

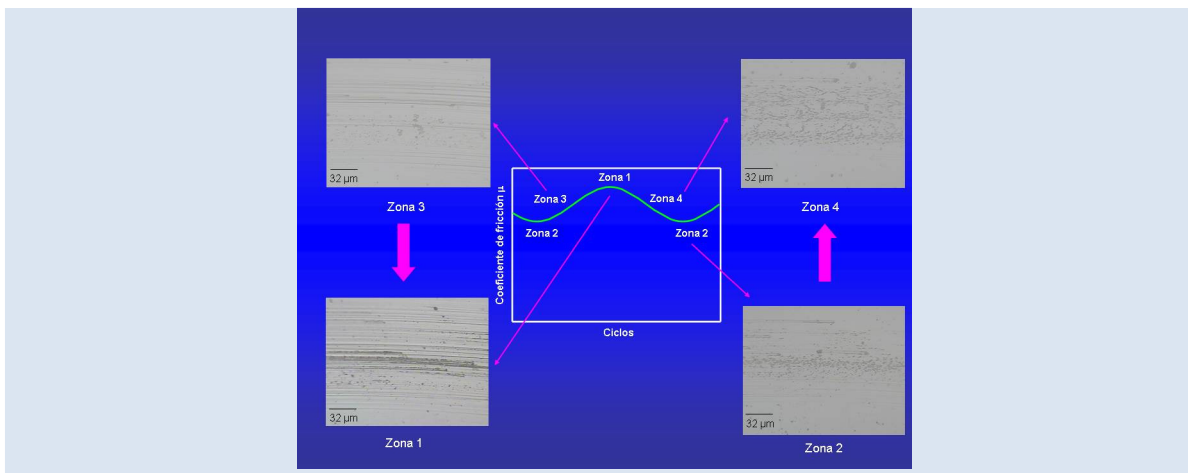
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE RECUBRIMIENTOS MULTICAPA DE Cr/CrC DEPOSITADOS SOBRE DOS SUSTRATOS DIFERENTES

Maryory Gómez^{1*}, Arturo Lousa², Joan Esteve²

1: Universidad de Antioquia, Grupo de Corrosión y Protección –CIDEMAT-, Calle 62 # 52-59. Medellín, Colombia

2: Universitat de Barcelona, Grup de Capes Fines i Enginyeria de Superfícies, Carrer Martí i Franquès 1. Barcelona, España

* e-mail: mgomezb@udea.edu.co



RESUMEN

La combinación de materiales cerámicos y metálicos en estructuras multicapa es bien conocida por producir recubrimientos con un comportamiento mecánico y tribológico mejorado. En este artículo, reportamos las propiedades tribológicas de recubrimientos multicapa de cromo/carburo de cromo Cr/CrC nanométricos depositados por pulverización catódica magnetron r.f. Las pruebas de fricción y desgaste en deslizamiento fueron desarrolladas sobre multicapas de Cr/CrC también como sobre recubrimientos de referencia de CrC. El comportamiento al desgaste en deslizamiento en seco de las multicapas de Cr/CrC fue investigado usando la técnica de esfera sobre disco con contra cuerpos esféricos de alúmina y acero. Los recubrimientos multicapa exhibieron resistencia al desgaste en deslizamiento en seco mejor que el de referencia. Las multicapas de Cr/CrC mostraron coeficientes de fricción en seco entre 0,50 y 0,60 y la monocapa de CrC alrededor de 0,30 a lo largo de toda la prueba. Los principales mecanismos de desgaste en deslizamiento son discutidos.

Palabras Claves: Propiedades tribológicas, Multicapas nanométricas, Cromo/carburo de cromo, Esfera sobre disco.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES EVALUATION OF Cr/CrC MULTILAYER COATINGS DEPOSITED ON TWO SUBSTRATES DIFFERENTS

ABSTRACT

The combination of ceramic and metallic materials in multilayered structures is well known to produce coatings with improved mechanical and tribological behavior. In this paper, we report the tribological properties of nanometric chromium/chromium carbide (Cr/CrC) multilayer coatings deposited by r.f. magnetron sputtering. Sliding friction and wear tests were performed on Cr/CrC multilayers as well as on CrC reference coatings. The dry sliding wear behavior of Cr/CrC multilayers was investigated using the ball-on-disk technique with alumina and steel ball counterparts. The multilayered coatings exhibited a dry sliding wear resistance better than the reference. The Cr/CrC multilayers showed dry friction coefficients between 0,50 and 0,60 and the CrC single layer around 0,3, for extended sliding tests. The main mechanisms of sliding wear are discussed.

Keywords: Tribological properties, Nanometric multilayers, Chromium/chromium carbide, ball-on-disk.

1. INTRODUCCIÓN

El cromo y el carbono se pueden combinar para formar diferentes carburos, los cuales poseen alta dureza, resistencia y estabilidad química. Los carburos de cromo se conocen en tres estructuras cristalinas: el Cr_{23}C_6 en el sistema cúbico, Cr_7C_3 y Cr_3C_2 en el sistema ortorrómbico, ésta última estructura posee las mejores propiedades mecánicas, en cuanto a dureza. Los carburos de cromo se pueden emplear como recubrimientos resistentes al desgaste y recubrimientos 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 [1]. Estos recubrimientos son útiles para aplicaciones de alta temperatura, para conformado y herramientas de forja, sellos y válvulas para turbinas [2, 3]. También, los carburos de cromo en forma de polvo cristalino se usan como refuerzo para materiales compuestos volumétricos y en recubrimientos de capas gruesas depositadas por la técnica de proyección térmica [4]. A pesar del interés de estos materiales, aún falta entender y conocer mejor sus propiedades.

En los últimos años, se han aumentado los esfuerzos para obtener recubrimientos de carburos de cromo de alta calidad, en capa fina, mediante técnicas de depósito en fase vapor (PVD) “*Physical Vapor Deposition*” usando pulverización catódica reactiva, evaporación por arco catódico y depósito por laser pulsado [1, 5, 6, 7]. Los carburos de cromo con exceso de carbono se han estudiado también para sustituir al carbono amorfo (Diamond-Like-Carbon, DLC) como recubrimientos antifricción [1, 8, 9].

A pesar de los estudios reportados de recubrimientos de carburo de cromo y de cromo, aún falta realizar más esfuerzos para entender mejor su desempeño tribológico. Los coeficientes de fricción de recubrimientos de CrC depositados mediante evaporación por arco catódico han mostrado un comportamiento paralelo al contenido de C del recubrimiento mostrando valores desde 0,06 para el recubrimiento con mayor contenido de C que reveló una estructura amorfa hasta 0,52 para el recubrimiento con menor contenido de C el cual mostró presencia de la fase Cr_3C_2 [10]. Otro autor reporta coeficientes de fricción entre 0,41 y 0,35 para recubrimientos monocapa de Cr_3C_2 y Cr_7C_3 , mientras que las tasas de desgaste mostraron valores en la escala de $10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ [11]. Recubrimientos

multicapa de SiC/CrC presentaron coeficientes de fricción entre 0,2 y 0,8 en función del espesor de las bicapas [12].

Los recubrimientos multicapa con períodos de espesores nanométricos se han vuelto tema de investigación porque mejoran las propiedades mecánicas de los recubrimientos debido al aumento de su dureza al mejorar la resistencia a la propagación de grietas y por la relajación de las tensiones del recubrimiento [13, 14, 15]. Los recubrimientos multicapa también pueden mejorar las propiedades tribológicas del recubrimiento, al aumentar la adhesión entre el recubrimiento y el sustrato [16, 17, 18, 19], mejoran la resistencia a la corrosión al obtener recubrimientos más compactos [20].

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar de forma detallada el comportamiento tribológico en deslizamiento sin lubricación de recubrimientos multicapa de Cr/CrC depositados sobre sustratos de acero M2 endurecido y obleas de silicio evaluados contra esferas de alúmina y acero.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Depósito de los recubrimientos

Los recubrimientos multicapa de Cr/CrC fueron depositados simultáneamente sobre sustratos de acero M2 endurecido y obleas de silicio, mediante pulverización catódica magnetron r.f. reactiva a partir de un blanco de cromo metálico en una mezcla de gas argón-metano. Las multicapas fueron depositadas cambiando alternativamente la composición del gas de pulverización entre el argón puro y la mezcla gaseosa Ar/CH₄ para depositar la capa de cromo o carburo de cromo respectivamente. Se utilizó una mezcla de gas de 15 % de metano (CH₄) en argón, con una presión de depósito de 0,06 Pa. La mezcla de gases se seleccionó de acuerdo a estudios previos de sistemas monocapa de CrC, debido a que con esta mezcla se obtuvo la estructura más cristalina. El potencial del sustrato se mantuvo a -50 V durante el depósito de los dos materiales y alcanzó una temperatura de 400 °C. La distancia blanco-sustrato fue de 5 cm. Los recubrimientos multicapa fueron depositados con un período de modulación de bicapa Λ de 100 nm determinado mediante SEM (Leica 360, Cambridge Instruments), y con espesor total del recubrimiento de 1,5 μm . En los recubrimientos multicapa la capa más interna es Cr, que actúa como capa de adhesión

al sustrato y la más externa es CrC. Para efectos de comparación también se depositaron recubrimientos monocapa de Cr y CrC en las mismas condiciones que se depositaron los recubrimientos multicapa. La rugosidad R_a de las multicapas fue medida en un perfilómetro (Dektak 3030) obteniendo un valor de 2,8 nm sobre sustratos de Si y de 9,1 nm sobre sustratos de acero. Detalles sobre la composición estructural de estos recubrimientos pueden ser encontrados en la referencia [21].

2.2 Evaluación tribológica de los recubrimientos

El comportamiento tribológico de los recubrimientos se evaluó en un tribómetro de tipo esfera sobre disco en deslizamiento sin lubricación, utilizando como contra-cuerpos esferas de alúmina sinterizada y acero endurecido de 6 mm de diámetro, aplicando una carga de 1 N con una velocidad lineal de 0,0021 m/s se obtuvieron huellas de 4 mm de diámetro. Se utilizó una velocidad baja para poder detectar alguna ocurrencia de pequeñas fallas del recubrimiento en puntos localizados sobre la huella. Antes y después de cada prueba las muestras y las esferas fueron lavadas con etanol en ultrasonido. Las pruebas se desarrollaron a condiciones ambientales de laboratorio a una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y humedad relativa de $40 \pm 5\%$. Los ensayos fueron conducidos hasta 5500 ciclos, en todos los casos el ensayo finalizó antes de desnudarse el sustrato para que tanto el coeficiente de fricción como el desgaste medido efectivamente correspondan al material del recubrimiento. Después de realizar las pruebas en el sistema de esfera sobre disco, las superficies del contacto tribológico se observaron en el microscopio óptico (CarlZeiss Jenatech-Inspection) antes y después de la limpieza con etanol. Los volúmenes de las huellas de desgaste fueron medidos mediante perfilometría. Sobre cada huella de diámetro 4 mm, se tomaron 8 perfiles equidistantes de la sección transversal de la huella. Una vez obtenidas las áreas de los 8 perfiles, se promediaron y este valor medio fue multiplicado por la longitud de la huella de desgaste para obtener el volumen del surco de desgaste. En las esferas no fue posible determinar el desgaste debido a que fue mínimo. La dureza de los recubrimientos se midió mediante nanoindentación dinámica (Nano Test 550, Micro Materials Ltd.) usando un indentador de diamante Berkovich, para calcular la dureza se utilizó el método de análisis de Oliver y Pharr [22].

El recubrimiento multicapa mostró una dureza de 15 GPa y el recubrimiento monocapa de CrC exhibió una dureza de 21 GPa.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de fricción

La Figura 1 muestra la evolución de los coeficientes de fricción del recubrimiento de CrC de referencia y de un recubrimiento multicapa depositado sobre sustrato de acero y evaluado contra esfera de acero. La evolución del coeficiente de fricción es bastante similar en todas las condiciones evaluadas de sustratos y contra-cuerpos, en los primeros ciclos de prueba, el coeficiente de fricción es similar entre los recubrimientos multicapa y el recubrimiento monocapa de referencia de CrC. En la medida en que progresa el ensayo, los valores de los coeficientes de fricción de los recubrimientos multicapa aumentan súbitamente y después entran en un régimen estable cerca de 0,50 (Fig. 1), mientras que los coeficientes de fricción de los recubrimientos de referencia continúan sin variar prácticamente manteniendo un bajo coeficiente de fricción de 0,30 (Fig. 1). El recubrimiento de referencia de Cr se evaluó contra esferas de acero y de alúmina en condiciones similares de carga y velocidad, estos ensayos revelaron un coeficiente de fricción μ de $0,70 \pm 0,03$ en el régimen estable.

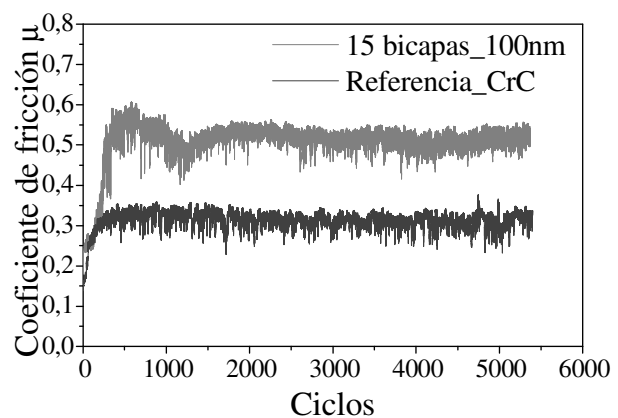


Figura 1. Registro de los coeficientes de fricción de los recubrimientos depositados sobre sustratos de acero y evaluados contra esfera de acero.

En algunas situaciones, como en los recubrimientos depositados sobre sustratos de silicio y evaluados contra esferas de alúmina, inmediatamente después del aumento abrupto de los coeficientes de fricción de los recubrimientos multicapa, éstos llegan a

valores hasta de 0,70 que coincide con la fricción del cromo, los cuales se sostienen por un corto período y después disminuyen a valores del orden de 0,60 o 0,50 como progresa el ensayo. Cuando se examina con escala ampliada los registros obtenidos en el sistema de esfera sobre disco se puede observar, en general, que la parte inicial del ensayo presenta coeficientes de fricción similares para todos los recubrimientos multicapa con un valor alrededor de 0,30, valor que coincide con el coeficiente de fricción del CrC de referencia. Parece como si esta parte inicial del ensayo correspondiera al tiempo necesario para desgastar la capa más externa de CrC en los recubrimientos multicapa. La próxima capa de cromo y las bicapas más internas son desgastadas con una fuerza de fricción más alta. Este hecho fue verificado deteniendo el ensayo en el sistema de esfera sobre disco, justo en el momento en que aumenta la fricción y midiendo la profundidad de la huella obtenida hasta esa parte del ensayo. Esto sugiere que las partículas de desgaste generadas que provienen desde el cromo juegan un papel muy importante en la alta fricción de estos recubrimientos.

La Figura 2 muestra los valores medios de los coeficientes de fricción en el régimen estable para los diferentes recubrimientos en función de los materiales del sustrato y el contra-cuerpo, las líneas discontinuas indican los μ de los recubrimientos de referencia. Los coeficientes de fricción de los recubrimientos multicapa exhiben valores bastante similares entre sí en régimen estable, mostrando valores entre 0,50 y 0,60, las multicapas depositadas sobre silicio exhiben valores ligeramente más altos que los sistemas depositados sobre acero. Esto puede ser debido a que a pesar de que los recubrimientos multicapa sobre ambos sustratos se encontraron amorfos [21], es sabido que el sustrato sobre el que crecen las películas juega un papel importante en la microestructura de las mismas, por lo tanto es probable que las partículas de desgaste que se generan de los recubrimientos depositados sobre Si tengan mayores durezas que las generadas en los recubrimientos depositados sobre sustratos de acero.

Se podría esperar que los registros de fricción de estas estructuras multicapa revelen un comportamiento periódico en la medida en que la esfera va entrando en contacto con las diferentes capas, o sea un μ alrededor de 0,7 cuando está en

contacto con una película de cromo y coeficientes de fricción alrededor de 0,3 cuando está en contacto con una película de CrC. Sin embargo al hacer una exhaustiva revisión de cada registro, no es evidente que estos recubrimientos multicapa presenten un comportamiento periódico a lo largo de las pruebas. Esto puede ser debido a que las partículas de desgaste generadas que provienen de los dos materiales que constituyen las multicapas, se mezclan a partir del momento en que empieza el desgaste de la capa de cromo metálico y desde aquel momento son las responsables del desgaste consecutivo tanto de las capas de Cr como de las capas de CrC. Además, otra contribución a la fuerza de fricción es el contacto de la esfera con los laterales de la huella que contienen los dos materiales del recubrimiento multicapa. Estos hechos enmascaran el coeficiente de fricción individual de cada capa, revelando un μ que resulta de las interacciones entre las diferentes fases presentes. A pesar de esto, un registro en particular, mostró una evolución periódica del coeficiente de fricción, resultando a la vez una huella muy suave sobre la que es posible apreciar la estructura multicapa muy bien definida. Este registro es mostrado en la Figura 3, el cual fue obtenido con el recubrimiento depositado sobre silicio y evaluado contra esfera de alúmina.

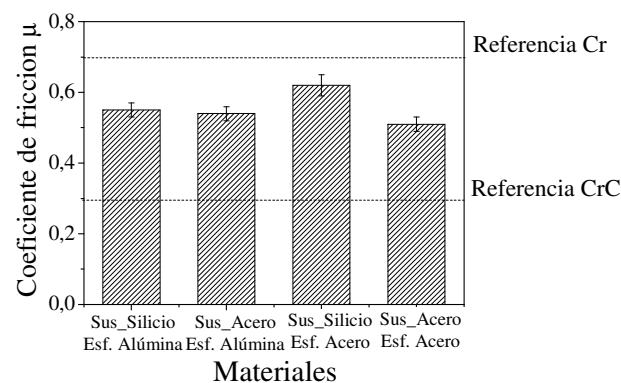


Figura 2. Valores de los coeficientes de fricción de los recubrimientos multicapa y de referencia.

Al inicio del ensayo se desgasta la capa más externa de CrC señalada en la Figura 3 como CrC₁, después de esta capa la esfera llega a la capa más externa de cromo (Cr₁ Fig. 3) con lo cual aumenta abruptamente el coeficiente de fricción y durante el desgaste de esta capa se mantiene alrededor de 0,70

que coincide con el coeficiente de fricción del cromo puro. Luego se inicia el desgaste de la segunda capa de CrC (CrC_2 , Fig. 3) por lo que baja el coeficiente de fricción a 0,55, valor que no corresponde al coeficiente de fricción del CrC debido a la presencia de partículas de desgaste provenientes de la capa de cromo. El coeficiente de fricción vuelve a aumentar cuando se inicia el contacto con la otra capa de cromo (Cr_2 , Fig. 3) alrededor de 0,63 sin llegar al coeficiente de fricción del cromo debido a las contribuciones del CrC presente en el contacto. Así sucesivamente el coeficiente de fricción continúa disminuyendo y aumentado a lo largo de todo el ensayo hasta llegar a desgastar 10 bicapas del recubrimiento como se puede observar en el registro y en la huella obtenida al final de este ensayo mostrada en la Figura 4. También se observa un comportamiento asintótico de este registro del coeficiente de fricción donde el valor de μ tiende hacia un valor promedio entre el coeficiente de fricción del Cr y del CrC.

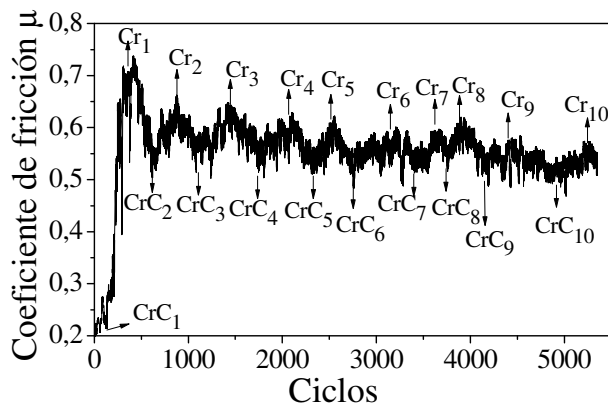


Figura 3. Registro de fricción del recubrimiento multicapa depositado sobre silicio y evaluado contra esfera de alúmina.

En la imagen de la Figura 4 se observan claramente las bicapas desgastadas a lado y lado de la capa Cr_{10} la cual se aprecia en el centro de la imagen con anchura mayor. Esta es la capa más interna de la huella y fue la última con la que la esfera inició el contacto antes de suspenderse el ensayo. De esta manera, en el orden en que se encuentran las capas desde el exterior hacia el centro de la huella, enumeradas como CrC_1 , Cr_1 , CrC_2 , Cr_2 , ..., CrC_{10} , Cr_{10} fueron desnudadas por el contra-cuerpo en el ensayo de esfera sobre disco, debido a que presentan este orden en el recubrimiento desde la capa más exterior hacia la más interior. Otro aspecto a

considerar de la imagen es que básicamente sólo se pueden apreciar las capas de cromo, las cuales presentan una anchura con buena resolución al microscopio óptico. Mientras que las capas de CrC se observan como una línea oscura entre dos capas de Cr, lo cual sugiere que el perfil en profundidad de las capas desgastadas tiene una forma aproximada a alguno de los esquemas presentados en la Figura 5.

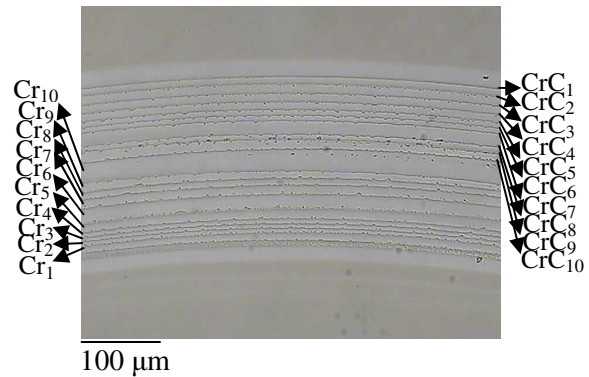


Figura 4. Imagen adquirida en el microscopio óptico de la huella obtenida en la prueba de fricción contra esfera de alúmina del recubrimiento multicapa depositado sobre silicio.

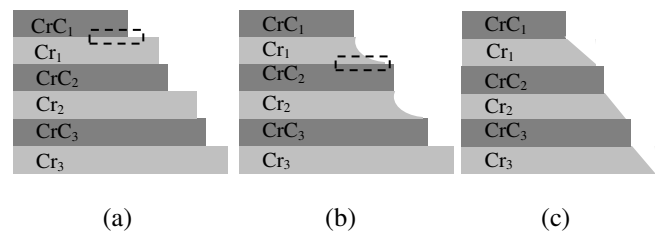


Figura 5. Esquemas posibles de los perfiles en profundidad de las huellas obtenidas en el sistema de esfera sobre disco a) interfase con Cr por debajo y CrC por encima con buena resistencia al desgaste, (b) interfase con Cr por encima y CrC por debajo exhibe buena resistencia al desgaste y (c) desgaste uniforme en todo el recubrimiento de Cr.

De acuerdo a la imagen (Fig. 4) el CrC desgastado debe tener un perfil muy vertical ya que observando la huella frontalmente casi no se pueden apreciar estas capas y de aquí que en los esquemas propuestos en la Figura 5 el perfil de estas capas de CrC es asumido vertical, mientras que las películas de cromo muestran una banda al observar la huella al microscopio. No fue posible comprobar el perfil de las bandas de cromo en el espesor de estas películas, por tanto en los esquemas se plantean tres

situaciones que se pueden aproximar a los perfiles obtenidos. Una es que las superficies de Cr que se ven desnudas correspondan a la zona más exterior de las capas, o sea, que esta zona presente mayor resistencia al desgaste (Fig. 5a), otra situación es que las superficies expuestas correspondan a la zona más interior de las capas de Cr presentando esta zona mayor resistencia al desgaste (Fig. 5b) y la otra posibilidad es que ocurra un desgaste uniforme en todo el espesor de las capas de Cr, exhibiendo una resistencia al desgaste igual en todo el espesor de estas películas (Fig. 5c). Hay autores que han explicado perfiles como el de la Figura 5b de recubrimientos multicapa de un metal con un cerámico Cr/CrN, con un modelo basado en que la interfase de metal sobre cerámico se comporta como una zona especial que es muy resistente al desgaste abrasivo debido a la ductilidad del metal y la dureza del cerámico que soporta la interfase por debajo [23].

Adicionalmente, en el registro de fricción de la Figura 3 se verificó el tiempo que tarda el sistema de esfera sobre disco en desnudar completamente cada capa de Cr y CrC del recubrimiento multicapa. La Figura 6 muestra el tiempo que tardó el desgaste de las diferentes capas de acuerdo al registro de la Figura 3 en función de las diferentes capas de cromo y carburo de cromo desnudadas en el orden en que se encuentran en el recubrimiento multicapa, donde los números de la abscisa en la Figura 6 corresponden a los subíndices de las diferentes capas de la Figura 3. Como se puede observar en la Figura 6 la relación del tiempo requerido para desnudar cada capa es lineal desde el inicio del ensayo hasta desgastar las 10 bicapas del recubrimiento. También esta figura permite dilucidar que la tasa de desgaste a lo largo de todo el ensayo fue constante.

3.2 Resultados de desgaste

En las huellas de desgaste obtenidas sobre los recubrimientos multicapa depositados sobre silicio fue posible apreciar la estructura multicapa claramente. Al final de la prueba se pudo observar partículas de material de color oscuro sobre la esfera Figura 7a y alrededor de la huella Figura 7c, después de realizar la limpieza con etanol tanto la esfera como la huella quedaron exentas de material adherido Figuras 7b y d. La esfera presentó muy poco desgaste igual como ocurrió en el resto de los ensayos.

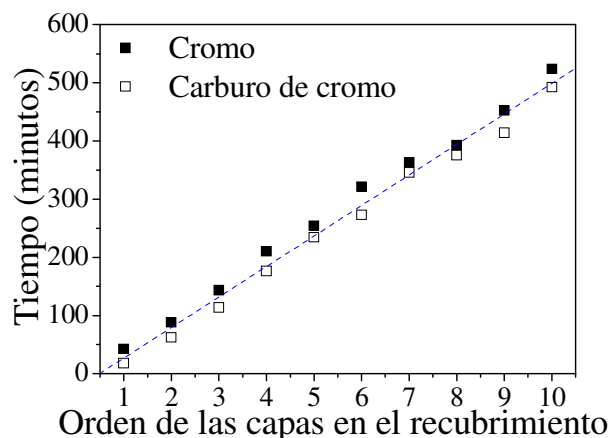


Figura 6. Tiempo que tarda el sistema de bola sobre disco en desnudar las diferentes capas de la estructura multicapa, los números del eje de la abscisa corresponden a los subíndices de las diferentes capas de Cr y CrC indicados en la figura 3.

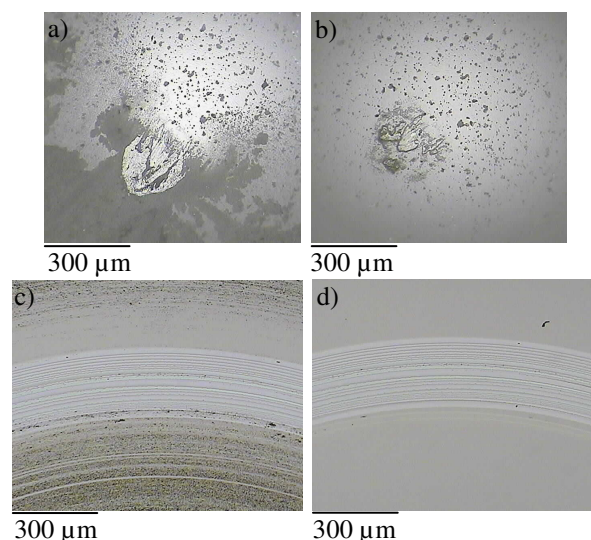


Figura 7. Aspecto de la esfera de alúmina y la huella al final de la prueba de fricción del recubrimiento multicapa depositado sobre silicio y evaluado contra esfera de alúmina: a) esfera antes de la limpieza, b) esfera después de la limpieza, c) huella antes de la limpieza y d) huella después de la limpieza.

En lo referente a los mecanismos de desgaste, en los recubrimientos multicapa se observó de forma generalizada abrasión y manchas de óxidos como producto de reacciones triboquímicas. Estas manchas de óxido fueron observadas de forma similar en todas las huellas de los recubrimientos multicapa depositados sobre los dos sustratos utilizados cuando fueron evaluados contra esferas de alúmina y acero de forma indistinta. Los productos

de las reacciones triboquímicas en estos ensayos resultan de la reacción del cromo proveniente de los recubrimientos y del hierro en el caso de las pruebas contra esfera de acero con el oxígeno del aire. Las partículas de desgaste generadas durante los ensayos se recolectaron y se analizó su composición química. El análisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) mostró que estas partículas están compuestas de cromo, carbono y oxígeno en las pruebas realizadas contra esferas de alúmina, además, hierro cuando las pruebas fueron desarrolladas contra esferas de acero. La espectroscopia Raman de estas partículas reveló hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) en las pruebas contra esferas de acero, mientras que en las pruebas contra esferas de alúmina el principal constituyente fue óxido de cromo (Cr_2O_3).

En varias de las pruebas realizadas no se observó de forma uniforme el mismo aspecto a lo largo de cada huella, presentando apariencias diferentes dentro de cada surco. En la Figura 8 se observan imágenes obtenidas sobre la misma huella de desgaste del recubrimiento multicapa depositado sobre acero y evaluado contra esfera de acero. En la Figura 8a se puede apreciar una zona donde la huella exhibió la mayor densidad de manchas de óxidos y trazas de abrasión. Mientras que en la zona de la Figura 8b, se observan pequeños puntos de inicio de la formación de óxidos sin mostrar trazas de abrasión. Por otra parte, las zonas mostradas en las Figuras 8c y d, muestran un aspecto de deterioro intermedio entre las zonas anteriormente descritas, presentando manchas de óxidos y trazas de abrasión, que no son tan severas como las mostradas en la Figura 8a.

En la Figura 9 se pueden observar varios perfiles de una huella obtenida en el recubrimiento multicapa evaluado contra esfera de alúmina, como se puede apreciar se obtuvieron diferentes perfiles a lo largo de la huella. De acuerdo a estos perfiles la profundidad de la huella varía entre 0,68 y 0,94 μm . La forma de los perfiles es bastante reproducible a lo largo del surco, mientras que sus dimensiones presentan variación.

La Figura 10 muestra valores de tasas de desgaste, para los recubrimientos depositados sobre sustratos de silicio y acero evaluados contra esferas de alúmina y acero. La línea punteada indica las tasas de desgaste del recubrimiento de CrC cuando fue evaluado contra las diferentes esferas. En estos resultados se puede ver que los recubrimientos

multicapa siempre presentan una mejor resistencia al desgaste que el recubrimiento monocapa de referencia. Esto es particularmente destacable cuando deslizan contra esfera de alúmina. Las tasas de desgaste de los recubrimientos multicapa depositados sobre sustratos de silicio son ligeramente superiores a las tasas de desgaste de estos recubrimientos depositados sobre acero, esto presenta una buena correlación con los coeficientes de fricción medidos que también fueron levemente superiores sobre sustratos de silicio que sobre acero.

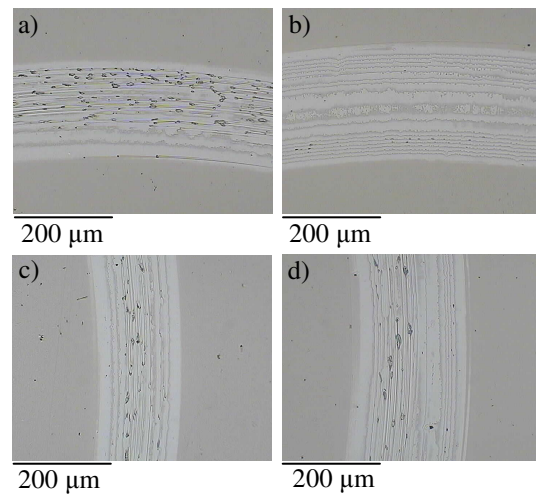


Figura 8. Aspecto en diferentes zonas de la huella obtenida en el recubrimiento multicapa depositado sobre acero y evaluado contra esfera de acero: a) aspecto en la zona 1, b) aspecto en la zona 2, c) aspecto en la zona 3 y d) aspecto en la zona 4.

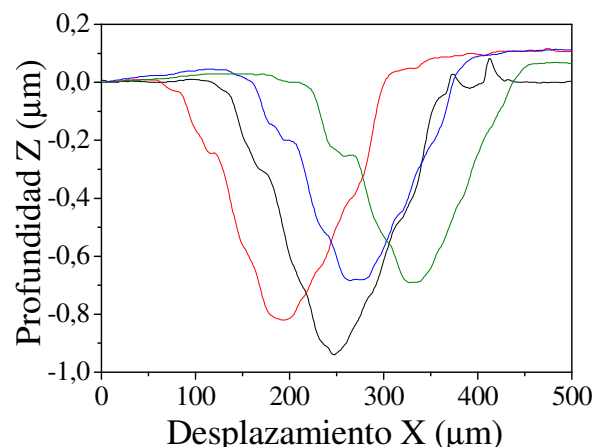


Figura 9. Perfiles de la huella de desgaste en deslizamiento del recubrimiento multicapa depositado sobre silicio y evaluado contra esfera de alúmina.

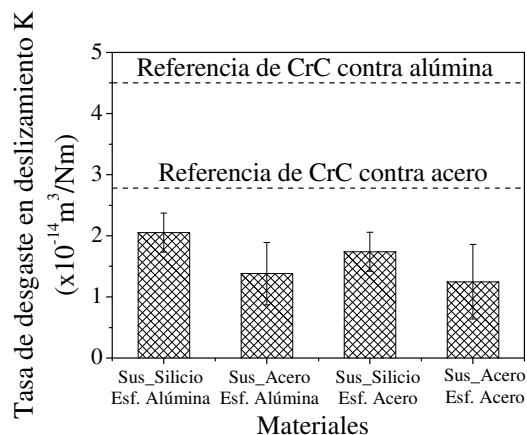


Figura 10. Tasas de desgaste en deslizamiento del recubrimiento multicapa en las diferentes condiciones estudiadas.

Los recubrimientos multicapa Cr/CrC superaron la resistencia al desgaste en deslizamiento del recubrimiento monocapa de CrC. Esto puede ser debido a que los recubrimientos multicapa por contener fases intercaladas de material duro (CrC) y material dúctil (Cr) presentan un comportamiento mejorado debido a la combinación de propiedades. Mientras que la fase dura aporta resistencia a la deformación bien sea por rayado, penetración de partículas, a la deformación inducida por la misma esfera, entre otros; la fase dúctil que presenta menos resistencia a la deformación es capaz de soportar pequeñas deformaciones recuperando su forma inicial entrando en ciclos de deformación-recuperación que pueden ser continuados durante varios períodos de la prueba alargando la vida del recubrimiento.

4. CONCLUSIONES

Las propiedades tribológicas de los recubrimientos multicapa Cr/CrC están determinadas por las propiedades tribológicas de cada una de las capas que constituyen la multicapa. La fricción, en los primeros ciclos de ensayo, refleja el coeficiente de la capa CrC, siempre la capa más externa del recubrimiento, pero una vez esta capa está desgastada, la fricción aumenta debido a la capa de Cr. Un estudio detallado del desgaste en la multicapa ha permitido demostrar el mecanismo de desgaste capa a capa y las variaciones del coeficiente de fricción asociadas a este mecanismo.

El perfil de desgaste de las películas de CrC es bastante vertical lo que puede indicar que estas

capas se desgastan de una forma abrupta. Esto puede estar relacionado con la fragilidad de este material, como es de esperar en un material cerámico más duro y menos dúctil que los metales. Parece que en estos recubrimientos multicapa el cromo es el responsable de la alta fricción, mientras que la resistencia al desgaste en deslizamiento está influenciada por la combinación de propiedades de las dos fases presentes.

Los sustratos presentaron una leve influencia en los resultados de los recubrimientos multicapa presentando coeficientes de fricción y tasas de desgaste un poco más altos los recubrimientos depositados sobre silicio que sobre acero. Los recubrimientos multicapa presentaron mejor resistencia al desgaste en deslizamiento que el recubrimiento de referencia de CrC.

5. AGRADECIMIENTOS

La autora (M. G.) expresa su agradecimiento a la Universidad de Barcelona, por la beca otorgada para la realización del doctorado.

6. REFERENCIAS

- [1]. Wang D.-Y, Weng K.-W, Chang C.-L, Ho W.-Y. Surf. Coat. Technol. 1999; 120-121: 622-628.
- [2]. Kunrath A. O, Upadhyaya K, Reimanis I. E and Moore J. J. Surf. Coat. Technol. 1997; 94-95: 237-241.
- [3]. Paul A, Lim J, Choi K, Lee C. Mater. Sci. Eng. 2002; A332: 123-128.
- [4]. Guilemany J. M, Miguel J. M, Vizcaíno S, Lorenzana C, Delgado J, Sánchez J. Surf. Coat. Technol. 2002; 157: 207-213.
- [5]. Agarwal V, Vankar V.D, Chopra K.L. Thin Solid Films. 1989; 169: 281-288.
- [6]. Suda Y, Kawasaki H, Terajima R, Emura M. Jpn. J. Appl. Phys. 1999; 38: 3619-3621.
- [7]. Zhang D, Lei T. C, Li F. Wear. 2001; 251: 1372-1376.
- [8]. Chiu M.-C, Hsieh W.-P, Ho W.-Y, Wang D.-Y, Shieu F.-S. Thin Solid Films. 2005; 476: 258-263.
- [9]. Chang Y.-Y, Wang D.-Y, Wu W. Thin Solid Films. 2002; 420-421: 241-247.
- [10]. Esteve J, Romero J, Gómez M, Lousa A. Surf. Coat. Technol. 2004; 188-189: 506-510.
- [11]. Saduman S. Mater. and Design. 2006; 27: 85-91.
- [12]. Ziegele H, Rebholz C, Voevodin A.A, Leyland A, Rohde S.L, Matthews A. Tribol. Int. 1997; 30: 845-856.

- [13]. Berger M, Wiklund U, Eriksson M, Engqvist H, Jacobson S. Surf. Coat. Technol. 1999; 116-119: 1138-1144.
- [14]. Martínez E, Romero J, Lousa A, Esteve J. Surf. Coat. Technol. 2003; 163-164: 571-577.
- [15]. Sakurai M, Toihara T, Wang M, Kurosaka W, Miyake S. Surf. Coat. Technol. 2008; 203: 171-179.
- [16]. Holmberg K, Matthews A, Ronkainen H. Tribol. Int. 1998; 31: 107-120.
- [17]. Wiklund U, Hedenqvist P, Hogmark S. Surf. Coat. Technol. 1997; 97: 773-778.
- [18]. Bull S. J, Jones A. M. Surf. Coat. Technol. 1996; 78: 173-184.
- [19]. Li C, Yong D, Xiang X, Ke K, Ming J. Int. J. Refract. Met. H. 2011; 29: 681-685.
- [20]. Monticelli C, Balbo A, Zucchi F. Surf. Coat. Technol. 2010; 204: 1452-1460.
- [21]. Romero J, Lousa A, Martínez E, Esteve J. Surf. Coat. Technol. 2003; 163-164: 392-397.
- [22]. Oliver W.C., Pharr G.M. J. Mater. Res. 1992; 7: 1564-1582.
- [23]. Berger M, Wiklund U, Eriksson M, Engqvist H, Jacobson S. Surf. Coat. Technol. 1999; 116-119: 1138-1144.