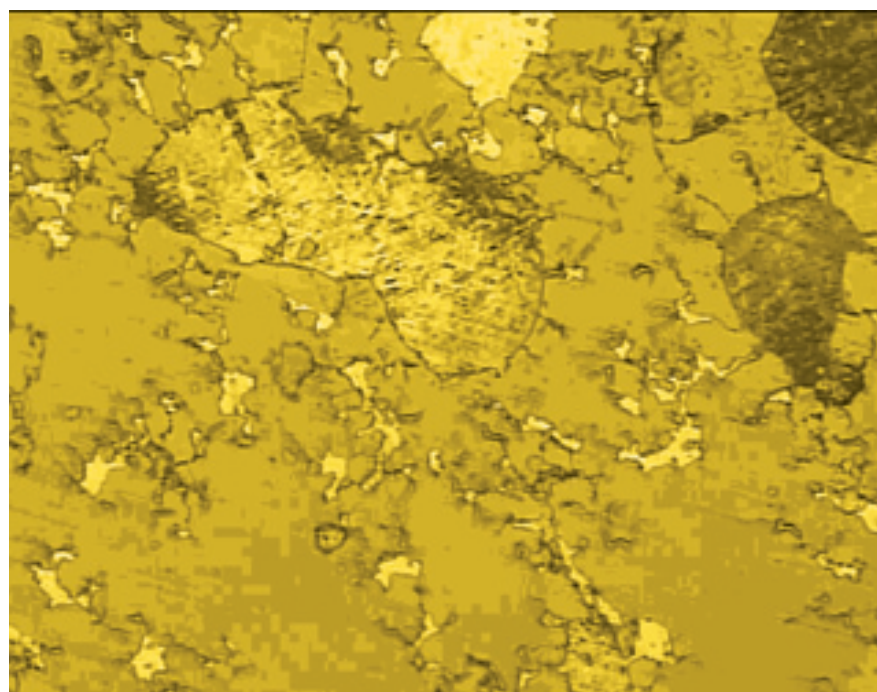


Estudio del comportamiento a la corrosión y el desgaste de recubrimientos en bicapas de W/WC crecidas en el acero AISI 304

H.E. JARAMILLO^{1,2,5}
N. ALBA^{1,3,5}
G. TERÁN⁴
B. VILLAMIL⁴



Micrografías de acero AISI 304

Resumen

Bicapas de W/WC se crecieron mediante la técnica de magnetron sputtering reactivo utilizando 40, 60, y 80% de metano CH_4 en la mezcla de gases. Las bicapas se crecieron sobre acero inoxidable AISI 304 para determinar el comportamiento al desgaste y a la corrosión. Antes de crecer las bicapas se creció una capa de Ti para mejorar la adherencia de los recubrimientos al sustrato. La resistencia al desgaste y el coeficiente de fricción de los recubrimientos se determinó utilizando el equipo tribómetro con la técnica pin on disk. Los recubrimientos, presentaron en promedio 0.6 de coeficiente de fricción. La medida de pérdida de peso de los recubrimientos permitió el análisis cualitativo del comportamiento al desgaste. Las bicapas crecidas con 80% de metano mostraron la mejor

1 Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales GCIM,

2 Departamento de Energética y Mecánica,

3 Departamento de Ciencias Básicas de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente,

4 Jóvenes Investigadores Colciencias

5 Centro de Excelencia en Nuevos Materiales CENM. Colombia.

Fecha de recibo: febrero de 2007

Fecha de aceptación: marzo de 2007

resistencia al desgaste y a la adhesión. Las pruebas de corrosión electroquímica mostraron que las bicapas crecidas con 80% de metano fueron más resistentes a la corrosión que las otras bicapas.

Palabras clave: Bicapas, W/WC, pin on disk, magnetron sputtering, resistencia al desgaste y a la corrosión.

Abstract

W/WC bilayers were deposited by reactive magnetron sputtering using 40%, 60% and 80% methane CH₄ in the gas mixture. The bilayers were grown on to AISI 304 stainless-steel substrates in order to study the wear and corrosion behavior. Before growing the bilayers, a Ti monolayer was grown to improve the adherence of the coatings to the substrate. The wear resistance and the friction coefficient of the coatings were determined using a pin-on-disk tribometer. All coatings had a friction coefficient of about 0.6. The measured weight lost of the bilayers from each probe allowed the qualitative analysis of wear behavior all coatings. The bilayers grown with 80% methane showed the best abrasive wear resistance and adhesion without failure through the coating in the wear track for dry pin-on-disk sliding. Electrochemical corrosion test showed that the bilayers grown with 80% methane were more resistant to corrosion than the ones uncoated.

Key words: Bilayers, W/WC, pin on disk, magnetron sputtering, wear and corrosion resistant.

1. Introducción

Desde los años treinta se han dedicado grandes esfuerzos al

desarrollo de nuevas técnicas de recubrimiento. El objetivo se centra en conseguir la mayor dureza superficial posible, debido a la relación entre la dureza y la resistencia al desgaste. A principios de los años ochenta estas técnicas se diversificaron, desarrollando nuevos compuestos y algunas de ellas avanzaron rápidamente a nivel industrial.¹

La aplicación de recubrimientos sobre un material o sustrato permite jugar con un material compuesto, obteniendo propiedades del recubrimiento relacionadas con el desgaste y del material base, al que se le atribuyen las propiedades mecánicas. Los tratamientos termoquímicos convencionales como cementación, nitruración, boruración y otros, vienen consiguiendo estos propósitos a base de difundir en el sustrato elementos como C, N o B. En el caso de los recubrimientos, el compuesto del recubrimiento y el material del sustrato suelen ser de distinta naturaleza. La obtención de propiedades combinadas como dureza, coeficiente de fricción y tenacidad son las bases de las investigaciones que se están llevando a cabo en el área de la ingeniería de materiales, en física, centros tecnológicos y universidades. A estas propiedades se suman, además, la necesidad de mejorar las propiedades eléctricas, ópticas, magnéticas y resistencia a la corrosión.

De todas las técnicas de recubrimientos que se han desarrollado,² las que se han incorporado a la industria con mayor facilidad son las de deposición física en fase de vapor (PVD), deposición química en fase de vapor asistida por plasma (PECVD) y la deposición química en fase de vapor (CVD).

Los recubrimientos se pueden definir como la transferencia de un material en la superficie de otro material, logrando una mejora de

sus propiedades mecánicas por la fusión de las propiedades de los dos materiales, su finalidad es mejorar las propiedades superficiales. La aplicación de los recubrimientos es muy amplia, se utilizan en motores de combustión interna, rodamientos de altas temperaturas, turbina de gas, válvulas, boquillas y componentes aeronáuticos, como barreras térmicas y de difusión, barreras de antidesgaste y resistencia a la corrosión.³

Los distintos métodos PVD consisten genéricamente en evaporar un metal puro o aleación por medios físicos en una cámara de vacío muy elevado aproximadamente 10^{-4} a 10^{-5} mbar. Una vez evaporado el metal o aleación, entra en contacto con un gas reactivo mediante plasma y forma el compuesto que se desea implantar sobre la superficie a recubrir. Este compuesto se proyecta contra las piezas por acción de la diferencia de potencial entre 200 y 400 V, que existe entre las piezas a recubrir y la cámara. Al entrar en contacto con el sustrato, el producto gaseoso formado se condensa sobre él.

Los sustratos con recubrimientos de capas finas y duras hacen disminuir el desgaste debido a que:⁴

- Actúan como una barrera de difusión.

- Disminuyen la intensidad de fricción (menor coeficiente de fricción), y por ello, rebajan los esfuerzos de corte.
- Reducen la abrasión por las sustancias duras.
- Crean una barrera contra la interacción química.
- Suprimen la adherencia entre la herramienta y la viruta que se desprende por microsoldaduras.

Para obtener un buen recubrimiento, las exigencias básicas de calidad tienen que establecerse tanto para el sustrato o material base como para el material del recubrimiento, por ello estos deben poseer las características mostradas en la Tabla 1.⁵

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de depositar una bicapa de tungsteno y carburo de tungsteno W/WC utilizando la técnica R.f. *magnetron sputtering* reactivo con voltaje bias, sobre el acero inoxidable AISI 304. A las diferentes muestras de acero se les realizó análisis químico, ensayos de dureza, análisis metalográfico y medida de rugosidad antes de crecer las bicapas. Para la caracterización de las bicapas se emplearon diversos ensayos como resistencia al desgaste mediante la técnica de ca-

Tabla 1. Características deseables en los sustratos y los recubrimientos.

Sustrato	Recubrimiento
<ul style="list-style-type: none"> • Composición química compatible con el recubrimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Buena adherencia a las superficies del sustrato.
<ul style="list-style-type: none"> • Buena tenacidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estructura compacta, densa y libre de porosidad.
<ul style="list-style-type: none"> • Dureza elevada tanto en caliente como en frío. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de rozamiento pequeño con respecto al sustrato.
<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de dilatación similar al de la capa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dureza elevada a las temperaturas más altas de trabajo.
<ul style="list-style-type: none"> • Buena conductividad térmica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran estabilidad química.
<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad dimensional a las temperaturas de recubrimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • De producción rápida y económica.

lotest, resistencia a corrosión electroquímica y resistencia al desgaste mediante la técnica *pin on disk*.

2. Detalles experimentales

Las bicapas se crecieron mediante la técnica PVD magnetrón sputtering, en un reactor semi-industrial.⁶ El sistema utilizado consta de cuatro cañones de cuatro pulgadas de diámetro, tres fuentes de radio frecuencia de 13.56 MHz RFX 600 A, con sus respectivos acoples de impedancia, tres fuentes de corriente directa MDx 500, un sistema de bombeo turbo-molecular, medidores de alta y baja presión, un sistema de calentamiento Athena 500 por radiación llegando hasta 350°C, fluxómetros digitales para cuatro gases, y un dispositivo de pasa-muro que soporta un eje asistido por un motor regulable en velocidad que permite girar el sustrato y producir los recubrimientos.

La configuración de este sistema de pulverización catódica consiste en una cámara de vacío, con la distribución de los electrodos, donde el blanco se halla en la zona del cátodo conectado a un potencial negativo y el sustrato está en la zona del ánodo que se encuentra conectada a un potencial positivo. Se introduce un gas de alta pureza, normalmente Argón, que sirve como medio donde se inicia y se sostiene la descarga que genera la pulverización catódica; con una presión del gas en el rango de 0 a 100 mtorr. Se observa así una descarga sostenida del plasma por la que viajan las especies que se condensan y se depositan en el sustrato para formar la película.

2.1. Sustrato

Se utilizaron probetas de acero inoxidable AISI 304 con diámetro de 16mm y espesor de 3.8mm aproximadamente. A todas las probetas se les hizo en una de sus caras un acabado superficial tipo espejo. En la Tabla 2 se presenta el análisis

cuantitativo de la composición química del acero utilizado.

Tabla 2. Resultados de análisis químico del sustrato, Acero AISI 304, mediante el espectrómetro de emisión atómica Termo Jarrell Atm Comp 181

Ítem	Elemento	%
1	C	0.0405
2	Si	0.4095
3	Mn	1.7850
4	P	0.0276
5	S	0.0114
6	Cr	17.8600
7	Ni	8.1380
8	Mo	0.3220

Antes de crecer las bicapas, los sustratos se caracterizaron mediante diferentes técnicas:

- Ensayos de dureza: La dureza se midió usando un durómetro Rockwell C.⁷
- Análisis metalográfico: Para conocer la microestructura del acero AISI 304, la probeta se atacó utilizando un reactivo al 4.5ml de ácido clorhídrico, 1.5ml de ácido nítrico y 2ml de etanol absoluto grado reactivo por el método de inmersión. Para esto se empleó un microscopio óptico *Olympus* y el software analizador de imágenes *Image-Pro-Plus*.
- Ensayo de rugosidad: Se utilizó el rugosímetro Mitutoyo para realizar las mediciones. El parámetro establecido para este ensayo fue el recorrido del sensor 0.8mm y se tomaron cinco mediciones en ese recorrido; al final de la prueba se generó una gráfica del perfil de la superficie examinada.

2.2. Proceso de crecimiento de los recubrimientos W/WC

Las probetas se sometieron a una limpieza con alcohol isopropí-

lico. En el proceso de deposición de las bicapas de W/WC se utilizó una atmósfera de gases variante, comenzando con un 20% de metano (CH₄) y aumentando en rangos de 20 hasta el 80% de CH₄ (ver Tabla 3). La variación de composiciones de la atmósfera de gas permitió analizar el comportamiento de la resistencia a la corrosión y al desgaste de los diferentes recubrimientos. En la Figura 1 se presenta el orden de deposición de las bicapas.

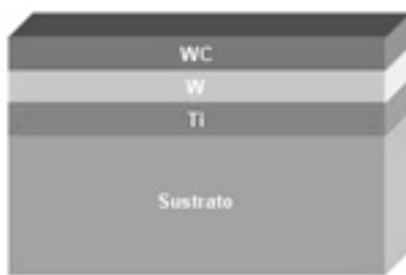


Figura 1. Orden de deposición de las bicapas W/WC

2.3. Caracterización de las bicapas

- Resistencia al desgaste mediante la técnica Calotest: Las pruebas de micro-abrasión para determinar las constantes de desgaste del recubrimiento (Kc) y del sustrato (Ks) respectivamente, se llevaron a cabo en un equipo Calotest modificado.
- Resistencia a la corrosión electroquímica: antes de realizar las curvas Tafel se debe conocer el rango del potencial, mediante la curva RP se obtiene el potencial; este dato se le suministra al software para comenzar el ensayo (ver Tabla 4).

2.4. Resistencia al desgaste mediante la técnica pin on disk

En la Tabla 5 se detallan los parámetros utilizados para el ensayo de desgaste por la técnica de *pin on disk*.

3. Resultados y análisis

3.1. Probetas sin recubrimiento

Se realizaron cinco indentaciones en distintas partes de la superficie sobre la probeta de acero AISI 304 con una dureza promedio de 14 HRC.

En la Figura 2, se ve la muestra microestructura del acero AISI 304 utilizado como sustratos a aumentos de 200 y 500 veces su tamaño. Estas microestructuras fueron comparadas con las microestructuras presentadas en el Metals Handbook,⁸ las cuales coincidieron con la estructura característica de este acero. En estas figuras se observa una fase austenita, característica de estos aceros inoxidables.

Tabla 3. Condiciones utilizadas para crecimiento de las bicapas W/WC utilizando 20%, 40%, 60% y 80% de metano.

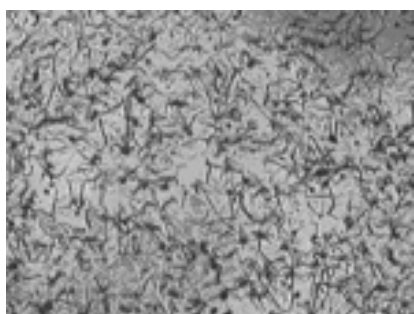
Ítemes	Condiciones	Valores
1.	Método de deposición	r. f. <i>magnetron sputtering</i> reactivo
2.	Densidad de Potencia (W/mm ²)	0.045
3.	Potencia r.f. (W)	350
4.	Presión de trabajo (mtorr)	5
5.	Bias r. f. (V)	-70
6.	Blanco	Tungsteno 99.99%
7.	Diámetro del Blanco (mm)	100
8.	Distancia blanco al sustrato (mm)	70
9.	<i>Buffer Layers</i>	Monocapa de Ti
10.	Tiempo Buffer Layers (min.)	30
11.	Temperatura del sustrato (°C)	300
12.	Tiempo de proceso (h)	W: 1 ½ y WC: 1 ½

Tabla 4. Condiciones utilizadas para el ensayo de corrosión electroquímica de acero inoxidable AISI 304.

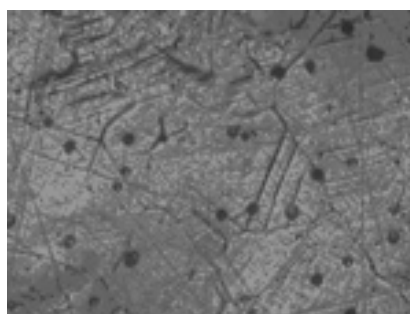
Ítemes	Condiciones	% CH ₄			
		20%	40%	60%	80%
1.	Voltaje inicial (V)	-0.71	-0.5	-0.71	-0.35
2.	Voltaje final (V)	-0.21	0.05	-0.21	0.15
3.	Tasa de barrido (mV/s)	0.5	0.5	0.5	0.5
4.	Densidad del material (mg/cm ³)	7.86	7.86	7.86	7.86

Tabla 5. Condiciones utilizadas para el ensayo de desgaste mediante la técnica *pin on disk* de un acero inoxidable AISI 304.

Ítemes	Tabla de datos	% CH ₄			
		20%	40%	60%	80%
1.	Peso inicial del pin (g)	0.8813	0.8781	0.8815	0.8822
2.	Diámetro del pin (mm)	6	6	6	6
3.	Peso inicial de la probeta de acero AISI 304 sin recubrimiento (g)	5.8155	5.7883	5.8123	5.8281
4.	Temperatura del ambiente de laboratorio (°C)	23.0	24.7	24.0	24.0
5.	Carga aplicada (N)	2	2	2	2
6.	Recorrido (m)	2500	2500	2500	2500
7.	Velocidad de recorrido (rpm)	100	100	100	100
8.	Radio de la huella de desgaste (mm)	3.5	3.5	3.5	3.5



(a)



(b)

Figura 2. Micrografías del acero AISI 304 (a) 20X. (b) 50X.

3.2. Mediciones de rugosidad

En las mediciones de rugosidad se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la rugosidad de los aceros AISI 304 y AISI 420.

Ítem	Característica	Rugosidad [μm]
1	Acero AISI 304 sin recubrimiento	0.21
2	Acero AISI 304 con recubrimiento (40% CH ₄)	0.31
3	Acero AISI 304 con recubrimiento (80% CH ₄)	0.29

En la Tabla 6 se puede apreciar cómo aumenta la rugosidad de la superficie debido a la deposición de las películas, anticipando que habrá una mayor pérdida de material en los recubrimientos que en los sustratos.

3.3. Ensayo de calotest

En la Tabla 7 se muestran los espesores de las bicapas crecidas con la técnica de PVD *magnetron sputtering*, se observa una reducción del espesor de las bicapas a medida que se aumenta el porcentaje de gas metano, debido a que se disminuye el porcentaje del gas Argon.

Tabla 7. Resultados de calotest del acero AISI 304 con bicapas.

Ítemes	Acero AISI 304 W/WC	D (μm)	d(μm)	Espesor (μm)
1.	20% CH ₄	930	630	3.94
2.	40% CH ₄	1640	1420	3.51
3.	60% CH ₄	1600	1400	3.01
4.	80% CH ₄	1520	1340	2.74

3.4. Análisis de resistencia a la corrosión

Las curvas de polarización obtenidas en el ensayo de corrosión electroquímica para muestras con

recubrimiento y sin él, en condiciones estáticas, se muestran en la Figura 3.

De la Figura 3 se observa que en los sustratos con recubrimientos de W/WC crecidos con 40% y 80% de metano se generó un corrimiento de las curvas hacia densidades menores, comparados con la curva del sustrato y el sustrato con recubrimiento de 60% de CH₄ presentaron un comportamiento muy similar. Se supone la posibilidad de una adherencia baja del recubrimiento, que produjo como consecuencia el desprendimiento de la película. Se observa un aumento de la pendiente de la curva anódica y una disminución de la intensidad de corrosión para los recubrimientos con 40% y 80% de metano.

Al analizar mediante el microscopio óptico el comportamiento de la película en la prueba de corrosión se observó que no fue semejante en todos los casos (ver Figura 4): la

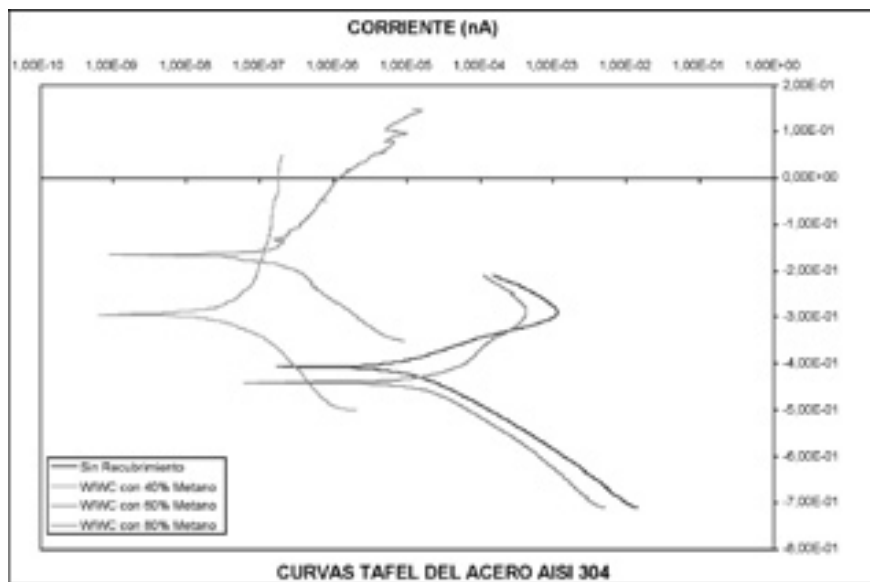


Figura 3. Curvas de polarización de las probetas.

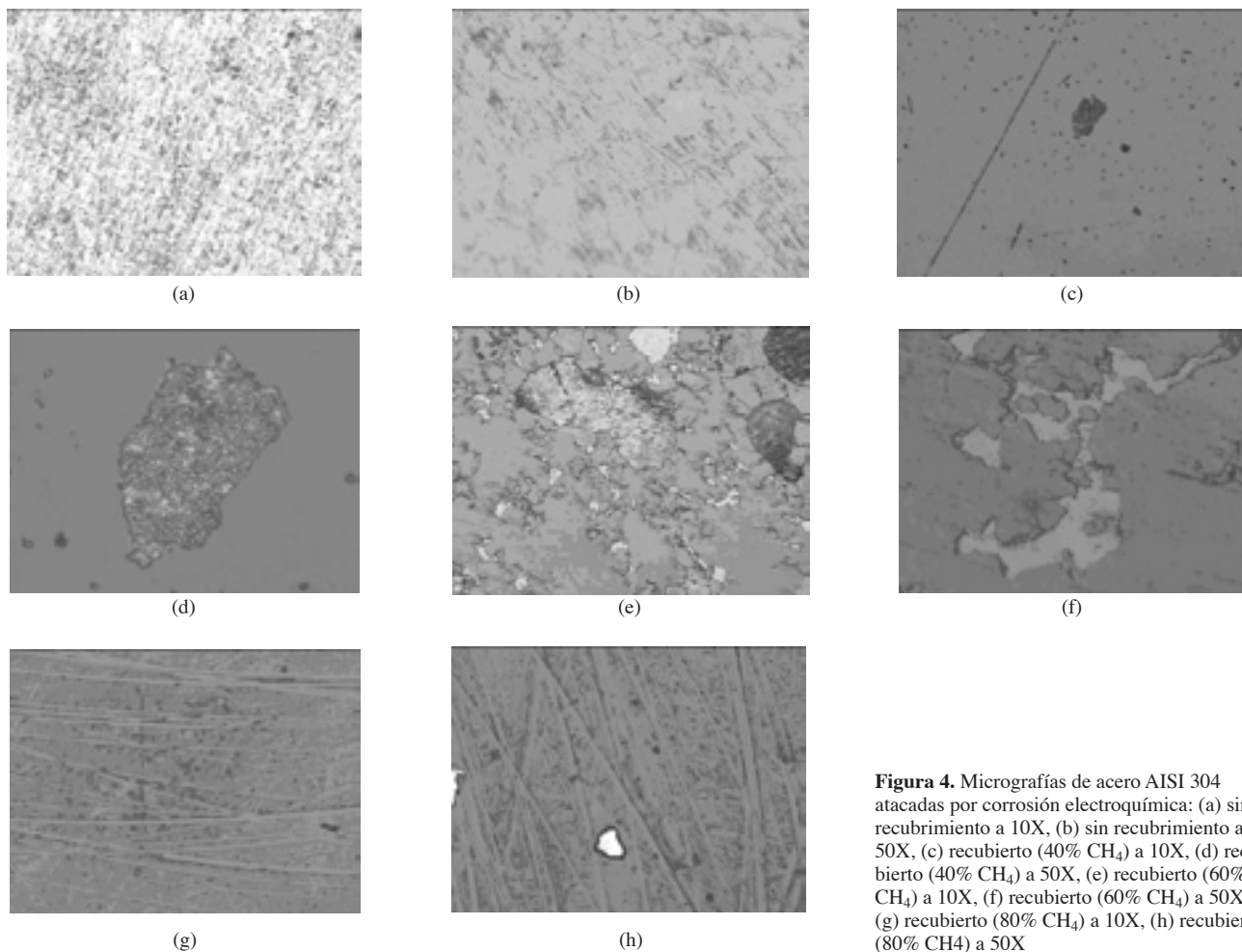


Figura 4. Micrografías de acero AISI 304 atacadas por corrosión electroquímica: (a) sin recubrimiento a 10X, (b) sin recubrimiento a 50X, (c) recubierto (40% CH₄) a 10X, (d) recubierto (40% CH₄) a 50X, (e) recubierto (60% CH₄) a 10X, (f) recubierto (60% CH₄) a 50X; (g) recubierto (80% CH₄) a 10X, (h) recubierto (80% CH₄) a 50X

muestra con 60% metano detectó el desprendimiento de la capa, el cual fue asociado a la aparición de un pico de corriente anódica en las curvas según se muestra en la Figura 3. Esta información, junto con la observación de las películas después del ensayo, permite concluir que este desprendimiento no se debió a la acción de mecanismos de corrosión localizada, sino más bien a la disolución de la matriz por debajo de la capa y a la posterior remoción de ésta por falta de estabilidad mecánica en el recubrimiento.⁹

La inhibición del proceso catódico y anódico se puede deducir a partir de los datos presentados en la Tabla 8.

La velocidad de corrosión expresada como corriente de corrosión, I_{corr} , se calculó utilizando el método de exploración Taffel.¹⁰ De la Tabla 8 se observa que el sustrato y la muestra con 60% metano poseen un potencial de corrosión más negativo que las otros recubrimientos, indicando que el sistema recubierto es más activo y, por lo tanto, menos resistente a la corrosión.

De la muestra crecida con 40% de metano se observa una superficie con picaduras de corrosión. Caso contrario se da en el sustrato y recubrimiento con 60% de metano, donde existe un aumento en la pendiente de la curva catódica lo que provoca una variación en la corriente anódica. El sistema se halla bajo control catódico.

La muestra crecida con 80% de metano presentó alta resistencia a la corrosión de acuerdo con la Figura 4g y 4h que muestra la superficie del recubrimiento.

3.5. Ensayos de desgaste por Pin on Disk

En la Figura 5a se observan tres zonas importantes durante el proceso de desgaste; la primera región muestra un incremento

Tabla 8. Valores obtenidos del ensayo potencio-dinámico de las muestras

Muestra	E_{corr} (mV)	I_{corr} (A)	Tasa de corrosión (mpy)
Sustrato Acero AISI 304	-407.0	10×10^{-6}	4.587
Acero AISI 304-40% CH ₄	-293.0	127×10^{-9}	0.05833
Acero AISI 304-60% CH ₄	-440.0	29×10^{-6}	13.25
Acero AISI 304-80% CH ₄	-165.0	281×10^{-9}	0.1286

súbito del coeficiente de fricción debido al contacto inicial del pin y la probeta que se presenta desde 0 m a 450 m del recorrido, en la región intermedia se muestra una leve estabilidad del coeficiente entre

450 m y 850 m de recorrido, debido a un asentamiento que se produce por la disminución de la rugosidad inicial de la superficie. En la última región se estabiliza el coeficiente de fricción a $0.679 \mu\text{m}$.

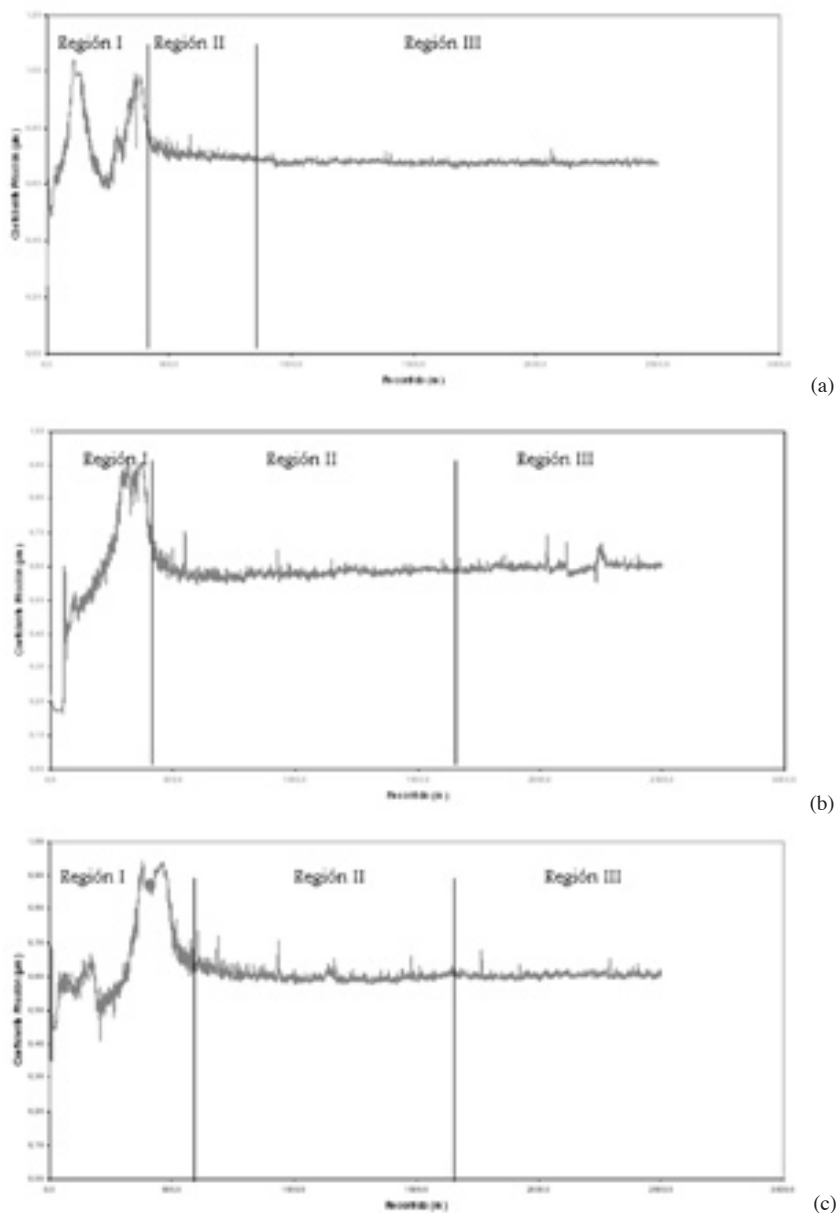


Figura 5. Curva de coeficiente de fricción vs recorrido sobre el acero AISI 304: (a) sin recubrimiento, (b) recubiertas con una bicapa W/WC (40% CH₄), (c) recubiertas con una bicapa W/WC (80% CH₄)

En la Figura 5(b) se presenta la gráfica de coeficiente de fricción versus recorrido de la bicapa de W/WC a 40% CH₄ crecida sobre acero AISI 304, se aprecian de igual manera las tres regiones durante el proceso de desgaste; en la primera región se observa una variación ascendente del coeficiente de fricción entre 0m a 400m del recorrido, una variación dinámica del coeficiente de fricción en la segunda región que se encuentra entre 400m y 1700m; en el tramo final el coeficiente de fricción se estabiliza a 0.597 μ m.

De igual forma en la bicapa de W/WC a 80% de CH₄ sobre acero AISI 304, se identificaron las tres regiones (ver Figura 5c). La región I que va de 0m a 550m muestra que la superficie de la probeta presenta asperezas más pronunciadas, que demoran su asentamiento. La región II entre 550m y 1700m muestra una variación lenta del coeficiente de fricción y la región III se consolida a 0.602 μ m.

En la Tabla 9 se muestra el coeficiente de fricción hallado para la probeta del material base, como también las probetas recubiertas.

Tabla 9. Coeficientes de fricción determinados

Material	Coefficiente de fricción
Acero AISI 304 sin recubrimiento	0.680
Acero AISI 304 con recubrimiento de W/WC (40% CH ₄)	0.597
Acero AISI 304 con recubrimiento de W/WC (80% CH ₄)	0.602

Se analizaron las huellas dejadas por el pin sobre la probeta de acero AISI 304, mediante el analizador de imágenes Leyca y el microscopio óptico Olympus. En la Figura 6(a) se presentan las imágenes. La huella presenta un camino de desgaste poco homogéneo en

toda la superficie, con la formación de adhesión en algunos sectores.

La huella de desgaste del acero AISI 304 con bicapas de W/WC 40% de metano (ver figura 6b) presenta un desgaste considerable de la bicapa, incluyendo desprendimiento del sustrato. La micrografía de la figura 6c, presenta un desgaste homogéneo de la bicapa de W/WC durante todo el recorrido de la huella, en esta bicapa no se presentó el fenómeno de adhesión.

4. Conclusiones

Las pruebas de desgaste mostraron que los aceros recubiertos con bicapas de W/WC crecidas con 80% de metano fueron más resistentes al desgaste que las capas al 40% y 60% de metano.

En las pruebas de corrosión, las bicapas con 80% de metano presentaron baja pérdida de masa y la película no fue atacada en su totalidad.

Estos resultados indican que para aplicaciones en ingeniería con ambientes corrosivos, se recomienda el uso de aceros AISI 304 con bicapas de W/WC crecidas con 80% de metano.

5. Agradecimientos

Este proyecto se elaboró con el apoyo de la Vicerrectoría de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Autónoma de Occidente, el Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) y Colciencias, mediante la modalidad de Jóvenes Investigadores. El crecimiento de las bicapas se realizó en el Sena-Astin y la caracterización se llevó a cabo en los laboratorios de materiales de la Escuela Marco Fidel Suárez y la Universidad Autónoma de Occidente.

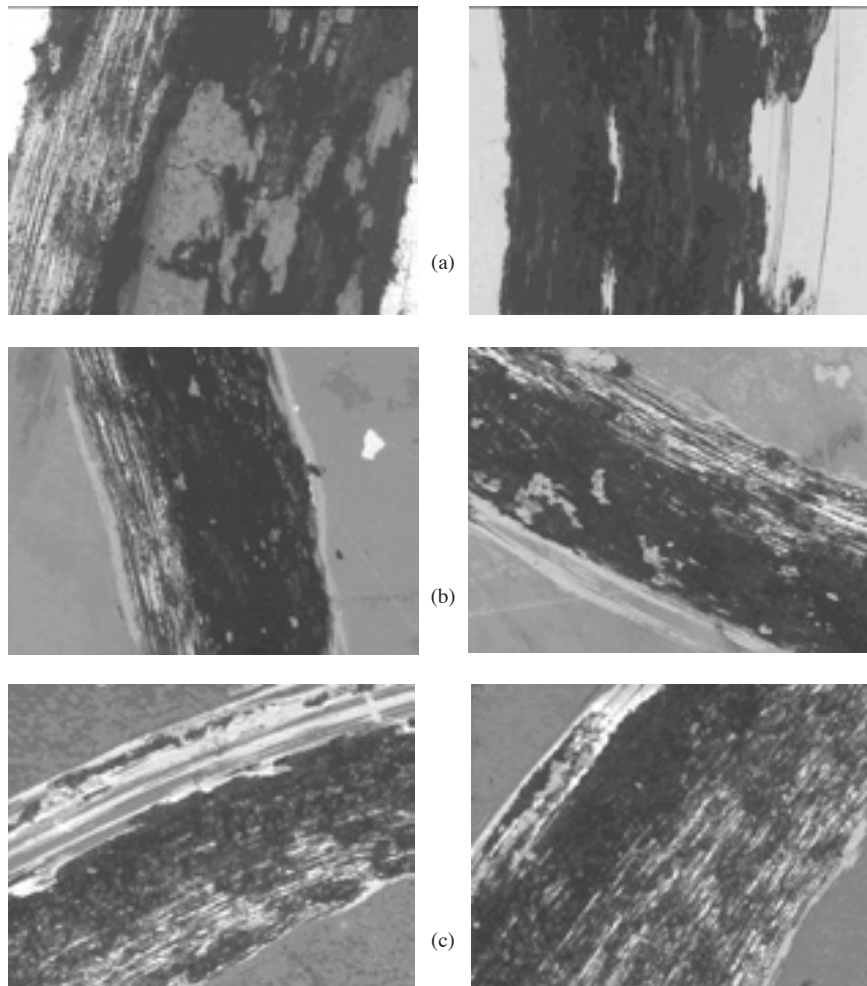


Figura 6. Micrografía del camino de desgaste sobre el Acero AISI 304 5X (a) sin recubrimiento, (b) 40% CH₄ (c) 80% CH₄

Bibliografía

1. L. Carreras y F. Malá, grupo TTC, Departamento de Recubrimientos avanzados. Actualidad industrial de las técnicas de recubrimientos de capas duras finas. Trabajo publicado en la revista Ibérica de tecnología, Numero 404, junio 2003.
2. L. Carreras, S. Bueno, F. Montalá. grupo TTC, Departamento de Recubrimientos avanzados. Aplicaciones decorativas de las técnicas de PVD, Trabajo publicado en el boletín AIAS, julio 2003.
3. B. W. Madsen. "measurement of wear and corrosion rates using a novel slurry wear test", *Materials Performance*, 26 (1987), 21-28.
4. A. Fan, L. Jinming, T. Ziyun, "An investigation of the corrosive wear of stainless steels in aqueous slurries", *Wear* 193 (1996), 73-77.
5. J. Lousa, E. Romero, J. Esteve, F. Montalá, L. Carreras. Recubrimientos multicapa C-CrN, aplicaciones mecánicas obtenidos por PVD, Presentado al IX Congreso Nacional de Tratamientos Térmicos y de Superficies 2003. España.
6. Laboratorios de CDT ASTIN -Sena, Centro de Desarrollo Tecnológico y Asistencia técnica a la industria del Servicio Nacional de Aprendizaje Sena, Cali, Colombia.
7. Laboratorio de Materiales de la Universidad Autónoma Occidente, Cali, Colombia.
8. Metals Handbook. Metallography and Microstructures. American Society of Metals International. New Jersey, USA, 1998.
9. G. Zum, "Microstructure and wear of materials", Elsevier, Holand 1987.
10. Y. Zheng, Z. Yao, X. Wei, K. Wei. "The synergistic effect between erosion and corrosion in acid slurry médium", *Wear* 186-187 (1995), 555-561.