

## EFECTO DEL CONTENIDO DE CARBONO SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO DE RECUBRIMIENTOS DE CrC DEPOSITADOS POR PULVERIZACIÓN CATÓDICA MAGNETRÓN

MARYORY ASTRID GÓMEZ\*  
ARTURO LOUSA\*\*  
JOAN ESTEVE\*\*\*

### RESUMEN

Los recubrimientos de carburo de cromo sobre acero son un buen candidato para aplicaciones de conformado y moldes de inyección. La alta resistencia mecánica, resistencia química y estabilidad a alta temperatura de la fase  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  pueden ser compatibles con el intenso desgaste abrasivo y la corrosión en tales operaciones de fabricación. En este trabajo se depositaron recubrimientos de CrC por pulverización catódica magnetrón RF, los cuales mostraron contenidos de carbono entre el 25 % y el 58 % por análisis EDS. Los valores de dureza de estos recubrimientos fueron entre 15 y 24 GPa; los más duros de las muestras tuvieron contenido de carbono en el rango de 39-53 %. El desgaste abrasivo de los recubrimientos se evaluó utilizando un equipo de disco abrasivo con polvo de diamante. El volumen de las huellas de abrasión se midió con las imágenes obtenidas en el microscopio interferométrico y además se corroboró con el cálculo del volumen geométrico basado en secciones medidas con el perfilómetro. El comportamiento al desgaste abrasivo mostró una marcada dependencia con el contenido de carbono. El desgaste abrasivo más bajo se obtuvo para los recubrimientos con el más alto contenido de carbono.

**PALABRAS CLAVE:** desgaste abrasivo; recubrimientos de CrC; pulverización catódica magnetrón RF; composición del CrC.

---

\* Ingeniera Metalúrgica, Universidad de Antioquia; Doctora en Técnicas Instrumentales de la Física y la Ciencia de los Materiales, Universitat de Barcelona. Profesora e investigadora, Grupo de Corrosión y Protección, Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales –CIDEMAT–, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. mgomez@udea.edu.co

\*\* Físico, Ph. D. Profesor Titular. Grup de Ciència i Enginyeria de Superfícies, Universitat de Barcelona. Barcelona, España. alousa@ub.edu

\*\*\* Físico, Químico y Ph. D. Profesor Catedrático. Grup de Ciència i Enginyeria de Superfícies, Universitat de Barcelona. Barcelona, España. joan.esteve@ub.edu

## EFFECT OF THE CARBON CONTENT IN ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF CrC COATINGS DEPOSITED BY MAGNETRON SPUTTERING

### ABSTRACT

Chromium carbide coatings on steel are a good candidate for applications on forming and molding dies. The high mechanical strength, chemical resistance and high temperature stability of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  phase can be compatible with the severe abrasive wear and corrosion found in those manufacture operations. In this work chromium carbide coatings deposited by means of RF magnetron sputtering showed carbon contents between 25 % and 58 % by EDS analysis. Hardness values of these coatings were between 15 and 24 GPa, being the hardest values in the samples with carbon content in the 39-53 % range. The abrasive wear behavior of the coatings was evaluated by using a dimple grinder with diamond powder. The volume of the abrasion craters was measured from the images obtained with the interferometric microscope, and further corroborated by geometrical volume calculation based in profilometer sections that were measured. Abrasive wear behavior showed a marked dependence with carbon content. The lowest abrasive wear was obtained for the coatings with the highest carbon content.

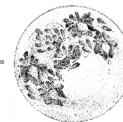
KEY WORDS: abrasive wear; CrC coatings; RF magnetron sputtering; CrC composition.

## EFEITO DO CONTEÚDO DE CARBONO SOBRE A RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO DE RECOBRIMENTOS DE CrC DEPOSITADOS POR PULVERIZAÇÃO CATÓDICA MAGNETRÃO

### RESUMO

Os recobrimentos de carburo de cromo sobre aço são um bom candidato para aplicações de conformado e moldes de injeção. A alta resistência mecânica, resistência química e estabilidade em alta temperatura da fase  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  podem ser compatíveis com o intenso desgaste abrasivo e a corrosão em tais operações de fabricação. Neste trabalho depositaram-se recobrimentos de CrC por pulverização catódica magnetrão RF, os quais mostraram conteúdos de carbono entre 25 % e 58 % por análise EDS. Os valores de dureza destes recobrimentos foram entre 15 e 24 GPa; os mais duros das mostras tiveram conteúdo de carbono na faixa de 39-53 %. O desgaste abrasivo dos recobrimentos avaliou-se utilizando uma equipe de disco abrasivo com pó de diamante. O volume das impressões de abrasão mediu-se com as imagens obtidas no microscópio interferométrico e ademais se corroborou com o cálculo do volume geométrico baseado em seções medidas com o perfilômetro. O comportamento ao desgaste abrasivo mostrou uma marcada dependência com o conteúdo de carbono. O desgaste abrasivo mais baixo obteve-se para os recobrimentos com o mais alto conteúdo de carbono.

PALAVRAS-CÓDIGO: desgaste abrasivo; recobrimentos de CrC; pulverização catódica magnetrão RF; composição do CrC.



## 1. INTRODUCCIÓN

Los carburos de cromo se pueden emplear en recubrimientos resistentes al desgaste y protectores en ambientes corrosivos, lo que hace que sean considerados como un posible reemplazo para los recubrimientos convencionales como el cromo duro electroquímico en la protección de moldes (Wang *et al.*, 1999; Ji *et al.*, 2006). Estos recubrimientos también son útiles para aplicaciones de alta temperatura, para conformado y herramientas de forja, sellos y válvulas para turbinas (Kunrath *et al.*, 1997; Paul *et al.*, 2002). Los carburos de cromo estequiométricos se conocen en tres estructuras cristalinas:  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  en el sistema cúbico,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  y  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  en el sistema ortorrómbico; esta última estructura posee las mejores propiedades mecánicas en cuanto a dureza (Wang *et al.*, 1999).

En los últimos años, se han aumentado los esfuerzos para obtener recubrimientos de carburos de cromo de alta calidad, mediante técnicas de depósito en fase vapor “physical vapor deposition” (PVD) usando pulverización catódica reactiva, evaporación por arco catódico y depósito por láser pulsado (Agarwal, Vankar y Chopra, 1989; Suda *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 1999; Zhang, Lei y Li, 2001; Betts, 2009). Los carburos de cromo con exceso de carbono se han estudiado también para sustituir al carbono amorfo (diamond-like carbon, DLC) como recubrimientos antifricción (Wang *et al.*, 1999; Chang, Wang y Wu, 2002; Chiu *et al.*, 2005).

La abrasión es el mecanismo de desgaste más común, pues se estima que el 50 % de los problemas en la industria se deben a este fenómeno. Este tipo de desgaste llevó a desarrollar equipos tribológicos para simular sus efectos. En estos casos, las condiciones de prueba pueden ser bastante cercanas a las condiciones de trabajo reales y los métodos de prueba pueden ser bien caracterizados y reproducibles. Hoy día la microabrasión es un método de prueba para evaluar el comportamiento al desgaste abrasivo de películas delgadas; existen configuraciones como la de esfera sobre superficie plana, ampliamente utilizada para

evaluar el comportamiento de recubrimientos, usando una pasta abrasiva constituida por una dispersión de micropartículas de SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o diamante en agua destilada (Kassman *et al.*, 1991; Allsopp, Trezona y Hutchings, 1998; Hutchings, 1998; Trezona, Allsopp y Hutchings, 1999; Adachi y Hutchings, 2003; Andrade *et al.*, 2009; Leech y Li, 2011).

Los ensayos de abrasión presentan ventajas debido a que requieren un área pequeña de prueba. En la actualidad, aún es poca la información que se tiene sobre el desempeño de recubrimientos obtenidos por técnicas PVD en pruebas de abrasión de pequeña escala (Batista, Matthews y Godoy, 2001). Por lo tanto, en el presente estudio se compara el desempeño frente al desgaste abrasivo de recubrimientos monocapa de CrC depositados por pulverización catódica magnetron RF y la influencia que tiene el contenido de C de dichos recubrimientos en la resistencia al desgaste abrasivo que con frecuencia se encuentra en aplicaciones industriales, también se relaciona el contenido de carbono con las propiedades mecánicas de los recubrimientos.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Depósito de los recubrimientos

En el presente trabajo se evaluó la resistencia al desgaste abrasivo de recubrimientos monocapa de CrC obtenidos mediante pulverización catódica magnetron RF reactiva. Los recubrimientos fueron depositados a partir de un blanco de cromo metálico de 99,99 % de pureza; los sustratos utilizados fueron obleas de silicio. Para el depósito de las monocapas de CrC, la composición del gas de pulverización fue variada entre 9 y 17 % de  $\text{CH}_4$  en Ar, lo que significó una presión parcial de  $\text{CH}_4$  entre 0,04 y 0,122 Pa. Durante el depósito, la polarización del sustrato fue variada entre 0 y -130 V. Estos recubrimientos mostraron espesores en el rango de 0,5 a 1,7  $\mu\text{m}$ ; en todos los recubrimientos antes del depósito de la monocapa de CrC se depositó una delgada capa de Cr

para mejorar la adhesión. En la tabla 1 se muestran algunas características del depósito y la composición de estos recubrimientos. El contenido de carbono atómico de los recubrimientos fue obtenido mediante análisis EDS (Leica 360, Cambridge Instruments) con 12 keV y 1,5 nA en el haz de electrones.

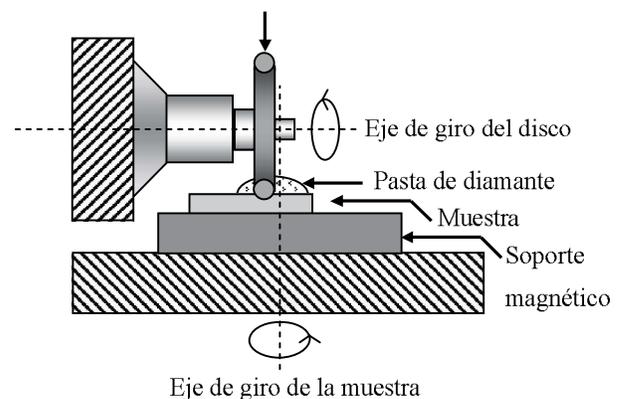
**Tabla 1.** Algunos parámetros de depósito y características de los recubrimientos monocapa de CrC depositados por pulverización catódica magnetron RF reactiva

Muestra	Presión parcial CH <sub>4</sub> (Pa)	C atómico en el recubrimiento (%)	Tasa de crecimiento (μm/h)
CrC01	0,040	25	1,20
CrC02	0,061	34	1,20
CrC03	0,057	35	1,00
CrC04	0,058	37	1,30
CrC05	0,061	39	0,95
CrC06	0,061	39	0,40
CrC07	0,072	40	0,80
CrC08	0,070	41	0,80
CrC09	0,077	41	0,92
CrC10	0,080	41	0,75
CrC11	0,075	41	0,76
CrC12	0,086	42	0,76
CrC13	0,072	46	0,70
CrC14	0,069	49	0,55
CrC15	0,062	49	0,75
CrC16	0,067	49	0,40
CrC17	0,070	49	0,45
CrC18	0,100	50	0,80
CrC19	0,100	52	0,65
CrC20	0,100	53	0,70
CrC21	0,080	54	0,57
CrC22	0,097	54	0,67
CrC23	0,121	54	0,85
CrC24	0,121	55	0,85
CrC25	0,108	56	0,75
CrC26	0,122	57	0,87
CrC27	0,119	58	0,80

## 2.2 Evaluación de las propiedades de los recubrimientos

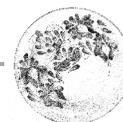
La dureza y el módulo de elasticidad de los recubrimientos se midieron mediante nanoindentación dinámica (Nano Test 550, MicroMaterials Ltd.)

usando un indentador de diamante Berkovich; para calcular la dureza se empleó el método de análisis de Oliver y Pharr (1992). El desgaste abrasivo fue generado en un equipo de disco abrasivo “dimple grinder” (Gatan, modelo 656); en el equipo utilizado el disco abrasivo es de cobre con diámetro de 15 mm y tiene un perfil esférico en el borde de contacto con la muestra. El equipo original tiene el eje de giro de la muestra justo en el contacto de esta con el disco abrasivo, de esta forma la huella de desgaste abrasivo obtenida tiene forma de casquete esférico del mismo diámetro que el disco abrasivo. Se desplazó el punto de apoyo del disco abrasivo a una distancia de 0,4 mm del eje de giro de la muestra, de manera que la huella de abrasión tuviera la forma de un surco toroidal de 0,8 mm de diámetro, como lo ilustra la figura 1.

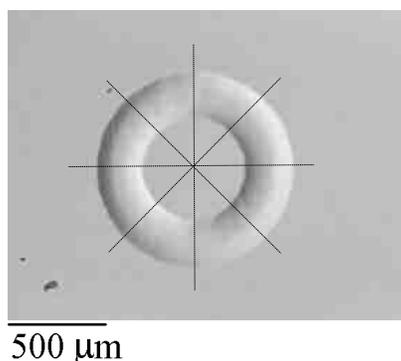


**Figura 1.** Equipo de “disco abrasivo” usado para las pruebas de desgaste

Las pruebas de desgaste abrasivo de los recubrimientos fueron conducidas aplicando una carga normal de 0,4 N, velocidad del disco de cobre de 84 rpm en el contacto con la muestra y duración de 2 min. Para todos los recubrimientos evaluados, las huellas de desgaste abrasivo se obtuvieron con diámetros alrededor de 800 nm y las profundidades no alcanzaron en ningún caso el sustrato. En el equipo utilizado, las muestras también tienen una velocidad de giro muy inferior a la del disco abrasivo. En todas las pruebas realizadas se empleó pasta de diamante de 0,1 μm como cuerpos abrasivos.



Al finalizar las pruebas, la pasta abrasiva remanente fue eliminada mediante limpieza con etanol, y las huellas obtenidas fueron observadas en el microscopio óptico (Carl Zeiss Jena dotado con una cámara CCD Jai Protec 2060), a fin de apreciar su aspecto y valorar que el recubrimiento no hubiera presentado alguna falla de rotura o de adhesión durante los ensayos. Los volúmenes desgastados se midieron en el microscopio interferométrico (Zygo, modelo 3000) y por perfilometría (Dektak 3030), con el fin de corroborar los resultados. La medida de estos volúmenes en el perfilómetro se realizó tomando los perfiles de 8 secciones transversales de cada huella de desgaste, distribuidos uniformemente a lo largo de toda la huella, como lo ilustra la figura 2. Una vez obtenidas las 8 áreas de las secciones transversales de las huellas de desgaste abrasivo, se hizo el promedio y este valor se multiplicó por la longitud de la huella para obtener el volumen desgastado. A partir de los volúmenes de las huellas, las tasas de desgaste abrasivo se calcularon con la ecuación 1.



**Figura 2.** Distribución de las áreas transversales adquiridas en las huellas de desgaste abrasivo mediante perfilometría para estimar el volumen desgastado

$$K = \frac{V}{F \times s} \quad (1)$$

Donde:  $K$  es la tasa de desgaste abrasivo ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )

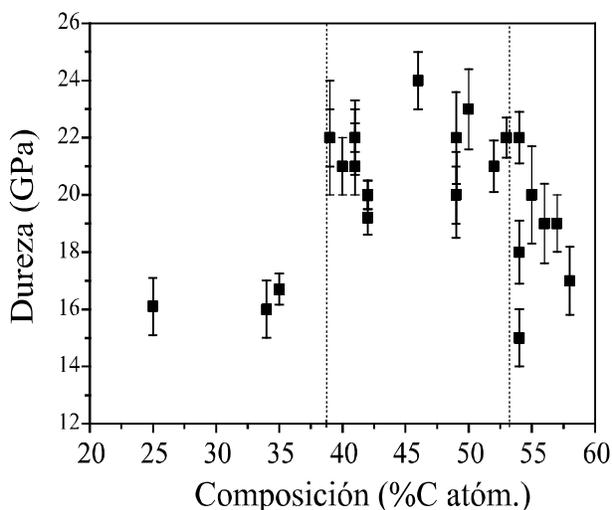
$V$  es el volumen perdido en el ensayo ( $\text{m}^3$ )

$F$  es la carga aplicada (N)

$s$  es la distancia deslizada (m)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

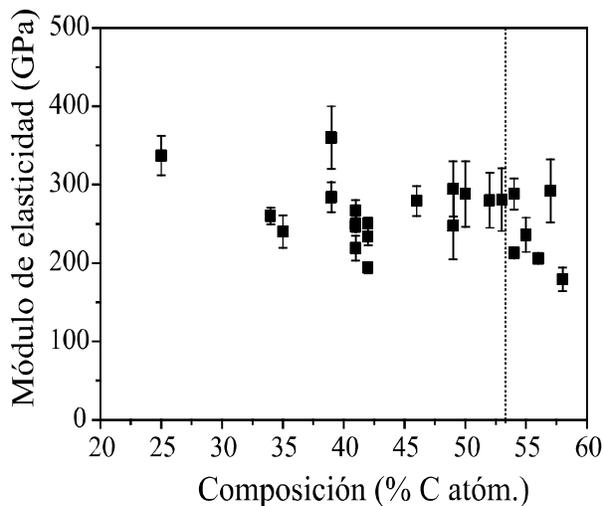
La figura 3 muestra la evolución de la dureza en función del contenido de carbono atómico de los recubrimientos; los valores de dureza variaron entre 15 y 24 GPa. Los recubrimientos con composición subestequiométrica, con contenidos de carbono menores de 40 %, presentaron valores de dureza alrededor de 16 GPa. Las muestras que corresponden al rango de composición delimitado por las líneas punteadas con composición estequiométrica y con exceso de carbono (39 y 53 %) mostraron los más altos valores de dureza (20 a 24 GPa). Respecto a estos valores, la dureza de los recubrimientos con contenidos de carbono mayores de 53 % disminuyó levemente en la medida en que aumentó el contenido de carbono en los recubrimientos.



**Figura 3.** Variación de la dureza superficial de los recubrimientos en función del contenido de carbono atómico. Las líneas punteadas separan los tres rangos de valores de dureza encontrados

La figura 4 presenta los módulos de elasticidad en función del contenido de carbono de los recubrimientos de CrC. Los módulos elásticos de los recubrimientos con composición entre 25 y 53 % de carbono, en su mayoría, presentan módulos bastante similares entre 251 y 281 GPa, excepto las muestras CrC01 (25 % C) y CrC06 (39 % C) que presentan módulos con valores de 337 y 360 GPa respectivamente.

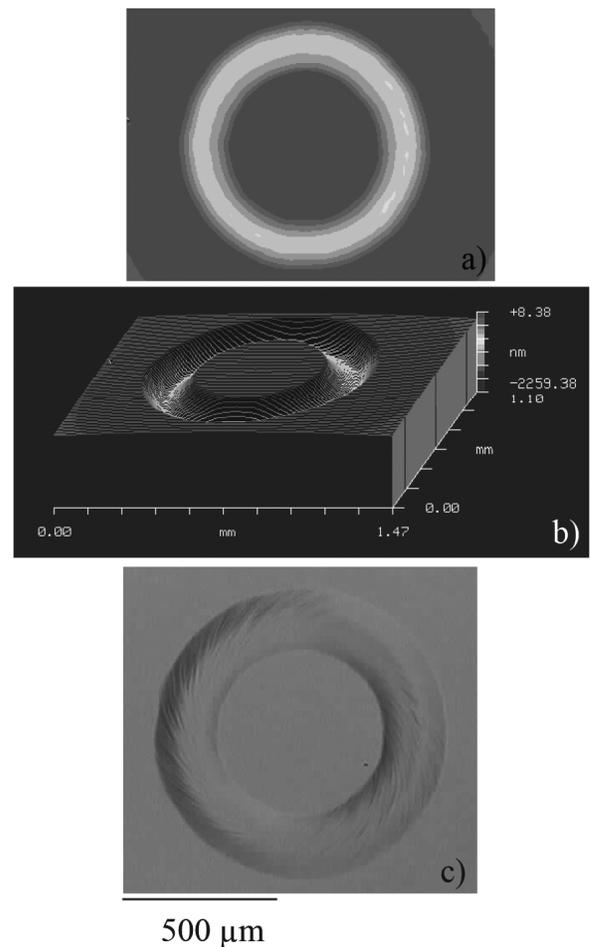
Los módulos de elasticidad de los recubrimientos con el más alto exceso de carbono (contenido de C mayor de 53 %) presentan una leve tendencia a disminuir con el aumento del exceso de carbono.



**Figura 4.** Variación del módulo de elasticidad superficial de los recubrimientos en función del contenido de carbono atómico. La línea punteada separa los recubrimientos con el más alto exceso de carbono

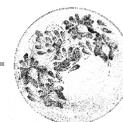
La figura 5 exhibe la huella de desgaste abrasivo obtenida en la muestra CrC07 que presentó una composición estequiométrica de la fase  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  con un contenido de carbono del 40 % (tabla 1). La figura 5a presenta la vista frontal de la huella adquirida en el microscopio interferométrico Zygo, la cavidad en volumen de material desgastado se puede apreciar en la figura 5b, mientras que la figura 5c muestra la fotografía de la huella obtenida en el microscopio óptico donde se observan con claridad las trazas de abrasión generadas por las partículas de diamante presentes en el contacto tribológico. El aspecto de la huella revela bien definidos los surcos de abrasión, generados por las partículas de diamante que se fijan en el contracuerpo (disco de cobre), por ser este mucho más blando y ello da lugar a la abrasión entre dos cuerpos; este mismo mecanismo mostraron todos los recubrimientos. También se puede observar que el recubrimiento presentó buena adhesión, y es claro que en el momento de suspender el ensayo no se

había llegado al sustrato ni a la capa de adhesión de cromo. Se pudo comprobar que los volúmenes desgastados medidos por microscopía interferométrica y por perfilometría fueron muy similares, habiéndose obtenido los mismos resultados por ambas técnicas.

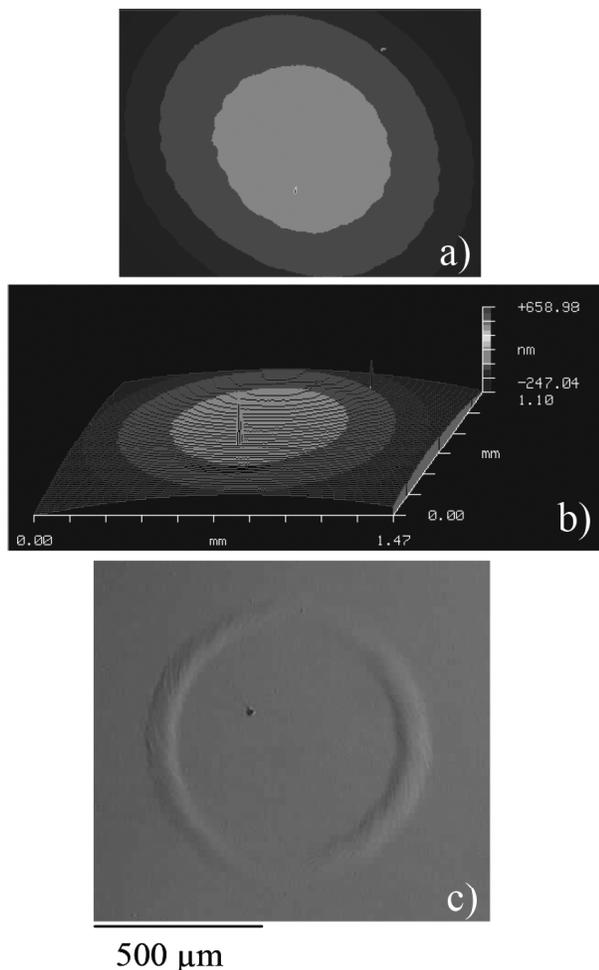


**Figura 5.** Huella de desgaste abrasivo de la muestra CrC07 con composición estequiométrica de 40 % de carbono: a) imagen bidimensional obtenida en el microscopio Zygo, b) Imagen tridimensional obtenida en el microscopio Zygo, c) Imagen obtenida en el microscopio óptico

La figura 6 exhibe la huella de desgaste abrasivo de la muestra CrC23 con alto exceso de carbono en su composición, un 54 %. Las imágenes bidimensional y tridimensional adquiridas en el microscopio interferométrico se pueden observar en las figuras 6a y 6b; en la figura 6c puede apreciarse la imagen

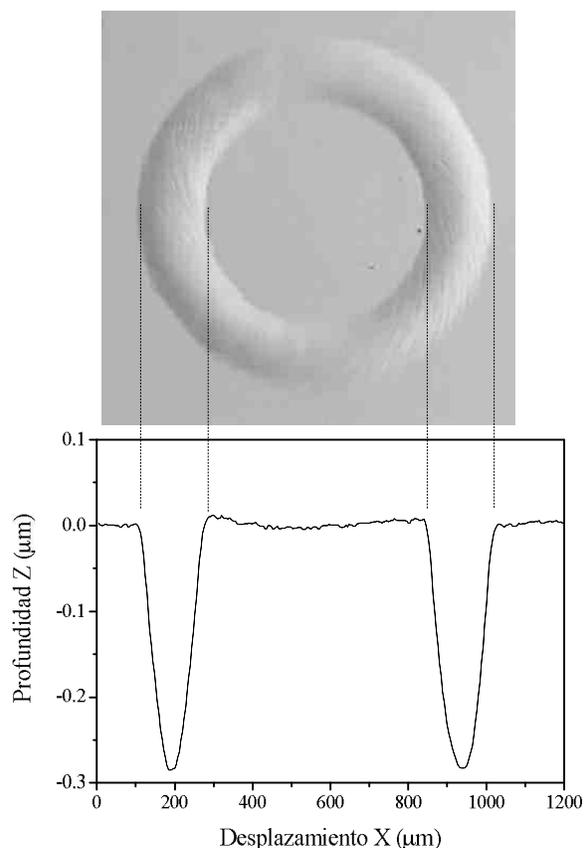


adquirida en el microscopio óptico. En los recubrimientos con alto exceso de carbono, el tamaño de las huellas disminuyó considerablemente, como lo revelan estas imágenes respecto a la figura 5.



**Figura 6.** Huella de desgaste abrasivo de la muestra CrC23 con exceso de carbono y contenido del 54 %; a) Imagen frontal de la huella de acuerdo con las líneas de interferencia, b) representación en volumen de la huella de acuerdo con las líneas de interferencia y c) imagen adquirida en el microscopio óptico

En la figura 7 se puede observar la imagen y un perfil de la huella de desgaste obtenida en la muestra CrC02 de composición subestequiométrica, con 34 % de contenido de carbono. La huella muestra un aspecto suave y un ancho alrededor de  $190 \mu\text{m}$  con una profundidad de  $0,28 \mu\text{m}$  medida en el perfilómetro.

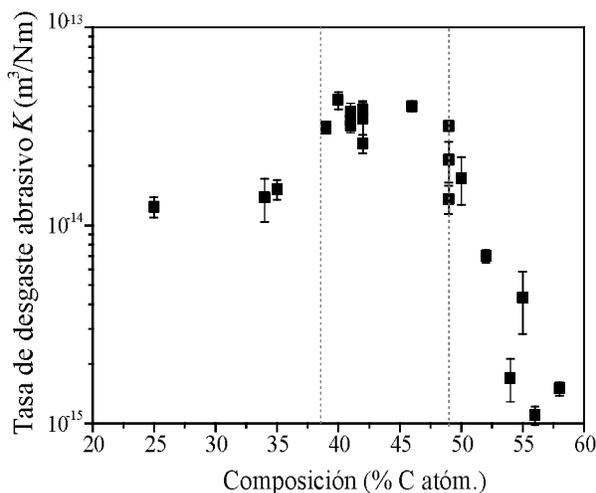


**Figura 7.** Huella de desgaste abrasivo obtenida en la muestra CrC02 de composición subestequiométrica de la fase  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  con un contenido de 34 % C

La figura 8 presenta las tasas de desgaste abrasivo de los recubrimientos monocapa en función del contenido de carbono. Los recubrimientos con composición entre 39 y 49 % de C (líneas punteadas) muestran las mayores tasas de desgaste abrasivo, poseen una composición química cercana a la estequiométrica de la fase  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , su dureza no hizo que mejorara su resistencia al desgaste abrasivo, probablemente la fragilidad tuvo un papel más importante contribuyendo a una mayor tasa de desgaste. Los recubrimientos con contenido de carbono entre 50 y 58 % presentan tasas de desgaste abrasivo con una pronunciada reducción, comportamiento que puede ser atribuido a la elasticidad de los recubrimientos con el más alto exceso de carbono; admiten pequeñas deformaciones elásticas cuando las partículas abrasivas (diamante en las pruebas de desgaste

abrasivo) son presionadas contra ellos y recuperan su forma cuando cesa la presión de estas partículas sobre ellos. Por tanto, las pequeñas deformaciones elásticas que toleran estos recubrimientos pueden disminuir en forma notable el desgaste abrasivo. Además, como el carbono es un material autolubricante, los recubrimientos con exceso de este elemento quizás tienen algo de autolubricante, lo cual influye en las bajas tasas de desgaste obtenidas.

Las tasas de desgaste abrasivo obtenidas en los recubrimientos estudiados fueron más bajas que las reportadas para recubrimientos de DLC, CrN, TiN, TiCN, TiAlN, así como recubrimientos dúplex de TiN y TiAlN (Batista, Matthews y Godoy, 2001; Van Acker y Vercammen, 2004).



**Figura 8.** Tasas de desgaste abrasivo de los recubrimientos monocapa de CrC en función del contenido de carbono atómico. Delimitado por las líneas punteadas está el rango de recubrimientos que presentaron las mayores tasas de desgaste

#### 4. CONCLUSIONES

El carbono cumplió un papel muy importante en la disminución de la tasa de desgaste abrasivo de los recubrimientos que tenían este elemento en exceso respecto a la fase  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , estas películas presentaron la más baja tasa de desgaste de todos los recubrimientos estudiados.

En los recubrimientos que tenían composición estequiométrica de la fase  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  y cercana a ella (entre 39 y 49 % de C) su fragilidad tuvo mayor incidencia en los resultados que su dureza, y presentaron las tasas de desgaste abrasivo más altas de todos los recubrimientos estudiados.

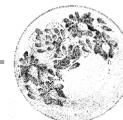
Los recubrimientos con composición subestoequiométrica (% C < 39 %) mostraron tasas de desgaste abrasivo intermedias, ya que eran menos frágiles y no tenían fase lubricante libre.

#### AGRADECIMIENTOS

La autora expresa su agradecimiento a la Universidad de Barcelona por la beca para la realización del doctorado en Técnicas Instrumentales de la Física y la Ciencia de los Materiales.

#### REFERENCIAS

- Adachi, K. and Hutchings, I. M. (2003). "Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test". *Wear*, vol. 255, No. 1-6 (August-September), pp. 23-29.
- Agarwal, V.; Vankar, V. D. and Chopra, K. L. (1989). "Reactive-magnetron-sputtered chromium carbide films". *Thin Solid Films*, vol. 169, No. 2 (February), pp. 281-288.
- Allsopp, D. N.; Trezona, R. I. and Hutchings, I. M. (1998). "The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test". *Tribology Letters*, vol. 5, No. 4 (July), pp. 259-264.
- Andrade, M. F. C.; Martinho, R. P.; Silva, F. J. G.; Alexandre, R. J. D. and Baptista, A. P. M. (2009) "Influence of the abrasive particles size in the micro-abrasion wear tests of TiAlSiN thin coatings". *Wear*, vol. 267, No. 1-4 (June), pp. 12-18.
- Batista, J. C. A.; Matthews, A. and Godoy, C. (2001). "Micro-abrasive wear of PVD duplex and single-layered coatings". *Surface and Coatings Technology*, vol. 142-144 (July), pp. 1137-1143.
- Betts, J. C. (2009). "The direct laser deposition of AISI 316 stainless steel and  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  powder". *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, No. 11 (June), pp. 5229-5238.



- Chang, Y.-Y.; Wang, D.-Y. and Wu, W. (2002). "Catalysis effect of metal doping on wear properties of diamond-like carbon films deposited by a cathodic-arc activated deposition process". *Thin Solid Films*, vol. 420-421 (December), pp. 241-247.
- Chiu, M.-C.; Hsieh, W.-P; Ho, W.-Y; Wang, D.-Y. and Shieu, F.-S. (2005). "Thermal stability of Cr-doped diamond-like carbon films synthesized by cathodic arc evaporation". *Thin Solid Films*, vol. 476, No. 2 (April), pp. 258-263.
- Hutchings, I. M. (1998). "Erosive and abrasive wear tests for thin coatings: A unified approach". *Tribology International*, vol. 31, No. 1-3 (January), pp. 5-15.
- Ji, G.-C.; Li, C.-J.; Wang, Y.-Y. and Li, W.-Y. (2006). "Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr coating". *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, No. 24 (August), pp. 6749-6757.
- Kassman, A.; Jacobson, S.; Erickson, L.; Hedenqvist, P. and Olsson, M. (1991). "A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coatings". *Surface and Coatings Technology*, vol. 50, No. 1 (September), pp. 75-84.
- Kunrath, A. O.; Upadhya, K.; Reimanis, I. E. and Moore, J. J. (1997). "Synthesis and application of composite TiC- $\text{Cr}_3\text{C}_2$  targets". *Surface and Coatings Technology*, vol. 94-95 (October), pp. 237-241.
- Leech, P. W. and Li, X. S. (2011). "Comparison of abrasive wear in diamond composites and WC-based coatings". *Wear*, vol. 271, No. 9-10 (July), pp. 1244-1251.
- Oliver, W. C. and Pharr, G. M. (1992). "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments". *Journal of Materials Research*, vol. 7, No. 6 (June), pp. 1564-1583.
- Paul, A.; Lim, J.; Choi, K. and Lee, C. (2002). "Effects of deposition parameters on the properties of chromium carbide coatings deposited onto steel by sputtering". *Materials Science and Engineering A*, vol. 332, No. 1-2 (July), pp. 123-128.
- Suda, Y.; Kawasaki, H.; Terajima, R. and Emura, M. (1999). "Chromium carbide thin films synthesized by pulsed Nd:YAG laser deposition". *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 38, No. 6A (March), pp. 3619-3621.
- Trezona, R. I.; Allsopp, D. N. and Hutchings I. M. (1999). "Transitions between two-body and three-body abrasive wear: Influence of test conditions in the micro-scale abrasive wear test". *Wear*, vol. 225-229, No. 1 (April), pp. 205-214.
- Van Acker, K. and Vercaemmen, K. (2004) "Abrasive wear by  $\text{TiO}_2$  particles on hard and on low friction coatings". *Wear*, vol. 256, No. 3-4 (February), pp. 353-361.
- Wang, D.-Y.; Weng, K.-W.; Chang, C.-L. and Ho, W.-Y. (1999). "Synthesis of  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  coatings for tribological applications". *Surface and Coatings Technology*, vol. 120-121 (November), pp. 622-628.
- Zhang, D.-W.; Lei, T. C. and Li, F.-J. (2001). "Laser cladding of stainless steel with Ni- $\text{Cr}_3\text{C}_2$  for improved wear performance". *Wear*, vol. 251, No. 1-12 (October), pp. 1372-1376.