

Depósito electroquímico de recubrimientos compuestos de Ni-SiC y evaluación de su comportamiento anticorrosivo

Electrochemical deposition of Ni-SiC composite coatings and evaluation of anticorrosive behavior

Johny Edwar Henao Guzmán¹, Maryory Astrid Gómez Botero^{1,2}, Jorge Andrés Calderón^{1,3}*

¹Grupo de Corrosión y Protección, Universidad de Antioquia, Carrera 53 N.º 61-30, Torre 2 lab. 330, Medellín, Colombia

²Grupo de Ciencia e Ingeniería de Materiales Compuestos, Universidad de Antioquia, Calle 62 N.º 52-59, Medellín, Colombia

³Grupo de Materiales Electroactivos, Universidad de Antioquia, Calle 62 N.º 52-59, Medellín, Colombia

(Recibido el 26 de noviembre de 2008. Aceptado el 26 de mayo de 2009)

Resumen

En el presente estudio se reporta la obtención de recubrimientos de Ni puro y compuestos de Ni con partículas nanométricas de SiC. Los recubrimientos fueron depositados sobre sustratos de acero al carbono AISI-SAE 1016 mediante polarización lineal sobre un electrodo de disco rotatorio, variando la velocidad de rotación y el contenido de partículas de SiC en el baño. Los recubrimientos fueron obtenidos a partir de una solución tipo Watts clásica, en la cual se adicionaron nanopartículas de SiC. Las propiedades anticorrosivas de los recubrimientos se estudiaron mediante técnicas electroquímicas y ensayos de corrosión-erosión. La microestructura de los recubrimientos se estudió mediante microscopía óptica. Se encontró que a medida que aumenta la cantidad de partículas en los recubrimientos aumenta la nobleza y la resistencia a la corrosión-erosión de los mismos. De la misma manera las propiedades mecánicas de los recubrimientos mejoran notablemente con el incremento de la cantidad de partícula en el depósito y con el aumento de la velocidad de agitación del baño durante la electrodeposición.

----- *Palabras clave:* Níquel, SiC, Recubrimientos compuestos, electrodeposición, corrosión-erosión.

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 66 17, fax: + 57 + 4 + 219 65 65, correo electrónico: jacalder@udea.edu.co (J. A. Calderón)

Abstract

In the present study the deposition of pure Ni and composites Ni + SiC nanoparticles coatings is reported. The coatings were deposited on the substrate of carbon steel AISI-SAE 1016 through linear polarization on a rotating disk electrode, varying the speed of rotation and the content of SiC particles in the bath. The coatings were obtained from a classical type Watts solution, which added nanoparticles of SiC. The anti-corrosive properties of the coatings were studied using electrochemical and corrosion-erosion tests. The microstructure of the coating was examined by optical microscopy. We found that with increasing numbers of particles in the coating increases the mobility and resistance to corrosion-erosion of the coatings. In the same way the mechanical properties of the coating significantly improve with the increase in the number of particles in the Watts solution and with the increase of stirring solution during the electrodeposition processes.

----- *Keywords:* Nickel coatings, SiC, composite coatings, electrodeposition, erosion-corrosion.

Introducción

En la constante búsqueda de nuevos materiales, se estudian actualmente los recubrimientos compuestos. Estos recubrimientos son sistemas heterogéneos formados por una matriz que puede ser metálica a la cual se le incorporan partículas micro o nanométricas de materiales metálicos o no metálicos. Estas partículas pueden ser óxidos de alta dureza, carburo de silicio, diamante, Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 , MoS_2 , sólidos lubricantes o microcápsulas de líquidos lubricantes [1-16], en la literatura se reporta que el uso de una fase dispersa contribuye al mejoramiento de las propiedades tribológicas y reportan la formación de diferentes recubrimientos compuestos con una matriz de níquel. La fabricación de estos recubrimientos se puede realizar por electrodeposición, método en el cual se pueden incorporar partículas finas de metales, compuestos no metálicos o cerámicos para mejorar las propiedades de un material [6, 16]. Adicionalmente, el depósito electroquímico es una técnica que permite realizar recubrimientos a piezas de diferente forma y dimensión disminuyendo el costo de producción.

La elaboración de recubrimientos compuestos se ha venido desarrollando, entre otras, porque a medida que la tecnología avanza, el sector industrial

encuentra la necesidad de emplear materiales que se ajusten adecuadamente a las funciones requeridas dentro de un determinado proceso. Por ejemplo, los sistemas para generación de energía eléctrica y energía nuclear, turbinas a gas y a diesel, pistones y cilindros en diversas máquinas, sufren problemas de corrosión y desgaste, pero estos problemas mejoran notablemente cuando se aplica un recubrimiento adecuado. En las últimas décadas, con la incorporación de partículas en los recubrimientos se han podido proveer o mejorar las propiedades de los materiales, tales como: resistencia al desgaste, autolubricación, dureza superficial, resistencia a la corrosión, maleabilidad, entre otras [3, 17].

Los recubrimientos compuestos de Ni-SiC han sido estudiados debido a su alta resistencia al desgaste, a la corrosión, y a las propiedades que proveen las partículas cerámicas. Las propiedades de estos recubrimientos compuestos se pueden evaluar midiendo la dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión [3, 18, 19]. Tales características varían con el tipo de partícula, su tamaño, su porcentaje en volumen y la distribución en el depósito. Las condiciones de electrodeposición como densidad de corriente, concentración de partículas en el baño y la agitación determinan la composición y morfología del recubrimiento [3, 20-24].

Muchos investigadores se han enfocado en el impacto de los parámetros del electrodeposición, como condiciones de la solución (pH, presencia de aditivos, composición del baño), condiciones de la corriente (tipo de señal impuesta, valor de la densidad de corriente), propiedades de las partículas de refuerzo (tamaño, propiedades superficiales, concentración y tipo de partículas). En general, se ha encontrado que con un aumento en la densidad de corriente se logran recubrimientos con una tasa de incorporación de partículas mayor, pero estos presentan microgrietas y otros defectos, así como aglomeración de partículas lo que no ayuda en la homogeneidad del recubrimiento. Por otro lado, se ha observado que la cantidad de partículas embebidas aumenta con una mayor concentración de partículas en el baño y que una disminución en el tamaño de las partículas de SiC logra un mejoramiento en las propiedades mecánicas del recubrimiento, como la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión [12, 17, 19, 23]

El níquel y sus aleaciones se usan en una amplia variedad de aplicaciones, y en la mayoría de ellos se requiere resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste y resistencia a la temperatura. Entre las industrias que hacen uso de estos recubrimientos están la industria química, la petroquímica, la automovilística y la aeronáutica [3, 4, 18, 21, 24-26].

En este trabajo se reporta, la obtención de recubrimientos de níquel (Ni) y recubrimientos compuestos de níquel/carburo de silicio (Ni-SiC) mediante electrodeposición. El estudio de su comportamiento anticorrosivo se efectuó mediante pruebas de corrosión-erosión. Adicionalmente se analizó el efecto de la cantidad de nano-partículas incorporadas sobre las propiedades mecánicas y anticorrosivas de los recubrimientos.

Procedimiento experimental

Obtención de los recubrimientos

Los recubrimientos de Ni y Ni-SiC fueron obtenidos a partir de un baño Watts preparado con agua desionizada y con la siguiente composición p/p: 30% de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Carlo Erba), 4% de

$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Merck), 3% de H_3BO_3 (Carlo Erba). El pH del baño fue ajustado a un valor de 4,6. Para obtener los recubrimientos compuestos Ni-SiC, se le adicionó al baño Watts nanopartículas de SiC con un diámetro promedio de partícula de 25 nm (PlasmaChem) en concentraciones de 20, 50 y 70 g/l, dependiendo del recubrimiento a depositar. Los recubrimientos de Ni y compuestos de Ni-SiC fueron obtenidos mediante polarización catódica potenciodinámica a una velocidad de barrido de 0,3 mV/s, desde el potencial de circuito abierto hasta -1,0 V de sobre potencial catódico, utilizando una celda de tres electrodos. Como electrodo de trabajo se usaron discos de acero AISI-SAE 1016 con diámetro de 14,98 mm (área=1,762 cm²) el cual se configuró a modo de disco rotatorio para realizar depósitos con velocidades de rotación del electrodo a 100 y 625 rpm y así proporcionar agitación al sistema. Previo a cada experimento el disco fue pulido hasta un grado estándar de 600, lavado con agua destilada y alcohol. Como electrodo auxiliar se empleó una malla cilíndrica de platino de gran área y como electrodo de referencia se usó un electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl). Los depósitos se hicieron a una temperatura constante de 50°C, mediante un baño termostataado con recirculación (INDULAB). Las curvas de polarización catódica para la obtención de los recubrimientos fueron obtenidas empleando un potencióstato-galvanostato IM6e Bass Zahner.

Pruebas de corrosión-erosión

Los recubrimientos fueron evaluados física y electroquímicamente, con el objetivo de visualizar la influencia del contenido de partículas y de la velocidad de agitación sobre la dureza y la resistencia a la corrosión-erosión de los recubrimientos. Para los ensayos de corrosión-erosión se preparó una solución de NaCl al 3% p/p en agua desionizada, a esta solución se le adicionó partículas de sílice de 300 μm de tamaño de partícula, en una concentración de 20% p/p. La solución de NaCl + SiO_2 fue impulsada mediante un disco que rotaba a una velocidad constante de 1500 rpm, para conseguir suficiente poder abrasivo.

Para los ensayos de corrosión-erosión se expusieron discos con los recubrimientos de Ni y Ni-SiC a un ángulo de 0° respecto a la dirección de fluido, de manera que la solución erosiva impactara tangencialmente sobre los recubrimientos. Durante la exposición de las muestras a la acción del fluido erosivo y corrosivo fueron trazadas curvas de polarización para evaluar la resistencia a la corrosión-erosión de los recubrimientos. En estos ensayos se usó un electrodo de Calomel saturado como referencia, placas de platino (área = $6,9 \text{ cm}^2$) como electrodo auxiliar. Similarmente fueron realizadas medidas de impedancia electroquímica a recubrimientos compuestos de Ni-SiC 70 g/l expuestos a diferentes condiciones de velocidad del fluido abrasivo (0, 1000 y 1500 rpm). Las medidas de impedancia electroquímica fueron realizadas a potencial de circuito abierto, con una amplitud de 10 mV y en un rango de frecuencias de 100 KHz a 5 mHz. Se empleó para estos ensayos un potenciostato-galvanostato PGST-30 Autolab. Todas las soluciones utilizadas fueron preparadas con agua desionizada ($5,0 \text{ mS.cm}^{-1}$) obtenida de un millipore Simpapak0R1.

Caracterización de los recubrimientos

Los recubrimientos se caracterizaron mediante microscopía óptica con equipo Nikon eclipse E200, mediante esta técnica se midieron los espesores y se observó el aspecto superficial de los mismos después de realizar las pruebas de corrosión-erosión. Adicionalmente se realizaron análisis de difracción de rayos X (DRX) en un equipo Panalytical MDP Expert pro con configuración $q = 2\theta$ (Bragg Brentano), con radiación monocromática Cu Ka. Se ejecutaron medidas de microdureza Vickers en un equipo Shimadzu Tipo M aplicando cargas de 25g en la dirección paralela al crecimiento de los recubrimientos, es decir perpendicular a la superficie del sustrato.

Resultados y discusión

Obtención de los recubrimientos

Las curvas de polarización catódicas realizadas en la solución Watts a diferentes velocidades de

rotación de electrodo para la obtención de los recubrimientos de Níquel puro, muestran dos regiones claramente distinguibles, figura 1a. La primera región, a baja polarización, corresponde al depósito de níquel con baja eficiencia. En este rango de polarización la reacción preponderante es la reducción de hidrógeno. Se observa que en esta región la corriente crece muy poco con el aumento del potencial. La segunda región, a polarizaciones por encima de 0,7 V, corresponde a la región de depósito de níquel con alta eficiencia. En esta región existe una relación lineal entre el potencial y la corriente, con una pendiente superior a los 45° . Curvas de polarización similares durante el depósito de Ni han sido obtenidas por otros investigadores [5, 27-30]. Por otro lado, no se observa influencia del transporte de masa en el proceso de electrodeposición de recubrimientos de Ni puro, puesto que no hay variación de la corriente cuando se varía la velocidad de rotación del electrodo.

La figura 1b, muestra la curva de polarización catódica para la obtención de los recubrimientos compuestos de Ni-SiC a 20 g/l de SiC a diferentes velocidades de rotación de electrodo. Aunque estas curvas de polarización presentan un patrón similar a las del Ni puro, en ellas se observa un desplazamiento hacia valores más positivos del potencial a medida que aumenta la velocidad de rotación del electrodo en la parte lineal de la curva, es decir donde existe el depósito metálico con alta eficiencia. En otras palabras, debido a la incorporación de las partículas de SiC, se presenta un aumento en la corriente cuando aumenta la velocidad de rotación para el mismo potencial. Esto indica que la incorporación de las nanopartículas en el baño facilita el proceso de electrodeposición del metal. Un efecto similar fue observado por S. Watson en el depósito de partículas de cromo y de SiC [31, 32]. S. Watson atribuye el aumento de la corriente cuando se incorporan las partículas de SiC, a la despolarización catódica ocasionada por el aumento del área de superficie activa para el depósito de Ni. No obstante esta concepción siendo lógica, no explica completamente bien por qué aumenta la corriente cuando se aumenta la

velocidad de rotación del electrodo. Esto evidentemente se debe un efecto positivo del transporte de masa de iones níquel facilitado por las nanopartículas de SiC.

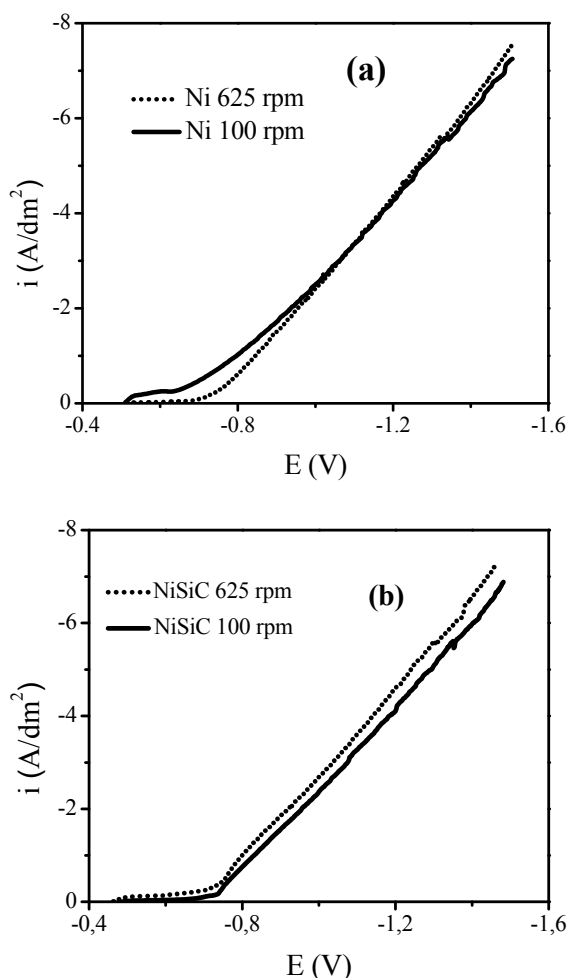


Figura 1 Curvas de polarización durante la electrodeposición de (a) Ni puro y (b) Ni con nanopartículas de SiC a 20 g/l

Caracterización de los recubrimientos

Los valores de los espesores de los recubrimientos medidos mediante microscopía óptica oscilaron entre 21,3 y 23,4 μm para los recubrimientos de Ni obtenidos a 100 y 625 rpm respectivamente. Esto evidencia que no existe un cambio relativo entre los valores de los espesores. Esto es congruente con lo observado en la figura 1a,

donde se constató que no hay influencia del transporte de masa en el proceso de electrodeposición de recubrimientos de Ni puro, debido a que no hay un comportamiento marcado en cambio en la corriente cuando se varía la velocidad de rotación del electrodo. Por otro lado, para los recubrimientos compuestos de Ni-SiC se tienen espesores medidos entre 39,3 y 45,7 μm para una concentración de nanopartículas de SiC de 20 g/l obtenidos a 100 y 625 rpm respectivamente y para concentraciones de SiC de 70 g/l los espesores oscilan entre 43,4 y 58,9 μm . Estos resultados evidencian que a mayor velocidad de agitación de la solución, hay un efecto sobre el transporte de masa de iones Ni, influenciado por la presencia de las nanopartículas en el baño, lo que está acorde con lo que se muestra en la curva de polarización de la figura 1b, corroborando el hecho que la incorporación de las nanopartículas en el baño facilita el proceso de electrodeposición del metal. En un estudio anterior [33] fue constatado que el aumento del espesor del recubrimiento de material compuesto se debe más al aumento de la corriente ocasionado por el efecto de transporte de masa que al volumen de nano partículas incorporadas.

Difracción de Rayos X (DRX)

En la figura 2 se presenta el difractograma de un recubrimiento compuesto de Ni-SiC 70g/l. En él se evidencia la presencia de Ni cristalino, estando los picos más intensos a ángulos 2θ de 44° , 52° y 77° . Estos picos son atribuidos a los planos cristalinos (111), (200) y (220) [29, 34]; sin embargo otras orientaciones cristalinas aparecen, debido a la incorporación de las nanopartículas de SiC, como se discutirá mas adelante. Según lo que se observa en el difractograma, las condiciones de electrodeposito de este estudio favorecen el depósito del níquel con una orientación cristalina preferencial en los planos (111), al ser esta banda de mayor intensidad que las otras. De acuerdo con lo reportado por Hu [34] los depósitos con una orientación preferencial (111) presentan mayor cantidad de sitios activos para la evolución de hidrógeno. La presencia de las orientaciones cris-

talinas (200) y (220) son favorecidas por el pH relativamente ácido del baño utilizado. Mediante esta técnica no fue posible detectar la presencia de SiC. Esto puede ser debido a que las nanopartículas se encuentran embebidas en el depósito de níquel y, a causa de su tamaño nanométrico, se dificulta la detección por DRX. A pesar de no haber sido posible la identificación de las partículas de SiC en el recubrimiento, el efecto de la presencia de ellas es evidente por la modificación de las propiedades mecánicas y anticorrosivas que le confieren, como se verá seguidamente.

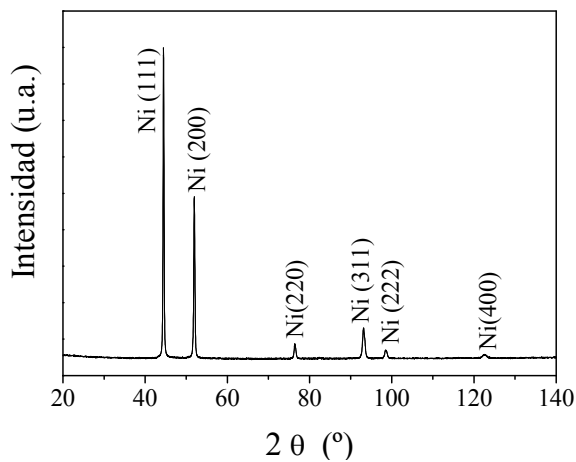


Figura 2 Difractograma del recubrimiento obtenido Ni-SiC 70 g/l a 625 rpm, a partir de un baño Watts de pH = 4,6

Microdureza

La figura 3 presenta de manera comparativa los valores de microdureza Vickers para los recubrimientos compuestos de Ni-SiC y Ni puro. La microdureza del acero AISI-SAE 1016 desnudo es de 163,03 HV. Dependiendo de las condiciones de electrodeposición la microdureza en los recubrimientos Ni-SiC varía entre 260 y 390 HV. Como puede ser observado en la figura 3, el depósito de Ni puro exhibe microdurezas superiores a la del sustrato, lo cual a su vez es aumentado con el incremento de la velocidad de rotación del electrodo durante el electrodeposito. De la misma manera, los resultados muestran que la incorporación de las nanopartículas de SiC en la matriz de Ni-

quel, mejora la dureza del depósito de Ni entre un 50 y 80%. Se observa también que a medida que se incrementa la cantidad de partículas en el baño, para una misma velocidad de rotación del electrodo, aumenta la dureza del recubrimiento, esto se debe a que hay mayor incorporación de partículas en el depósito. Este resultado es más evidente para menores velocidades de rotación del electrodo.

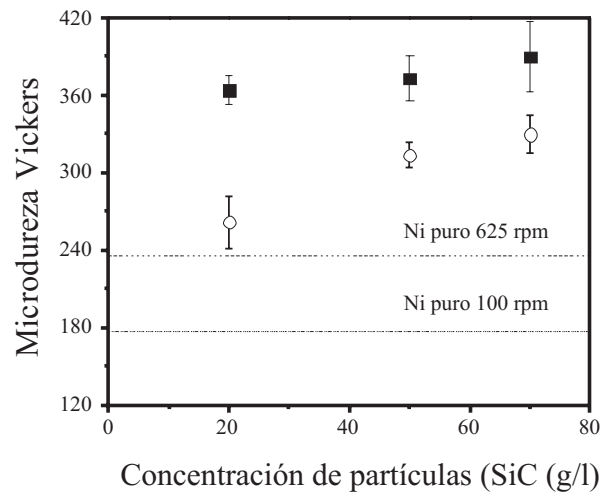


Figura 3 Medidas de microdureza Vickers de los recubrimientos obtenidos a las dos velocidades de rotación del electrodo: $\dot{\jmath}$ 100 rpm y $\dot{\jmath}$ 625 rpm

I. Garcia [4] reporta un aumento en la cantidad de SiC codepositado a medida que aumenta la concentración de partículas en la solución electrolítica y añade que tanto la dureza como las otras propiedades mecánicas de este tipo de recubrimientos compuestos, depende en general de la cantidad y el tamaño de las partículas incorporadas; además de las características mecánicas de la matriz. En el presente estudio se observa también que para una misma concentración de partículas de SiC, la microdureza aumenta con el incremento de la velocidad de rotación del electrodo. Estos resultados concuerdan con lo obtenido por L. Torres [33], quien obtuvo resultados similares para recubrimientos compuestos de Ni-SiC y Nidiamante. Pavlatou [35] atribuye el aumento de la dureza en los recubrimientos compuestos Ni-SiC, no solo a la presencia de las partículas sino

también a la disminución del tamaño de grano del níquel depositado y al cambio de orientaciones cristalinas, todo ello debido al codeposito del SiC con el Ni. En nuestro estudio fue verificada una disminución del tamaño de grano del níquel con la incorporación de las partículas. Adicionalmente, como se observa en el difractograma de la figura 2, se confirma la presencia de las orientaciones cristalográficas (220), (311) y (222), estas orientaciones cristalinas del Ni aparecen solo cuando hay incorporación de partículas cerámicas en el recubrimiento metálico [35, 36, 37], lo cual le confiere mayor dureza a los recubrimientos.

Evaluación de la resistencia a la corrosión-erosión

En la figura 4 se presentan los diagramas de impedancia realizados durante los ensayos de corrosión-erosión a uno de los recubrimientos compuestos de Ni-SiC 70 g/l de SiC. Las curvas fueron realizadas a potencial de circuito abierto y a diferentes velocidades de fluido. Se observa que la resistencia a la polarización del recubrimiento disminuye a medida que aumenta la velocidad de impacto del fluido. La resistencia a la polarización de los recubrimientos puede ser leída al extrapolar el límite a bajas frecuencias del diagrama de impedancia hasta el eje real. La impedancia electroquímica muestra claramente la influencia marcada de la acción corrosiva y erosiva del fluido. Cuando el fluido está en estado de reposo (0 rpm) la resistencia a la polarización del recubrimiento es superior a 180 ohm.cm², mostrando un arco aún abierto a bajas frecuencias. Por otro lado, cuando el fluido es puesto en movimiento la acción erosiva se hace evidente al presentar el arco que se cierra a bajas frecuencias y del cual se puede leer resistencias a la polarización inferiores a medida que aumenta la velocidad del fluido.

En la figura 5 se presentan las curvas de polarización del sustrato, del recubrimiento de Ni puro y de los recubrimientos compuestos de Ni-SiC depositados bajo las diferentes condiciones de depósito durante el ensayo de corrosión-erosión. Estos ensayos se realizaron bajo condiciones de alta agresividad, teniendo en cuenta la concen-

tración de iones cloruro y una alta velocidad de impacto de fluido (1500 rpm), como se mostró previamente en los diagramas de impedancia, en estas condiciones de impacto de fluido se consigue mayores condiciones agresividad del medio. Es interesante notar que los potenciales de corrosión de los recubrimientos compuestos de Ni-SiC en la solución corrosiva-abrasiva presentan valores más positivos que los recubrimientos de Níquel puro y que el sustrato de acero al carbono. Los cambios generados en la microestructura, las orientaciones cristalinas del depósito de Ni, la resistencia a la corrosión y la microdureza de los recubrimientos debido a la incorporación de las nanopartículas de SiC, se ven reflejados en una notable mejora en la resistencia a la corrosión-erosión.

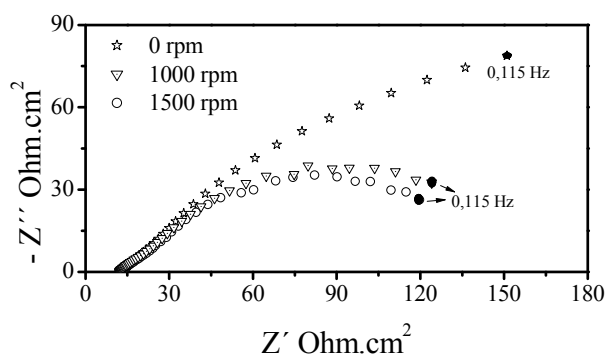


Figura 4 Impedancia de recubrimientos Ni-SiC 70g/l a diferentes velocidades de fluido (NaCl 3% + 20% p/p SiO₂)

En la tabla 1, se muestran las corrientes y los potenciales de corrosión para los recubrimientos obtenidos a partir de las curvas de polarización de la figura 5. Se puede observar que el recubrimiento de Ni puro exhibe un potencial de corrosión más positivo que el sustrato, lo cual lo hace más noble y le puede conferir protección anticorrosiva. Similarmente, se observa que los potenciales de corrosión de los recubrimientos son más positivos a medida que aumenta el contenido de partículas en el recubrimiento, reforzando la protección anticorrosiva del níquel. El comportamiento anticorrosivo mostrado por los recubrimientos Ni-SiC fue similar a lo hallado por *Andel*

Aal y colaboradores [6], quienes estudiaron las propiedades anticorrosivas y antidesgaste de recubrimientos Ni-W+P+SiC y observaron que las curvas de polarización se desplazaban hacia valores más positivos de potencial a medida que se incrementaba el contenido de partículas de SiC en el baño, igualmente las corrientes de corrosión fueron menores.

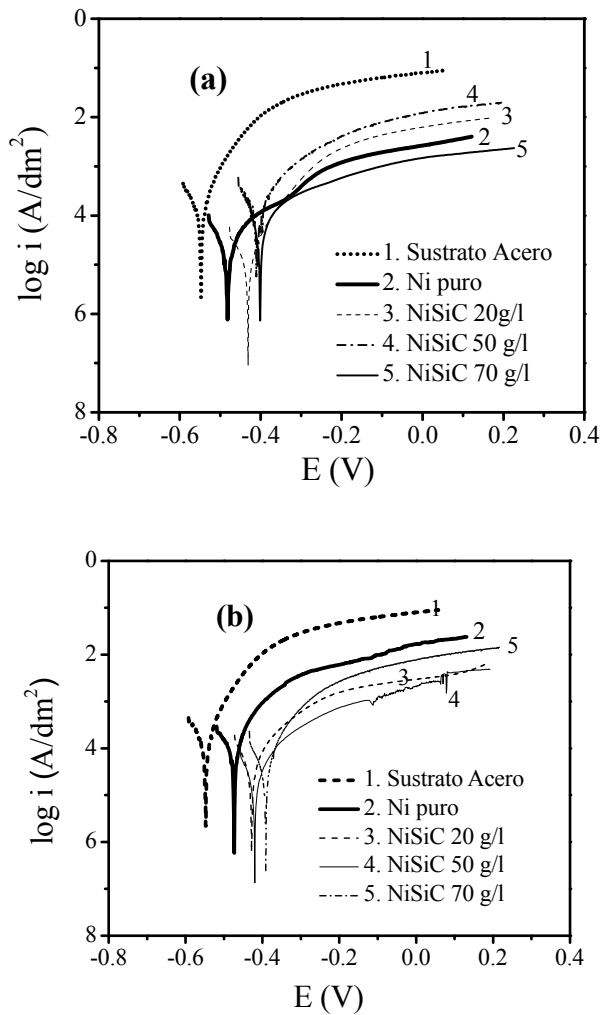


Figura 5 Curvas de Polarización durante los ensayos de corrosión-erosión de recubrimientos obtenidos a diferente concentración de partículas y rotación de electrodo: a) 100 rpm y b) 625 rpm. Solución 3% NaCl + 20% sílice. Velocidad de impacto del fluido 1500 rpm

De acuerdo a algunos estudios relacionados con el comportamiento anticorrosivo de recubrimientos compuestos de matriz metálica, mientras más noble sea el recubrimiento, mejor será su desempeño ante la corrosión-erosión [38-40]. En nuestro estudio todo esto es confirmado por el comportamiento de las corrientes de corrosión. Puede observarse que las corrientes de corrosión son menores en los recubrimientos compuestos Ni-SiC obtenidos en concentraciones mayores de partículas en el baño. Similarmente, las corrientes de corrosión son ligeramente menores en los recubrimientos obtenidos a mayores velocidades de rotación del electrodo. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por Vaezi y colaboradores [5] y Zhou y colaboradores [25].

El mejor desempeño ante la corrosión-erosión de los recubrimientos Ni+SiC con respecto a los de Ni puro, se debe a diversos factores que se unen y presentan sinergia entre ellos: (i) el ennoblecimiento de la matriz de níquel, (ii) reforzamiento de la capa pasiva del níquel, (iii) disminución de la porosidad o de la formación de microgrietas en el depósito de níquel debido a que el codeposito de las partículas de SiC contribuyen al llenado de estos defectos por la matriz de níquel. Estas hipótesis han sido confirmadas por varios autores [6, 25, 41, 42]. La incorporación de nanopartículas de SiC contribuye notablemente a la disminución de la susceptibilidad a la corrosión-erosión de los recubrimientos de níquel, aumentando la inercia química de este y mejorando sus propiedades mecánicas.

Microscopía óptica

En la figura 6 se presentan fotografías de probetas con recubrimientos compuestos Ni-SiC después del ensayo de corrosión-erosión. Fue constatado que los sustratos de acero en las probetas con recubrimiento compuesto no presentaron signos de corrosión, sólo se observaron algunos puntos de erosión, cuya concentración en la superficie varía de acuerdo a la cantidad de partículas presentes en el baño. Se observó que con el incremento de las partículas en el baño, el recubrimiento se hace más resistente al ataque de la solución erosiva. El recubrimiento con la menor concentración de

partículas de SiC (Figura 6a) mostró mayor ataque, el recubrimiento con la concentración intermedia de partículas (Figura 6b) mostró un ataque

reducido mientras que el recubrimiento con la mayor concentración de partículas SiC (Figura 6c) no mostró ataque después del ensayo.

Tabla 1 Potenciales (E_{corr}), corrientes (I_{corr}) y velocidades (V_{corr}) de corrosión de los recubrimientos obtenidos a 100 y 625 rpm y a diferente contenido de SiC en el baño, calculadas a partir de las curvas de polarización en los ensayos de corrosión-erosión

Material	Velocidad de rotación del electrodo (rpm)					
	100			625		
	E_{Corr} (V)	I_{Corr} (A/dm ²)	V_{corr} (mm/año)	E_{Corr} (V)	I_{Corr} (A/dm ²)	V_{corr} (mm/año)
Acero AISI-SAE 1016	0,542	6,247xe ⁻⁵	0,768	0,542	6,247 e ⁻⁵	0,768
Ni puro	0,478	3,192xe ⁻⁵	0,6888	0,470	2,291 e ⁻⁵	0,6342
Ni-SiC 20 g/l	0,430	1,465xe ⁻⁵	0,3162	0,422	1,037 e ⁻⁵	0,2238
Ni-SiC 50 g/l	0,406	1,288xe ⁻⁵	0,2779	0,410	8,098 e ⁻⁶	0,1747
Ni-SiC 70 g/l	0,390	1,119xe ⁻⁵	0,2415	0,384	6,093 e ⁻⁶	0,1315

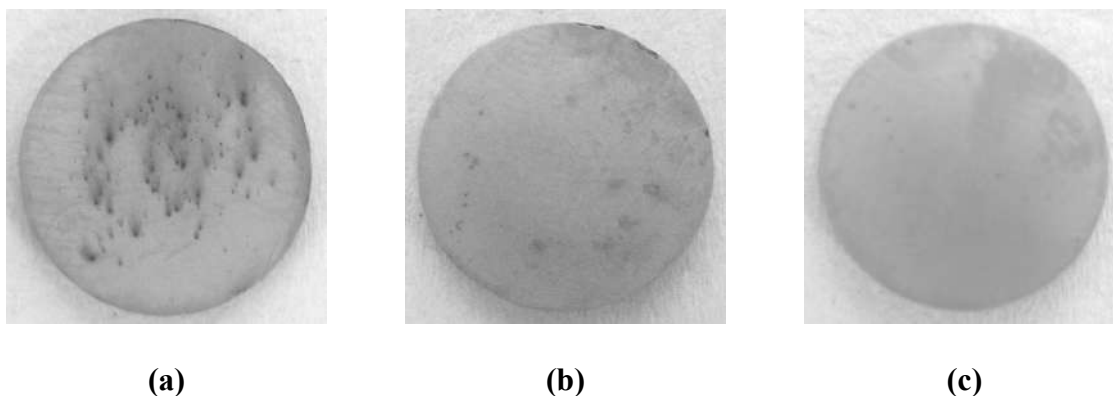


Figura 6 Fotografías de recubrimientos compuestos después del ensayo de corrosión-erosión a) Ni-SiC 20 g/l, b) Ni-SiC 50g/l y c) Ni-SiC 70 g/l

Conclusiones

Los recubrimientos compuestos de Ni-SiC presentan mejor resistencia a la corrosión-erosión

que los recubrimientos de Níquel puro, siendo los más resistentes a la corrosión aquellos obtenidos a mayor velocidad de agitación (625 rpm) y con la mayor concentración de partículas de SiC (70 g/l).

La microdureza de los recubrimientos compuestos Ni-SiC fue significativamente superior a la de los de Ni puro, ello debido a que la incorporación de partículas promueve la nucleación del Ni en diferentes planos cristalinos. Adicionalmente, la presencia de las nanopartículas en el baño, cambia la microestructura del recubrimiento generando granos más finos, por lo que se obtienen recubrimientos con mejores propiedades mecánicas y anticorrosivas.

Los recubrimientos que contienen mayor concentración de nanopartículas en el baño, muestran un mejor comportamiento anticorrosivo, lo que demuestra la acción efectiva de protección que le confieren las nanopartículas de SiC al recubrimiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) contrato No.043-2005, por la colaboración que brinda en el desarrollo de este proyecto y al ingeniero Adrián Gómez del laboratorio de metalografía de la Universidad Nacional Sede Medellín por su colaboración en la realización de las medidas de microdureza.

Referencias

1. P. L. Mangonon. *Ciencia de materiales: selección y diseño*. Ed. Prentice Hall. México. 2001. pp. 592.
2. P. Molera Solá. *Metales Resistentes a la corrosión*. Ed. Marcombo. Barcelona. 1990. pp. 98-99.
3. F. Bratu, L. Benea, J. P. Celis. "Tribocorrosion behavior of Ni-SiC composite coatings under lubricated conditions". *Surface & Coatings Technology*. Vol. 201. 2007. pp. 6940-694.
4. I. García, J. Fransaer, J. Cellis. "Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles". *Surface and Coatings Technology*. Vol. 148. 2001. pp. 171-178.
5. M. Vaezi, S. Sadrnezhad, L. Nikzad. "Electrodeposition of Ni-SiC nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics". *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. Vol. 315. 2008. pp. 176-182.
6. A. Abdel Aal, S. M. El-Sheikh, Y. M. Z. Ahmed. "Electrodeposited composite coating of Ni-W-P with nano-sized rod and spherical-shaped SiC particles". *Materials Research Bulletin*. Vol. 44. 2009. pp. 151-159.
7. M. Srivastava, V. K. Grips, K. S. Rajam. "Influence of SiC, Si₃N₄ and Al₂O₃ particles on the structure and properties of electrodeposited Ni". *Materials Letters*. Vol. 62. 2008. pp. 3487-3489.
8. A. Abdel Aal, H. A. Gobran, F. Muecklich. "Electrodeposition of Ni-RuAl composite coating on steel surface". *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 473. 2009. pp. 250-254.
9. S. T. Aruna, V.K. Grips, K.S. Rajam. "Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties". *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 468. 2009. pp. 546-552.
10. Z. Huang, D. Xiong. "MoS₂ coated with Al₂O₃ for Ni-MoS₂/Al₂O₃ composite coatings by pulse electrodeposition". *Surface and Coatings & Technology*. Vol. 202. 2008. pp. 3208-3214.
11. L. Shi, C. Sun, W. Liu. "Electrodeposited nickel-cobalt composite coating containing MoS₂". *Applied Surface Science*. Vol. 254. 2008. pp. 6880-6885.
12. P. Gyftou, E. A. Pavlatou, N. Spyrellis. "Effect of pulse electrodeposition parameters on the properties of Ni/nano-SiC composites". *Applied Surface Science*. Vol. 254. 2008. pp. 5910-5916.
13. X. Cui, W. Wei, H. Liu, W. Chen. "Electrochemical study of codeposition of Al particle-Nanocrystalline Ni/Cu composite coatings". *Electrochimica Acta*. Vol. 54. 2008. pp. 415-420.
14. E. Pompei, L. Magagnin, N. Lecis, P.L. Cavallotti. "Electrodeposition of nickel-BN composite coatings". *Electrochimica Acta*. Vol. 54. 2009. pp. 2571-2574.
15. E. García-Lecina, I. García-Urrutia, J.A. Díez, M. Salvo, F. Smeacetto, G. Gautier, R. Seddon, R. Martin. "Electrochemical preparation and characterization of Ni/SiC compositionally graded multilayered coatings". *Electrochimica Acta*. Vol. 54. 2009. pp. 2556-2562.
16. Y. Yingwu, Y. Suwei, Z. Lu. "Electrochemical impedance spectroscopy and corrosion behavior Al₂O₃-Ni nanocomposite coatings". *Electrochimica Acta*. Vol. 53. 2008. pp. 4557-4563.
17. F. Hu, K. Chan. "Deposition behavior and morphology of Ni-SiC electro-composites under triangular waveform". *Applied Surface Science*. Vol. 243. 2004. pp. 251-258.
18. N. Zhao, C. Fa-he, W. Wei. "Electrodeposition of Ni-SiC nanocomposite film". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 17. 2006. pp. 9-15.

19. Y. Yingwu, Y. Suwei, Z. Lu. "Corrosion behavior of Ni-W/SiC nanocomposite coating in NaCl solution". *Surface Review and Letters*. Vol. 13. 2006. pp. 489-494.
20. W. Hongzhi, Y. Suwei, M. Sowjun. "Electrochemical preparation and characterization of Ni/SiC gradient deposit". *Materials Processing Technology*. Vol. 145. 2003. pp. 299-302.
21. M. Srivastava, V. K. Grips, K. S. Rajam. "Electrochemical deposition and tribological behaviour of Ni and Ni-Co metal matrix composites with SiC nano-particles". *Applied Surface Science*. Vol. 253. 2007. pp. 3814-3824.
22. I. Brahim. "Black nickel electrodeposition from a modified Watts bath". *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol. 36. 2006. pp. 295-301.
23. A. F. Zimmerman, D. G. Clark, K. T. Aust, U. Erb. "Pulse electrodeposition of Ni-SiC nanocomposite". *Materials Letters*. Vol. 52. 2002. pp. 85-90.
24. C. Malfatti, J. Ferreira, C. Santos, B. Souza, E. Fallavena, S. Vaillant, J. Bonino. "NiP/SiC composite coatings: the effects of particles on the electrochemical behavior". *Corrosion Science*. Vol. 47. 2004. pp. 567-580.
25. Y. Zhou, Y. Ding. "Oxidation resistance of co-deposited Ni-SiC nanocomposite coating". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 17. 2007. pp. 925-928.
26. L. Benea, V. Iordache, F. Wenger, P. Ponthiaux. "Nanostructured SiC-Ni composite coatings obtained by electrodeposition a tribocorrosion study". *Fascicle IX Metallurgy and Materials Science*. Vol. 1. 2005. pp. 1453-1457.
27. L. Benea, P. L. Bonora, A. Borello, S. Martelli, F. Wenger, P. Ponthiaux, J. Galland. "Preparation and investigation of nanostructured SiC-Nickel layers by electrodeposition". *State Ionics*. Vol. 151. 2002. pp. 89-95.
28. I. Epelboin, M. Jousselein, R. Wiat. "Impedance measurements for nickel deposition in sulfate and chloride electrolytes". *J. Electroanal. Chem*. Vol. 119. 1981. pp. 61-71.
29. A. Magdy, M. Ibrahim. "Black nickel electrodeposition from a modified Watts bath". *J. Appl. Electrochem*. Vol. 36. 2006. pp. 295-301.
30. E. Chassaing, M. Jousselein, R. Wiat. "The Kinetics of Nickel Electrodeposition Inhibition By Adsorbed Hydrogen And Anions". *J. Electroanal. Chem*. Vol. 157. 1983. pp.75-88.
31. S. W. Watson, R. P. Waiters. "The Effect of Chromium Particles on Nickel Electrodeposition". *J. Electrochem. Soc*. Vol. 138. 1991. pp. 3633-3637.
32. S. W. Watson. "Electrochemical Study of SiC Particle Occlusion during Nickel Electrodeposition". *J. Electrochem. Soc*. Vol. 140. 1993. pp. 2235-2238.
33. L. Torres. *Obtención y Caracterización de Recubrimientos Compuestos de Nanopartículas de Carburo de Silicio (SiC) y Diamante en una Matriz de Niquel*. Trabajo de investigación de Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín. 2007. pp. 69-98.
34. C. C. Hu, C. Y. Lin, T. C. Wen. "Textural and electrochemical properties of Watts nickel-deposited titanium electrodes". *Mater. Chem. Phys*. Vol. 44. 1996. pp. 233-238.
35. E. A. Pavlatou, M. Stroumbouli, P. Gyftou, N. Spyrellis. "Hardening effect induced by incorporation of SiC particles in nickel electrodeposits". *J. Appl. Electrochem*. Vol. 36. 2006. pp. 385-394.
36. F. Denise, H. Leidheiser Jr. "An X-Ray Study of the Effect of Organic Compounds on the Crystal Growth of Nickel during Electrodeposition". *J. Electrochem. Soc*. Vol. 100. 1953. pp. 490-495.
37. C. S. Lin, K. C. Huang. "Codeposition and microstructure of nickel-SiC composite coating electrodeposited from sulphamate bath". *J. Appl. Electrochem*. Vol. 34. 2004. pp. 1013-1019.
38. J. M. Guilemany, J. Fernández, J. Delgado, A.V. Benedetti, F. Climent. "Effects of thickness coating on the electrochemical behaviour of thermal spray Cr C-NiCr coatings". *Surface and Coatings Technology*. Vol. 153. 2002. pp. 107-113.
39. D. Chidambarama, C. R. Clayton, M. R. Dorfman. "Evaluation of the electrochemical behavior of HVOF-sprayed alloy coatings - II". *Surface & Coatings Technology*. Vol. 192. 2005. pp. 278-283.
40. P. H. Suegamaa, C. S. Fugivara, A. V. Benedetti, J. M. Guilemany, J. Fernández, J. Delgado. "The influence of gun transverse speed on electrochemical behaviour of thermally sprayed Cr3C2-NiCr coatings in 0.5 M H₂SO₄ solution". *Electrochimica Acta*. Vol. 49. 2004. pp. 627-634.
41. L. Shi, C. Sun, P. Gao, F. Zhou, W. Liu. "Mechanical properties and wear and corrosion resistance of electrodeposited Ni-Co/SiC nanocomposite coating". *Appl. Surf. Sci*. Vol. 252. 2006. pp. 3591
42. L. Y. Wang, J. P. Tu, W. X. Chen, Y. C. Wang, X. K. Liu, C. Olk, D. H. Cheng, X. B. Zhang. "Friction and wear behavior of electroless Ni-based CNT composite coatings". *Wear*. Vol. 254 2003. pp. 1289.