

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN EROSIÓN DE RECUBRIMIENTOS MULTICAPAS DE TiN/AlTiN

Willian Aperador^{1,2*}, Cesar Amaya³, Jorge Bautista Ruiz⁴

1:Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Carrera 11 No. 101-80, Fax:+57(1) 6343200, Bogotá, Colombia. 2: Escuela Colombiana de Ingeniería – Julio Garavito, AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), +57(1) 668 3622, Bogotá, Colombia. 3:Grupo de Investigación en Desarrollo de Materiales y Productos CDT ASTIN SENA, Cali-Colombia. 4:Departamento de Física, Universidad Francisco de Paula Santander. Avenida Gran Colombia No 12E – 96. B Colsag. Edificio de Laboratorios. San José de Cúcuta. Norte de Santander. Colombia

* e-mail: g.ing.materiales@gmail.com



RESUMEN

Se depositaron películas delgadas en forma de multicapas de TiN/AlTiN con periodos de 2, 6, 12 y 24 bicapas sobre sustratos de acero AISI 1045 mediante un sistema magnetrón sputtering con r.f reactivo a partir de blancos de Ti y Al de alta pureza (99,99%) en una atmósfera compuesta de Ar/N₂. Las multicapas fueron evaluadas frente a fenómenos de corrosión, erosión y corrosión erosión a un ángulo de impacto de 90°, y una solución compuesta por NaCl 0,5 M y sílice, analizando el efecto del número de bicapas en la resistencia a la corrosión de estos recubrimientos. La caracterización electroquímica se realizó mediante la técnica curvas de polarización Tafel y la caracterización microestructural mediante microscopía electrónica de barrido. Se encontró una disminución notable en la velocidad de corrosión del sustrato, pasando de 2291,05 mpy a 351,24 mpy con la deposición de los recubrimientos con 2 bicapas y a un valor de 15,01 mpy para la muestra recubierta con 24 bicapas. Estos resultados corroboran el buen desempeño de las bicapas en la resistencia a la corrosión erosión. A partir de los resultados de microscopía electrónica de barrido es posible ratificar el efecto protector de los recubrimientos sobre el sustrato en función del incremento del número de bicapas.

Palabras Claves: Nitruro de titanio- aluminio, corrosión dinámica, corrosión erosión, erosión, Microscopía electrónica de barrido.

EVALUATION OF RESISTANCE TO EROSION CORROSION OF MULTILAYER TiN/AlTiN

ABSTRACT

Thin films were deposited in multilayer TiN / AlTiN with periods of 2, 6, 12 and 24 bi-layers on AISI 1045 steel substrates, by RF magnetron sputtering system on Ti and Al targets (99.99%) in Ar/N₂ atmosphere. The multi-layers were tested against to corrosion, erosion and corrosion erosion 90° angle impact and 0.5 M NaCl solution and silica, and analyzing the effect of number of bi-layers on the corrosion resistance of these coatings. The electrochemical characterization was performed by Tafel polarization curves and micro-structural by scanning electron microscopy. The study showed decreased rate corrosion on substrate, it diminished from 2291.05 mpy to 351.24 mpy with 2 bi-layers, and 15.01 mpy with 24 bi-layers. These results corroborate the good acting of the bi-layers in the corrosion erosion resistance. From the results of scanning electron microscopy can confirm the protective effect of coatings on the substrate as well as the increasing number of bi-layers.

Keywords: aluminum titanium nitride, corrosion dynamics, erosion corrosion, erosion, scanning electron microscopy.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión erosión es una aceleración en la velocidad de corrosión de un metal debido al movimiento relativo de un fluido corrosivo sobre la superficie de un metal [1], si además el fluido presenta contenido de partículas sólidas en suspensión se tiende a incrementar el efecto erosivo que causa el deterioro del metal.

Los recubrimientos duros se han convertido en la solución de problemas como la corrosión y el desgaste. La técnica deposición física de vapor (PVD), es uno de los procesos más utilizados para la obtención de recubrimientos duros, que engloba cualquier proceso de crecimiento de una película en un ambiente de vacío que implique la deposición de átomos o moléculas en un sustrato[2], que consiste en evaporar por medios físicos el material que formará el recubrimiento y su posterior condensación sobre el sustrato, este proceso tiene la posibilidad de aplicarse simultáneamente a conjuntos o piezas.

El primer recubrimiento en ser utilizado en la industria del maquinado y con actual reconocimiento es el TiN. Este recubrimiento combina alta dureza con propiedades de bajo coeficiente de fricción, garantizando mayor vida en servicio por lo que es utilizado principalmente para recubrir herramientas de corte. En 1986 los recubrimientos de TiN fueron modificados implementando los recubrimientos de TiAlN [3][4][5]. La incorporación de átomos de aluminio (Al) dentro de la estructura cristalina del nitruro de titanio (TiN) no solo incrementa la resistencia a la oxidación por medio de la formación de una capa estable y compacta en la superficie sino que también contribuye a un significativo incremento en la dureza en comparación con el nitruro binario simple [6][7]. En los últimos años, se han realizado considerables esfuerzos por desarrollar recubrimientos multicomponentes como heteroestructuras en multicapas con el fin de mejorar la resistencia al desgaste y la oxidación de los componentes recubiertos. Las mejoras se presentan en la deposición alternada de dos (o más) capas químicas y/o mecánicamente diferentes, de tal forma que la concentración de tensiones y las condiciones para la propagación de nano-grietas pueda ser controlada. Por lo tanto la estructura de multicapas puede actuar como inhibidor de nano-grietas, además incrementar la resistencia a la

fractura [8]. Por tanto, los recubrimientos con nitruros depositados mediante PVD con alto contenido de aluminio como el AlTiN proporcionan alta resistencia al desgaste, altas temperaturas de servicio, resistencia a la oxidación y baja conductividad térmica [4-7].

El propósito de este trabajo fue estudiar la naturaleza electroquímica de los recubrimientos multicapas basados en [TiN/AlTiN]_n, con el fin de analizar su respuesta química en medios agresivos, el fenómeno de erosión y sinergismo corrosión-erosión. Este estudio permitirá la recopilación de suficiente información de los recubrimientos TiN/AlTiN, con el propósito de determinar la influencia del número de bicapas en el comportamiento anteriormente mencionado.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Multicapas de [TiN/AlTiN]_n se depositaron sobre sustratos de acero AISI 1045 (diámetro 2 cm; espesor 4 mm) y Si (orientación 100; 1,7 cm de lado; 280 micras de espesor), los cuales fueron limpiados por ultrasonido en una secuencia de 15 minutos en un baño de etanol y acetona. Los recubrimientos se obtuvieron mediante la técnica del magnetron sputtering multi-blanco en r.f (13,56 MHz) en la planta piloto del CDT ASTIN, SENA Regional Valle (Colombia). Para la deposición de los recubrimientos se utilizaron blancos de 4 pulgadas de diámetro de Ti y Al con una pureza del 99,9%.

La presión base al interior de la cámara de vacío fue de $7,0 \times 10^{-6}$ mbar. Antes de iniciar la deposición los sustratos fueron sometidos a una limpieza por plasma durante 20 minutos en atmósfera de Ar a un bias de -400V en r.f. Durante el crecimiento, los gases de trabajo fueron una mezcla de Ar (93%) y N₂ (7%) con una presión total de trabajo de 6×10^{-3} mbar a una temperatura del sustrato de 300°C y un bias r.f del sustrato de -70V y una potencia de 350W. Para la deposición de las multicapas el blanco de aluminio fue periódicamente cubierto por el obturador, mientras el sustrato se mantenía bajo rotación circular en frente de los blancos para facilitar la formación de los recubrimientos. Un esquema del sistema magnetron sputtering multi-blanco empleado en el desarrollo del estudio se esquematiza en la figura 1.

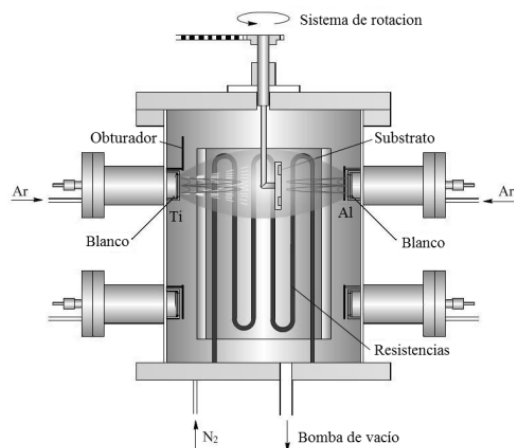


Figura 1. Diagrama esquemático del sistema magnetrón sputtering multi-blanco r.f.

Con el fin de estudiar la influencia de la sinergia entre la corrosión dinámica, erosión y corrosión erosión (figura 2), de recubrimientos tipo multicapas, se depositaron sistemas de [TiN/AlTiN]_n con periodos de 2, 6, 12, y 24 bicapas controlando los tiempos de apertura y cierre del obturador. El espesor de los recubrimientos fue obtenido mediante un perfilómetro DEKTA 8000 con un diámetro de punta de $12 \pm 0,04 \mu\text{m}$ a una longitud de barrido entre $1000 \mu\text{m}$ – $1200 \mu\text{m}$. Para la muestra de 2 bicapas, el espesor fue de $1,72 \pm 0,04 \mu\text{m}$, y dado que los recubrimientos fueron obtenidos bajo los mismos parámetros de crecimiento y tiempo total de depósito (3 horas), es posible afirmar que los sistemas multicapas tienen un espesor alrededor de este valor.

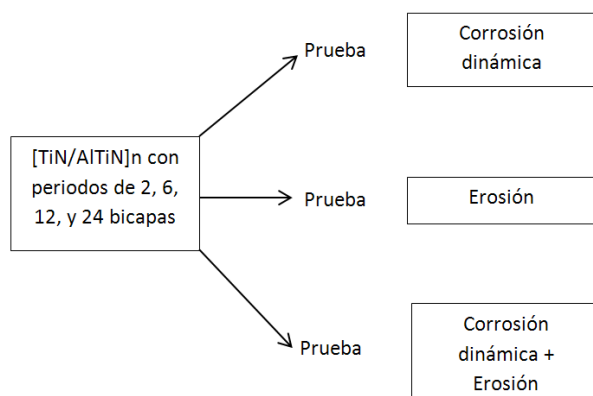


Figura 2. Metodología utilizada para evaluar la resistencia a la corrosión dinámica, erosión y corrosión erosión de recubrimientos multicapas de TiN/AlTiN.

En cuanto a la evaluación de la resistencia a la

corrosión erosión se utilizó un equipo tipo cilindro rotatorio que consta de un recipiente de vidrio en el cual va contenida la solución, una tapa de acrílico en la cual se disponen el electrodo de referencia (Ag/AgCl), el contraelectrodo (grafito) y el portamuestras con una área de exposición de la muestra de 1 cm^2 . Este portamuestras se ubicó a un ángulo de impacto del fluido de 90° . Además, el equipo consta de un impulsor de HUMWPE (Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular) ajustado al eje de un motor que genera el movimiento de la solución y el impacto sobre la muestra (Figura 3) [9]. La velocidad de giro fue de 2780 rpm, proporcionando una velocidad lineal máxima de la partícula de 16 m s^{-1} .

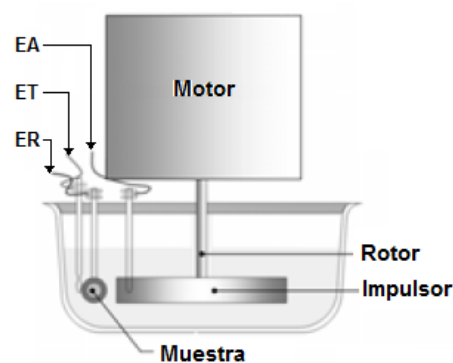


Figura 3. Esquema de dispositivo empleado en las pruebas de desgaste por corrosión-erosión, EA: Electrodo auxiliar, ET: Electrodo de trabajo, ER: Electrodo de referencia.

Para la evaluación de la resistencia a la corrosión dinámica y corrosión erosión se utilizó un potenciostato – galvanostato Gamry modelo PCI-4 mediante la técnica de curvas potenciodinámicas Tafel. Se ubicaron las probetas bajo inmersión en una solución de NaCl 0,5 M preparada con agua destilada y partículas de sílice (SiO_2) con tamaño de partícula entre $210 \mu\text{m}$ y $300 \mu\text{m}$ bajo una proporción del 20%wt con respecto al medio. La celda compuesta por un contraelectrodo (grafito), un electrodo de referencia de Ag/AgCl y como electrodo de trabajo se utilizó el acero AISI 1045 con y sin recubrimiento en multicapas. Los diagramas de Tafel se obtuvieron de forma dinámica a una velocidad de barrido de $0,5 \text{ mV/s}$ en un rango de voltajes de $-0,25\text{V}$ a $0,75\text{V}$ empleando un área expuesta de 1 cm^2 , el comportamiento electroquímico fue evaluado posterior a 45 minutos,

tiempo necesario para la estabilización del potencial de circuito abierto, las normas utilizadas en los criterios de medición y cálculos corresponden a las ASTM G5 y G59 [10-11]. Las muestras fueron sometidas a desgaste por erosión durante un tiempo total de 240 minutos de exposición (tiempo que dura el ensayo mediante Tafel) a una temperatura de 25°C. Durante la prueba de inmersión en una solución de NaCl 0,5 M con la presencia de partículas de sílice (SiO₂), las muestras se retiran de la solución en un cierto intervalo de tiempo (15 minutos), se limpiaron con un chorro de agua, se secaron con aire caliente, y se pesaron con una balanza con una precisión de 0,1 mg; con el propósito de determinar la pérdida de peso debido a la erosión. La observación microestructural se realizó mediante un microscopio electrónico de barrido de alta resolución, el cual tiene un sistema de espectroscopía de energía dispersiva (EDX system), el MEB tiene una resolución de 1-nm a 30 kV.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Corrosión dinámica

De acuerdo a las curvas de polarización anódica mostradas en la figura 4, se resalta que los potenciales de corrosión en las multicapas de [TiN/AlTiN]_n se desplazan hacia zonas anódicas (protección), sin embargo no existe una relación directa con el aumento del número de bicapas (Tabla 1). Las curvas obtenidas en la figura 4 generan un comportamiento de zona de corrosión activa en la zona anódica, siendo más prominente para el sustrato y 2 bicapas, las bicapas 6, 12 y 24 generan zonas de menor electro-disolución en un rango de -100 mV a -140 mV respecto al comienzo de la electro-disolución (250mV vs E_{corr}), posteriormente se aumenta la zona de corrosión activa de las bicapas debido al aumento de la densidad de corrosión. El acero (sustrato) en un medio de NaCl 0,5 M presenta un cambio en el comportamiento en la rama anódica a potencial cercano a -270 mV vs. Ag/AgCl aproximadamente; este cambio se puede distinguir como el inicio de la formación de corrosión general de forma estable debido a un mayor incremento en la densidad de corrosión, indicando la regeneración de una capa de productos de corrosión que permiten estabilizar la densidad de corriente en torno a este potencial y prevenir el incremento de la velocidad de disolución

del metal. Las bicapas 2, 6 y 12 muestran un comportamiento similar al sustrato, se puede evidenciar que la aparición de una capa pasiva sobre el material probablemente debido al comportamiento del sustrato en presencia de un medio de NaCl 0,5 M, posteriormente se observa que el metal y los recubrimientos permanecerá en el estado activo una vez destruida la pasividad y las picaduras crecerán sin interrupción, motivo por el cual se modifica la forma de las curvas; esta característica se puede apreciar para todo el conjunto de curvas potenciodinámicas. Es importante resaltar el caso particular para el recubrimiento de 24 bicapas en donde se evidencia una disminución de la densidad de corrosión con valores cercanos al E_{corr}, posteriormente se evidencia de que el plateau no es totalmente constante como resultado de un proceso de control cinético mixto principalmente.

Tabla 1. Valores de los parámetros electroquímicos obtenidos por curvas de polarización para el sustrato y las multicapas de [TiN/AlTiN]_n.

Muestra	Potencial de corrosión vs E _{corr} (mV)	Densidad de corriente de corrosión (A/cm ²)	Velocidad de corrosión (mpy)
Sustrato	-640	1,04 *10 ⁻³	235,52
2 bicapas	-580	8,09 *10 ⁻⁴	54,91
6 bicapas	-490	4,63 *10 ⁻⁴	25,79
12 bicapas	-310	2,13 *10 ⁻⁴	18,80
24 bicapas	-240	0,15 *10 ⁻⁴	2,132

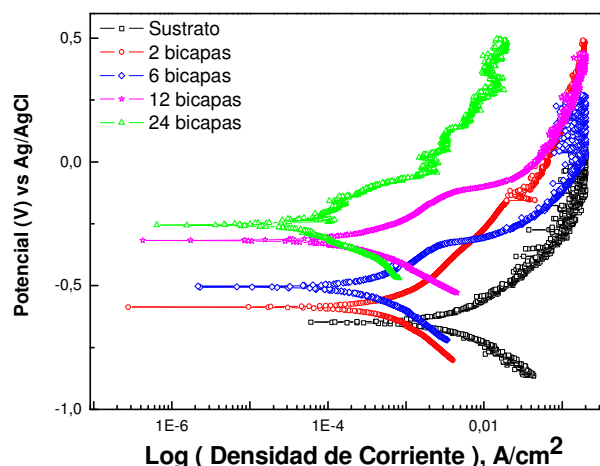


Figura 4. Curvas de polarización de la corrosión dinámica en una solución de NaCl 0,5 M.

La disminución de la densidad de corrosión de corrosión en los recubrimientos multicapas de $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$, puede ser atribuido al grado de porosidades, presentes en las películas, sugiriendo que la porosidad decrece con el incremento del número de bicapas, las porosidades en las bicapas pueden producirse en el recubrimiento por fenómenos de nucleación durante el crecimiento de las capas generando trayectorias de menor resistencia para el paso del ión Cl [16-20].

El desplazamiento de las curvas Tafel hacia potenciales positivos conforme se incrementa el número de capas aplicadas, radica en la naturaleza de las estructuras tipo multicapa, puesto que al aumentar el número de bicapas se incrementa el número de interfases entre las monocapas de TiN y AlTiN. Como las interfases son zonas donde se presentan desordenes estructurales generan un cambio en la orientación cristalográfica, actúan como puntos de dispersión, dificultando la migración del ión Cl desde la superficie hacia el sustrato metálico y retrasan el inicio de los procesos corrosivos [4]. Esto conlleva a que la energía requerida por los iones de la solución para que migren libremente desde la superficie hacia la interfase película/sustrato sea mayor con el aumento del número de bicapas, este comportamiento se refleja en la disminución de la densidad de corriente de corrosión y la velocidad a la corrosión (tabla 1) [6].

3.2 Erosión

Para evaluar el fenómeno erosivo se aplicó protección catódica de 1V catódico con respecto al potencial de circuito abierto del acero y el recubrimiento respectivamente, de acuerdo a la norma ASTM G 119-93 [12], esta protección catódica garantiza daño superficial sólo por efecto de las partículas erosivas

En la figura 5 se representa gráficamente la pérdida de material asociado a impactos repetidos de partículas sólidas luego de los 240 minutos de ensayo. Se observa mayor pérdida de masa con el tiempo en el sustrato debido a su baja ductilidad, sufriendo mayor desgaste cuando está expuesto a ángulos de impacto de 90° . Los recubrimientos multicapas de $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ generan una disminución en la pérdida de masa. La muestra con 2 bicapas reduce la pérdida de masa en un 40% respecto al sustrato sin recubrir, mostrando el efecto

benéfico de la aplicación de las películas al acero 1045. La muestra recubierta por 24 bicapas presentó el menor valor de pérdida de masa. Este comportamiento puede atribuirse a la aplicación mayor en el número de multicapas generado mejoras en las propiedades mecánicas, especialmente la dureza. Las multicapas absorben y distribuyen mejor la energía de impacto generadas por las partículas abrasivas. Adicionalmente, el aumento en el número de bicapas proporciona una disminución en la pérdida de masa mejorando la resistencia al desgaste al aumentar el número de interfases. También se mejoran las propiedades mecánicas como: dureza y módulo de elasticidad [13] [14] [15].

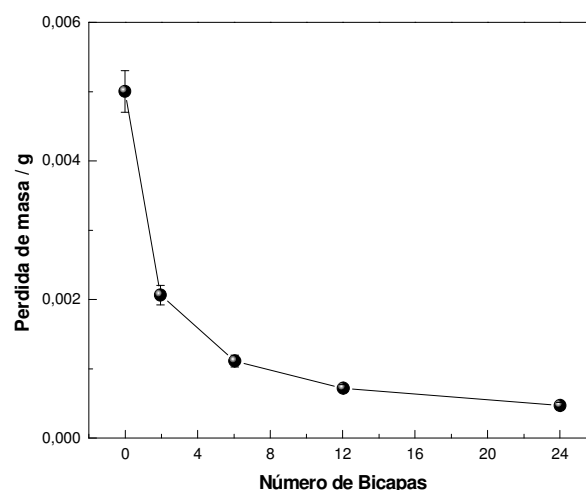


Figura 5. Pérdida de masa en función de las multicapas de $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ sin efecto corrosivo.

3.3 Corrosión erosión

Al comparar el comportamiento de las diferentes multicapas de $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$, se encuentra, para los materiales de estudio, potenciales de corrosión como densidades de corrosión son muy similares entre sí para las bicapas 2, 6 y 12. Además, se puede observar un fenómeno de corrosión generalizada principalmente, la presencia de un plateau de densidad de corriente y la zona de modificación de las curvas por efecto de la pérdida de la pasividad y la generación de la corrosión localizada, esta última diferente en cada caso, ya que la cinética de la reacción depende del número de bicapas, siendo más rápida para la bicapa 2 seguido por la bicapa 6, 12 y 24, en orden decreciente.

En principio, en forma cualitativa es posible agrupar las curvas, siendo las curvas del acero recubierto con multicapas de 2, 6 y 12 similares entre sí. Las

multicapas de $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ muestran una disolución del material de forma moderada, este fenómeno se encuentra en todos los recubrimientos a 120mV vs. Ag/AgCl indicando la regeneración de capas de productos de corrosión que permiten estabilizar la densidad de corriente en torno a este potencial y prevenir el incremento de la velocidad de disolución del metal. A partir de 280 mV vs. Ag/AgCl, se observa que la cinética del proceso está dominada por difusión motivo por el cual se modifica la forma de las curvas; esta característica se puede apreciar para todo el conjunto de curvas potenciodinámicas y concuerda con el efecto a observar cuando la densidad de corriente aumenta en función del potencial. De acuerdo con las curvas de polarización anódica mostradas en la figura 6 el sustrato en un medio corrosivo erosivo presenta un cambio en el comportamiento en la rama anódica a potencial cercano a -120 mV vs. Ag/AgCl aproximadamente. Este cambio se puede distinguir como el inicio de la formación de corrosión por picadura sobre una leve capa pasiva cuya estabilidad es baja ya que se extiende hasta el final del ensayo. Las multicapas de $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ muestran una disolución del material de forma moderada, este fenómeno se encuentra en todos los recubrimientos a 70mV vs. Ag/AgCl indicando la regeneración de capas de productos de corrosión que permiten estabilizar la densidad de corriente en torno a este potencial y prevenir el incremento de la velocidad de disolución del metal. A partir de 220 mV, se observa que la cinética del proceso está dominada por difusión motivo por el cual se modifica la forma de las curvas; esta característica se puede apreciar para todo el conjunto de curvas potenciodinámicas y concuerda con el efecto a observar cuando la densidad de corriente aumenta en función del potencial.

Los datos registrados en la Tabla 2 indican, efectivamente, un desempeño electroquímico menor en comparación con la corrosión dinámica (figura 4 y tabla 1), frente a la corrosión erosión, la cual muestra una disminución de los potenciales y densidades de corrosión, relativamente aceptable para la multicapas con 2 bicapas e inclusive ligeramente mejor que las bicapas 6, 12 y 24.

En general, los datos (tabla 1) muestran un buen comportamiento de todos los recubrimientos analizados en comparación al material base cuando se someten a fenómenos corrosivos. Sin embargo,

cuando se someten al flujo corrosivo-erosivo (tabla 2) la película pasiva formada normalmente en la superficie es eliminada y removida por la acción de partículas duras, llevando a la pérdida de la protección anticorrosiva. La corrosión por su parte, reduce la resistencia de estos recubrimientos en la superficie y favorecen el aumento en la velocidad de corrosión en comparación con la corrosión dinámica (figura 4).

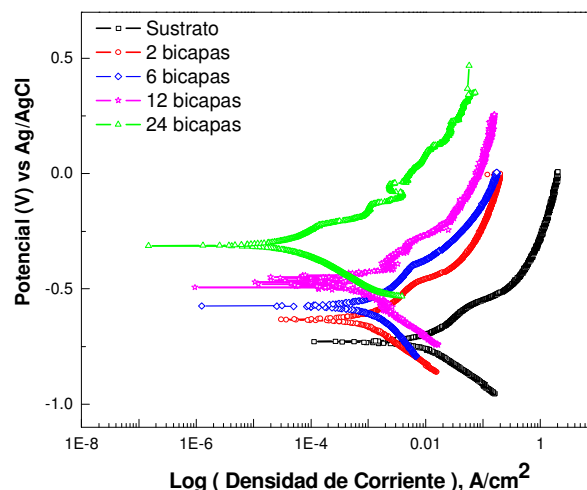


Figura 6. Curvas de polarización de la corrosión-erosión del sustrato y las multicapas de $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ en un medio de NaCl al 0,5M.

Tabla 2. Parámetros electroquímicos obtenidos por curvas de polarización en el sistema corrosión-erosión para el sustrato y las multicapas de $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$.

Muestra	Potencial de corrosión vs E_{corr} (mV)	Corriente de corrosión (A/cm^2)	Velocidad de corrosión (mpy)
Sustrato	-720	$1,63 \cdot 10^{-2}$	2291,05
2 bicapas	-620	$1,54 \cdot 10^{-3}$	351,24
6 bicapas	-570	$1,064 \cdot 10^{-3}$	225,32
12 bicapas	-490	$6,52 \cdot 10^{-4}$	138,95
24 bicapas	-310	$6,63 \cdot 10^{-5}$	15,01

3.4 Microscopía electrónica de barrido.

En la figura 7 se muestra una micrografía en sección transversal de la multicapa $\text{TiN} / \text{AlTiN}$ $n = 6$ ($\Lambda = 500$ nm). El contraste más oscuro de las capas AlTiN con respecto a los TiN permite una determinación clara de la estructura en capas. Estos recubrimientos de $\text{TiN} / \text{AlTiN}$ presentaron una periodicidad bien definida y uniforme, el valor de espesor medido con ayuda de la micrografía SEM es

similar al valor diseñado. La única desviación fue el relativo espesor nanométrico, estas desviaciones son difíciles de evaluar debido a la baja resolución de las interfaces de TiN / AlTiN obtenidas mediante esta técnica.

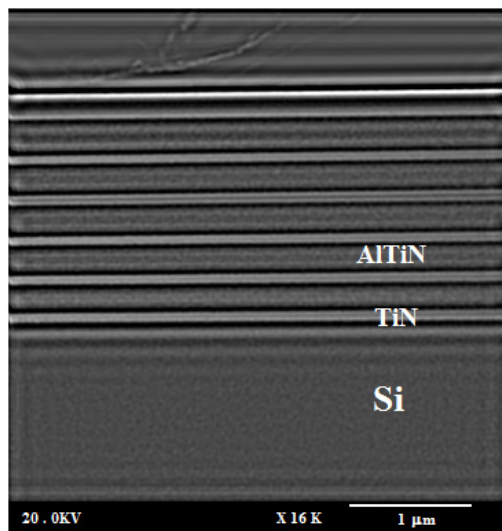


Figura 7. Micrografía de SEM de la multicapa con $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ con $n = 6$, $\Lambda = 500$ nm.

Las micrografías de la figura 8 muestran los resultados del ataque corrosivo. Estas micrografías son tomadas en la superficie del sustrato y la multicapa con 2,6,12 y 24 bicapas luego del proceso de corrosión erosión a un ángulo de impacto de 90° . En la figura 8a se observa una zona del sustrato la cual ha sido deteriorado debido al efecto de la corrosión dinámica. En la figura 8b,c,d y e, se visualiza como el recubrimiento ha sufrido mecanismos de desgaste por agrietamiento, se distinguen diferentes zonas: 1) evidencia el proceso de degradación debido a la corrosión general mostrada en las curvas de polarización 2) efecto nocivo generado por la acción de la corrosión y el agrietamiento del recubrimiento generado por la energía de impacto de las partículas abrasivas de sílice. También se observan zonas grises en donde el efecto protector ha generado mecanismos de defensa produciendo zonas de bajo agrietamiento. Estas áreas muestran una superficie sin fractura cuya protección ha sido otorgada por las multicapas; se observa en la superficie del recubrimiento de 24 bicapas focos de corrosión localizada, la cual se puede asociar con la respuesta generada en las curvas de polarización anódica, en donde a los -117 mV vs. Ag/AgCl, se produce ataque por picado.

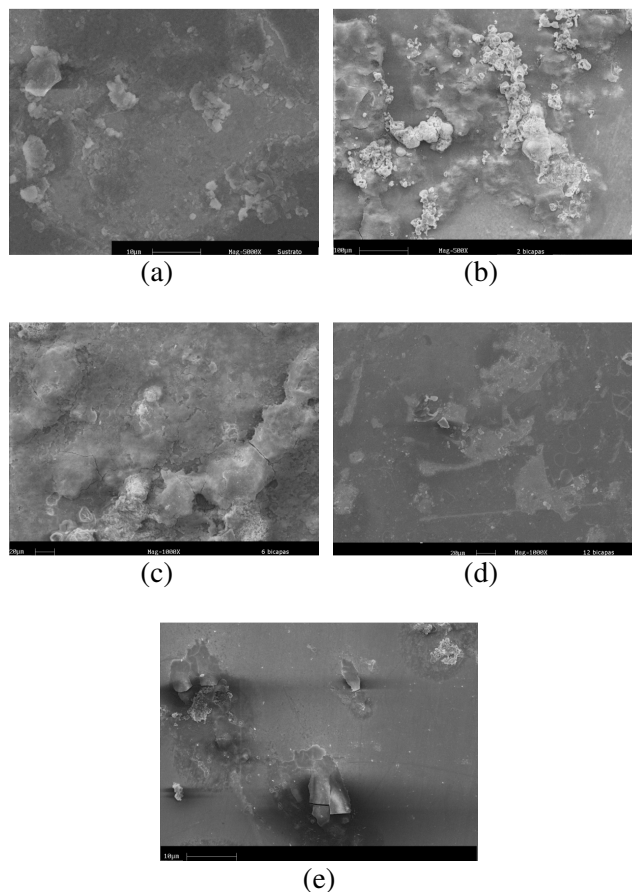


Figura 8. Micrografía de SEM para muestras sometidas a corrosión - erosión 90° . a) Sustrato; b) multicapa $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ con $n = 2$; c) multicapa $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ con $n = 6$; d) multicapa $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ con $n = 12$; e) multicapa $[\text{TiN}/\text{AlTiN}]_n$ con $n = 24$.

4. CONCLUSIONES

Las curvas de polarización Tafel obtenidas en los ensayos de corrosión dinámica y corrosión erosión muestran el buen desempeño generado por las multicapas debido al aumento y desplazamiento hacia potenciales positivos a medida que se aumentan las bicapas. Además, se observa cómo se mejora el comportamiento frente a la corrosión erosión con los recubrimientos multicapas, evidenciado en el desplazamiento de las curvas hacia menores valores de densidad de corriente con respecto al sustrato, de igual manera este comportamiento se ve mejorado con el incremento del periodo de las bicapas. Todas las curvas de polarización Tafel indican una disolución general y una posterior corrosión localizada, este comportamiento se debe al efecto agresivo generado por la corrosión y la adición de la erosión de forma

conjunta, se sugiere trabajar los recubrimientos con un sistema de protección catódica con el propósito de que la corrosión tipo picado no afecte el recubrimiento en condiciones agresivas.

El comportamiento de las multicapas en condiciones de erosión y un ángulo de impacto de 90°, evidencian que los recubrimientos generan una gran disminución de pérdida de material bajo estas circunstancias cuando se depositan sobre acero 1045, la pérdida de masa para este tipo de recubrimientos es menor en especial para la multicapa con $n=24$. El efecto erosivo en las multicapas permitió establecer buenas propiedades mecánicas generando una absorción y distribución de la energía de impacto, es decir, a medida que aumenta el número de bicapas se disminuye la pérdida de masa.

En el mecanismo de sinergia de corrosión erosión se evidenció la simultaneidad en los procesos: mecánico de eliminación de material (sustrato y multicapas) a través de la erosión y el proceso de corrosión electroquímica.

Mediante la técnica SEM se observó un efecto protector de las multicapas. En las muestras recubiertas se observan mecanismos de desgaste debido al agrietamiento sufrido por el efecto erosivo, y algunas zonas de corrosión generalizada debido al efecto de la corrosión.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo expresan su agradecimiento al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias, por el apoyo para la ejecución del presente estudio.

6. REFERENCIAS

- [1]. Fang Y, Pang X, Zhang G. Corrosion Science. 2008; 50 (10): 2796–2803.
- [2]. Munz W, Donohue L, Hovsepian P., Surf. Coat. Technol. 2000; 125 (1-3): 269–277.
- [3]. Endrino J.L, Fox-Rabinovich J.L, and Gey C. Surface & Coatings Technology. 2006, 200 (24): 6840–6845.
- [4]. Souto R.M., and Alanyalib H., Corrosion Science. 2000, 42 (12): 2201–2211.
- [5]. Ding X-Z., Thin Solid Films. 2008, 516 (16): 5716–5720.
- [6]. Correa F, Caicedo J.C, Aperador W, Rincón C. A, Bejarano G., Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. 2008, 46 (1): 7–14.
- [7]. Ramalingam S. and Zheng L. Film-substrate interface stresses and their role in the tribological performance of surface coatings, Tribol Int. 1995; 28 (3): 145–161.
- [8]. Caicedo J. C, Amaya C, Yate L, Zambrano G, Gómez M. E, Alvarado-Rivera J, Prieto P, Muñoz-Saldaña J. Appl. Surf. Sci. 2010; 256 (20): 5898–5904.
- [9]. Payan H, Aperador W, and Vargas A. Ciencia et Technica. 2008; 38 (2): 177–180.
- [10]. ASTM G5 Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 2003.
- [11]. ASTM G59-04 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 2004.
- [12]. ASTM 119(93). Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion. West Conshohocken, PA. American Society for Testing and Materials, 2009
- [13]. Afrasiabi A, Saremi M, Kobayashi A.. Mater. Sci. Eng. A. 2008; 478 (20): 264–269.
- [14]. Stack M.M and Abd El Badia T.M. Wear. 2008; 264 (9–10): 826–837.
- [15]. Bejarano G, Caicedo J. C, Adam G, and Gottschalk S. phys. stat. sol. (c). 2007: 4 (10): 4260–4266.
- [16]. Tato W, Landolt D, J. Electrochem. Soc. 1998; 145 (12): 4173–4181.
- [17]. Moreno H. Caicedo JC, Amaya C, Cabrera G, Yate L, Aperador W, Prieto P. Diamond and Related Materials. 2011 20 (4): 588–595.
- [18]. Caicedo, J.C., Amaya, C., Cabrera, G., Esteve, J., Aperador, W., Gómez, M.E., Prieto, P. Corrosion surface protection by using titanium carbon nitride/titanium-niobium carbon nitride multilayered system. Thin Solid Films 519 (19), pp. 6362–6368.
- [19]. Nieto J, Caicedo J, Amaya C. Moreno H, Aperador W, Tirado L, Bejarano G.. DYNA. 2010; 77 (162): 161–168.
- [20]. Moreno LH, Caicedo JC, Martínez F, Bejarano G, Battaille TS, Prieto P., JBSMSE. 2010; 32 (2): 114–118.