

Morphologic evaluation of silicon surface modified with titanium and titanium+nitrogen

F. F. Parada-Becerra^{a,*}, P. Tsygankov^a, V. Dugar-Zhabon^a, D. Y. Peña, J. Coronado^b, J. González^b, E. D. V-Niño^{c,d}

^aLaboratorio de Física y Tecnología del Plasma y Corrosión, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

^bGrupo de Investigación en Corrosión, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia

^cMaterials Science and Technology Research Group, Foundation of Researchers in Science and Technology of Materials, Bucaramanga, Colombia

^dBCMaterials, Basque Center on Materials, Applications and Nanostructures, UPV/EHU Science Park, Leioa, Spain.

*Corresponding author, E-mail: freddy.parada@correo.uis.edu.co, foristom@gmail.com, phone: 57+7 3045718407

ABSTRACT

The surface modification of silicon sheets with titanium and titanium+nitrogen is presented by means of a hybrid high voltage pulsed discharge and electric arc in a vacuum. The spectral diagnostic shows an approximate value of the temperature of the titanium cathode in the hybrid discharges of 7127 ± 200 K and in the arc discharges of 8888 ± 767 K. The morphology of the surfaces was obtained and analyzed using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray techniques. It is evidenced that surfaces modified with titanium+nitrogen present greater homogeneity compared to surfaces modified with titanium due to the lower distribution of microdroplets formed, validating the influence of hybrid discharges as a possible coating manufacturing method in various applications on science, engineering, and technology of materials.

Keywords: Hybrid discharge, Discharge of arc electric, Ionic implantation, Coatings, Microdroplets, Temperature.

Evaluación morfológica de la superficie de silicio modificada con titanio y titanio+nitrógeno

RESUMEN

Se presenta la modificación superficial de laminas de silicio con titanio y titanio+nitrógeno mediante una descarga híbrida pulsada de alto voltaje y de arco eléctrico en vacío. El diagnóstico espectral muestra un valor aproximado de la temperatura del cátodo de titanio en las descargas híbridas de 7127 ± 200 K y en las descargas de arco de 8888 ± 767 K. La morfología de las superficies fue obtenida y analizada mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido y energía dispersiva de rayos X. Se evidencia que las superficies modificadas con titanio+nitrógeno presentan una mayor homogeneidad en comparación con las superficies modificadas con titanio debido a la menor distribución de microgotas formadas, validando la influencia de las descargas híbridas como un posible método de fabricación de recubrimientos en varias aplicaciones de ciencia, ingeniería y tecnología de materiales.

Palabras claves: Descarga híbrida, Descarga de arco eléctrico, Implantación iónica, Recubrimientos, Microgotas, Temperatura.

INTRODUCCIÓN

Los métodos de fabricación de recubrimientos y de películas delgadas son importantes para adquirir diferentes desempeños de las estructuras dependiendo del objetivo funcional [1-6]. La tecnología de implantación iónica consiste en modificar las capas subsuperficiales de los materiales, mediante la influencia de iones de alta energía en la superficie, sin alterar las dimensiones geométricas ni las propiedades internas [7-13]. Las técnicas de deposición

física en fase vapor (en inglés, physical vapor deposition-PVD), deposición química en fase a vapor (en inglés, chemical vapor deposition-CVD), entre otras, permiten la modificación de la superficie mediante la generación de sistemas de recubrimientos, monocapa, bicapa o multicapa, con características enfocadas a la optimización del desempeño funcional de la superficie [1-6]; por lo que, en la deposición por descarga de arco eléctrico en vacío un factor importante es la reducción del tamaño de las

microgotas formadas en la superficie por las altas densidades de corriente que se presentan en el cátodo (spots) [3, 4, 7, 14-16].

Existen modelos que tratan de explicar con buena aproximación el fenómeno de la descarga de arco eléctrico. Sin embargo, no se tiene un entendimiento absoluto sobre la formación y control de las microgotas generadas en la superficie del cátodo que comprometen la calidad del recubrimiento [14-16]; de modo que, la eliminación o reducción de estas micropartículas sin disminuir drásticamente el ritmo de deposición es un gran reto [14-16].

La modificación de superficies mediante tecnologías de descargas pulsadas de alto voltaje y arco eléctrico es un método alternativo que se utiliza con el propósito de mejorar las propiedades fisicoquímicas de los materiales metálicos como la resistencia al desgaste y a la corrosión [17-21]. Este método consiste en tratar la superficie de los metales por medio de descargas de alto voltaje y de arco eléctrico de forma independiente o simultáneas; las descargas simultáneas, conocidas como descargas híbridas, son las que modifican uniforme y simultáneamente la estructura de las capas superficiales y subsuperficiales del material [18-21]. Por este motivo, podrían aplicarse con éxito en la industria de la ciencia e ingeniería de los materiales, fabricación, automoción, petroquímica, médica, metalmecánica, entre otras.

En la presente investigación se evalúa el efecto de la modificación superficial con titanio (Ti) y titanio+nitrógeno (Ti+N) sobre la morfología de la superficie en láminas de silicio (Si). Las superficies se caracterizan por microscopía electrónica de barrido (en inglés, scanning electron microscope-SEM) y espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (en inglés, energy-dispersive X-ray spectroscopy-EDS).

Experimento

El experimento comprende la preparación de las superficies, la modificación de las superficies mediante descargas híbridas, y la caracterización morfológica de las superficies recubiertas con Ti y Ti+N.

El evaporador de arco eléctrico (Figura 1) se utiliza en la cámara del equipo JUPITER (en inglés, Joint Universal Plasma and Ion Technologies Experimental Reactor-JUPITER) [7-10, 18-21] con un sistema de vacío que permite obtener una presión durante el proceso de modificación superficial en el rango de 0,2 Pa y 1,0 Pa. En la Figura 1 se presenta el esquema de activación de encendido de arco que funcionó en un rango de potencial de polarización entre 16 V y 21 V, con una corriente de 140 A, y un sistema de modulación magnética que controla la propagación de la mancha (spot) catódica produciendo un flujo de vapor de especies metálicas (titanio), iones, clusters, y microgotas; simultáneamente se aplica una descarga pulsada de alto voltaje de 10 KV, con pulsos de 0,25 ms de duración y frecuencia de repetición de 30 Hz. Las superficies de Si se modificaron con Ti y Ti+N durante 5 minutos y 10 minutos [18-21].

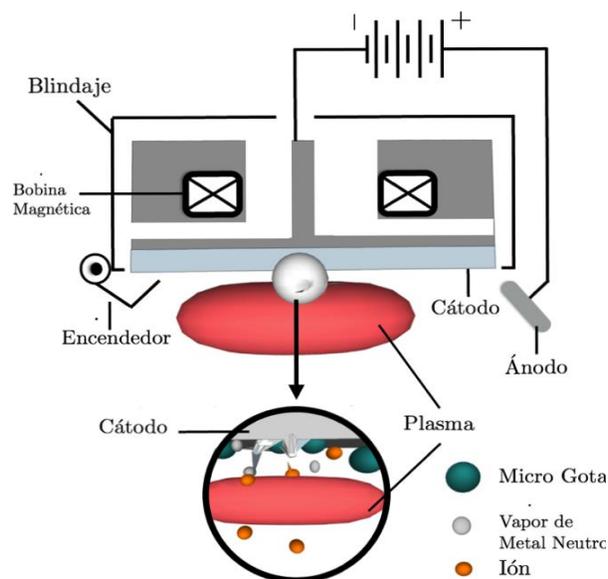


Fig. 1. Esquema de activación y formación de la descarga de arco eléctrico.

En la descarga de arco eléctrico, el sistema de modulación magnética permite re-direccionar la trayectoria del spot catódico en dirección radial y azimutal (Figura 2), lo que es una amplia ventaja en la fabricación de recubrimientos monocapa por arco catódico; además, permite reducir el diámetro de las microgotas en comparación con otros sistemas de deposición por arco catódico debido a la redistribución rápida del número de spots catódicos que evita la formación de capas gruesas de metal líquido compuesto de microgotas cuyas dimensiones son de aproximadamente 0,1 mm [4, 6, 14-16, 18, 21].

El spot presenta un comportamiento caótico que va desde una fase explosiva a una fase lenta de evaporación en el orden de los nanosegundos (Figura 2); la descarga eléctrica se suspende completamente hasta que un nuevo centro se forme con una nueva micro explosión que aparece como un movimiento macroscópico de la mancha sobre el cátodo, es decir se presenta un comportamiento secuencial de inicio y extinción de la actividad del spot en diferentes puntos sobre la superficie del cátodo de Ti (Figura 2). La emisión explosiva de electrones (micro explosión) cambia la topografía de la superficie del cátodo de Ti por causa del rápido calentamiento de la zona donde aparece el spot; un incremento en el área el spot implica una reducción de la densidad de corriente y de la densidad de energía desprendida en el spot [4, 6, 14-16, 18, 21].

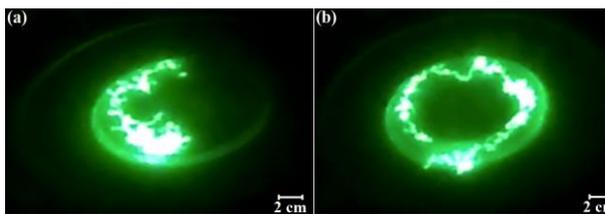


Fig. 2. Propagación de la mancha o spot catódico observada con filtro $\lambda = 550$ nm.

La morfología de los recubrimientos se analizó a partir de imágenes obtenidas en el microscopio electrónico de barrido con cañón de emisión de campo (en inglés, field emission gun-FEG), Quanta FEG 650, con detector de electrones secundarios (en inglés, everhart thornley

detector-ETD) que permite observar morfologías y detector de electrones retro dispersados (en inglés, back scattered electron-BSE) que determina las variaciones de composición; el microanálisis de composición elemental se realizó con el objetivo de identificar cuantitativamente el porcentaje en peso de los elementos de Ti y Ti+N presentes en la superficie de Si recubierta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se llevaron a cabo con la finalidad de evaluar el efecto de la deposición mediante descargas híbridas en la morfología de la superficie. El análisis espectral en el rango ultravioleta-visible de la descarga híbrida y de arco eléctrico (Figura 3) nos proporciona información relacionada con la temperatura del plasma generado durante la fabricación de los recubrimientos, así como la presencia de iones de Ti multicargados [20].

Mediante la instalación de una fibra óptica en el interior de la cámara de descarga del reactor JUPITER [7-10, 18-21] se obtienen los espectros de emisión de la descarga híbrida (Figura 3(a)) y de la descarga de arco eléctrico (Figura 3(c)) durante el proceso de deposición de Ti; en los espectros se aprecian un gran número de líneas de titanio que validan la producción de vapor metálico en la descarga híbrida (Figura 3(a)) y en la descarga de arco eléctrico (Figura 3(c)). La Ecuación 1 relaciona matemáticamente la intensidad de las líneas espectrales de TiI y TiII, la concentración de especie atómica emisora, la eficiencia del sistema óptico, la función de partición y el peso estadístico [20].

$$I_{\lambda}^{ki} = F n_k A_{ki} = F C_s g_k \frac{e^{-\frac{E_k}{k_B T}}}{U_s(T)} A_{ki} \quad (1)$$

Donde I_{λ}^{ki} es la intensidad integrada de una línea espectral emitida en la longitud de onda y originada por la transición entre los estados electrónicos k e i , C_s es la concentración

de la especie atómica emisora, F es un parámetro experimental que tiene en cuenta la eficiencia del sistema óptico de recolección de radiación, la densidad del plasma y el factor de respuesta del sistema de detección; g_k es el peso estadístico del estado electrónico excitado que tiene energía E_k , k_B es la constante de Boltzman, T es la temperatura, y U_s es la función de partición para la especie emisora s .

Las mediciones del sistema óptico-espectral estiman los parámetros del plasma generado y del vapor producido durante la descarga de arco eléctrico; los datos obtenidos se utilizan con el fin de optimizar la fabricación de recubrimientos, películas delgadas, y para el desarrollo de

algoritmos en los sistemas de control de arco eléctrico. El diagnóstico de los espectros ópticos en el cátodo de titanio se realizó en el rango de longitud de onda de 300 nm a 600 nm, donde se identificaron las líneas de TiII y TiIII [20, 21]; con esta información se estimó el valor de la temperatura del plasma generado durante la descarga híbrida (Figura 3(b)) y de arco eléctrico (Figura 3(d)).

El desarrollo analítico determinado por la Ecuación 1, permite conocer el valor de la temperatura en las zonas de formación del spot catódico de la descarga híbrida con $T = 7127 \pm 200$ K (Figura 3(b)) y de la descarga de arco eléctrico con $T = 8888 \pm 767$ K (Figura 3(d)).

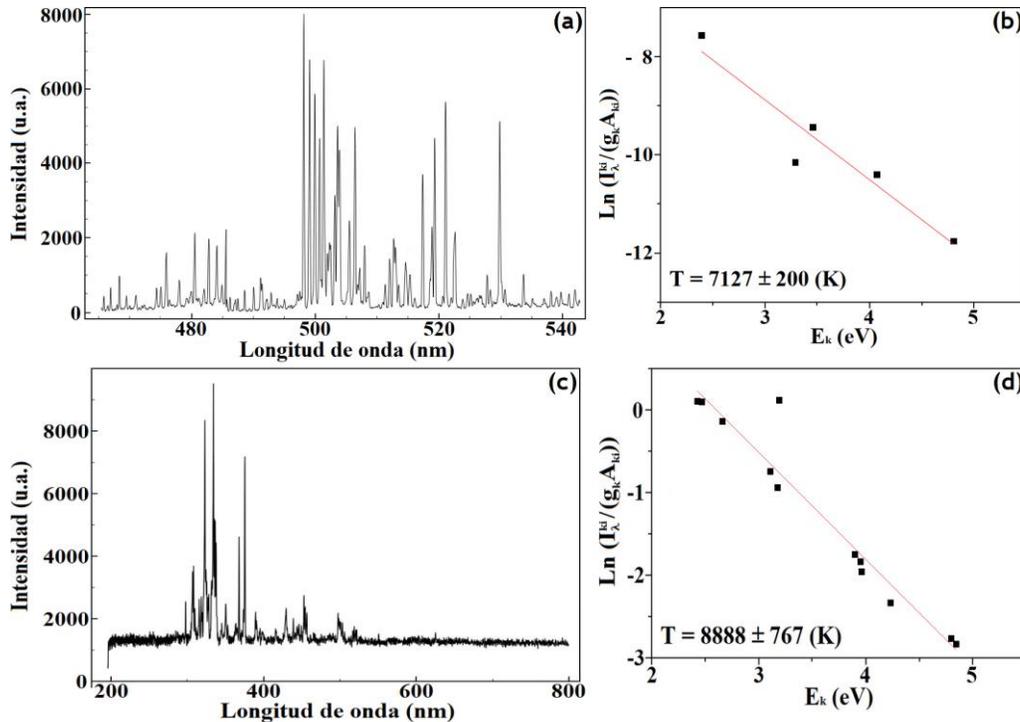


Fig. 3. Diagnóstico espectral. (a) espectro y (b) cálculo de la temperatura en la descarga híbrida; (c) espectro y (d) cálculo de la temperatura en la descarga de arco eléctrico.

La tasa de deposición del Ti en los sustratos depende de la distancia entre el arco catódico y la superficie, de la magnitud de la corriente del arco y el campo magnético del solenoide que controlan la descarga del arco eléctrico; con una corriente de arco de 140 A la tasa de deposición de Ti medida es de aproximadamente 1,5 nm/s, lo que da un valor de espesor de capa de 0,45 μm y 0,9 μm con

tiempos de deposición de 5 minutos y 10 minutos respectivamente [18-21]. En la descarga híbrida, la implantación de iones ocurre simultáneamente con el proceso de deposición; la implantación de iones en la estructura del sustrato sólo es eficaz durante los primeros segundos aproximadamente, después de este período de

tiempo los iones no se implantan en la estructura del sustrato sino en la capa depositada [18-21].

La caracterización morfológica de la superficie recubierta con Ti y Ti+N se realizó por medio de la técnica SEM-EDS (Figura 4 y Tabla 1) con el propósito de establecer los detalles microestructurales más representativos (microgotas) que puedan influir en el comportamiento homogéneo y de adherencia del recubrimiento.

La Figura 4 presenta la distribución espacial de la formación de microgotas en la superficie de láminas de silicio; las microgotas (micropartículas) se encuentran asociadas al comportamiento caótico del spot y surgen por el desprendimiento de la energía de descarga en uno o varios puntos sobre la superficie del cátodo de Ti fuertemente calentada; el vapor de Ti está compuesto de átomos y de pequeñas gotas de titanio líquido [18-21].

Los recubrimientos fabricados mediante la descarga híbrida se obtienen en cuatro etapas fundamentales: (i) se

produce el vapor de las especies metálicas neutras, átomos excitados, e iones multi-cargados, con la descarga arco eléctrico; (ii) se realiza la transferencia de flujos de vapor a la superficie del sustrato en condiciones de bajas presiones; en los procesos de deposición a baja presión se reducen las impurezas, se reducen las dispersiones y las colisiones por gas residual; (iii) se condensa el vapor en la superficie del sustrato, crecimiento atómico; (iv) se asiste el flujo de especies metálicas y no metálicas mediante la descarga de alto voltaje (10 kV), interacción de las microgotas con los iones energéticos por influencia de la descarga de alto voltaje (implantación iónica) [7-12]; la implantación iónica se puede utilizar como un proceso de activación de la superficie o para crear un sistema de capas subsuperficiales y superficiales que podría mejorar la interfaz superficie-capa y reducir el problema de adhesión del recubrimiento con la superficie del sustrato [7-12, 18-21].

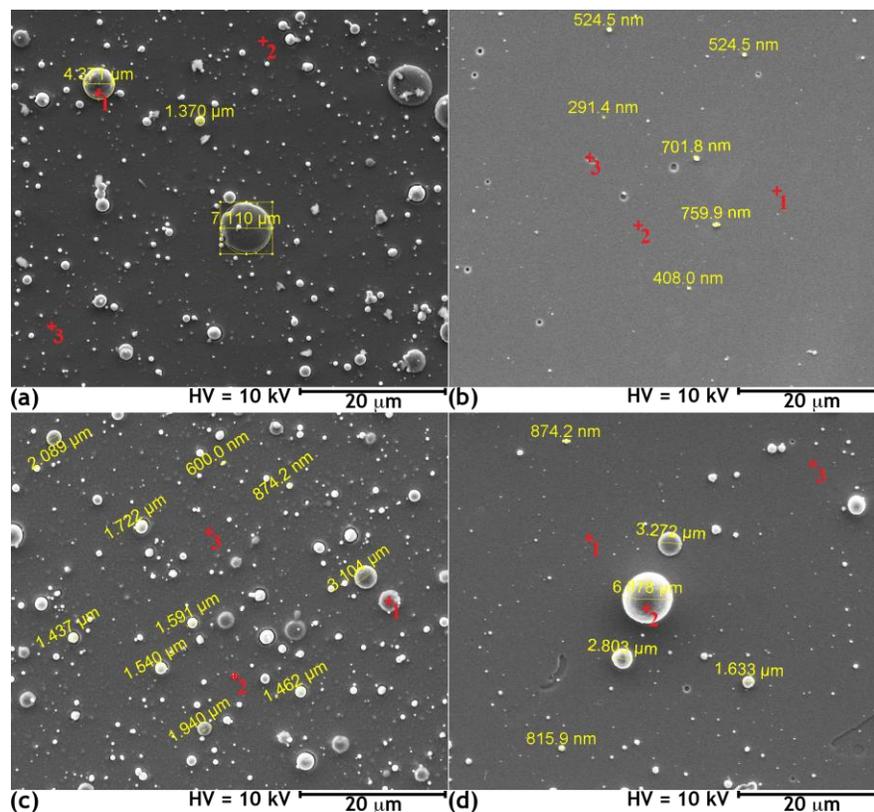


Fig. 4. Micrografía SEM de electrones secundarios en la superficie modificada con: (a) Ti y (b) Ti+N durante 5 min, (c) Ti y (d) Ti+N durante 10 minutos.

Las regularidades en la formación de microgotas son por causa del efecto de la inducción del campo magnético sobre la velocidad con la que se mueven los spots catódicos; lo que significa que cada uno de estos puntos debe ser considerado como una fuente de calor. Las configuraciones de modulación magnética controlan la formación y ubicación del spot en diferentes áreas del cátodo, y determinan la influencia de la erosión del cátodo con respecto a la formación de las microgotas. Adicionalmente, el incremento de la velocidad de propagación del spot catódico disminuye la tensión térmica específica en el área del cátodo donde se genera el spot, lo que conduce a reducir el porcentaje de emisión de las micropartículas, de modo que disminuye el número de microgotas y las dimensiones de las microgotas (radio de formación de las micropartículas) [14-16, 18-21].

La reducción del número y tamaño de las microgotas se evidencia en las superficies recubiertas con Ti+N (Figura 4(b) y Figura 4(d)) en comparación con las superficies recubiertas con Ti (Figura 4(a) y Figura 4(c)); de las microfotografías de las superficies recubiertas con Ti durante 5 minutos y 10 minutos (Figura 4(a) y Figura 4(c)) se observan deformaciones (múltiples microgotas) que aparecen debido a la solidificación de el material evaporado y de las especies de Ti no ionizadas (agrupaciones formadas durante la evaporación del cátodo de Ti). Este proceso físico podría atribuirse a la descarga del arco eléctrico que no enciende en toda la superficie del cátodo, lo que provoca la inestabilidad de unos puntos denominados punto brillante o punto catódico que se pueden controlar a partir de parámetros experimentales como la corriente eléctrica [7-9, 14-16, 18-21].

Los espectros elementales obtenidos por EDS sobre las superficies recubiertas con Ti durante 5 minutos y 10 minutos detectaron un porcentaje atómico de titanio entre 85,9% – 94,9% y 96,3% – 98,7% respectivamente, además de los elementos típicos del sustrato de Si (Figura 4(a), Figura 4(c), Tabla 1); este

aumento directo en la concentración de Ti se atribuye a una mayor tiempo de exposición de la superficie del sustrato durante el proceso de deposición (ya que el recubrimiento depende del tiempo de deposición entre otros parámetros), lo que permite que más especies de Ti se incorporen al volumen del sustrato y luego se depositen [7-9, 14-16, 18-21].

Las microfotografías de la superficie recubierta con Ti+N durante 5 minutos y 10 minutos se presentan en la Figura 4(b) y Figura 4(d) respectivamente; las superficies exhiben una disminución de microgotas en comparación con la presentada en la Figura 4(a) y Figura 4(c) (superficie recubierta con Ti). La disminución de microgotas presentes en la superficie se debe a que el tratamiento híbrido implica la interacción de partículas de Ti y N₂ con la superficie del sustrato por causa de la descarga de arco eléctrico y la descarga pulsada de alto voltaje [7-9, 14-16, 18-21]. La activación de estas descargas con partículas ionizadas de N₂, reduce la formación de clusters de Ti producidos por la descarga del arco eléctrico.

Los espectros de composición elemental EDS obtenidos del tratamiento con Ti+N durante 5 minutos, detectaron un porcentaje atómico de Ti entre 58,7% – 59,3% y N entre el 36,5% – 37,8%; mientras que las superficies recubiertas con Ti+N durante 10 minutos, detectaron un porcentaje atómico de Ti entre 57,1% – 59,4% y de N entre el 37,8% – 40,4% (Tabla 1), resultados que concuerdan con los resultados reportados en otros trabajos de investigación [7-9, 18-21].

Los resultados EDS reportados en la Tabla 1 corroboran la composición en porcentaje atómico de los recubrimientos; la presencia de silicio en las superficies recubiertas durante 5 minutos es debido a la alta energía usada en el análisis EDS que detecto el elemento de composición del sustrato, lo que significa que el recubrimiento formado es una película delgada (Tabla 1). En la Tabla 1, el porcentaje atómico de aluminio (Al) y carbono (C) detectado

corresponde a impurezas provenientes de la cámara de descarga y del material que recubre algunos de los elementos acoplados en el interior de la cámara de

descarga del reactor JUPITER con el propósito de mantener las características voltio-ampérica de la descarga híbrida en el régimen autosostenido.

Tabla 1. Análisis elemental EDS de las superficies modificadas con Ti y TiN durante 5 y 10 minutos.

Elementos	Espectro (At %)											
	Ti, 5 minutos			TiN, 5 minutos			Ti, 10 minutos			TiN, 10 minutos		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
C	13,7	4,0	2,0	1,9	1,6	2,1	2,0	2,7	0,3	2,0	1,8	2,1
Al	0,4	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	1,0	1,0	1,0	0,8	0,7	1,1
Si	—	—	2,2	1,4	1,0	1,0	—	—	—	—	—	—
Ti	85,9	94,9	94,8	59,3	58,8	58,7	97,0	96,3	98,7	59,4	57,1	58,9
N	—	—	—	36,5	37,8	37,6	—	—	—	37,8	40,4	37,9

CONCLUSIONES

Las diferencias de los valores de temperatura obtenidos en la descarga híbrida y en la descarga de arco eléctrico validan la formación y distribución de las microgotas; además, con la descarga híbrida se consigue reducir la densidad de energía y el incremento del número de spot catódicos. Por otra parte, los electrones de alta energía que inciden sobre el cátodo del arco eléctrico en conjunto con la ionización de los átomos o moléculas cargadas eléctricamente a causa de la descarga de alto voltaje reducen la formación de microgotas en la superficie de los sustratos mejorando notoriamente la calidad de los recubrimientos producidos. Por consiguiente, se evidencia que la cantidad de microgotas y el diámetro de las microgotas se reducen en las superficies modificadas con Ti+N en comparación con las superficies modificadas con Ti. Adicionalmente, la caracterización superficial por SEM mostró que las superficies modificadas con Ti manifiestan microgotas, gránulos o porosidades más apreciables en comparación con las superficies modificadas con Ti+N. Los espectros de composición elemental obtenidos del análisis EDS, detectaron la presencia de elementos de Ti y N en la superficie de las láminas de silicio, validando el efecto de la descarga híbrida de especies metálicas y no metálicas sobre la microestructura superficial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Microscopía y al Laboratorio de Espectroscopia Atómica y Molecular del Centro de Investigación Científica y Tecnológica en Materiales y Nanociencia, Parque Tecnológico Guatiguará, Universidad Industrial de Santander. Este trabajo fue parcialmente financiado por la agencia colombiana Colciencias a través de las becas de doctorado 617 de 2013 y 727 de 2015.

REFERENCIAS

- [1] Jaimes, D. Darío, R. (2019) “Características de los revestimientos al vacío”. *Acta Microscopica* 28(1):48-53.
- [2] Lara-Ortiz, L. Parada-Becerra, F. F., Valbuena-Niño, E. D., Tsygankov, P. A., Dugar-Zhabon, V., Plata-Gómez, A. (2017) “Temperature behaviour on deposition of the titanium nitride thin films on H13 steel by the electric arc discharge in vacuum”. *Respuestas* 22(2):14-22.
- [3] Tsygankov, P. A., Parada Becerra, F. F., Dugar-Zhabon, V. D., Plata, A., V-Niño, E. D. (2016) “Artificially modulated hard coatings produced with a vacuum arc evaporator” *Journal of Physics: Conference Series* 687:012005:1-4.
- [4] Anders, A. (2008) “*Cathodic arcs*” New York, U.S.A., Springer-Verlag.

- [5] González, L., González, G. (2013) "Evaluación por microscopia electrónica de barrido de recubrimientos Zn-7Al depositados a diferentes tiempos por inmersión en caliente sobre un acero SAE 1015". *Acta Microscopica* 22(1):91-98.
- [6] Anders, A. (1997) "Metal plasm immersion ion implantation and deposition: A review". *Surface and Coatings Technology* 93(2-3):158-167.
- [7] Valbuena-Niño, E. D., Gil, L., Hernández, L., Sanabria, F. (2020) "Corrosion resistance of a carbon-steel surface modified by three-dimensional ion implantation and electric arc". *Advances in Materials Research* 9(1):1-14.
- [8] Sanabria, F., V-Niño, E. D., Rincon-Joya, M., Estupiñán-Duran, H. A., Viejo, F. (2020) "Surface evaluation of carbon steel doped with nitrogen ions". *Rev. UIS Ing.* 19(1):205-212.
- [9] Sanabria, F., Viejo, F., V-Niño, E. D. (2019) "Performance in saline environment of a carbon steel surface modified by three dimensional ion implantation". *Journal of Physics: Conference Series* 1403:012015:1-7.
- [10] Dougar, V. D., Dulce, J., Tsygankov, P. (2002) "Implantación iónica tridimensional mediante descargas de alto voltaje a bajas presiones del dispositivo JUPITER". *Respuestas* 8:9-30.
- [11] Mccafferty, E. (2001) "Effect of ion implantation on the corrosion behavior of iron, stainless steels, and aluminum – A review". *Corrosion* 57(12):1011-1029.
- [12] Wegmann, L. (1984) "The historical development of ion implantation". *Ion Implantation Science and Technology* ed. Ziegler, J. F. New York, U.S.A., Academic Press, pp. 3-49.
- [13] Ashworth, V., Baron, E., Grant, W. A., Munn, P., Procter, R. P. M. (1982) "The effect of chlorine implantation on the localized corrosion behaviour of stainless steel and aluminium". *Ion implantation into metals: Proceedings of the 3rd international conference on modification of surface properties of metals by ion implantation* Manchester, U.K., Pergamon Press Ltd, pp.77-86.
- [14] Vasenin, Y. (2002) "Modelling of the microdrops distribution generated by a single cathode spot of the metal vapor arc". *20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Tours, France, IEEE, pp 400-403.
- [15] Karpenko, G. D., Rubinshtein, V. L., Anishchik, T. A., Andreev, M. A., Goev, A. I. (1988) "Effect of the magnetizing current on the structure of coatings obtained by the vacuum electric-arc method". *Journal of Engineering Physics* 54(6):683-686.
- [16] Mesyats, G. A. (1985) "A cyclical explosive model of the cathode spot". *IEEE Transactions on Electrical Insulation* EI-20(4):729-734.
- [17] Serna, W., Ospina, C. (2019) "Un estudio sobre la estabilidad a la corrosión del acero". *Acta Microscopica* 28(1):2-5.
- [18] Dugar-Zhabon, V. D., Dulcé-Moreno, H. J., Garnica-Villamizar, H. A., Valbuena-Niño, E. D. (2012) "A new method for surface modifications of carbon steels and alloys". *Materials Research* 15(6):969-973.
- [19] Valbuena-Niño, E. D., Dugar-zhabon V., Dulce Moreno H J, Peña Rodríguez G, Garnica H A, Tsygankov P. (2012) "Aplicación de descargas simultáneas de alto voltaje y arco eléctrico para el tratamiento superficial avanzado de metales". *Iteckne* 9(1):14-20.
- [20] Parada-Becerra, F., Cabanzo, R., Dugar-Zhabon, V., Tsygankov, P., Mejia-Ospino, E., V-Niño, E. D. (2012) "Plasma temperature measurement in a hybrid discharge by using optical diagnostics". *Journal of Physics: Conference Series* 370:012054:1-6.
- [21] Tsygankov, P., Plata, A., V-Niño, E. D., Ochoa, C., Parada, F., Chacón, C., Dugar-Zhabon, V. (2011) "Estudio de características voltio-ampéricas y peculiaridades de funcionamiento de un vaporizador de arco en vacío". *Revista Colombiana de Física* 43(2):458-462.