

ESTUDIO DEL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DUPLEX Y MULTICAPAS TiN/Ti EN PRUEBAS DE MICROABRASIÓN

M. Flores^{1*}, E. De Las Heras², R. Ruelas¹, E. Rodríguez¹, A. Bautista¹, L. Pazos², P. Corengia³

¹ Centro de Investigación en Materiales, DIP-CUCEI, Universidad de Guadalajara, A.P. 470, Zapopan Jal., C.P. 45101, México.

² Grupo de Biomateriales, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Av. Gral. Paz 5445, B1650WAB San Martín, Buenos Aires, Argentina.

³ INASMET-Tecnalia, Mikeletegi Pasealekua 2, E- 20009 Donostia-San Sebastián, España
e-mail*: maflores@dip.udg.mx

Palabras claves: Desgaste, Microabrasión, nitruración, recubrimientos duros.

RESUMEN

La nitruración iónica, sobre aceros, se utiliza para endurecer la superficie de componentes mejorando la resistencia a la corrosión, al desgaste e incrementando la vida a fatiga. Los tratamientos dúplex, son una alternativa para resolver las limitaciones de recubrimientos de alta dureza sobre sustrato de durezas inferiores. En este caso el tratamiento dúplex consiste en un tratamiento de nitruración iónica seguido de un recubrimiento monocapa o multicapa depositado por medio de la técnica de PVD.

El presente trabajo estudia la influencia de la variación en la severidad de contacto en el modo de desgaste presente en la prueba de microabrasión usada para medir el coeficiente de desgaste de recubrimientos dúplex, compuestos por una capa nitrurada por plasma DC pulsado más recubrimientos de TiN y multicapas de TiN/Ti depositadas sobre acero inoxidable AISI 316L sin nitrurar, nitrurado y acero H13. La severidad de contacto se modificó variando la carga aplicada (0.25 a 1 N). Los abrasivos usados fueron una suspensión de partículas de diamante de 0.1µm de diámetro y una suspensión de partículas de alúmina de 5µm de diámetro promedio. Para el caso de las multicapas metal-cerámico se analiza la influencia de la presencia de capas metálicas relativamente blandas en la determinación del coeficiente de desgaste. Se emplearon dos velocidades de giro de la esfera de 0.05 y 0.154 m/s utilizándose dos equipos de microabrasión: uno comercial y otro construido en el Laboratorio de la UdeG. Las huellas de desgaste fueron fotografiadas y medidas en un microscopio óptico. Se estableció el valor de la carga crítica a la cual se produce la transición entre los modos de desgaste de los sustratos y las muestras nitruradas.

El tratamiento de nitruración iónica permite incrementar la resistencia al desgaste microabrasivo del acero AISI 316L. Los recubrimientos dúplex incrementan la resistencia al desgaste de las muestras nitruradas. Asimismo, las muestras con recubrimientos multicapas superan en resistencia al desgaste a las muestras dúplex con recubrimientos monocapas. La mayor resistencia de las multicapas podría explicarse por un aumento en la resistencia a la fractura y no por un incremento de dureza de la superficie. El uso de abrasivo con tamaño de partícula de 0.1µm no permitió identificar la transición en el modo de desgaste. Por otra parte, en el caso de las capas dúplex, la capa externa de TiN no presenta un patrón de desgaste claro que permita identificar el modo de desgaste.

1. INTRODUCCIÓN

Se ha reportado que la resistencia al desgaste medida en pruebas de microabrasión está relacionada con el rendimiento de las herramientas de corte y por ello esta prueba puede ser usada como pre-evaluación del desempeño de recubrimientos aplicados a las mismas [1-2]. La prueba de abrasión a micro escala ha mostrado ser reproducible y permite obtener el coeficiente de desgaste y, además, se utiliza para medir el espesor de recubrimientos [3-5].

En la prueba de microabrasión se aplica un abrasivo, mediante una suspensión, entre la superficie de una esfera que gira y la muestra a la cual se le aplica una carga (generalmente entre 0.2N y 3N). Cuando las partículas abrasivas deslizan entre la muestra y la esfera, se presenta el modo de desgaste de dos cuerpos produciéndose huellas que presentan ranuras o surcos. Por otro lado, si las partículas abrasivas giran entre la muestra y la esfera, el modo de desgaste es de tres cuerpos, obteniéndose huellas de desgaste con la presencia de múltiples indentaciones en lugar de ranuras. Se ha reportado que cuando el modo dominante de desgaste es de tres cuerpos, es más repetible la medición del volumen desgastado.

La transición entre los modos dominantes de desgaste depende de la severidad de contacto. En este sentido, se ha identificado la transición para cargas de 0.5 N cuando se usa una esfera de 2.5 cm [4].

Entre los tratamientos de superficie utilizados en aceros se encuentra la nitruración iónica. Este tratamiento, se utiliza para endurecer la superficie de componentes mejorando la resistencia a la corrosión, al desgaste e incrementando la vida a fatiga de los aceros tratados. Una de las muchas ventajas de este tratamiento respecto a la nitruración convencional proviene del efecto del *sputtering* durante el tratamiento asistido por plasma.

Los tratamientos dúplex, son una alternativa para resolver las limitaciones de recubrimientos de alta dureza sobre sustrato de durezas inferiores. En este caso el tratamiento dúplex consiste en un tratamiento de nitruración iónica seguido de un recubrimiento duro. Los recubrimientos duros pueden ser monocapa o multicapa y pueden obtenerse por medio de la técnica de deposición física en fase vapor (PVD). La capa nitrurada puede actuar como soporte mecánico del recubrimiento, evitando la fractura frágil del mismo debido a la deformación del sustrato cuando se aplican cargas locales.

Diferentes trabajos han mostrado que recubrimientos dúplex con multicapas mejoran la resistencia a la microabrasión respecto a tratamientos dúplex monocapa [6,7]. De igual forma, se ha reportado un incremento en la vida útil de brocas nitruradas y recubiertas con multicapas TiAlN/VN respecto a brocas con sólo recubrimientos multicapas TiAl/VN [8]. Sin embargo, son necesarios nuevos estudios que

identifiquen y comparen la transición en los mecanismos de desgaste de sistemas abrasivo-recubrimiento, y que discutan el uso de partículas abrasivas relativamente grandes.

En el presente trabajo, se estudia la influencia de la severidad de contacto en el modo de desgaste presente en la prueba de microabrasión de muestras de acero AISI 316L y H13. Se evalúa el coeficiente de desgaste de recubrimientos dúplex, compuestos por una capa nitrurada seguida de un recubrimiento de TiN y multicapas de TiN/Ti.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Tratamiento de nitruración iónica

Con anterioridad al tratamiento de nitruración iónica, las muestras de acero AISI 316L fueron desbastadas con papel lija granulometría 600 y limpiadas en un baño de ultrasonido durante 10min en acetona y 10min en alcohol isopropílico.

En forma previa a la nitruración, se realizó un *sputtering* durante 3h usando una mezcla de 50%Ar + 50%H₂. El tratamiento fue llevado a cabo en un reactor industrial durante 20h a 400°C y una presión de 6.5hPa; la mezcla utilizada fue de 75%H₂+25%N₂, la tensión de 700V, la densidad de corriente: ~1Acm⁻² y el Pulso t_{on}/t_{off} : 70-700µs.

2.2 Depósito de recubrimientos por PVD

Los recubrimientos fueron depositados por medio de la técnica PVD *magnetron sputtering* empleando un blanco de titanio de 2 pulgadas de diámetro con pureza de 99.99 %. Se utilizó un plasma formado en una atmósfera de Ar para depositar el titanio y una mezcla de Ar+N₂ para depositar las capas de nitruro de titanio (TiN). El cambio de titanio a TiN se logró controlando el flujo de nitrógeno sin interrumpir el *sputtering*, es decir el plasma se mantuvo encendido durante el transcurso del depósito de las multicapas. Con lo anterior se obtuvo un cambio gradual en la composición de la multicapa.

El titanio se depositó a una presión de 0.4Pa (3mTorr) y un flujo de gas de 1sccm. Para depositar el TiN se uso una mezcla de 40%Ar + 60%N₂ a una presión de 0.8Pa (6 mTorr), se uso un flujo de gases 1sccm de Ar y 1.5sccm de N₂. La corriente del plasma fue de 0.4A tanto para el Ti como para el TiN, mientras que el voltaje usado fue de 405V y 465V respectivamente. Con las condiciones de depósito anteriores se obtuvo una tasa de depósito de 0.27±0.05nm/s para el TiN y de 0.83±0.16nm/s para el Ti. El espesor de cada monocapa fue entre 0.2 y 0.5µm, en todos los casos la primera capa depositada siempre fue de Ti y la última de TiN.

Se utilizó una muestra comercial con una capa de Ti/TiN depositada por arco catódico sobre acero AISI 316L nitrurado, la cual fue identificada como TiN en la Tabla I.

Las muestras de acero H13 fueron desbastadas hasta papel lija de granulometría 2000 y pulidas con pasta de diamante 1µm. Posteriormente, se depositó una multicapa no periódica con polarización de -100V, esta muestra fue nombrada 2TiN/Ti.

En la Figura 1 se presenta, esquemáticamente, el diseño de tres multicapas depositadas sobre acero AISI 316L nitrurado y sobre acero H13.

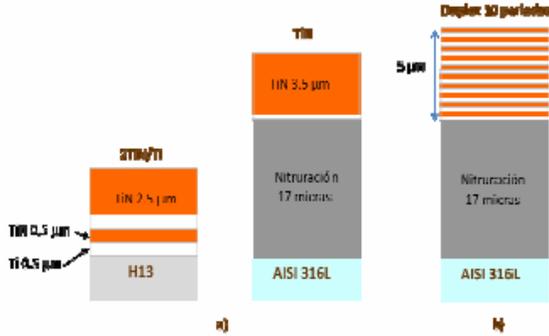


Figura 1. a) Capas depositadas con diseño no periódico, muestras 2TiN/Ti y TiN. b) Dúplex: Capa nitrurada más 10 períodos de TiN/Ti.

En la Tabla I se detallan las características de las muestras empleadas en este trabajo.

Tabla I: Espesores de los recubrimientos

Muestra	Espesor (nm)		
	Ti	TiN	Total
Sustrato de AISI 316L Nitrurado	Referencia		
TiN	200	3300	3500
N 10 TiN/Ti	250	250	5000
N 13 TiN/Ti	200	200	5200
Sustrato de AISI 316L	Referencia		
10 TiN/Ti	250	250	5000
13 TiN/Ti	200	200	5200
Sustrato H13	Referencia		
2 TiN/Ti*	500	500	4000

* Sustrato H13: 2 TiN/Ti, capa final TiN 2.5µm

2.3 Medición de la microdureza

La microdureza compuesta del sistema, recubrimiento-sustrato, fue medida por medio de microdureómetros Akashi MVK-H2 y Shimadzu 341-64278 usando un indentador Vickers, cargas de 50g y una duración de la aplicación de 30s.

2.4 Prueba de microabrasión

La prueba de microabrasión ha recibido creciente atención y se han aplicado pruebas interlaboratorios para analizar su reproducibilidad. Por medio de ello, se ha logrado establecer que la severidad de contacto S puede ser expresada por la ecuación [4]:

$$S = \frac{W}{A \nu H'} \quad (1)$$

donde W es la carga aplicada entre la bola y la muestra, A es el área de interacción (área de la huella de desgaste) definida por la ecuación (2), ν es la fracción de volumen del abrasivo en la suspensión y H' es la dureza efectiva dada por la ecuación (3).

$$A = \pi a'^2 = \pi(a^2 + 2Rd) \quad (2)$$

En la ecuación (2) a es el radio del área Hertziana de contacto, R es el radio de la bola y d el diámetro de las partículas abrasivas.

La dureza efectiva H' es definida como:

$$\frac{1}{H'} = \frac{1}{H_b} + \frac{1}{H_m} \quad (3)$$

donde H_b es la dureza de la bola y H_m es la dureza de la muestra.

Las ecuaciones (1) y (3) muestran que a medida que aumenta la dureza de la muestra, sin variar el resto de los parámetros, la dureza efectiva aumenta y la severidad de contacto disminuye.

A partir de una comparación del modo de desgaste de diferentes sistemas tribológicos, con diferentes combinaciones de abrasivo, material de la muestra, esfera y condiciones de prueba [4]; se ha encontrado que se puede definir una severidad crítica de contacto S^* , la cual se relaciona empíricamente con la razón de las durezas H_m/H_b de la siguiente forma:

$$S^* = \alpha \left(\frac{H_m}{H_b} \right)^\beta \quad (4)$$

donde α y β son constantes empíricas con $\alpha=0.0076$ y $\beta= -0.49$ para razones de dureza H_m/H_b de 0.05 a 10 [4]. Se reporta que cuando $S/S^* < 1$ domina la abrasión de tres cuerpos y cuando $S/S^* > 1$ la abrasión por rayado o de dos cuerpos.

La tasa específica de desgaste o volumen específico de desgaste V_E se calculó mediante la fórmula:

$$V_E = \frac{V}{DW} \quad (5)$$

donde V es volumen de la muestra perdido por desgaste, D es la distancia recorrida por la esfera y W la carga aplicada. Suponiendo que la huella de desgaste sigue la geometría esférica de la bola, el volumen perdido se puede calcular con:

$$V = \frac{1}{3}\pi h^2(3R - h) \quad (6)$$

$$V = \frac{\pi b^4}{64R} \quad b \ll R \quad (7)$$

donde h es la profundidad de la huella o cráter, R es el radio de la bola y b es el diámetro de la huella de desgaste. La profundidad de desgaste se puede obtener con:

$$h = R - \sqrt{R^2 - (b/2)^2} \quad (8)$$

Para pruebas donde la profundidad de penetración no supera el espesor del recubrimiento, la tasa de desgaste específico equivale al coeficiente de desgaste k_c dado por la ecuación de Arshad [9] para el desgaste abrasivo $V = kDP$.

Para las pruebas de microabrasión desarrolladas en el presente trabajo, se usaron: un equipo comercial de "Ball Cratering" marca Gencoa y un equipo de fabricación propia (construido en el Laboratorio del Centro de Investigación en Materiales, DIP-CUCEI, UdeG). La Figura 2(a) presenta un diagrama de bloques de los elementos usados para la operación del equipo de fabricación propia. La Figura 2(b) ilustra la forma de montar la muestra y aplicar la carga, bajo la metodología llamada de bola libre sobre dos ejes (en este modo, uno de ellos es movido por una banda conectada a la polea de un motoreductor). El sistema cuenta con un brazo de palanca que permite variar la carga aplicada, hasta llegar al límite donde la fricción entre la esfera y la muestra es igual a la fricción entre la esfera y los ejes. El equipo Gencoa tiene una velocidad de giro de 116rpm para la esfera de 2,54cm (1 pulgada) de diámetro y 100rpm para una esfera de 3cm (1.18 pulgada) de diámetro. En el caso del equipo de fabricación propia la velocidad de giro de la esfera puede variar de 0 a 120 rpm.

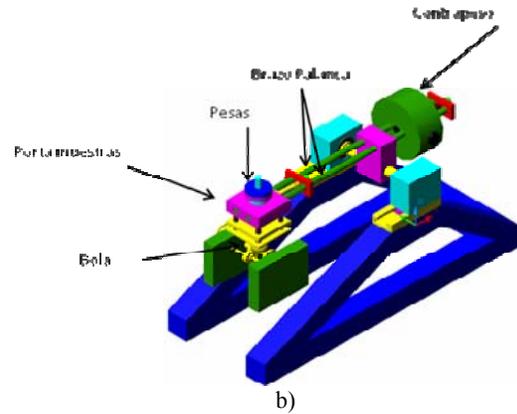
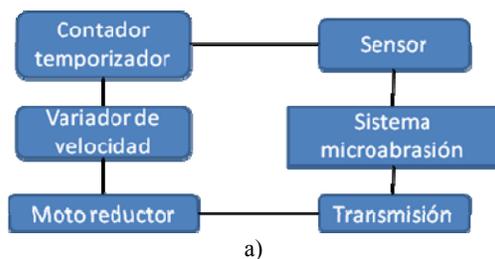


Figura 2. a) Diagrama de bloques del sistema de microabrasión fabricado en el Laboratorio de la UdeG. b) Dibujo esquemático del sistema de microabrasión.

Se utilizaron dos abrasivos; uno de ellos fue una suspensión de partículas de diamante de $0.1\mu\text{m}$, la concentración fue la suministrada por el proveedor del equipo de microabrasión. A todas las muestras medidas con este tamaño de partícula se les aplicó la misma suspensión y por lo tanto la concentración fue constante. El segundo abrasivo utilizado fue una solución 10% en volumen de polvo de alúmina (Buehler No. 40-6605-050-16) en agua destilada. En la Tabla II se presentan las condiciones de desgaste para los dos abrasivos empleados con la bola de 2.54cm de diámetro.

Tabla II: Parámetros para la medición del desgaste

Abrasivo Suspensión	Carga (N)	Velocidad (m/s)-(rpm)	Distancia recorrida (m)
Diamante $0.1\mu\text{m}$	1	0.154-116	9.25-185
Alúmina $5\mu\text{m}$ 10% Vol.	0.25-0.75	0.05-37.5	6
	0.25-1	0.154-116	9.25

El volumen perdido por desgaste se calculó del promedio medido en cuatro pruebas para cada carga aplicada, se midió el diámetro paralelo y perpendicular a la dirección de giro de la esfera y el promedio se utilizó para calcular el volumen con la ecuación (6).

2.5 Observación de la superficie e identificación de fases

La estructura cristalina de las multicapas y las capas nitruradas se estudiaron por medio de difracción de rayos X con un difractor Siemens D500 usando radiación de $\text{Cu K}\alpha$ con $\lambda = 0.15406\text{nm}$.

La huella de desgaste fue observada y medida por medio del microscopio óptico que posee integrado el microdurómetro. Las fotomicrografías y mediciones

de las huellas de desgaste se obtuvieron mediante un microscopio metalográfico PME Olympus Tokio.

3. RESULTADOS

3.1 Microdureza y estructura de las superficies obtenidas por tratamientos dúplex

La microdureza compuesta promedio de las muestras nitruradas fue de 600 HV, las muestras prenitruradas N13 TiN/Ti y N10 TiN/Ti presentaron una dureza de 1300 HV y 1250 HV respectivamente. La muestra nitrurada con una capa de TiN presentó una dureza de 1275 HV. La multicapa 13 TiN/Ti depositada sobre el sustrato de 316L sin nitrurar presentó una dureza de 530 HV. La muestra TiN/Ti depositada sobre acero H13 tuvo una dureza de 940 HV.

Los resultados de difracción de rayos X sobre la muestra de 10 períodos nitrurada, evidenciaron una orientación preferencial en la dirección (111) para el TiN, y en la dirección (002) para el Ti. El pico en $2\theta = 39.2$ fue producido por la fase Ti_2N la cual pudo haberse formado durante la transición entre el Ti y el TiN. En el caso de la muestra depositada por arco se presentó una orientación preferencial en la dirección (111).

3.2 Pruebas de microabrasión con suspensión de partículas de diamante de 0.1 μ m

En la Figura 3a se muestra la tasa específica de desgaste para las muestras sin nitrurar y nitruradas con diferentes períodos de recubrimientos, ensayadas bajo una carga de 1N en una distancia de 9.25m. Se puede observar que la resistencia al desgaste de las muestras con tratamientos dúplex fue superior a las muestras que sólo poseen capa nitrurada. Asimismo, de los resultados obtenidos, de las diferentes muestras con multicapas, se desprende que el coeficiente de desgaste, excepto para la muestra N 10 TiN/Ti, es del mismo orden. Este resultado, podría deberse a que en las pruebas de microabrasión presentadas en la Figura 3a, los recubrimientos multicapas conservaron su integridad, evaluándose de esta forma, sólo el recubrimiento sin influencia del sustrato (con o sin tratamiento de nitruración).

Por otro lado, la dureza compuesta de las muestras dúplex monocapa (TiN) y multicapas (N 13 TiN/Ti y N 10 TiN/Ti), fue del mismo orden de magnitud. En este sentido, se esperaría que no existan diferencias en la resistencia al desgaste abrasivo. Sin embargo, a al aumentar la distancia recorrida, el resultado de la prueba de desgaste para 185m, evidencia que la muestra con tratamiento dúplex multicapas (N 13 TiN/Ti) presenta una resistencia al desgaste superior (Figura 3b). Esto podría explicarse por la resistencia

que presentan las mismas a la propagación de fisuras [10] y, al hecho que la profundidad de la huella en la muestra TiN alcanzó la capa nitrurada que se encuentra debajo del recubrimiento (Figura 3c - superior) mientras que la muestra con multicapas presenta sólo una leve visualización de la misma (Figura 3c - inferior).

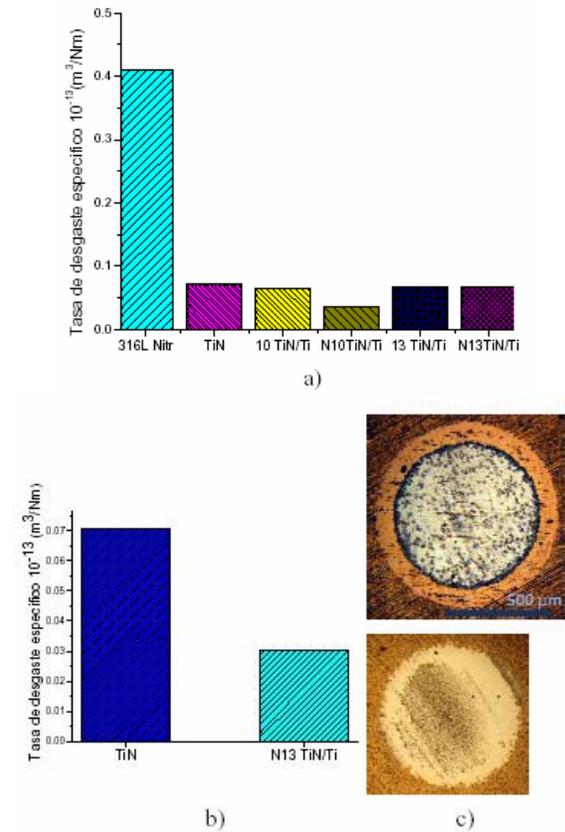


Figura 3. Resultados de desgaste usando como abrasivo partículas de diamante de 0.1 μ m para a) 9.25m y b) 185m. c) Huellas de desgaste de la muestra TiN (superior) y c) N 13 TiN/Ti (inferior).

3.3 Pruebas de microabrasión con suspensión de partículas de alúmina de 5 μ m

Los resultados de las pruebas de microabrasión, utilizando una dispersión de partículas de alúmina de 5 μ m, se presentan en la Figura 4. En la Figura 4a, se muestra la variación de la tasa de desgaste en función de la carga aplicada, para las muestras sin nitrurar y nitruradas, ensayadas a dos velocidades distintas. En la misma, se puede observar que a medida que se incrementa la carga aplicada el coeficiente de desgaste disminuye para todos los casos. De acuerdo con la ecuación (1), conforme aumenta la huella y el área de contacto se incrementa, la severidad de contacto disminuye. Es notable que después de un cierto desgaste, que permite alcanzar un área de contacto mayor (como se observa para la carga de 0.5N), el coeficiente de

desgaste es similar para las velocidades de 0.05m/s y 0.154m/s.

En la Figura 4b, se presenta la variación de la profundidad de la huella en función de la carga aplicada para las muestras TiN y 2 TiN/Ti. Para la muestra TiN, es posible apreciar el aumento de la tasa de desgaste cuando la profundidad de la huella alcanza el sustrato (espesor de recubrimiento = 3.5µm). Asimismo, se evidencia la mayor resistencia de la multicapa depositada sobre H13, en la cual, para el ensayo de 1N, la huella apenas está alcanzando el sustrato.

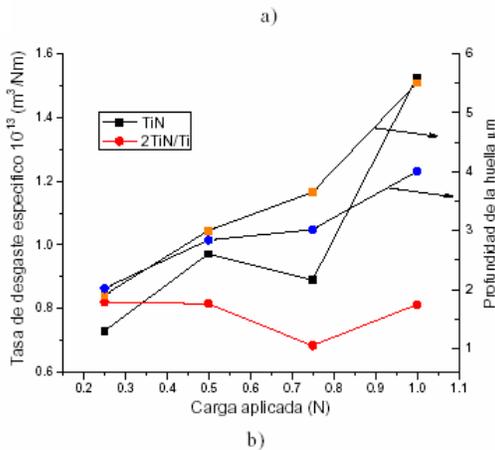
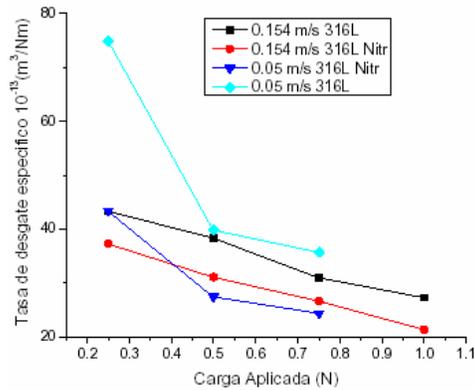


Figura 4. a) Tasa de desgaste, de muestras sin nitrurar y nitruradas, ensayadas bajo diferentes condiciones de carga y velocidad, b) Tasa de desgaste y Profundidad de huella para diferentes cargas aplicadas

En la Figura 5 se presentan las fotomicrografías de las huellas de desgaste de las muestras de AISI 316L nitruradas y sin nitrurar ensayadas a 0.05m/s y con cargas de 0.5N y 0.75N. De la observación se desprende que, para las muestras de AISI 316L sin nitrurar, el modo de desgaste actuante fue de tres cuerpos para ambas cargas. En el caso de las muestras nitruradas, las rayas que se aprecian para la carga de 0.5N (Figura 5c) indicarían el inicio de la transición hacia el modo de desgaste de dos cuerpos.

Asimismo, se observó que al aumentar la carga las rayas se acentúan (Figura 5d).

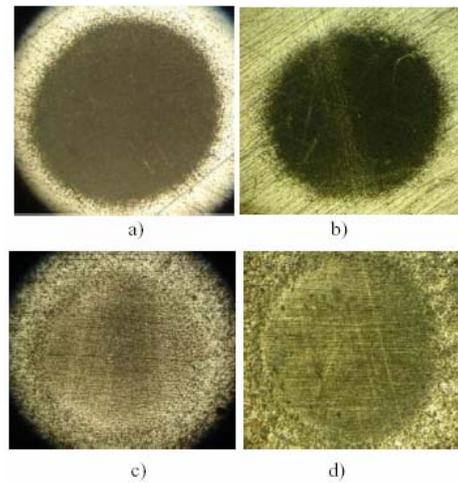


Figura 5. Huellas de desgaste para una velocidad de 0.5m/s. AISI 316L a) W=0.5N, b) W=0.75N y AISI 316L nitrurado c) W=0.5N, d) W=0.75N

En la Figura 6 se muestran imágenes de las huellas de desgaste obtenidas a partir de pruebas realizadas a una velocidad de 0.154m/s usando cargas de 0.25N. La muestra de AISI 316L recubierta (sin nitrurar) presenta el modo de desgaste de tres cuerpos, mientras que las huellas de las muestras dúplex presentan rayas que podrían indicar el modo de desgaste de dos cuerpos. Este comportamiento podría explicarse, ya que, debido al aumento de dureza, el abrasivo deforma más la esfera que la muestra, la esfera atrapa la partícula abrasiva que no gira y causa rayas con poca profundidad en la superficie de la muestra siguiendo la topografía existente. Las fotografías de las Figuras 6c y 6d no permiten identificar el modo de desgaste para estas muestras.

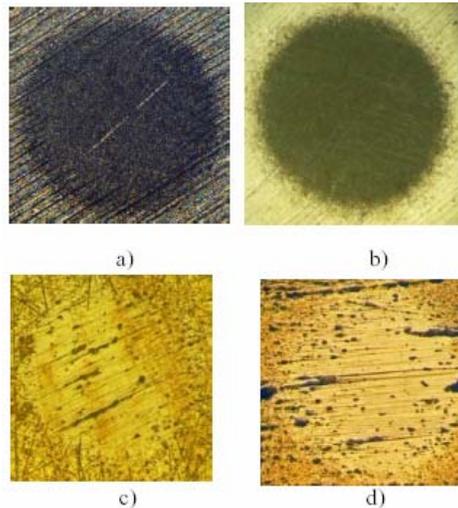


Figura 6. Huellas de desgaste para una velocidad de 0.154m/s usando una carga W=0.25N, para muestras de a) 316L, b) 316L nitrurado, c) TiN y d) 2TiN/Ti.

En la Figura 7 se presentan las huellas de desgaste para una velocidad de 0.154m/s, las tres huellas presentan surcos que indican el modo de desgaste de dos cuerpos. En el caso de la muestra nitrurada, al aumentar la carga de 0.75 a 1N aumenta la superficie cubierta con rayas.

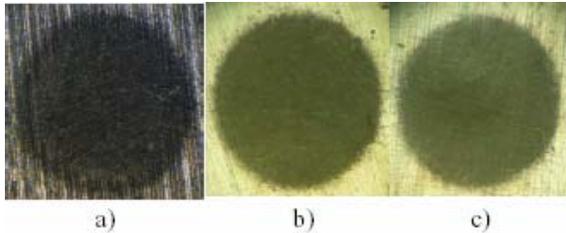


Figura 7. Huellas de desgaste para una velocidad de 0.154m/s, a) AISI 316L, W=0.5N, b) AISI 316L nitrurado, W=0.75N y c) AISI 316L nitrurado, W=1N.

4. DISCUSIÓN

Las muestras dúplex presentaron una mayor resistencia al desgaste que las multicapas sobre el sustrato AISI 316L sin nitrurar, esto podría ser adjudicado al aumento de la dureza compuesta, de la superficie, por efecto de la nitruración. En el caso de las muestras 13TiN/Ti, y N13TiN/Ti (muestra dúplex), la dureza compuesta de esta última, es aproximadamente el doble de la primera; sin embargo, la tasa de desgaste obtenida, no fue la mitad de la tasa de desgaste de la muestra multicapa 13TiN/Ti. Este hecho podría deberse a que, para las cargas usadas, es posible medir el coeficiente de desgaste de los recubrimientos con escasa influencia del sustrato.

Por otro lado, los tratamientos dúplex, también retrasan el avance de la profundidad de la huella, evitando que el sustrato entre en contacto con el abrasivo, por ello su influencia es más notoria para el caso de mayores distancias recorridas, como evidenciaron las pruebas realizadas a 185m. Cuando las cargas aplicadas en situaciones de desgaste son mayores, el recubrimiento se beneficia del soporte mecánico que le proporciona la capa nitrurada y la mejora se puede notar desde el inicio de la prueba [11].

Para muestras ensayadas a una velocidad de 0.154m/s, la transición en el modo de desgaste de tres cuerpos hacia el de dos cuerpos se observó tanto en el AISI 316L como en el AISI 316L nitrurado, iniciándose la transición al modo mixto de desgaste para cargas de 0.5N. Para esta velocidad, se observó una tendencia hacia el modo de desgaste de dos cuerpos a medida que la carga aumentó. Sin embargo, no se observó que éste sea el modo de desgaste dominante para las mayores cargas usadas. En las muestras ensayadas a una velocidad de

0.05m/s, la transición en el modo de desgaste se da para mayores cargas y se puede identificar el modo dominante de desgaste de mejor manera.

En el caso de la multicapa depositada sobre acero H13, se puede decir que la influencia del sustrato fue mínima, ya que, la profundidad de la huella de desgaste no alcanzó al sustrato. La elevada resistencia al desgaste podría atribuirse al hecho que el sustrato fue polarizado durante el depósito de las multicapas [12].

5. CONCLUSIONES

El tratamiento de superficie de nitruración iónica incrementa la resistencia al desgaste microabrasivo del acero AISI 316L. Los recubrimientos dúplex incrementan la resistencia al desgaste de las muestras nitruradas, mientras que las muestras con multicapas superan en resistencia al desgaste a las muestras dúplex con monocapas. La mayor resistencia de las multicapas no se explicaría por un aumento en la dureza sino por un aumento en la resistencia a la fractura. El uso de abrasivo con tamaño de partícula pequeño, 0.1 μ m, permite medir el espesor del recubrimiento, y no se identificó transición en el modo de desgaste para este abrasivo.

Usando abrasivo de 5 μ m el modo de desgaste depende tanto de la velocidad de giro de la bola como de la carga aplicada. A una mayor velocidad de giro de la bola, la transición entre el modo de desgaste de tres cuerpos hacia el de dos cuerpos se presenta para cargas más pequeñas. La transición en el modo de desgaste para las muestras ensayadas a velocidades de 0.154m/s se observó, entre los 0.25N y los 0.5N para las muestras de AISI 316L nitruradas, y entre 0.5N y 0.75N para las muestras de 316L sin nitrurar. Para cargas de hasta 1N, la transición en el modo de desgaste para la velocidad de 0.154 m/s no tuvo lugar en forma completa sino que se presentó un modo mixto. Para la velocidad de 0.05m/s no se observó transición del modo de desgaste para el acero AISI 316L para cargas de hasta 0.75N, en el caso del acero AISI 316L nitrurado la transición se encontró para cargas entre 0.5N y 0.75N. En el caso de las capas dúplex, la capa externa de TiN no presenta un patrón de desgaste claro que permita identificar el modo de desgaste.

6. AGRADECIMIENTOS

Proyecto Conacyt 49172 por el financiamiento y a la empresa IONAR S.A. por la nitruración iónica de las muestras

7. REFERENCIAS

- [1] K.L. Rutherford, S.J. Bull, E.D. Doyle, I.M. Hutchings, *Surf. Coat. Technol.* 80 (1996) 176-180.
- [2] K.L. Rutherford, I.M. Hutchings, *Surf. Coat. Technol.* 79 (1996) 231-239.
- [3] K. Adachi, I.M. Hutchings, *Wear* 255 (2003) 23-29.
- [4] K. Adachi, I.M. Hutchings, *Wear* 258 (2005) 318-321.
- [5] M.G. Gee, A.J. Gant, I.M. Hutchings, Y. Kusano, K. Schiffman, K. Van Acker, S. Poulat, Y. Gachon, J. von Stebut, P. Hatto, G. Plint, *Wear* 259 (2005), 27-35.
- [6] V. Imbeni, C. Martini, E. Lanzoni, G. Poli, I.M. Hutchings, *Wear* 251 (2001) 997-1002.
- [7] J.C.A. Batista, A. Matthews, C. Godoy, *Surf. Coat. Technol.* 142-144 (2001) 1137-1143.
- [8] Q. Luo, P.Eh. Hovsepian, D.B. Lewis, W.-D. Munz, Y.N. Kok, J. Cockrem, M. Bolton, A. Farinotti, *Surf. Coat. Technol.* 193 (2005) 39-45.
- [9] J.F. Archard, *J. Appl. Phys.* 24 (1953) 981-988.
- [10] G.S. Was, T. Foecke, *Thin Solid Films*, 286 (1996) 1-31
- [11] E. De Las Heras, D.A. Egidi, P. Corengia, D. González-Santamaría, A. García-Luis, M. Brizuela, G.A. López, M. Flores Martinez, *Surf. Coat. Technol.* 202 (2008) 2945-2954
- [12] M. Flores, L. Huerta, R. Escamilla, E. Andrade, S. Muhl, *Applied Surface Science*, 253 (2007) 7192- 7196.