



UNIVERSITAT DE BARCELONA

U

B

DEPARTAMENT DE FÍSICA APLICADA I ÒPTICA

Martí i Franquès, 1, 08028 Barcelona

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES
TRIBOLÓGICAS DE LOS RECUBRIMIENTOS
DUROS**

Maryory Astrid Gómez Botero

Memoria presentada para optar al grado de Doctora

Barcelona, Diciembre de 2005

ANEXO A

MORFOLOGÍA Y COMPOSICIÓN ESTRUCTURAL DE LOS RECUBRIMIENTOS DEL GRUPO A: RECUBRIMIENTOS DE CrC DEPOSITADOS POR EVAPORACIÓN POR ARCO CATÓDICO (CAE)

A.1. Morfología y composición

Las muestras fueron observadas mediante microscopía electrónica de barrido SEM (Leica 360, Cambridge Instruments) utilizando 12 keV y 1.5 nA en el haz de electrones. El espesor determinado en la imagen SEM de la muestra 6 (fig. AI) confirmó el valor medido por perfilometría. En esta figura se puede ver el sustrato de acero, la capa de adhesión de nitruro de cromo y la película de carburo de cromo que muestra una estructura columnar.

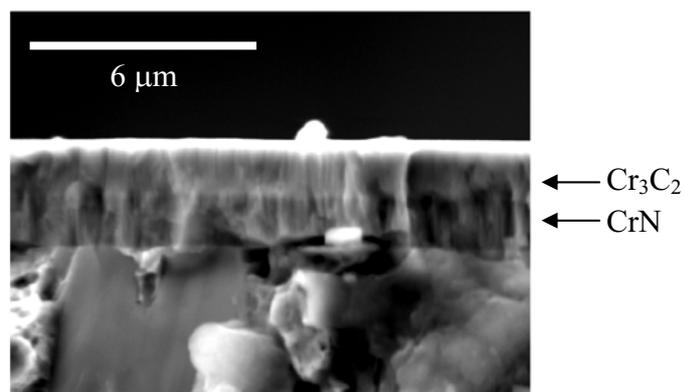


Figura AI- Imagen SEM de la sección transversal de la muestra 6 mostrando la estructura columnar de las capas de CrN y CrC.

La relación de número atómico C/Cr estimada desde los análisis de GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) disminuyó con la disminución de la

presión parcial de C_2H_2 desde 3.0 en la muestra 1 hasta 0.65 en la muestra 6. También se realizaron análisis Raman a las muestras con un espectrómetro Jobin Yvon T64000 con láser de Ar^+ , $\lambda = 514.5$ nm. La figura AII muestra los espectros micro-Raman obtenidos en las muestras 1 y 5. La muestra 1 fue la única que emitió señal Raman, el resto de las muestras no emitieron señal presentando espectros similares al de la muestra 5, figura AII(a). Sólo la señal correspondiente al carbono altamente sensible al Raman fue detectada en la muestra 1 con la más alta relación de C/Cr. Además una alta densidad de partículas (≈ 8 μm de tamaño) fue observada sobre la superficie de esta muestra. El espectro micro-Raman sobre la región libre de partículas mostró débiles bandas G y D características del carbono amorfo, espectro (b). Por el otro lado, el espectro micro-Raman de las partículas mostraron fuertes bandas D (1355 cm^{-1}) y G (1594 cm^{-1}) indicando un alto contenido de carbono amorfo en estas partículas, espectro (c).

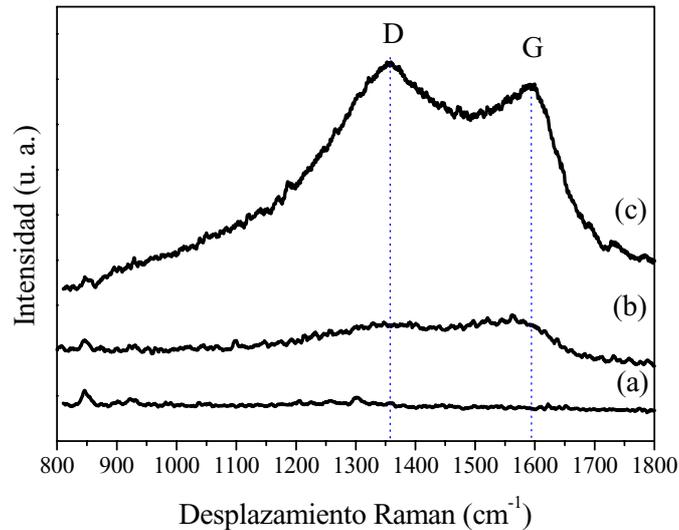


Figura AII- Espectros micro-Raman obtenidos sobre: (a) superficie de la muestra 5, (b) muestra 1 en una zona libre de partículas y (c) muestra 1 sobre una partícula.

Los análisis SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) fueron realizados en un equipo Atomika 488, usando un haz de iones de oxígeno de 9 keV y 500 nA. La figura AIII muestra el análisis SIMS de la muestra 6. Los perfiles de composición en profundidad de Cr y C revelan una buena uniformidad en la región de carburo de cromo,

una pronunciada transición entre las regiones de carburo de cromo y nitruro de cromo y una tasa de erosión dos veces más alta para el nitruro que para el carburo.

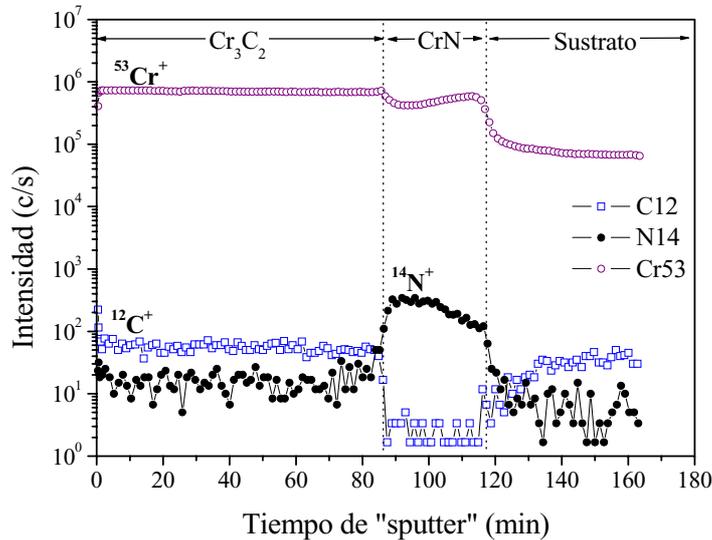


Figura AIII- Perfil SIMS de la muestra 6: CrN (1.5 μm) + CrC (1.5 μm).

A.2. Estructura cristalina

Los análisis de difracción de rayos X de los recubrimientos fueron desarrollados en un equipo Philips-MRD con configuración $\theta/2\theta$ (Bragg-Brentano). La figura AIV muestra la evolución de los difractogramas XRD de los recubrimientos depositados bajo diferentes presiones parciales de C₂H₂. Para la muestra 1 depositada a la más alta presión de C₂H₂ (6.1 Pa), se observa un débil pico que corresponde al (060) de la fase Cr₇C₃ y algunos picos más débiles (marcados con "S") provenientes del sustrato, junto con una amplia banda entre 30 y 55° centrada alrededor de 41° [JCPDS-ICDD]. Esta banda es característica de carburo de cromo amorfo [Paul]. Este resultado, junto con la alta relación atómica (C/Cr = 3) y la señal Raman observada, puede ser explicado por la presencia de pequeños cristales de Cr₇C₃ y regiones de carburo ricas en carbono amorfo.

Cuando la presión es disminuida a 3.0 Pa (muestra 2), la banda llega a ser menos intensa, el pico Cr₇C₃ (060) identificado a $2\theta = 45^\circ$ aumenta y aparece un pequeño pico a $2\theta = 66^\circ$ que puede ser identificado como el pico (002) de la fase Cr₃C₂. Cuando la

presión es disminuida a 2.4 Pa (utilizando tres cátodos, muestra 3), el pico Cr_7C_3 (060) disminuye y la intensidad del pico (002) de la fase Cr_3C_2 aumenta.

Además, si la presión es reducida a 1.4 Pa (muestra 4) la banda amorfa desaparece completamente, la intensidad de los picos Cr_7C_3 (060) y Cr_3C_2 (002) se incrementa, acompañada con la aparición del pico Cr_3C_2 (011). Estos picos están localizados a ángulos más bajos que el patrón del polvo estándar como una consecuencia de las tensiones compresivas inducidas por el bombardeo iónico. Finalmente, cuando la presión es reducida a 0.4 Pa (muestra 5), el pico (060) de la fase Cr_7C_3 casi desaparece, un fuerte pico (002) de Cr_3C_2 es observado y aumenta levemente la intensidad del pico (011) de Cr_3C_2 .

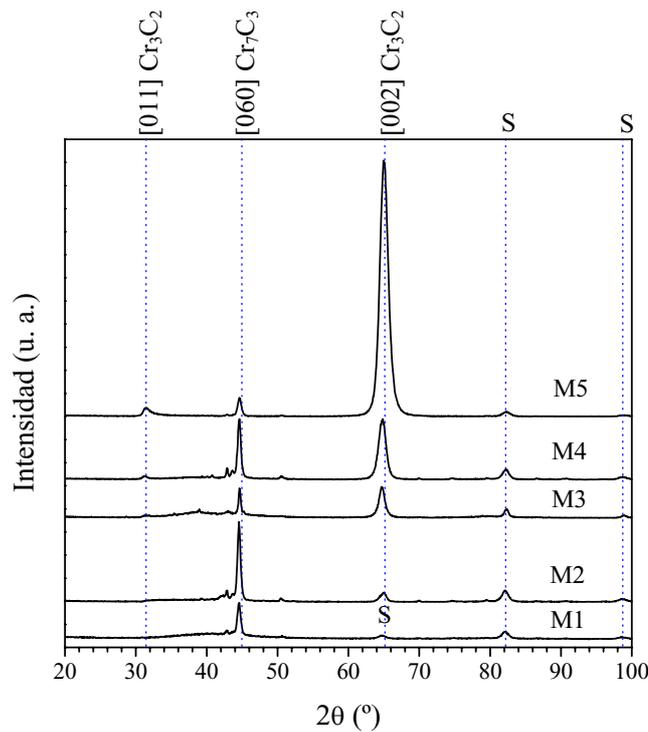


Figura AIV. Difractogramas XRD de muestras de CrC depositadas a diferentes presiones de C_2H_2 : muestra 1(M1), 6.1 Pa; muestra 2(M2), 3.0 Pa; muestra 3(M3), 2.4 Pa; muestra 4(M4), 1.4 Pa; muestra 5(M5), 0.4 Pa.

La figura AV muestra los difractogramas de rayos X de las muestras 5, 6 y 7 obtenidas bajo la misma presión de depósito (0.4 Pa), con voltajes en el sustrato de -150, -200 y -100 V respectivamente; pero éstas dos últimas con una película intermedia de CrN. Las tres muestras presentan difractogramas muy similares, la muestra 6

presenta el pico más estrecho y más intenso de Cr_3C_2 (002). Al cambiar el voltaje del sustrato a -100 V (muestra 7), la intensidad del pico Cr_3C_2 (002) disminuye de nuevo. En las muestras 6 y 7 aparecen los picos CrN (200) y (400) provenientes de la película intermedia. En las tres muestras se observa un pequeño pico que corresponde a Cr_3C_2 (011) y unas mínimas señales provenientes del sustrato.

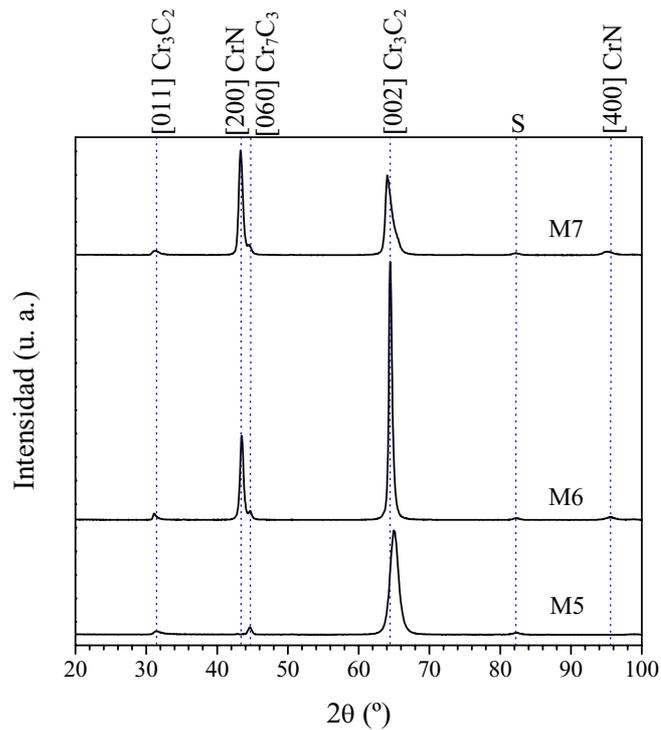


Figura AV. Difractogramas de la muestra 5(M5) depositada a una presión de C_2H_2 de 0.4 Pa sobre el sustrato de acero y las muestras 6(M6) y 7(M7) depositadas a las mismas condiciones sobre una capa intermedia de CrN .

ANEXO B

COMPOSICIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DEL GRUPO B: RECUBRIMIENTOS DE CrC DEPOSITADOS POR PULVERIZACIÓN CATÓDICA MAGNETRÓN

B.1. Espectroscopia de rayos X por dispersión de energía (EDX)

El porcentaje de carbono atómico de las muestras de CrC fue obtenido por espectroscopia de rayos X por dispersión de energía (EDX) en un microscopio electrónico de barrido (Leica 360, Cambridge Instruments) con 12 keV y 1.5 nA en el haz de electrones. El contenido de carbono de los recubrimientos aumentó cuando la presión parcial de CH₄ en el gas de depósito fue aumentada, como puede ser visto en la figura BI. Cuando la presión parcial de CH₄ es cambiada de 0.04 a 0.122 Pa, el contenido de carbono atómico de los recubrimientos varió desde 25 hasta 58 %. La dispersión en los resultados de composición de CrC entre las 27 muestras puede ser debida a la variación de otros parámetros de depósito, como el voltaje del sustrato o la temperatura del sustrato, que tienen alguna influencia sobre la incorporación de carbono en los recubrimientos. La línea punteada indica la principal tendencia mostrada por los recubrimientos en esta gráfica. Las más bajas presiones parciales producen recubrimientos sub-estequiométricos. Los recubrimientos con estequiometría Cr₃C₂ son obtenidos con las presiones parciales de CH₄ en el rango de 0.061 – 0.086 Pa. Estas muestras tienen la relación de composición atómica correspondiente a la del Cr₃C₂, y algunas de ellas muestran un rico contenido de la fase cristalina ortorrómbica Cr₃C₂ como fue observado en los patrones de difracción de rayos X (objeto de estudio de otro proyecto). Los recubrimientos obtenidos con las más altas presiones parciales de CH₄ muestran composición con exceso de carbono.

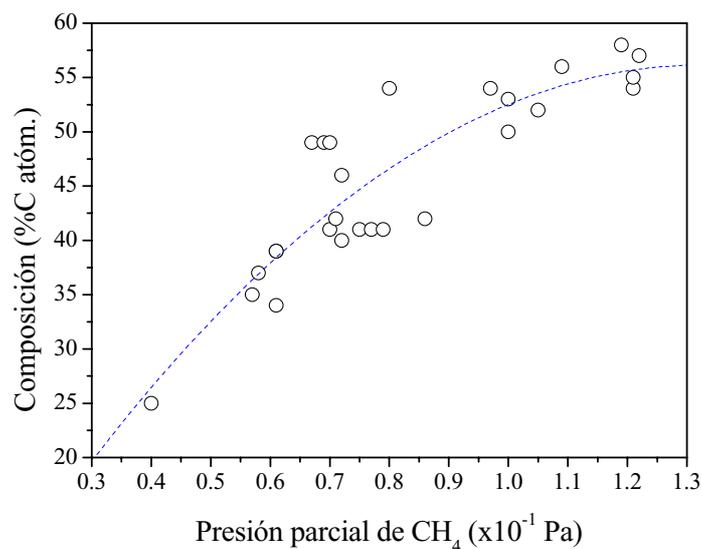


Figura BI- Contenido de carbono atómico de los recubrimientos de CrC depositados por pulverización catódica magnetrón r.f. en función de la presión parcial de CH₄ en el gas de depósito (Ar + CH₄). La línea discontinua es una guía visual de los datos.

B.2. Espectroscopia Raman

A fin de identificar el exceso de carbono no combinado presente en los recubrimientos se utilizó un espectrómetro Raman (Jobin Yvon T64000 con láser de Ar⁺, $\lambda = 514.5$ nm), debido a que el análisis Raman es muy sensible a pequeñas cantidades de carbono no combinado, en cualquiera de sus diferentes formas. La figura BII muestra los espectros Raman obtenido de tres recubrimientos con diferente contenido de carbono atómico. Las muestras con contenido de carbono inferior a 46 % no presentan señales de carbono libre, mientras recubrimientos con contenidos de carbono atómico mayores sí emiten señal, indicando la presencia de algún exceso de carbono. Por ejemplo la muestra con 41 % de carbono atómico con composición estequiométrica y con la fase cristalina Cr₃C₂ no presenta señal Raman (fig. BII). En la muestra con 54 % de carbono atómico alguna señal Raman es obtenida (fig. BII), la cual revela las bandas D (1394 cm⁻¹) y G (1568 cm⁻¹) originadas desde fases de carbono como grafito o amorfo “diamond-like-carbon” (DLC). La muestra con el más alto contenido de carbono atómico de 57 % muestra una señal Raman muy intensa con bandas D (1370 cm⁻¹) y G (1557 cm⁻¹) bien definidas, (fig. BII) comparado con el espectro Raman anterior. En las

muestras con el más alto contenido de C, la relación de intensidad de las bandas I(D)/I(G) disminuye apreciablemente, lo cual indica el predominio de la fase amorfa “diamond-like-carbon” sobre la fase de grafito en estos recubrimientos [Prawer, Ferrari]. Además, los recubrimientos con alto contenido de carbono muestran patrones de XRD de materiales amorfos.

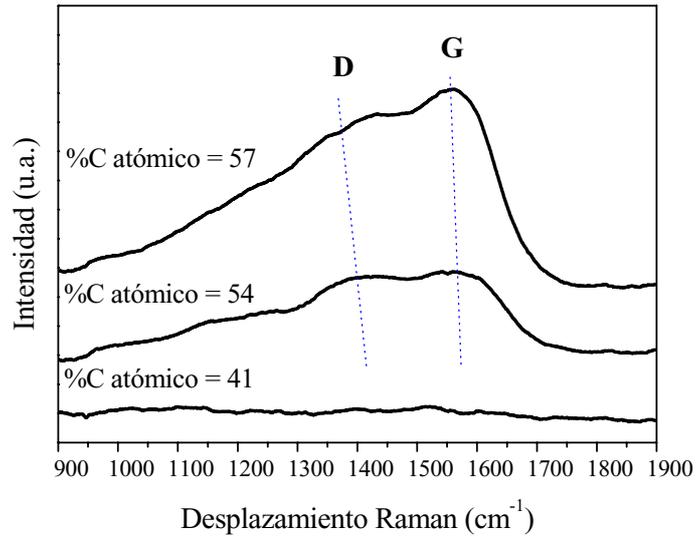


Figura BII- Espectros Raman de tres recubrimientos de CrC depositados por pulverización catódica magnetrón r.f. con diferente contenido de carbono: 41 %, 54 % y 57 %.

ANEXO C

COMPOSICIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DEL GRUPO C: RECUBRIMIENTOS CONSTITUIDOS POR MULTICAPAS DE Cr/CrC DEPOSITADOS MEDIANTE PULVERIZACIÓN CATÓDICA MAGNETRÓN

Composición de los recubrimientos

Los análisis de difracción de rayos X fueron realizados a las muestras con un difractómetro (Philips-MRD) de configuración $\theta/2\theta$ (bragg-Brentano). El espectro de difracción de rayos X (XRD) de la monocapa de referencia presenta, además de los picos (200) y (110) de Cr provenientes de la capa de adhesión de Cr, un pico muy intenso claramente identificado como la reflexión Cr_3C_2 (002) y una pequeña banda amplia la cual es atribuida a otras contribuciones menores de carburo de cromo. Los patrones de XRD de los recubrimientos multicapa presentan las reflexiones (110) y (200) desde las capas de Cr, con anchuras de pico aumentando como el período de la bicapa disminuye; también presentan una extensa banda donde la reflexión Cr_3C_2 (121) es localizada.

Los análisis SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) fueron realizados en un equipo Atomika 488, usando un haz de iones de oxígeno de 9 keV y 400 nA para las multicapas con períodos más gruesos, pero a 4.5 keV y 300 nA para los más delgados a fin de mejorar la resolución en profundidad. Los análisis SIMS de los recubrimientos mostraron una clara modulación en todas las multicapas confirmando la estructura multicapa diseñada previamente. Las señales SIMS de carbono y cromo en las capas de carburo de cromo muestran la misma composición estequiométrica medida en el recubrimiento monocapa de Cr_3C_2 .

ANEXO D

TASA DE CRECIMIENTO, COMPOSICIÓN ATÓMICA Y ESTRUCTURAL DE LOS RECUBRIMIENTOS DEL GRUPO D: RECUBRIMIENTOS DE CrAlN DEPOSITADOS POR EVAPORACIÓN POR ARCO CATÓDICO (CAE)

D.1. Tasa de crecimiento

El voltaje del sustrato tuvo un importante efecto sobre la tasa de crecimiento de las muestras depositadas, a mayor voltaje negativo, menor fue la tasa de crecimiento (figura DI). La tasa de crecimiento de las películas cambió de 5.0 a 2.5 $\mu\text{m}/\text{h}$ como el voltaje negativo del sustrato fue aumentado de -50 a -400 V. Un comportamiento similar fue observado en el depósito de recubrimientos de CrAlN por evaporación por arco catódico usando cátodos de Cr y Al puros [Vetter], aunque de acuerdo a los resultados de ambos trabajos, la dependencia parece ser más lineal que el ajuste sugerido por Vetter y coautores. Este comportamiento es debido al mecanismo de “re-sputtering” parcial inducido por el bombardeo iónico durante el crecimiento de la película. En la medida en que se aumenta el voltaje negativo, el flujo de átomos de Cr y Al, altamente ionizados, emitido por los cátodos llega al sustrato con energía cinética más alta, y como un resultado, un número más alto de átomos desde la película que está creciendo será “re-sputtered”.

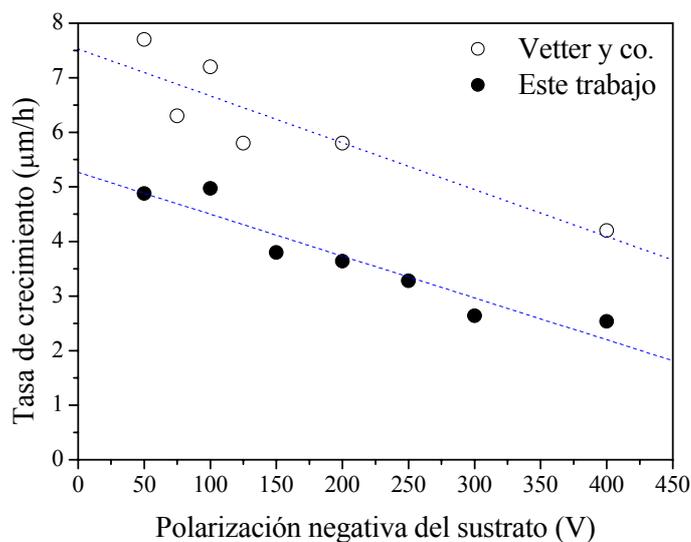


Figura DI- Tasa de crecimiento de recubrimientos de CrAlN en función del voltaje negativo del sustrato: (○) datos de la referencia Vetter y co., (●) muestras presentadas en este trabajo.

D.2. Composición atómica

Un perfil de composición típico obtenido por GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) es presentado en la figura DII, el cual corresponde a la muestra CrAlN4 depositada a $V_s = -200$ V. La composición del recubrimiento en profundidad es muy uniforme y se observa claramente la película intermedia de Ti. Los valores de espesores deducidos desde este análisis fueron sistemáticamente alrededor del 20 % más alto que los valores derivados con el método calotest. Aunque las composiciones atómicas deducidas con el análisis GDOES no pueden ser consideradas como valores absolutos, los resultados composicionales obtenidos para las diferentes muestras (figura DIII) indican que la composición de nitrógeno es prácticamente constante para todas las muestras (alrededor de 50 %) y que hay un leve aumento de la relación atómica Cr/Al cuando el voltaje negativo es aumentado. Este comportamiento puede ser atribuido a un campo de “sputtering” diferente para el Cr y el Al en el compuesto CrAlN.

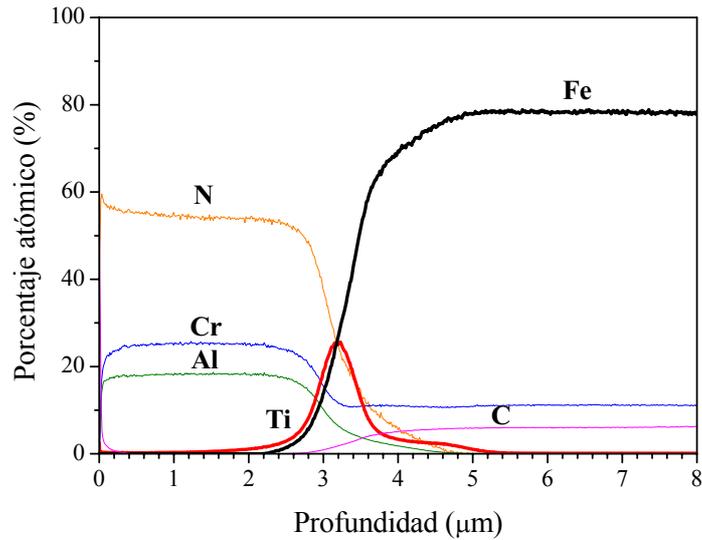


Figura DII- Perfil de composición GDOES de la muestra CrAlN4 depositada a un voltaje negativo de -200 V, sobre acero con una capa intermedia de Ti.

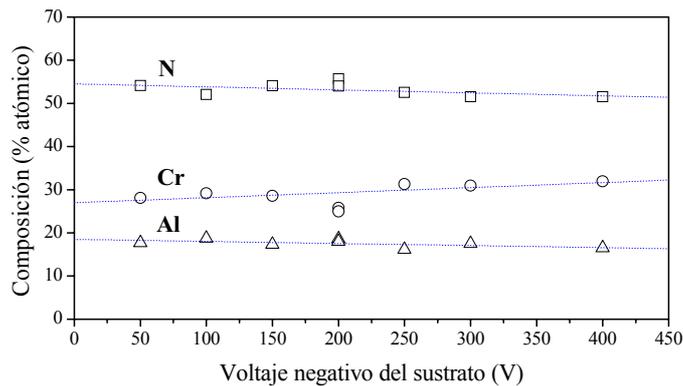


Figura DIII- Dependencia de la composición atómica de los recubrimientos de CrAlN con el voltaje negativo del sustrato.

D.3. Estructura cristalina

Los análisis de difracción de rayos X de los recubrimientos fueron desarrollados en un equipo Philips-MRD con configuración $\theta/2\theta$ (Bragg-Brentano). La figura DIV muestra los difractogramas XRD obtenidos para las diferentes muestras. Además de algunos picos débiles provenientes del sustrato (marcados con “S”) y desde la capa intermedia de Titanio (a $2\theta = 35^\circ$ y 40°), sólo los picos correspondientes a la estructura tipo NaCl están presentes, indicando que la estructura cristalina de nuestros

recubrimientos tanto de CrAlN como de CrN es predominantemente cúbica como la de CrN.

Cuando el voltaje negativo es aumentado, se observa una clara evolución estructural. La muestra CrAlN1 depositada al más bajo voltaje negativo ($V_s = -50$ V) muestra todos los picos correspondientes a la estructura del tipo NaCl con intensidades de pico similares a las tabuladas en el difractograma del polvo estándar [JCPDS-ICDD], lo cual sugiere una distribución de cristalitos orientados casi aleatoriamente. En el rango medio de voltajes negativos (-100 a -250 V) una estructura (111) altamente orientada es observada, en la cual la orientación (111) disminuye y el pico se desplaza hacia un valor de 2θ más alto cuando el voltaje negativo es aumentado, esto es una clara indicación de la reducción de tensiones en el recubrimiento. Este desplazamiento es acompañado por un progresivo ensanchamiento del pico, que puede ser interpretado como una reducción del tamaño de grano policristalino. En el rango de voltajes negativos alto ($V_s > -300$ V), la orientación preferida cambia completamente a (220) orientada para el valor más alto de $V_s = -400$ V.

Los dos difractogramas de los recubrimientos de CrN, mostraron los mismos picos de difracción de los recubrimientos de CrAlN pero a valores de 2θ menores. El recubrimiento de CrN1 depositado a -100 V reveló la estructura (111) altamente orientada, mientras que el difractograma de CrN2 depositado a -150 V es similar al de CrAlN1 depositado a -50 V.

En el trabajo citado antes [Vetter], no se encontró ningún detalle del efecto del voltaje sobre la estructura cristalina. Una orientación preferida (111) fue reportada para películas de $Cr_{1-x}Al_xN$ depositadas por pulverización catódica después de un recocido a 770 K para bajos contenidos de Al ($x < 0.27$), mientras que la orientación (220) fue preferida para contenidos mayores de Al [Banakh], aunque no se menciona nada respecto al voltaje. Sobre recubrimientos de $Cr_{1-x}Al_xN$ depositados por “arc ion plating” (AIP) usando un voltaje bajo de -20 V, también fue obtenida una estructura tipo NaCl para contenidos de aluminio de $x \leq 0.6$ [Kimura_1, Kimura_2]. Según nuestros resultados se puede concluir que la orientación preferida no es sólo determinada por la composición del material, sino que puede ser completamente alterada por el cambio del voltaje del sustrato.

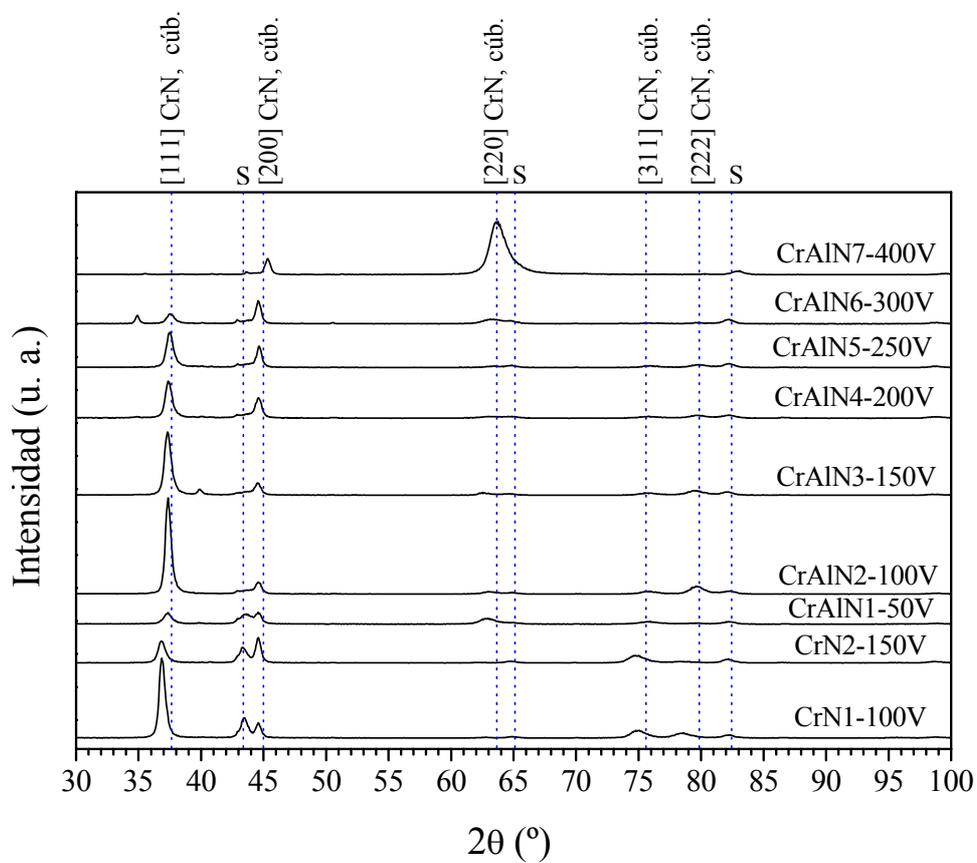


Figura DIV- Difractogramas XRD de las muestras de CrAlN y CrN depositadas aplicando diferentes polarizaciones negativas en los sustratos. Las líneas punteadas marcan la posición de los picos indicados en los recubrimientos estudiados. La "S" indica señales provenientes del sustrato.

ANEXO E

RELACIÓN DE MUESTRAS

En este anexo se presenta lista de los recubrimientos estudiados con los valores de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de caracterización de las propiedades tribológicas y mecánicas.

E.1. Grupo A: recubrimientos de CrC depositados por evaporación por arco catódico, “Cathodic Arc Evaporation” (CAE).

Muestra	Coefficiente de fricción μ, con bola de alúmina *	Coefficiente de fricción μ, con bola de acero *	Dureza (GPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
1: sus/CrC	0.04, 0.06, 0.16	0.08, 0.15, 0.17	10	98
2: sus/CrC	0.2, 0.22, 0.22	0.22, 0.18, 0.2	16	224
3: sus/CrC	0.2, 0.14, 0.15	0.19, 0.23, 0.16	12	182
4: sus/CrC	0.46, 0.53, 0.46	0.74, 0.58, 0.56	18	217
5: sus/CrC	0.17, 0.18, 0.19	0.16, 0.14, 0.18	20	286
6: sus/CrN/CrC	0.43, 0.47, 0.47	0.46, 0.45, 0.43	23	321
7: sus/CrN/CrC	0.46, 0.5, 0.41	--	22	299

**Los coeficientes de fricción contra cada bola están en orden de acuerdo a las cargas utilizadas de 0.5 N, 1 N y 2 N.*

E.2. Grupo B: recubrimientos de CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón, “sputtering”.

Muestra	Coefficiente de fricción μ^*	Tasa de desgaste en deslizamiento 1×10^{-14} (m ³ /Nm)*	Tasa de desgaste abrasivo 1×10^{-14} (m ³ /Nm)	Dureza (GPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Tensión (GPa)
CrC01	0.72	1.49	1.24	16	337	0.6
CrC02	0.55	1.51	1.38	16	260	0.7
CrC03	0.60	1.60	1.52	17	240	0.9
CrC04	0.39	1.34	2.59	20	251	4.2
CrC05	--	--	3.10	22	284	1.0
CrC06	0.34	2.19	3.15	22	360	5.5
CrC07	0.41	1.41	4.29	21	--	3.4
CrC08	0.43	2.17	3.19	22	250	3.7
CrC09	0.39	1.49	3.73	21	247	1.2
CrC10	--	--	--	22	219	3.7
CrC11	0.39	1.5	3.39	22	267	3.5
CrC12	--	--	3.85	19	194	3.5
CrC13	--	1.34	4.00	24	279	4.5
CrC14	0.32	1.45	3.18	20	--	4.8
CrC15	0.39	1.39	3.45	20	234	5.4
CrC16	--	1.46	2.14	22	295	4.6
CrC17	0.31	1.90	1.36	20	248	3.0
CrC18	--	--	1.74	23	288	5.0
CrC19	0.25	0.97	0.70	21	280	5.0
CrC20	--	--	--	22	281	6.0
CrC21	0.26	--	--	15	--	5.3
CrC22	--	--	--	22	288	5.0
CrC23	0.24	0.52	0.17	18	213	3.5
CrC24	0.21	0.59	0.43	20	236	--
CrC25	0.34	0.60	0.11	19	206	4.8
CrC26	0.20	--	--	19	292	3.8
CrC27	0.21	0.30	0.15	17	179	3.5

*Medidos contra bola de acero endurecido.

E.3. Grupo C: recubrimientos constituidos por multicapas de Cr/CrC depositados mediante pulverización catódica magnetrón, “sputtering”.

Propiedades tribológicas

Período de bicapa Λ (nm)	Coefficiente de fricción con bola de alúmina μ^*	Coefficiente de fricción con bola de acero μ^*	K contra bola de alúmina 1×10^{-14} (m^3/Nm)*	K contra bola de acero 1×10^{-14} (m^3/Nm)*	Tasa de desgaste abrasivo 1×10^{-14} (m^3/Nm)
22	0.56, 0.49	0.53, 0.60	2.37, 1.5	1.36, 1.69	1.27
32	0.63, 0.49	0.60, 0.49	1.96, 1.4	1.27, 1.26	0.53
60	0.54, 0.54	0.59, 0.53	1.94, 1.36	1.33, 1.27	0.67
100	0.55, 0.54	0.62, 0.51	2.05, 1.38	1.74, 1.25	0.67
150	0.59, 0.52	0.67, 0.54	1.41, 1.12	1.22, 0.88	0.78
300	--	--	--	--	--
Referencia	0.28, 0.31	0.26, 0.31	5.16, 4.04	2.55, 3.02	2.52

* Los coeficientes de fricción y las tasas de desgaste en deslizamiento sin lubricación son presentados para cada contracuerpo primero con los recubrimientos depositados sobre sustratos de silicio y en segundo lugar con los recubrimientos depositados sobre sustratos acero.

K es la tasa de desgaste en deslizamiento.

Propiedades mecánicas

Período de bicapa Λ (nm)	Dureza (GPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Tensión (GPa)	Carga crítica (N)
22	17	312	-0.3	77
32	19.5	325	0.6	78
60	17.5	314	1.4	70
100	15	298	1.6	70
150	16	306	1.1	69
300	15	294	1.2	57
Referencia	21	331	1.2	51

E.4. Grupo D: recubrimientos de CrAlN depositados por evaporación por arco catódico, “Cathodic Arc Evaporation” (CAE).

Propiedades tribológicas con bola de alúmina

Muestra	Coefficiente de fricción μ	K^* del recubrimiento 1×10^{-16} (m³/Nm)	K^* de la bola de alúmina 1×10^{-15} (m³/Nm)
CrAlN1	0.57	3.36	1.51
CrAlN2	0.45	2.62	0.76
CrAlN3	0.57	2.18	0.52
CrAlN4	0.47	2.40	1.18
CrAlN5	0.47	2.83	0.34
CrAlN6	0.44	2.31	1.18
CrAlN7	0.44	2.36	0.70
CrN1	0.30	5.06	0.34
CrN2	0.41	1.69	0.06

*K es la tasa de desgaste en deslizamiento para los recubrimientos o para la bola.

Propiedades tribológicas con bola de WC-Co

Muestras	Coefficiente de fricción μ	K^* del recubrimiento 1×10^{-16} (m³/Nm)	K^* de la bola de WC-Co 1×10^{-15} (m³/Nm)
CrAlN1	0.39	4.31	4.75
CrAlN2	0.30	1.68	3.10
CrAlN3	0.34	2.34	3.10
CrAlN4	0.39	2.47	4.22
CrAlN5	0.64	2.07	4.48
CrAlN6	0.57	2.01	3.50
CrAlN7	0.32	1.44	3.50
CrN1	0.47	0.97	3.08
CrN2	0.55	0.74	5.64

*K es la tasa de desgaste en deslizamiento para los recubrimientos o para la bola.

Propiedades mecánicas

Muestra	Rugosidad R_a (nm) *	Dureza (GPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
CrAlN1	9.7	31	336
CrAlN2	9.5	35	394
CrAlN3	10.8	32	354
CrAlN4	9.8	35	351
CrAlN5	9.2	35	360
CrAlN6	9.5	40	389
CrAlN7	9.7	33	313
CrN1	9.0	26	305
CrN2	7.6	29	327

**Rugosidad obtenida después de pulir finamente los recubrimientos para la medida de las propiedades mecánicas.*

