

# Evaluación de los productos de la reducción de un concentrado cromífero en la obtención de recubrimientos difusivos de carburos de cromo

Jesús Eduardo González Ruiz, Rafael Quintana Puchol,\* Alejandro Rodríguez Cristo\*\* y Alejandro Duffus Scout.\*

Departamento de Investigación y Desarrollo. Dirección de Química, Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25 y Calle 158, Playa, Ciudad de La Habana. Correo electrónico: [jesus.gonzalez@cnic.edu.cu](mailto:jesus.gonzalez@cnic.edu.cu). \*Centro de Investigaciones de Soldadura, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas \*\*Planta Mecánica, Cuba.

Recibido: 14 de octubre de 2008. Aceptado: 2 de julio de 2009.

Palabras clave: cromita, carburo de cromo, cromado difusivo, recubrimiento, mezcla de polvos.  
Key words: chromite, chromium carbide, coatings, chromizing, pack cementation.

**RESUMEN.** Las materias primas tradicionalmente utilizadas como fuentes portadoras de cromo (ferrocromo, cromo en polvo y óxido de cromo) en procesos de cromado difusivo presentan un elevado costo y en el caso del ferrocromo, dificultades para su trituración. En el trabajo se realiza una evaluación del efecto que posee el uso de los productos de la reducción aluminotérmica de un concentrado cromífero sobre las características y propiedades de recubrimientos difusivos de carburos complejos de cromo. Para evaluar los recubrimientos se utilizaron ensayos de Microscopía Óptica, Microdureometría, Difracción de Rayos X y Energía Dispersiva de Rayos X. Se determinó que la aplicación de tratamientos difusivos empleando un régimen de tratamiento de 1 000 °C – 4 h permite obtener recubrimientos de carburos complejos de cromo en los tres sustratos investigados (acero AISI 1055, acero para herramientas W108 y un hierro fundido gris). Las capas obtenidas no difieren por su morfología de las reportadas en trabajos precedentes y se caracterizan por poseer similar microdureza, así como espesores análogos o superiores a los alcanzados empleando fuentes portadoras de cromo convencionales en los procesos de cromado difusivo. Los recubrimientos también se destacan por sus elevados contenidos de cromo (entre 65 y 71 % en el caso del acero AISI 1055). Además, se comprobó que las mezclas elaboradas con los productos de la reducción del concentrado cromífero poseen la capacidad de aportar el cromo necesario para el normal desarrollo del proceso difusivo y que tienen una durabilidad, en las condiciones experimentales utilizadas, de al menos cuatro procesos sin necesidad de su reactivación.

**ABSTRACT.** The raw materials traditionally used as sources of chromium carriers (ferrochromium, chromium oxide and chromium powder) in application chromizing processes present a high price and some difficulties for ferrochromium grinding. In this work there is an assessment of the effect that has the use of the products of a reduction aluminothermic chromium concentrate on the characteristics and properties of diffusive chromium carbide complex coatings. To assess the coatings optical microscopy, micro – hardness test, Ray - X diffractometry and Energy Dispersive Ray - X Spectroscopy was used. It has determined that the implementation of diffusive treatments using a treatment regimen of 1 000 °C – 4 h giving complex carbides chromium coatings in three substrates researched (AISI 1055 steel, W108 tool steel and grey cast iron). The layers do not differ by their morphology of those reported in previous work and are characterized as having similar levels of microhardness and similar or high thicknesses that achieved using conventional sources carrying chromium in chromizing. Also coatings are highlighted by high contents of chrome that possess (among 65 and 71 % for steel AISI 1055). In addition, it was found that mixtures of products made with the reduction of chromium concentrate possess the ability to make chromium necessary for the normal development diffusive process with a durability of at least four processes without the need for its revival, for the experimental conditions used.

## INTRODUCCIÓN

Los recubrimientos difusivos de cromo se utilizan para resolver problemas de durabilidad en elementos de máquina sometidos a la acción de algunos medios corrosivos y al desgaste en sus diferentes formas.<sup>1-4</sup> Generalmente el proceso de cromado difusivo se aplica mediante deposición química o física de vapor, medio líquido, pastas o suspensiones y mezcla de polvos.<sup>1-11</sup>

No obstante, al incuestionable desarrollo que se ha alcanzado en los métodos de deposición química y física de vapor, el método de mezcla de polvos no ha perdido su vigencia para la aplicación de procesos de cromado

difusivo, debido a que el monto de la inversión inicial en equipos resulta sustancialmente inferior al necesario en la mayoría de los métodos antes descritos. Su uso, también se encuentra potenciado por la posibilidad de depositar cromo simultáneamente con silicio, boro, titanio, etc.,<sup>3,12-16</sup> permitiendo mejorar significativamente el comportamiento de los recubrimientos resultantes ante la acción del desgaste, la corrosión y la oxidación a elevadas temperaturas. Además, este método de tratamiento se caracteriza por la elevada adherencia de sus recubrimientos a los sustratos, lo que posibilita que las capas no se desprendan al ser sometidas a elevadas

solicitaciones mecánicas. Esta propiedad se encuentra vinculada a la temperatura empleada para la obtención del recubrimiento (generalmente en el intervalo comprendido entre 900 y 1 100 °C) y a la presencia en algunos aceros de una zona de transición rica en cromo.<sup>3,17,18</sup>

En la escasa utilización del método de mezclas de polvos a escala industrial han gravitado negativamente, entre otros factores, los elevados costos de las materias primas y aspectos tecnológicos, tales como dificultades para la trituration del ferrocromo de bajo contenido de carbono y la necesidad de mezclar al portador de cromo con elementos que eviten su sinterización durante la etapa difusiva.<sup>17</sup>

Los factores antes referidos justifican la búsqueda de fuentes alternativas de materias primas portadoras de cromo. En la naturaleza, en forma de menas, existen considerables reservas de cromo, muchas de las cuales se explotan para distintos fines.<sup>19-23</sup> En las cromitas el cromo se encuentra en forma de óxidos complejos comúnmente conocidos como cromoespinelas, en los que aparece combinado con el oxígeno y con hierro, aluminio y magnesio.<sup>21-23</sup> Los concentrados cromíferos también contienen silicatos de magnesio.<sup>17,19</sup>

En Cuba existen importantes yacimientos de mineral de cromo, ubicados, fundamentalmente, en el norte de las antiguas provincias orientales. Dentro de los yacimientos cubanos de mineral de cromo se destaca "Merceditas" por las considerables reservas que posee.<sup>17</sup> La utilización de los minerales de cromo en procesos de cromado difusivo puede repercutir en una reducción de los costos por concepto de materias primas en alrededor de 10 veces.<sup>17</sup>

Al cromar por difusión aceros con contenidos de carbono superiores al 0,2 % o hierros fundidos, aparecen fases de carburos en forma de una capa uniforme en la superficie de las muestras sometidas al tratamiento.<sup>3,18</sup> En los recubrimientos se crea una mezcla de las fases (Cr, Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> y (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>,<sup>3,17,24</sup> generando variaciones significativas en las propiedades de la capa y en su comportamiento frente a diferentes medios agresivos.<sup>2,3,12</sup>

El objetivo central del trabajo consistió en evaluar el uso de los productos de la reducción de un concentrado cromífero como sustituto de las fuentes tradicionalmente utilizadas como portadores de cromo en los procesos de cromado difusivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

Se utilizó un concentrado cromífero perteneciente al yacimiento "Merceditas", con una composición química, según reportes previos,<sup>25,26</sup> en la que se destaca la presencia de cromo, hierro, silicio, magnesio, aluminio y de calcio. Las fases que componen el concentrado cromífero también fueron reportadas en trabajos previos.<sup>17,19,26</sup>

Mediante un proceso de torneado se confeccionaron 20 cilindros de diámetro 25 mm X 2 mm de espesor. Las muestras a emplearse como sustrato de los recubrimientos se elaboraron de los aceros AISI 1055 y W108 y de un hierro fundido laminar con matriz perlítica (Tabla 1).

### Proceso de reducción del concentrado cromífero

El concentrado cromífero fue sometido a una reducción aluminotérmica empleando los parámetros siguientes: temperatura = 950 °C, tiempo = 4 h, diámetro medio de las partículas del concentrado = 55 μm (variante D de trabajo recientemente publicado).<sup>25</sup> El proceso se desarrolló en un contenedor aislado del medio exterior mediante un cierre compuesto por arcilla refractaria y silicato de sodio. En la confección de las mezclas se utili-

zó el 95 % del contenido de aluminio en forma de polvo que permite establecer una relación estequiométrica con los óxidos complejos de cromo, hierro y silicio.

### Composición de las mezclas saturantes

Se elaboraron dos mezclas saturantes a partir de los productos de la reducción del concentrado cromífero estudiado (Tabla 2). El contenido de cromo en la mezcla No. 2 se incrementó mediante la adición de ferrocromo de bajo contenido de carbono (C < 1 % y ≈ 75 % de Cr), mientras que para activar el proceso difusivo se utilizó 1 % de NH<sub>4</sub>Cl.

### Equipos y procesos

La calcinación, el proceso de reducción del concentrado cromífero y los experimentos de saturación por difusión se realizaron en un horno de cámara de fabricación rusa, del tipo CHO-3.6.2/10M1, con potencia de calentamiento de 14 kW, 440 V, temperatura de trabajo 1 000 °C y sistema de regulación térmico automático con precisión en las mediciones de la temperatura de ± 5 °C.

Los productos de la reducción aluminotérmica del concentrado fueron sometidos a un proceso de trituration manual y posteriormente, tamizados en un vibrador modelo 029 - T4 de fabricación rusa, empleando para ello un juego de tamices (GOST): 200, 160, 100, 63, 50 μm. El proceso de trituration de las partículas mayores se repitió hasta que todo el material pasó por el tamiz de 200 μm. El diámetro medio de las partículas se calculó empleando un procedimiento desarrollado por González Ruiz.<sup>17</sup>

Para la ejecución de los ensayos micrográficos se utilizó un microdurómetro de fabricación japonesa marca Shimadzu. En la realización de los ensayos de microdureza, se usó una carga de 20 g y al menos dos muestras por cada sustrato tratado, a las que se les realizaron, al menos diez mediciones de este parámetro y de su espesor de capa. Los resultados del espesor de capa fueron sometidos a un procesamiento estadístico con la ayuda del paquete de programas STATGRAPHICS V. 5.1 empleando un 95 % de confiabilidad.

Los ensayos para determinar las fases presentes en la capa se realizaron en un equipo de difracción de Rayos X marca Phillips PW 1218, con radiación CuK<sub>α</sub> 1 (λ = 1,540 6 Å) filtrada con Ni, corriente de 30 mA, voltaje 40 kV y un rango angular (2θ) entre 4 y 100°. Método de focalización según Bragg - Brentano.

La composición química puntual en la sección transversal de la capa de carburos, se determinó mediante Energía Dispersiva de Rayos X (EDX) en un microscopio electrónico de barrido. La composición química de los aceros empleados como sustrato se obtuvo mediante el método espectral, empleando para ello un analizador de metales modelo Spectrolab de la firma Spectro. A cada material analizado se le realizaron al menos tres ensayos, tomando el valor medio de cada elemento constituyente. El contenido de carbono y de azufre presente en el hierro fundido utilizado como sustrato en la investigación fue determinado empleando el método gasovolumétrico.

### Procedimiento empleado para obtener los recubrimientos

Los procesos difusivos fueron aplicados mediante la variante por separado del método aluminotérmico. El proceso se desarrolló en un contenedor similar al utilizado durante el proceso de reducción del mineral de cromo, colocando las muestras a recubrir en su interior de tal forma que la mezcla saturante las cubrió uniformemente. El contenedor fue tapado y posteriormente

**Tabla 1.** Composición química de los materiales utilizados como sustratos.

Sustrato	C	Si	Mn	Contenido			
				Cr (%)	Ni	S	P
AISI 1055	0,54	0,3	0,65	0,06	0,08	0,027	0,008
W108	0,76	0,38	0,2	0,19	0,05	0,005	0,004
Hierro fundido	3,0	2,35	1,02	0,14	0,17	0,08	0,222

**Tabla 2.** Composición de las mezclas saturantes empleadas en los experimentos.

No.	Composición
1	99 % [85 % de cromita + 15 % de aluminio] + 1 % de $\text{NH}_4\text{Cl}$
2	99 % [71 % de cromita + 12 % de aluminio + 17 % de $\text{FeCr}$ ] + 1 % de $\text{NH}_4\text{Cl}$

sellado con una mezcla de arcilla refractaria y silicato de sodio, luego, se introdujo en un horno de cámara a 580 °C y se mantuvo en estas condiciones durante una hora. A continuación, se elevó la temperatura hasta 1 000 °C, se realizó una exposición isotérmica de cuatro horas y al concluir el proceso difusivo se efectuó su enfriamiento al aire.

Además, con el objetivo de disponer de datos adicionales que posibilitaran evaluar la capacidad de aportar cromo de la mezcla no convencional (No. 1), se le aplicó un recocido de difusión (1 000 °C - 4 h) a capas de cromo (con un espesor de alrededor de 70  $\mu\text{m}$ ) electrodepositadas sobre acero AISI 1055. La evaluación se realizó a partir de la comparación de los espesores de la zona constituida por carburos obtenida con ambas variantes de tratamiento difusivo.

La capacidad de utilizar reiteradamente la mezcla no convencional (No. 1) se evaluó a partir de la aplicación de cuatro tratamientos consecutivos con un régimen de exposición 1 000 °C - 8 h. La mezcla fue reactivada antes de cada reutilización adicionándole 1 % de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

## RESULTADOS

### Trituración y análisis granulométrico de los productos de la reducción del concentrado

La mezcla aluminotérmica se sinterizó como resultado del proceso de reducción del concentrado del mineral de cromo,<sup>25</sup> aspecto que hizo necesaria la aplicación de un proceso de trituración con el objetivo de disminuir las dimensiones de las partículas y con ello mejorar su reactividad en presencia de haluros (activador del proceso de saturación por difusión). Después de triturados, los productos de la reducción fueron sometidos a un proceso de tamizado, obteniéndose la distribución granulométrica siguiente: < 50  $\mu\text{m}$  = 21 %, 50 a 63  $\mu\text{m}$  = 3 %, 63 a 100  $\mu\text{m}$  = 32,3 %, 100 a 160  $\mu\text{m}$  = 31,3 % y 160 a 200  $\mu\text{m}$  = 12,4 %, con un diámetro medio = 93  $\mu\text{m}$ .

### Caracterización de los materiales empleados en calidad de sustrato

Los ensayos de laboratorio corroboraron que los materiales seleccionados para cumplir con la función de sustratos poseen una composición química acorde con lo expuesto en la tabla 1.

Adicionalmente, al hierro fundido empleado como sustrato, se le realizó una micrografía con el objetivo de determinar su microestructura y la distribución y cantidad de grafito que presentaba (Tabla 3).

### Caracterización de los recubrimientos

En la región exterior de los aceros y del hierro fundido recubiertos empleando la mezcla 1, se obtuvo una capa uniforme de color blanco (Fig. 1), con espesores promedio de (12,6  $\pm$  0,8)  $\mu\text{m}$  en el acero AISI 1055, de (17,8  $\pm$  0,5)  $\mu\text{m}$  en el acero W108 y de (23  $\pm$  0,9)  $\mu\text{m}$  en el hierro fundido. Los valores máximos de microdureza en la sección transversal de los recubrimientos no variaron al comparar los tres sustratos estudiados [alrededor de (15 700  $\pm$  1 000) MPa] (Fig. 2). Es de significar que resultaron similares a los reportados para capas difusivas de carburos de cromo obtenidas a partir del uso de fuentes portadoras de cromo tradicionales.<sup>2,3,12</sup>

El ensayo de EDX permitió determinar que el cromo es el principal constituyente del recubrimiento (71 % en la zona externa del recubrimiento y 65 % en el límite con la zona de transición) (Fig. 3). Este resultado demostró que es posible transferir cromo desde la mezcla saturante hasta las superficies tratadas y que resulta viable obtener elevados contenidos de dicho elemento en los recubrimientos a partir del uso de los productos de la reducción aluminotérmica del concentrado cromífero estudiado.

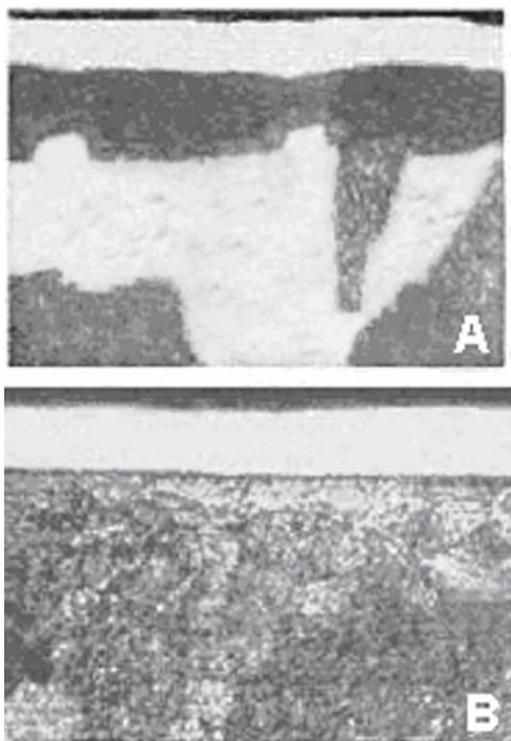
En la superficie del acero AISI 1055 tratado en la mezcla 1, los ensayos de DRX revelaron la presencia de las fases de carburos complejos (Cr, Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> y (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> en los picos más intensos (Fig. 4). Este resultado coincidió con los reportes de Mazorra para el cromado difusivo de un acero con 0,8 % de carbono mediante la variante aluminotérmica.<sup>24</sup>

### Evaluación del efecto de la adición de ferrocromo a la mezcla saturante

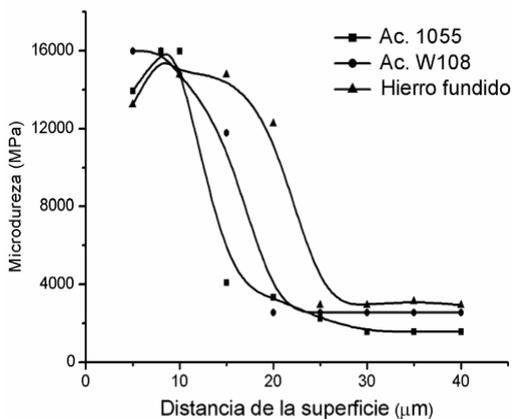
La ejecución de experimentos empleando las mezclas 1 y 2 y un régimen de exposición isotérmico de 1 000 °C - 4 h, permitió obtener en el acero AISI 1055 recubrimientos de carburos con un espesor de (12,6  $\pm$  0,8) mm y de (10,6  $\pm$  0,9) mm, respectivamente. Estos resultados

**Tabla 3.** Características del hierro fundido utilizado en los experimentos.

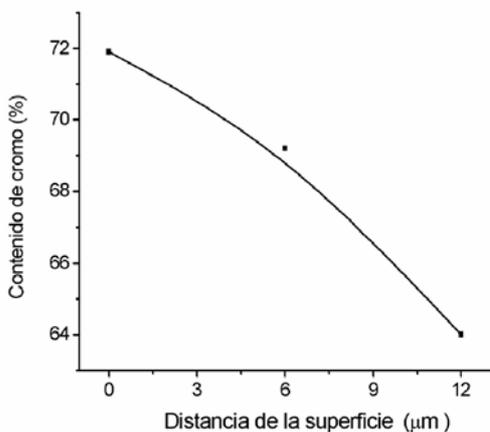
Largo de las inclusiones de grafito	Distribución del grafito	Cantidad de grafito	Estructura
60 a 120 $\mu\text{m}$	Uniforme	5 a 8 %	Predominantemente perlítica



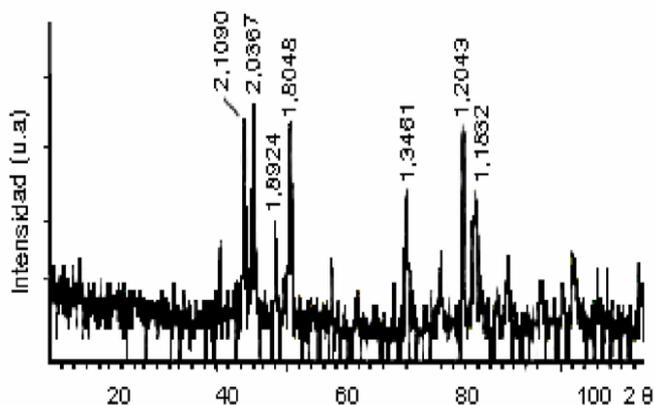
**Fig. 1.** Micrografía de la sección transversal de los aceros 1055 (A) y W108 (B) recubiertos con el empleo de la mezcla 1 y un régimen de exposición de 1 000 °C - 4 h, X 550.



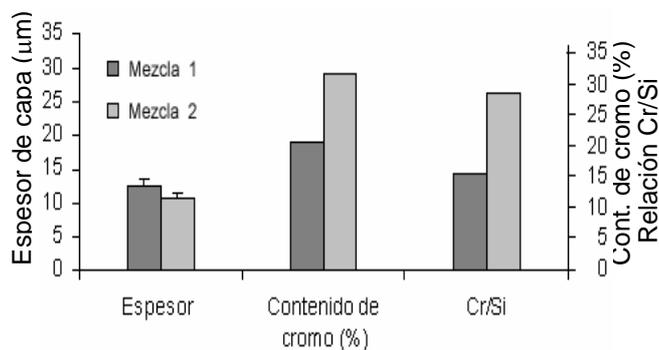
**Fig. 2.** Perfil de microdureza de los aceros AISI 1055 y W108 y de un hierro fundido recubiertos empleando la mezcla 1 y un régimen de exposición de 1 000 °C - 4 h.



**Fig. 3.** Contenido de cromo (at.) en la sección transversal de capa de carburos en el acero AISI 1055 recubierto empleando la mezcla 1 y un régimen de exposición de 1 000 °C - 4 h.



**Fig. 4.** Difractograma de la superficie del acero AISI 1055 recubierto empleando la mezcla 1 y un régimen de exposición de 1 000 °C - 4 h.



**Fig. 5.** Efecto del contenido de cromo en la mezcla saturante sobre el espesor de los recubrimientos de carburos en el acero AISI 1055. Régimen de exposición 1 000 °C - 4 h.

permitieron determinar que el aumento del contenido de cromo en la mezcla saturante desde 19 hasta 29 % no generó variaciones estadísticamente significativas en el espesor de la capa de carburos (Fig. 5), comportamiento similar al obtenido empleando regímenes de exposición de 1 000 °C - 8 h, 900 °C - 4 h y 900 °C - 8 h.<sup>17</sup>

**Comparación de las capas obtenidas con recubrimientos resultantes del recocido de difusión a capas de cromo electrodepositadas**

Las capas de cromo electrodepositadas sobre el acero AISI 1055, después de ser sometidas a un recocido de difusión con una exposición isotérmica 1 000 °C - 4 h, presentan un recubrimiento difusivo en la zona adyacente al sustrato, resultado similar al reportado por Wang.<sup>11</sup> Dicho recubrimiento se forma como resultado de la difusión del carbono presente en el acero AISI 1055 hacia la capa cromada por electrodeposición. La zona de la capa ocupada por carburos alcanzó dimensiones medias de (12,8 ± 0,5) μm (Fig. 6) y microdureza máxima de aproximadamente 15 700 MPa. En el límite del recubrimiento de carburos con el sustrato se observó la zona de transición, la que resulta típica de aceros con contenido medio de carbono cromados por difusión.

En la sección transversal de las capas de carburos formadas a partir de la electrodeposición de cromo + recocido de difusión se obtuvieron valores máximos de microdureza similares a los alcanzados utilizando la mezcla 1 [(15 700 ± 1 000) MPa en ambos casos, para un régimen de exposición de 1 000 °C - 4 h]. Mientras que al comparar los espesores de los recubrimientos de carburos obtenidos con ambas variantes de tratamiento (Fig. 6) no se apreciaron diferencias estadísticamente significativas (p < 0,05).

### Uso reiterado de la mezcla saturante desarrollada

La utilización reiterada de la mezcla 1 en la aplicación de procesos de cromado difusivo al acero AISI 1055, no generó variaciones estadísticamente significativas en los espesores de las capas de carburos al comparar los resultados de los procesos 1 y 4 (8 y 32 h de uso de la mezcla). En general, se observó un ligero incremento en las dimensiones de este parámetro como resultado de la aplicación de los procesos dos y tres (16 y 24 h de uso) (Fig. 7).

## DISCUSIÓN

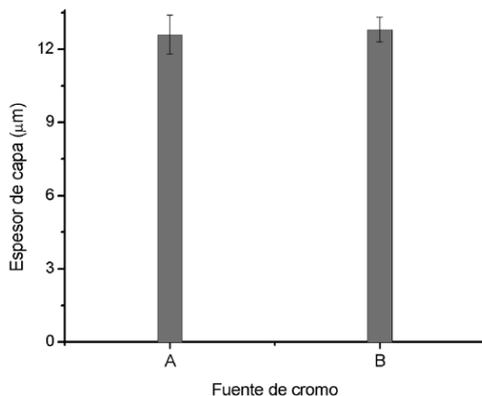
### Comparación de los recubrimientos obtenidos con revestimientos anteriormente reportados

Las capas difusivas de carburos obtenidas a partir del uso de la mezcla No. 1, en los sustratos investigados, poseen una morfología (Fig. 1) y valores de microdureza (Fig. 2) similares a los reportados por diferentes autores para procesos que emplean ferrocromo u otras fuentes portadoras de cromo convencionales.<sup>2,3,12</sup>

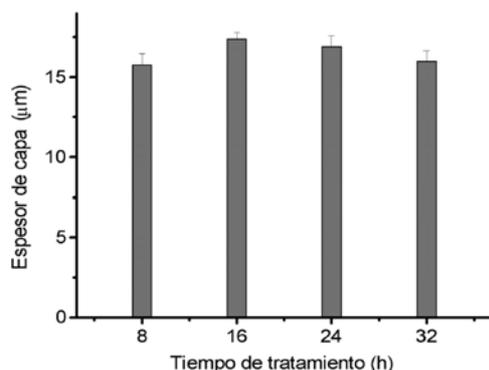
La aplicación de procesos empleando la mezcla No. 1 redundó en incrementos del espesor de las capas de carburos en comparación con resultados reportados en la bibliografía,<sup>27</sup> en niveles de 1,2 veces para el acero W108 y de 1,4 veces para el hierro fundido gris (Fig. 8). Mientras que resultaron similares a los reportados por García para el tratamiento de muestras de hierro gris empleando mezclas de cromado con adiciones de silicio.<sup>28</sup>

### Valoración de los resultados experimentales

El empleo de los productos de la reducción aluminotérmica del concentrado cromífero estudiado como materia prima en procesos de cromado difusivo



**Fig. 6.** Influencia de la fuente portadora de cromo sobre el espesor de la zona ocupada por carburos en el acero AISI 1055. A Mezcla 1. B Capa electrodepositada. Régimen de exposición: 1 000 °C - 4 h.



**Fig. 7.** Influencia del tiempo de utilización de la mezcla saturante en el espesor de la capa de carburos. Sustrato: acero AISI 1055. Mezcla 1. Temperatura de exposición: 1 000 °C.

de aceros con contenido medio de carbono, permitió obtener recubrimientos con una composición química y de fases similar a la reportada para procesos difusivos en los que se realiza la deposición simultánea del cromo con el silicio.<sup>3</sup> Es de significar que el contenido de cromo en las capas de carburos resultó inferior a lo reportado para los recubrimientos depositados mediante los métodos tradicionales.

El contenido máximo de cromo alcanzado en las capas de carburos del acero AISI 1055 ( $\approx 71\%$ ), resultó inferior en 7 a 19 % a los resultados reportados por Lyakhovich para recubrimientos depositados a partir de materias primas tradicionalmente utilizadas como fuentes portadoras de cromo.<sup>3</sup> No obstante, fue similar a lo reportado por dicho autor para recubrimientos en los que aparece el silicio como uno de sus constituyentes.<sup>3</sup> Ello permite relacionar la disminución del contenido de cromo en la capa de carburos con la presencia de silicio en la mezcla saturante.

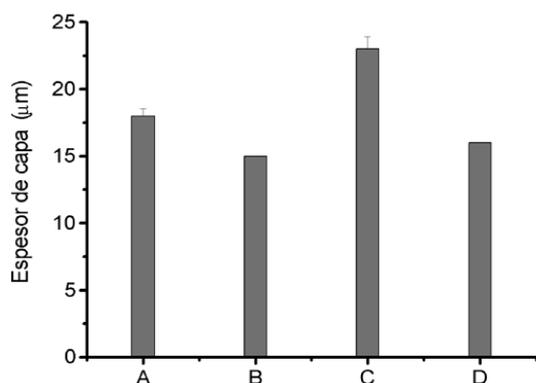
La aplicación del recubrimiento a partir de la mezcla estudiada (No. 1), redundó en apreciables variaciones en la composición química de las superficies tratadas. En el caso del acero AISI 1055 se incrementó en más de 100 veces el contenido de cromo en la zona externa de la capa de carburos en comparación con los valores que este acero posee antes de aplicarle el tratamiento difusivo y en alrededor de cuatro veces en comparación con los aceros altamente aleados.

La variante tecnológica desarrollada permitió obtener recubrimientos de carburos complejos de cromo [(Cr, Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> y (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>]. No obstante, se observaron algunas desviaciones en la intensidad de los picos que identifican a la fase (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> en comparación con los valores reportados para ella, lo cual pudiera encontrarse vinculado a la presencia de átomos de silicio en la red cristalina de los carburos complejos o al efecto del sustrato. Dentro de las fases presentadas por la capa no se revelaron los nitruros complejos de cromo - hierro, cuya presencia ha sido encontrada en capas cromadas mediante la variante de mezcla de polvos.<sup>3,5</sup> Este comportamiento debe encontrarse vinculado a que el nitrógeno procedente de la descomposición del NH<sub>4</sub>Cl se evacuó del contenedor.

En general, los espesores de los recubrimientos de carburos resultaron iguales y en algunos casos ligeramente superiores a los alcanzados empleando mezclas convencionales (Fig. 8). La obtención de espesores similares en la capa de carburos al emplear las composiciones de mezcla 1 y 2, (sin y con adiciones de ferrocromo), permitió concluir que resulta posible obviar la adición de un portador de cromo a las mezclas saturantes, lo cual repercute en la disminución de los costos por concepto de materias primas.

Además, la eficacia de la mezcla desarrollada (No. 1) quedó corroborada al obtener similares espesores en los recubrimientos de carburos que cuando se utilizaron capas electrodepositadas como fuente portadora de cromo. Este resultado es de gran importancia porque dichos recubrimientos garantizan la presencia de elevado contenido de cromo en la superficie a saturar al inicio del proceso difusivo (teóricamente alcanzan el 100 %) y como es conocido la difusión es un fenómeno que depende, entre otros factores, de la concentración del elemento que difunde.<sup>12</sup> Ello permite concluir que para un régimen de saturación de 1 000 °C - 4 h, la mezcla 1 es capaz de aportar el cromo necesario para el óptimo desarrollo del proceso, siendo la difusión la etapa limitante del proceso.

La elevada capacidad mostrada por la mezcla 1 de aportar cromo se encuentra vinculada a la combinación de una adecuada utilización de las potencialidades que



**Fig. 8.** Efecto de la de la mezcla saturante sobre el espesor de capas de carburos de cromo. A, B Acero con 0,8 % de carbono. C, D Hierro fundido gris. A, C Tratados con la mezcla 1, régimen de exposición  $1\ 000\ ^\circ\text{C} - 4\ \text{h}$ . B, D Tratados con mezcla compuesta por: [60 % ferrocromo + 40 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ] + 1 % de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , régimen de exposición:  $1\ 000\ ^\circ\text{C} - 4\ \text{h}$ .

brindan los productos de la reducción aluminotérmica del concentrado estudiado (contenido de aditivo inerte en la mezcla saturante, relación cromo/silicio usada y a la ausencia de carbono en la mezcla) con la composición de fases de los productos de la reducción empleados en la confección de la mezcla saturante (ausencia de aluminio en estado elemental, fases activadoras presentes y contenido de estas), aspectos que inciden directamente en el coeficiente de transferencia de masa del cromo desde la mezcla saturante hacia la superficie a recubrir. Otro aspecto que pudiera influir favorablemente en el espesor de los recubrimientos de carburos es la disminución que se produce del contenido de cromo en el recubrimiento.

## CONCLUSIONES

Se demostró que resulta posible emplear los productos de la reducción aluminotérmica del concentrado cromífero estudiado como fuente portadora de cromo en procesos de cromado difusivo mediante el método de mezcla de polvos. La variante tecnológica desarrollada permitió obtener recubrimientos de carburos complejos de cromo con una composición química y una microdureza similares a las reportadas para procesos de deposición simultánea de cromo y de silicio. Además, se determinó que es posible usar reiteradamente la mezcla saturante sin necesidad de adicionarle cromo durante al menos cuatro procesos.

También se comprobó que los espesores de los recubrimientos de carburos obtenidos en el hierro fundido gris y en los aceros AISI 1055 y W108, resultaron similares y en algunos casos, ligeramente superiores a los alcanzados usando las mezclas tradicionales de cromado difusivo.

Además, la mezcla desarrollada a partir de los productos de la reducción del concentrado cromífero estudiado (No. 1) permite disminuir los costos del proceso de recubrimiento por sustitución de materias primas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Taktak S, Ulker S, Gunes I. High temperature wear and friction properties of duplex surface treated bearing steels. *Surf. Coat. Tech.* 2008;202(14):3367-77.
- Kempster A. Recent developments in chemical vapor deposition. (Consultado: 26 de junio de 2008). Available: [http://www.btinternet.com/~cotechnology/surfaceweb/swebjournal/spage\\_files/kempster.htm](http://www.btinternet.com/~cotechnology/surfaceweb/swebjournal/spage_files/kempster.htm).
- Lyakhovich LS. Manual del tratamiento termoquímico de los metales y aleaciones. Moscú: Mir: 1981.
- Bettridge D, inventor. Metallic article having a protective coating and a method of applying a protective coating to a metallic article. US Patent 6,444,332, 2002.
- Lee JW, Duh JG. Evaluation of microstructures and mechanical properties of chromized steels with different carbon contents. *Surf. Coat. Tech.* 2004;177:525-31.
- Wei CY, Chen F'S. Thermoreactive deposition/diffusion coating of chromium carbide by contact-free method. *Mater. Chem. Phys.* 2005;91(1):192-9.
- Chen C, Zhou C, Gong S, Li S, Zhang Y, Xu H. Deposition of Cr-modified silicide coatings on Nb-Si system intermetallics. *Intermetallics.* 2007;15(5):805-9.
- Cho KH, Lee WG, Lee SB, Jang H. Corrosion resistance of chromized 316L stainless steel for PEMFC bipolar plates. *J. Power Sources.* 2008;178(2):671-6.
- Lee JW, Wang HC, Li JL, Lin CC. Tribological properties evaluation of AISI 1095 steel chromized at different temperatures. *Surf. Coat. Tech.* 2004;188:550-5.
- Zhou YB, Chen H, Zhang H, Wang Y. Preparation and oxidation of an  $\text{Y}_2\text{O}_3$  - dispersed chromizing coating by pack cementation at  $800\ ^\circ\text{C}$ . *Vacuum.* 2008;82(8):748-53.
- Wang L, Kim DS, Nam KS, Kim M, Kwon SC. Microstructure of electroplated hard chromium coatings after plasma nitrocarburizing. *Surf. Coat. Tech.* 2005;190(2):151-4.
- Lajtni Y, Arzamazov B. Tratamiento químico térmico de los metales. Moscú: MIR: 1987;p.283-99.
- Rapp R. The codeposition of elements in diffusion coating by pack cementation method. *Mater High Temp.* 1993;11:1-4.
- Rapp RA, Harper MA, inventors; Codeposition of chromium and silicon diffusion coatings in Fe-base alloys using pack cementation. US Patent 5,364,659, 1994.
- Lee SY, Kim GS, Kim BS. Mechanical properties of duplex layer formed on AISI 403 stainless steel by chromizing and boronizing treatment. *Surf. Coat. Tech.* 2004; 177:178-84.
- Karpman, MG. Protective coating for dies and die-castings molds for non ferrous casting. *Met. Sci. Heat Treat.* 1978;4:794-9.
- González JE. Obtención de recubrimientos difusivos de carburos complejos de cromo en aleaciones hierro-carbono a partir de cromita refractaria. [tesis en opción al título de doctor en Ciencias Técnicas]. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas; octubre 2001.
- Jorochoilov V, Gordon J. Teoría y tecnología del tratamiento superficial del acero. La Habana: Ciencia y Técnica: 1972;p.205-15.
- Perdomo L. Obtención de fundentes aglomerado para el recargue a partir de los productos de la reducción de cromita refractaria cubana. [tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas]. Santa Clara, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas; 2000.
- Proenza JA, Gervilla F, Melgarejo JC, Vera O, Alfonso P, Fallick A. Genesis of sulfide-rich chromite ores by the interaction between chromitite and pegmatitic olivine-norite dikes in the Potosi Mine (Moa-Baracoa ophiolitic massif, eastern Cuba). *Miner. Deposita.* 2001;36(7):658-69.
- De Melo M. Cromo. (Consultado: 21 de diciembre de 2006). Disponible: <http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral/2001/cromo.pdf>.
- Weber P, Hurman E. The reduction of chromite in the presence of silica flux. *Miner. Eng.* 2006;19(3):318-24.
- Alujas A, Quintana R, González JE, Yee H. Concentrado cromífero del yacimiento Merceditas, una fuente alternativa para recubrimientos cromo-difusivos en aceros. *Rev. LatinAm. Met. Mat.* 2003; 23(2): 62-8.
- Mazorra JA. Empleo de materiales ricos en óxido de cromo III en las mezclas sólidas para el cromado difusivo. *Técnica Popular.* 1987;2 (19):34-9.
- González JE, Quintana R, Arniella A, Alujas A, y Perdomo L. Evaluación del proceso de reducción aluminotérmica de un concentrado cromífero del yacimiento Merceditas. *Revista CENIC Ciencias Químicas.* 2008;39(1):23-8.
- González JE, Quintana R, Arniella A, Alujas A, Perdomo L. Caracterización química estructural de un concentrado cromífero procedente del yacimiento Merceditas y valoración de sus potencialidades como materia prima en tratamientos difusivos. *Revista CENIC Ciencias Químicas.* 2007;38(2):325-9.
- García A, Ivanovich V. Elevación de la calidad superficial de las piezas de hierro fundido mediante difusión. *Rev. Construcción de Maquinaria.* 1983;2:19-22.
- García A, Castello J. El cromosilicado contra la corrosión. *Rev. Construcción de Maquinaria.* 1987;6:54-6.