

DESGASTE EN RECUBRIMIENTOS DUROS EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO DE HIERRO DE REDUCCIÓN DIRECTA

DORA MARTÍNEZ, ALBERTO PÉREZ, ABRAHAM VELASCO*

El hierro esponja o hierro de reducción directa (HRD) se obtiene por la reducción del mineral de hierro en reactores con atmósferas de hidrógeno y monóxido de carbono. La composición típica del HRD es 90% mínimo de hierro. El resto está formado por residuos como silicio, calcio y carbono. Actualmente, el hierro esponja necesita ser transportado de los reactores de reducción directa a los hornos de acería. La transportación de las partículas en caliente a los hornos de acería puede ser por tren, camiones o bandas transportadoras. Una alternativa es el transporte neumático; esto significa ahorro en tiempo y energía, de otra manera tendría que esperarse al enfriamiento de las partículas para después ser transportadas y luego volver a calentarlas en los hornos. Para que este proceso se justifique en ahorro de energía, la transportación deberá realizarse a temperaturas que van desde los 400 hasta los 800°C, aproximadamente. Las partículas transportadas son formadas por pélets de hierro esponja arriba de 12 mm en diámetro y partículas de polvo menores de 2 mm de diámetro. La razón de transporte se espera que esté en el orden de 100 a 400 tons por hora, y las distancias son de 60 a 600 metros.^{1,2}

El transporte neumático de hierro esponja en caliente a altas temperaturas y dentro de atmósferas reductoras es una tarea difícil. La tubería está sujeta a esfuerzos térmicos, ataque por corrosión, desgaste erosivo y desgaste abrasivo.^{3,4} El carbono contenido en el HRD, ya sea en forma libre o combinado

formando carburo de hierro, (Fe_3C), tiende a reaccionar con el aire, generando calor en una reacción exotérmica, donde las temperaturas puede alcanzar rangos de hasta 1600°C. Por lo anterior, es necesario utilizar una atmósfera inerte o reductora.⁵ El principal requerimiento del transporte no es únicamente el trasladar entre dos puntos, sino preservar el valor intrínseco asociado con el contenido metálico, temperatura y tamaño de partícula del hierro esponja.

Los materiales, al ser seleccionados para la línea de transporte, deberán resistir, primero, la corrosión por el gas de transporte. Asimismo, los materiales deberán ser resistentes a la erosión producida por las partículas y a los esfuerzos térmicos asociados con los cambios de temperatura. Existe un número limitado de aleaciones que puede ser utilizadas para tal diseño. En esta obra, los autores presentan un trabajo experimental sobre cinco diferentes aleaciones. Los materiales utilizados son: un acero inoxidable tipo AISI 304 y cuatro aleaciones de recubrimientos duros. Las aleaciones de recubrimiento duro son a base de Cr-Ni-Mo-C. Las pruebas de erosión fueron realizadas en un equipo de laboratorio diseñado para trabajar en caliente, en el cual se pueden transportar partículas finas a diferentes atmósferas. Las muestras pueden ser colocadas a diferentes ángulos de impacto (de 0° a 90°).

* Doctorado en Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León. A. P. 074F C. U. San Nicolás de los Garza 66450 N. L. México.

Experimentación

Materiales

Los materiales utilizados en este trabajo, como ya se mencionó, fueron: un acero inoxidable tipo AISI 304 y cuatro aleaciones de recubrimientos duros a base de Cr-Ni-Mo-C, aplicados sobre un acero inoxidable. La composición química de las aleaciones se muestra en la tabla I. Para las pruebas de erosión en caliente, las muestras fueron cortadas de los tubos. La superficie de los diferentes materiales fueron preparadas por medio de pulido acabado espejo.

Material erosivo

Las partículas erosivas utilizadas para este trabajo son pélets de HRD producidos por el proceso HYL^{MR}. Una composición química típica (% en peso) de los pélets es 90% Fe mínimo, 5% de SiO₂, 2% C y 1.5% CO.⁶ Para la máquina de erosión en caliente los pélets de hierro esponja empleados, fueron finos de 1/16 a -1/8 de tamaño de malla para ser impactados en las muestras de recubrimientos metálicos.

Máquina de erosión en caliente

La máquina de desgaste es, esencialmente, un aparato de "granallado" con un calentador. En el diseño del equipo se contempló el manejo de diferentes atmósferas: atmósferas inertes, gas reformado (R-gas) con diferentes contenidos de H₂, o atmósferas basadas en hidrógeno y monóxido de carbono. En este equipo, diferentes materiales son expuestos al ataque erosivo. Las muestras pueden ser colocadas a diferentes ángulos de impacto; son cortadas a un tamaño predeterminado de 40x25x6 mm, la superficie de las muestras es cortada con un disco de diamante para dejar el área plana, después es pulida hasta un promedio de 50 µm de rugosidad Ra. Las

muestras son pesadas y la rugosidad es medida con un rugosímetro digital; luego son instaladas en el portamuestras y son expuestas a un flujo de sólidos (partículas de pélets de HRD) a una velocidad promedio de 7 m/s, transportados por una atmósfera caliente a una temperatura de 550°C. La tabla II describe las condiciones de prueba.

Los materiales, una vez sometidos al ensayo, se

Tabla II. Condiciones de la prueba de la máquina de erosión

Variables	Condiciones
temperatura	550 ± 10 °C
materiales transportados	finos de HRD
tamaño de partícula	[-0.3175, + 0.158] cm
carga transportada	2.8 tons - para el acero 304, R2, R3 y R4 11.16 tons - para R1
razón de carga de sólidos	1 kg./min.
atmósfera	inerte
velocidad estimada de partículas	5 - 10 m/s
ángulo de impacto	0° y 30°
flujo de gas	75 m ³ /h

limpiaron por medio de ultrasonido para remover materiales (como polvos del hierro esponja) adheridos en la superficie, los cuales pudieran cubrir áreas de interés. Se realizaron las observaciones a altas magnificaciones en el microscopio electrónico de barrido en la superficie de los materiales. Se capturaron las imágenes y se obtuvieron espectros de rayos X en las zonas deformadas plásticamente.

Al cuantificar el volumen de desgaste se procedió a seguir la siguiente metodología: primero, cuantificar el área de desgaste promedio de la superficie por medio de análisis de imágenes. Segundo, determinar la profundidad promedio de desgaste utilizando perfiles de rugosidad de las áreas dañadas.

Tabla I. Composición química de las aleaciones (% en peso)

Aleaciones	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
AISI 304	0.07	0.293	1.73	18.09	10.18	-	0.003	0.022
Aleación R1 Cr-Ni-Mo-C	3.00	N/D	0.4	24.00	23.00	4.00	N/D	N/D
Aleación R2Cr-Ni-Mo-C	2.26	2.5	1.3	26.32	2.49	4.4	N/D	N/D
Aleación R3 Cr-Ni-Mo-C	2.55	0.66	1.4	20.7	2.4	2.48	0.022	N/D
Aleación R4Cr-Ni-Mo-C	4.4	1.10	3.7	27.2	2.5	2.10	0.036	0.053

Este procedimiento se llevó a cabo ya que no se tiene un control en el cambio de masa debido al mínimo daño registrado en las aleaciones especiales y, por lo tanto, el registro de la lectura de cambio de masa es mínimo, además de presentar remoción de material; para el caso del ángulo de 30°, esto no es detectado como un cambio de masa.

La determinación de área dañada promedio se obtuvo del siguiente procedimiento:

- Se capturaron imágenes de la superficie de los materiales desgastados a diferentes ángulos de impacto, y a una magnificación de 500x en el SEM. El criterio para seleccionar las áreas deformadas o desgastadas fue al azar, realizando las observaciones en toda la superficie de impacto de los materiales ensayados.
- Las imágenes capturadas (12 en promedio por material) fueron examinadas en el analizador de imágenes, que fue debidamente calibrado a la magnificación 500x. La imagen de tamaño 512x480 píxeles, dada por el SEM, donde se obtuvo la equivalencia de un píxel por 0.188 mm, es leída por el equipo de análisis. En cada imagen se determinó el valor del área dañada y la fracción de área. Se realizó el tratamiento estadístico para encontrar el valor del área desgastada promedio de cada material ensayado.
- Al obtener el área de desgaste promedio se determinó el área total de desgaste por medio del cálculo del área de impacto total de los materiales utilizados. Esto se realizó mediante la observación superficial de la zona marcada por el flujo de sólidos; marcando la zona se realiza la medición del área de impacto con un vernier.

La profundidad en las áreas de desgaste fue estimada mediante el análisis de perfiles de rugosidad, obtenidos de un equipo de rugosidad marca Taylor Hobson Ltd, con punta cónica de diamante de radio de 2 mm, que cuenta con una profundidad de trabajo de 4 mm. En cada superficie de desgaste se realizaron en promedio 25 perfiles de rugosidad de 12 mm de longitud de barrido, en dirección horizontal y vertical de las zonas de desgaste; para verificar estas áreas de desgaste se compararon con las dimensiones de las imágenes obtenidas en el SEM. Se tiene como zonas de referencia aquellas que no estuvieron en contacto con el flujo de sólidos, ya que estaban protegidas por sujetadores en el portamuestras; estas zonas fueron las esquinas

de las pruebas. Se realizaron ensayos cuidando que se tomaran estas áreas y zonas de área dañada, para ver el cambio en el perfil de rugosidad. Una vez obtenido, se midió la profundidad máxima de un valle de las zonas detectadas como áreas deformadas debido a su amplitud, determinada por las imágenes encontradas. Se obtuvo la profundidad promedio de las zonas de desgaste para todos los materiales a los diferentes ángulos ensayados.

Una vez encontrada el área total de desgaste y la profundidad promedio en estas zonas, se estimó el volumen de desgaste de los materiales en este ensayo de desgaste mecánico, normalizándolo para el total de carga transportada en cada material ensayado, de tal forma que obtuvimos el volumen de desgaste por unidad de masa transportada.

Determinación de parámetros microestructurales

Para determinar los parámetros microestructurales de los recubrimientos metálicos seguimos la teoría de estereología,⁷ haciendo uso de los materiales preparados metalográficamente y de fotomicrografías a una magnificación de 200x. Utilizando el microscopio óptico y un analizador de imágenes Leica modelo Quantimet 520, se tomaron 20 campos al azar en tres diferentes cortes de las aleaciones a una magnificación de 200x para cada recubrimiento metálico, realizando la estadística correspondiente para ver la desviación con los datos obtenidos. Los parámetros determinados de interés son: área total de carburos y tamaño y número de carburos. Una vez obtenidos estos datos se determinaron indirectamente los parámetros de trayectoria media libre (λ) y espaciamiento entre carburos (σ) por medio de las siguientes relaciones:⁷

$$\lambda = (1 - V_v) / N_L$$

$$\sigma = 1 / N_L$$

Donde: λ es la trayectoria media libre entre carburos y matriz, σ es el espacio entre carburos, $V_v = A_A = L_L$ es la densidad de carburos. $N_L = L_L / L$, donde L es la longitud estándar (100 mm), L_L es el número de intercepciones por la longitud estándar.

Resultados

Máquina de erosión en caliente

Los resultados obtenidos en el dispositivo de erosión

Tabla III. Valores cuantitativos del volumen de desgaste erosivo a 0°

Aleaciones	Área de desgaste Ad (mm ²)	Profundidad hc (mm)	Volumen Vd (mm ³)	Carga transportada mt (kg)	Volumen normalizado Vd/mt (mm ³ /kg)
INOX. 304	176.52	0.008	1.41	2800	5.04exp-4
R1 (triten)	37.84	0.0026	0.098	11160	8.8exp-6
R2 (utp)	89.00	0.004	0.356	2800	1.2exp-4
R3 (fdb)	150.00	0.0078	1.17	2800	4.17exp-4
R4 (hyl)	181.73	0.0059	1.07	2800	3.82exp-4

Tabla IV. Valores cuantitativos del volumen de desgaste erosivo a 30°

Aleaciones	Área de desgaste Ad (mm ²)	Profundidad hc (mm)	Volumen Vd (mm ³)	Carga transportada mt (kg)	Volumen normalizado Vd/mt (mm ³ /kg)
INOX. 304	330.21	0.026	8.58	2800	3.06 exp-3
R1 (triten)	84.00	0.0075	0.63	11160	5.6 exp-5
R2 (utp)	104.53	0.0087	0.9	2800	3.2 exp-4
R3 (fdb)	194.00	0.012	2.33	2800	8.32exp-4
R4 (hyl)	285.84	0.021	6	2800	2.14exp-3

en caliente se muestran en las tablas III y IV para 0° y 30°, respectivamente. Las muestras fueron cortadas de la tubería o fueron obtenidas de placas.

Relaciones de desgaste vs. parámetros de microestructura

Una vez calculado el volumen normalizado de desgaste mecánico, se determinó el comportamiento y las correlaciones con los parámetros de microestructura y dureza de las diferentes aleaciones, con el fin de encontrar relaciones empíricas para explicar la relativa resistencia al desgaste de los diferentes recubrimientos metálicos estudiados. En las figuras 1 y 2 se observan las gráficas del volumen de desgaste por masa transportada contra los parámetros microestructurales, para los ángulos de 0° y 30°, respectivamente.

Para el ángulo de 0° de impacto -figura 1(a)- se observa la relación entre el volumen de desgaste contra la densidad de carburos de las aleaciones, podemos ver que no existe una relación directa con este parámetro, la distribución en la densidad de carburos en los materiales es muy cercana, sin embargo, el desgaste no tiene una correlación con este parámetro. En la figura 1(b) se observa el volumen de desgaste relativo contra el parámetro de trayectoria media libre entre carburos y matriz (λ). Se pue-

de observar una relación de orden potencial con una correlación de 0.92. En la figura 1(c) se presenta el parámetro de espaciamiento entre carburos (σ), donde observamos también una relación de potencia con el desgaste, con una correlación del 0.84. La figura 1(d) muestra el comportamiento del desgaste con la dureza. Como propiedad mecánica de los materiales, no existe una relación directa de la resistencia al desgaste con la dureza, como se puede observar en la figura 1(d).

La magnitud de desgaste encontrado en los materiales, a ángulos muy pequeños, es del orden de 10^{-4} , ésta es una magnitud que coincide con pruebas de desgaste de impacto para metales dúctiles reportadas en la literatura.⁸

Las relaciones para el ángulo de 30° se indican en la figura 2, donde se grafican los resultados del volumen de desgaste contra: (a) densidad de carburos, donde no existe una relación directa, al igual que el caso de erosión a 0°. Para el resto de los parámetros, observamos la figura 2 (b), (c) y (d), donde se tiene el mismo comportamiento que las correspondientes en la figura 2. Se encontraron correlaciones con los parámetros de microestructura λ y σ . La magnitud del desgaste a 30° es de un orden en magnitud mayor que el encontrado para el ángulo de 0°, como se describen los datos en las tablas III y IV.

Las correlaciones del desgaste y los parámetros

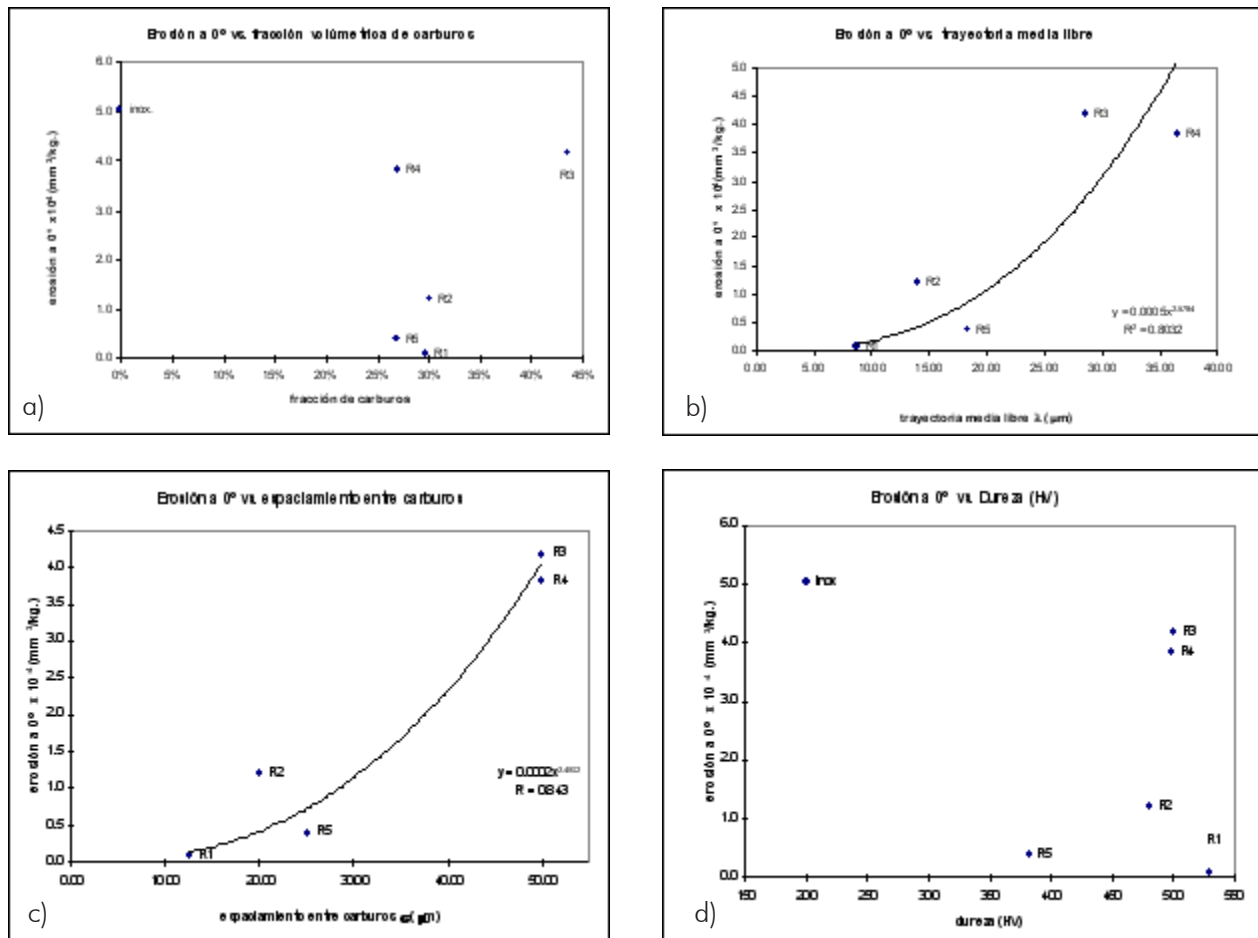


Fig. 1. Gráficas de volumen de desgaste a 0° contra: (a) densidad de carburos, (b) trayectoria media libre, (c) espaciamiento entre carburos y (d) dureza de los recubrimientos.

microestructurales fueron las siguientes:

Erosión a 0°:

$$E = 0.0002 \lambda^{2.88}$$

con una correlación de: $R^2 = 0.922$

$$E = 0.0002 \sigma^{2.49}$$

con una correlación de: $R^2 = 0.84$

Erosión a 30°:

$$E = 0.0003 \lambda^{2.46}$$

con una correlación de: $R^2 = 0.98$

$$E = 0.0004 \sigma^{2.12}$$

con una correlación de: $R^2 = 0.89$

La figura 3(a) muestra un acero inoxidable 304 que fue colocado paralelo al flujo después de ser impactado por 2800 kg de partículas. Los impactos producen surcos sobre la superficie. La dirección del flujo en el surco observado es de la parte superior a

la inferior. Existe una clara evidencia de la deformación plástica al frente de la marca del surco y de que el material fue removido. En el fondo del impacto se pueden observar marcas de desgarramiento del material. En la figura 3(b) se muestra un acero inoxidable 304 a 30° después de 2800 kg de partículas impactadas. El daño observado sobre la superficie parece ser mayor que el encontrado en la posición paralela al flujo de partículas en el mismo acero. Existe más deformación plástica que sobre la zona de las marcas de desgarramiento. La figura 4(a) muestra una aleación de recubrimiento duro, paralelo al flujo después de 11, 160 kg de partículas impactadas. Muy poco daño fue observado y se presentó únicamente en la matriz. Los carburos primarios protegen efectivamente la superficie del desgaste. En la figura 4(b) se observa la aleación de recubrimiento duro a 30°, después de 11,160 kg. Puede ser observado un mayor daño en la superfi-

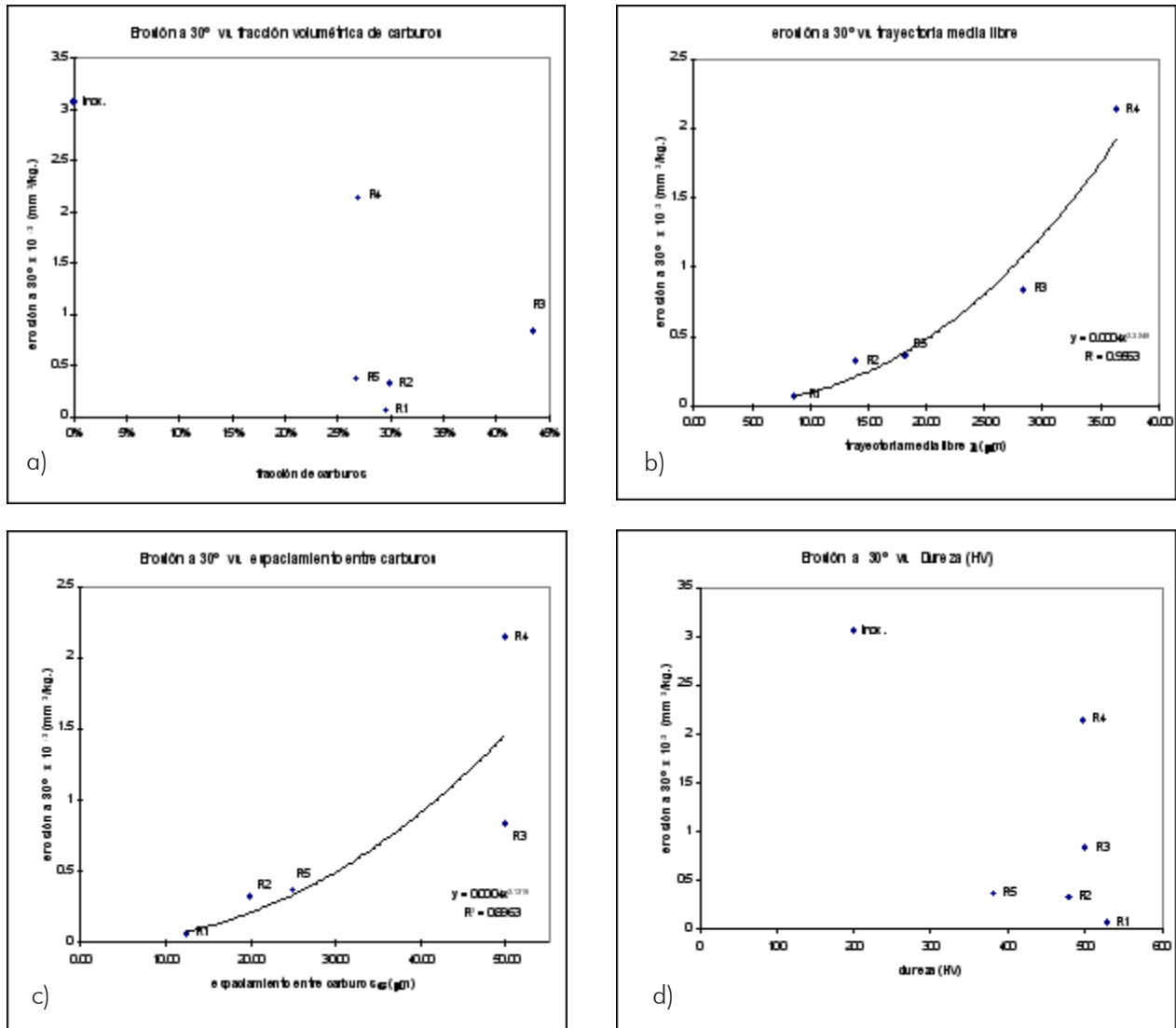


Fig. 2. Gráficas de volumen de desgaste a 30° contra: (a) densidad de carburos, (b) trayectoria media libre, (c) espaciamiento entre carburos y (d) dureza de los recubrimientos.

cie. Es claro que las partículas erosivas desgastan la matriz “suave” dejando sueltos los carburos primarios, hasta que se convierten en partículas separadas.

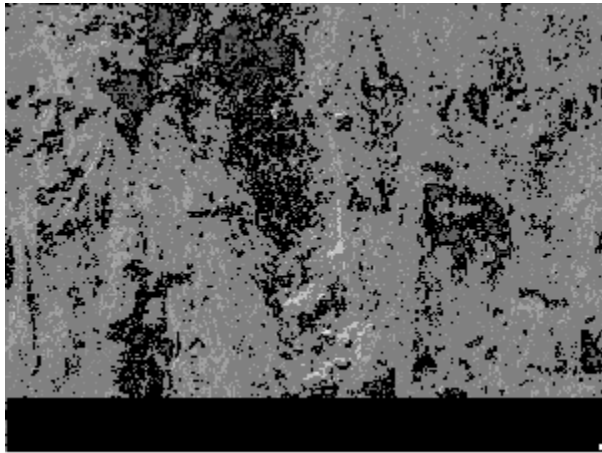
Dicusión

Máquina de erosión en caliente

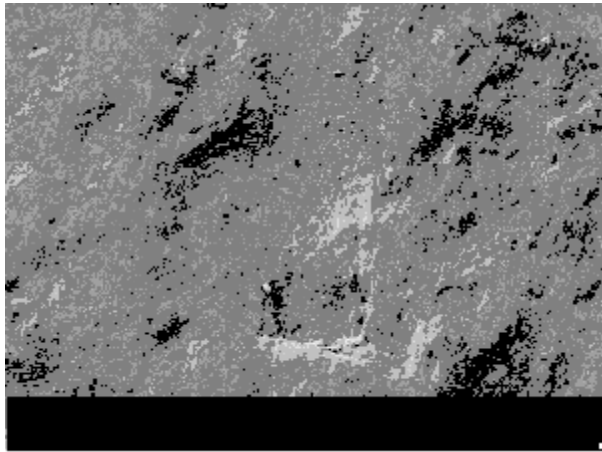
La principal característica de esta máquina es que puede ser utilizada para experimentar a diferentes ángulos de impacto. El ángulo de 0° fue usado para representar los tubos y el ángulo de 30° para los codos. Aunque es necesaria más experimentación

para trabajar con diferentes ángulos, es posible realizar la comparación entre estos dos ángulos. Ha sido aceptado que la erosión es una función del ángulo de impacto.³ Para metales dúctiles una alta razón de erosión puede ser encontrada en ángulos cerca de 30°. A ángulos pequeños o ángulos cercanos a 90° se observa menor erosión. Las figuras 3 y 4 muestran estas diferencias. A 30° (figura 5) el daño superficial es más alto que a 0°. En ambos casos, surcos, deformación plástica y la pérdida de material ocurren pero a 30° estos son mayores. Esto es debido a la naturaleza de contacto entre partículas y superficie.

Los valores estimados para el volumen de des-



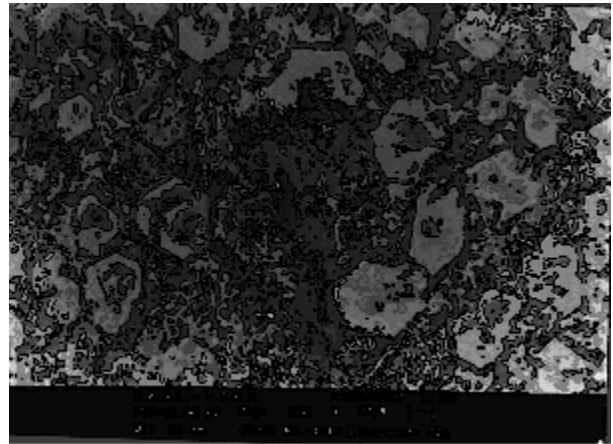
a)



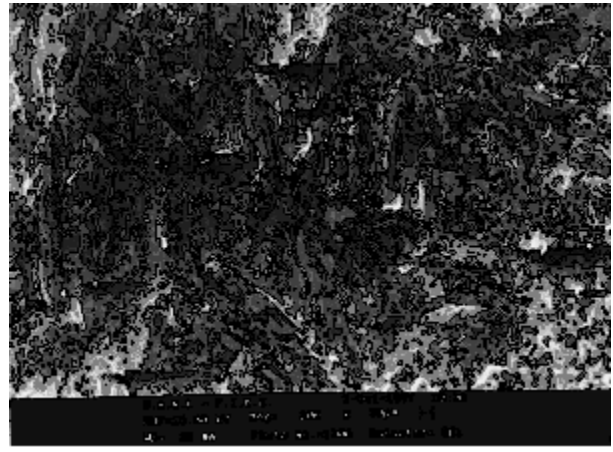
b)

Fig. 3. Fotografía de MEB de la superficie del acero inoxidable 304 (a) colocado paralelo al flujo de sólidos después de 2800 kg de partículas de impacto en la máquina de erosión en caliente, 300X nominal. (b) colocado a 30° con respecto al flujo de partículas, 150X nominal.

gaste nos dan cuantitativamente las diferencias en el comportamiento al desgaste erosivo de los materiales, en las pruebas de 0° y 30°. En la tabla III, ensayo a 0°, observamos la magnitud de desgaste del acero inoxidable que, en comparación al R1, es mayor casi 60 veces. Esto determina la importancia de los carburos complejos embebidos en una matriz de fase austenita, distribuidos uniformemente y con una repartición de tamaños de carburos. Para el resto de las aleaciones duras, la resistencia al desgaste, tomando como referencia al acero inoxidable, no existe mucha diferencia en magnitud de casi todos los recubrimientos que resisten en promedio cuatro veces más que el acero inoxidable, a excepción de



a)



b)

Fig. 4. (a) Fotografía de MEB de la superficie de la aleación del recubrimiento duro R1, colocado paralelo al flujo después de 11,160 kg de partículas de impacto en la máquina de erosión en caliente. Muy poco daño puede ser observado, 400X nominal. (b) Superficie del recubrimiento R1 colocado a 30° con respecto al flujo de sólidos, 200X nominal.

algunas aleaciones de fundición blanca, donde el desgaste es cerca de la misma magnitud que el acero inoxidable, esto ocurre ya que la matriz de estos materiales es de fase ferrita y martensita como primer punto, ya que estas presentan una alta ductilidad e inestabilidad a altas temperaturas, respectivamente; a parte de esta variable de estructura, se encuentra la distribución y tipo de carburos.

La diferencia en magnitud, para las pruebas de 0° a 30°, es de una orden de magnitud mayor para el caso del acero inoxidable, R1 y R4, donde la relación entre el desgaste del acero inoxidable (a 30°) y el recubrimiento R1 sigue conservando la razón cercana a 55 veces más desgaste, la explicación de la

resistencia al desgaste de este recubrimiento es debida a su constitución en estructura y tipo de carburos complejos embebidos en la matriz. El recubrimiento R2 tiene valores similares en ambos ensayos.

Los recubrimientos metálicos R3 y R4 presentan un alto desgaste casi comparable con el acero inoxidable AISI 304, para ambas pruebas donde existe una alta densidad de Fe_3C y presencia de la fase martensita en la matriz. Como se mencionó, no son fases estables a altas temperaturas que al disminuir la dureza de éstas, dejan de brindar protección a la matriz.

Las correlaciones obtenidas en esta sección demuestran lo observado en las superficie de los materiales y los resultados obtenidos de desgaste erosivo: además de la composición química y dureza, los parámetros de microestructura son de suma importancia en la resistencia al desgaste; el espaciamiento entre carburos y la trayectoria media libre entre matriz y carburo pueden permitir que exista mayor o menor magnitud en la deformación plástica en la matriz, esto es, los carburos actúan como barreras al desplazamiento de las dislocaciones, en conjunto con las fronteras de grano, y, por lo tanto, a la deformación que se lleva a cabo al existir el flujo plástico del material. De esta forma la densidad de carburos es importante en la matriz de los recubrimientos metálicos, pero la distribución de ellos es aún más importante; las correlaciones encontradas en los ensayos realizados a 0° y 30° describen lo anterior, para ambos casos se encontró la relación de los parámetros con el desgaste erosivo evaluado; presentan una función de potencia. No existe una relación directa con el desgaste del parámetro, densidad de carburos y con la propiedad mecánica de dureza, sin embargo, las gráficas nos dan una idea de los rangos útiles de estas propiedades de los materiales para condiciones de trabajo realizadas en esta prueba.

Las relaciones de desgaste vs. los parámetros de λ y σ , se comportan como una función de potencia, aproximadamente de orden 3 parábola cúbica. Para el ensayo a 0° , donde el desgaste erosivo es función de λ y σ , al tener un material que posea un espaciamiento entre partículas pequeño, según esta función, el desgaste erosivo sería casi nulo. En el caso contrario de tener un mayor espaciamiento, el desgaste se incrementaría rápidamente, como lo observamos en las gráficas (b) y (c) de la figura 1. Esto, debido a que los parámetros de λ y σ permitirán que el área expuesta de la matriz entre en contacto con el flujo de partículas de impacto, las cuales provocaran la

deformación plástica y, al final, el desgaste del material.

Para el ensayo a 30° , el desgaste es una función de potencia de aproximadamente orden 2 (parábola) de los parámetros λ y σ , donde se observa similar comportamiento que en el ensayo a 0° –ver figura 2(b) y (c). El efecto de λ y σ a 30° es mayor debido a la naturaleza de contacto de las partículas con el material.

Observaciones

- La máquina de erosión en caliente permitió realizar pruebas comparativas para diferentes materiales a diferentes ángulos de impacto. A 30° el daño superficial es más alto que a 0° . En ambos casos los surcos, la deformación plástica y la pérdida de material ocurren, pero a 30° son mayores. Esto es debido a la naturaleza de contacto entre partículas y superficie. En el ensayo a 0° , la magnitud de desgaste del acero inoxidable, en comparación al R1, es 60 veces mayor. Los recubrimientos restantes resisten en promedio cuatro veces más que el acero inoxidable, a excepción de algunas aleaciones de fundición blanca, donde el desgaste es cerca de la misma magnitud que el acero inoxidable. La diferencia en magnitud, para las pruebas a 0° y 30° , es de un orden de magnitud mayor para el caso del acero inoxidable, R1 y R4, donde la relación entre el desgaste del acero inoxidable (a 30°) y el recubrimiento R1, sigue conservando la razón cercana a 55 veces más desgaste.
- Los recubrimientos metálicos R3 y R4 presentan un alto desgaste casi comparable con el acero inoxidable AISI 304 para ambas pruebas, en los cuales existe una alta densidad de Fe_3C y presencia de la fase martensita en la matriz.
- Los parámetros de microestructura son de suma importancia en la resistencia al desgaste, el espaciamiento entre carburos y la trayectoria media libre entre matriz y carburo permiten que exista mayor o menor magnitud en la deformación plástica en la matriz. No existe una relación directa entre la fracción volumétrica de carburos y dureza con el desgaste erosivo. El desgaste erosivo es función de la trayectoria media libre (λ) y el espaciamiento entre carburos (σ). La relación del desgaste erosivo vs. los parámetros de λ y σ se

comportan como una función de potencia, aproximadamente de orden 2 parábola, en los ensayos a 0° y 30°. El desgaste en esta última condición es prácticamente un orden de magnitud mayor.

Conclusiones

Se encontró una correlación cualitativa y cuantitativa entre los parámetros microestructurales, trayectoria media libre y espaciado entre carburos con el mecanismo de erosión. Lo anterior permitió utilizar materiales más avanzados que presentan microestructuras más adecuadas que los materiales convencionales, tales como el acero inoxidable AISI 304.

Se desarrolló una metodología que permite evaluar en forma directa los parámetros microestructurales (trayectoria media libre y espaciado entre carburos) que son utilizados como herramienta predictiva para la evaluación del comportamiento tribológico del material en cuestión.

Agradecimientos

Al doctor Raúl Quintero y al ingeniero Ricardo Viramontes, de HYLSA, División Tecnología, por permitir la publicación de este trabajo. Al CONACyT.

Resumen

Muestras de recubrimientos duros (alto cromo-alto carbono) fueron ensayadas separadamente para determinar la resistencia a la erosión por múltiples impactos de pélets de hierro de reducción directa (HRD) en una máquina de erosión a alta temperatura. El volumen de desgaste y observaciones microscópicas fueron utilizadas para evaluar el mecanismo de erosión a diferentes ángulos de impacto. Como resultado de esta experimentación, se obtuvieron correlaciones de los parámetros microestructurales con la resistencia al desgaste. Esto deberá ayudar para evaluar los principales mecanismos del daño de la tubería empleada en el transporte neumático a alta temperatura de pélets de HRD en condiciones de operación industrial, en diferentes direcciones y determinar la resistencia al desgaste de nuevas aleaciones de recubrimientos.

Palabras clave: Desgaste, Erosión a alta tempera-

tura, Transporte neumático, Recubrimientos metálicos.

Abstract

Five samples of hard coatings (high chromium-high carbon) were separately tested for hot erosion resistance by multiple impacts of direct reduced iron (DRI) pellets in a hot erosion testing device. Volumetric wear and microscopic observations were used to evaluate the erosion mechanisms at different angles of impact. Microstructure parameters such as partial area of the hard phase particles (carbides), distance between particles and mean free path were measured and correlated with the volume lost. Results of this work show correlation between microstructure parameters, mostly the mean free path, with erosion resistance. Hot corrosion was inhibited by the use of hydrogen inert atmosphere for the erosion testing. However, the hard coating samples were tested for hot corrosion in a reactor at 700 °C. Metal dusting was present in carbon and stainless steel, but this kind of corrosion was not detected in the hard coatings. Results obtained here will help to evaluate the main mechanisms of pipe damage used in the high temperature pneumatic transportation of DRI under industrial conditions.

Keyword: Wear, Erosion at High Temperature, Conveying Pneumatic, Hard coatings.

Referencias

1. A. J. Burnett. Wear in Pneumatic Conveying Pipelines. Powder Handling and Processing U. K., Vol. 5, No. June 1993.
2. Alan V. Levy. Mechanisms of Combined Erosion - Corrosion of Steel at High Temperatures. University of California 1989.
3. I. M. Hutchings. Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials. Edited by Edward Arnold. London U. K. 1992.
4. R. D. Marcus, L. S. Leung, G. E. Klinzing and F. Rizk. Pneumatic Conveying of Solids. A theoretical and practical approach, 1990.
5. H. J. Grapke. Metal Dusting of Low and High Alloy Steels. Corrosion Science Vol. 51, No. 9, 1995 pp. 711 - 719.
6. Comunicación Privada. Marco A. Flores. HYLSA. Div. Tecnología. Abril 1998.
7. Practical Applications of Quantitative Metallography. McCall/Steele, editors, ASTM STP 839. Julio 1984.
8. Esperanza Deaquino, Dora Martínez, A. Pérez, A. Velasco, Marco Flores and Ricardo Viramontes. Wear in Pneumatic Transport under Hot Reducing Atmospheres. Powder Technology. February 1998, pg. 55 - 60.