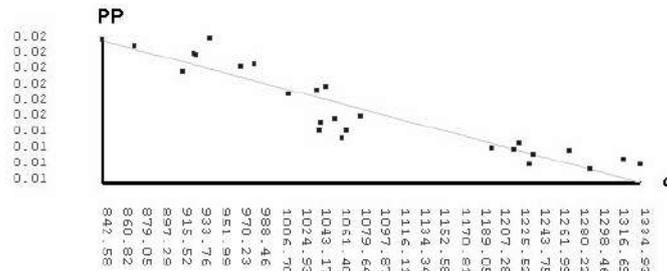


Figura 6 Comportamiento del desgaste abrasivo gravimétrico con respecto a la tensión

Evaluación del comportamiento de piezas

El modelo estadístico de desgaste abrasivo gravimétrico (PP), con respecto a la macrodureza es:

$$PP = 5,63 \times 10^{-2} - 1,19 \times 10^{-4} HB \quad (5)$$

En el modelo de desgaste gravimétrico respecto a la tensión, el comportamiento se describe según

una ley lineal con un coeficiente de correlación (R) de 0,93. El modelo cumplió satisfactoriamente todas las pruebas estadísticas para su validación.

El modelo estadístico de desgaste abrasivo gravimétrico (PP), con respecto a la tensión es:

$$PP = 5,34 \times 10^{-2} - 3,14 \times 10^{-5} \sigma \quad (6)$$

Los martillos de las trituradoras de sínter fundidos de acero Hadfield, utilizados en la industria productora de sulfuro de níquel y cobalto, tienen una duración promedio de hasta 480 horas con una frecuencia de trabajo de 12 horas diarias, por lo que en un año de trabajo se utilizan hasta 10 juegos de 18 martillos en una trituradora. Esto, en condiciones normales de explotación (cuando no están tratados con explosivos).

Como resultado del tratamiento con explosivos y antes de la puesta en explotación, se comprobó que la dureza de los martillos tuvo un incremento promedio superior al 80%. De acuerdo con las mediciones realizadas de forma sistemática durante su explotación, este incremento alcanza el 110% luego de 76 h de trabajo, y al cabo de 800 h de labor su dureza promedio se mantiene aproximadamente igual.

Los martillos que no fueron tratados con explosivos, sólo alcanzan un incremento de 28% en sus valores promedio de dureza durante sus primeras

76 h de trabajo, para condiciones similares de explotación; y el endurecimiento provocado por las condiciones de operación de los mismos hace que se alcance al cabo de 500 h de explotación el doble de su dureza inicial manteniéndose durante el resto del tiempo que duró la prueba.

En el período de prueba correspondiente a los meses de mayo a julio de 2003, los registros de operaciones de la planta de calcinación y sínter ofrecían 853 h de trabajo con los martillos tratados con explosivos, aun en condiciones adecuadas para continuar su explotación por lo que se decidió mantener el trabajo de los mismos. Hasta ese momento se había prácticamente duplicado el promedio estimado de vida útil de estos artículos.

Se realizaron mediciones periódicas del peso de cada martillo, con el objetivo de determinar el ritmo de desgaste que se produce en condiciones reales de explotación. La figura 7 muestra el comportamiento de este indicador.



Figura 7 Comportamiento del desgaste de los martillos

Interpretando estos resultados, se puede apreciar que los martillos tratados con explosivos muestran luego de más de 800 h de trabajo, un desgaste significativamente inferior al promedio de los martillos que no recibieron el tratamiento. El ritmo de desgaste entre los martillos que recibieron tratamiento

con explosivos es variado, y se acentúa en la medida que disminuyen los parámetros de detonación de las cargas explosivas aplicadas. El mejor comportamiento corresponde al martillo tratado con el mayor espesor de carga explosiva ($H = 25$ mm) y el mayor número de impactos ($k = 3$).

Si se tiene en cuenta solamente un incremento de doble duración en la explotación de estos artículos, solo se requerirán 5 juegos de martillos para una trituradora en un año de trabajo. Con este resultado será posible entonces reducir a la mitad las compras de nuevos martillos, disminuir los volúmenes de inventario y propiciar un incremento de los índices de eficiencia operacional, por lo que el costo de la actividad de mantenimiento será menor.

En un año de trabajo para una sola trituradora, el efecto económico de la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante explosivos de los martillos sería superior a 1.563,30 USD. Se debe señalar además que el impacto económico estará acentuado por el ahorro de portadores energéticos no cuantificados en la investigación pero que pudiera llegar hasta un 10% según fuentes especializadas, si se tiene en cuenta que la reducción de los niveles de desgaste de los martillos exige menos esfuerzos en el accionamiento electromecánico del equipo.

Desde el punto de vista social y ecológico teniendo en cuenta las evidencias de contaminación sónica y deterioro de la calidad ambiental del entorno en la sección de trituración, un elemento de gran importancia lo constituye la reducción de grandes volúmenes de polvos nocivos a la salud del hombre, expulsados a la atmósfera debido a las actividades de limpieza provocados por la realización de tareas de mantenimiento en ciclos muy cortos. Al mismo tiempo al disminuir el ritmo de desgaste de los martillos, se reduce el desbalance del equipo y a su vez, vibraciones y ruidos excesivos de grandes magnitudes, desajuste y falta de hermeticidad.

En el caso de los dientes de las palas excavadoras, a partir de un análisis estadístico realizado en una muestra de 6 excavadoras por un período de tiempo de 3 años y cuya frecuencia de trabajo osciló entre 16 y 20 h diarias, se pudo determinar que el cambio de los dientes no tratados con explosivos se realiza entre los 6 y 8 meses de explotación de los mismos. Entre los dientes más agredidos por el proceso de desgaste están los

situados en los bordes de la cuchara. Cuando no se tratan con explosivos, los dientes de las palas excavadoras entran en funcionamiento con una dureza promedio de 200 HB aproximadamente; y con posterioridad incrementan paulatinamente su dureza hasta alcanzar valores cercanos a los 400 HB, prácticamente al final de su vida útil.

Los dientes endurecidos previamente con explosivos, incrementan su dureza entre 420 y 480 HB; y con posterioridad, realizan su trabajo manteniendo esta dureza promedio según se pudo comprobar en mediciones realizadas a este parámetro durante el período de prueba.

Las pruebas realizadas en la mina de la industria productora de sulfuro de níquel y cobalto, muestran el resultado de la explotación durante 12 meses de varios juegos de dientes tratados con explosivos, en idénticas condiciones de operación que los dientes que no habían sido tratados con explosivos. A partir de este resultado es posible afirmar, que la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento mediante explosivos de los dientes, incrementa al doble la durabilidad de los mismos.

El efecto económico de la aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento de los dientes mediante explosivos sería superior a 2.719,24 USD para una sola excavadora en un año de trabajo.

Se puede afirmar que al lograr incrementar el tiempo de vida útil de los dientes, se contribuye a un mejor aprovechamiento de las posibilidades productivas de las excavadoras. Es decir con el aumento de su durabilidad se reportan otras ventajas tales como: reducción del costo de explotación y de mantenimiento, ahorro de portadores energéticos, y la disminución del volumen de inventario de estos elementos, disminución de importaciones y uso de los recursos en otros renglones.

Conclusiones

Se obtuvieron modelos experimentales de mínimos cuadrados que describen adecuadamente

las regularidades del comportamiento mecánico y funcional del acero Hadfield ante cargas explosivas.

Los modelos matemático estadísticos obtenidos, son estadísticamente significativos y tienen un comportamiento creciente según una ley lineal, en los límites fijados por las variables del proceso de experimentación.

Se produce un incremento de las tensiones principales normales de primer género y de la dureza de 872 a 1.315 MPa y de 270 a 400 HB respectivamente, y una disminución del desgaste gravimétrico de 0,02524 a 0,00981 g, en correspondencia con el incremento de las variables independientes del experimento: (δ) y (k).

La aplicación del procedimiento tecnológico de endurecimiento de piezas fabricadas de acero Hadfield, duplica la durabilidad de las mismas con un significativo efecto económico (1.563,30 USD para los martillos de una trituradora de sinter y 2.719,24 USD para los dientes de una excavadora, en un año de trabajo).

Referencias

1. F. Martínez. "Influencia de la estructura metalográfica del acero 65 Γ sobre la resistencia al desgaste abrasivo". *Revista Construcción de Maquinaria* N.º 2. 1981. pp. 23-35.
2. F. Martínez, L. Goyos. *Aleaciones austeníticas resistentes al desgaste y esfuerzos de impacto*. Construcción de Maquinaria. UCLV. Villa Clara. Cuba. 1989. pp. 16-29.
3. M. Mariño. *Estudio del deterioro por abrasión e impacto de los martillos de las trituradoras de mandíbula, fabricados de acero hadfield*. Tesis en opción al título de Master. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Moa. 2000. p. 84
4. E. Torres. *Influencia del Cry el Ni en las propiedades mecánicas y funcionales de los depósitos de soldadura de acero austenítico al alto manganeso*. Tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Universidad de Matanzas "Martha Abreu". Matanzas. 2002. p 177.
5. M. A. Caraballo. *Investigación sobre el endurecimiento mediante explosivos, del acero al manganeso empleado en los equipos de laboreo minero*. Tesis en opción al título de Master. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Moa 1999. p. 73.
6. C. de la Cruz; B. Leyva. *Investigación sobre el endurecimiento del acero al alto manganeso (Hadfield), mediante explosivos*. Trabajo de Diploma. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Moa 2003. p. 94.
7. N. Cobas. *Endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos*. Trabajo de Diploma. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Moa 1997. p. 62.
8. A. Palmero. *Mejoramiento de la calidad de los martillos de las trituradoras de la planta de calcinación y sinter de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, mediante el empleo de la energía de una sustancia explosiva*. Trabajo de Diploma. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Moa. p. 82.
9. M. A. Caraballo. *Endurecimiento mediante explosivos del acero Hadfield*. Tesis en opción al grado científico de doctor en Ciencia Técnicas. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Moa. p. 186.
10. ULAEX. *Accesorios para voladuras*. 2000.
11. C. Barret. *Estructura de los metales*. Madrid. 1ª ed. Editorial Aguilar. 1957. p. 838.
12. B. D. Cullity. *Elements of X – Ray Diffraction*. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science. University of Notre Dame. La Habana. Instituto Cubano del Libro. Ediciones Revolucionarias. 1967. p. 514.
13. E. Alfonso; J. Martin. *Aplicación de la Ley de Wolf– Bragg en la determinación de las tensiones residuales de primer género*. Memorias del II Taller Internacional de Didáctica de la Física "DIDACFISU" 2000". Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". 2000. p. 7. En: <http://www.ucbcba.edu.bo/institut/cexactas/didacfisudocumentos/ActasHTML/AplicacionDeLaLeyDeWolfBragg.html>. Consultada en diciembre de 2003.
14. D. Buraya. *Cristal Structure Analysis*. Department of Metallurgical and Materials Engineering. Materials Science and Engineering (3-0) 3. En: <http://euclid.ii.metu.edu.tr/~mete222/index.htm>. Consultada en febrero de 2004.