

Mejora superficial del acero AISI 316L mediante depósitos de nitruro de titanio amorfo por técnica de erosión catódica

Surface improvement of AISI 316L steel using amorphous titanium nitride deposits by cathodic erosion technique

Jorge Bertín Santaella-González*, Ricardo Orozco-Cruz**, Julián Hernández-Torres*, Leandro García-González*✉

Santaella-González, J. B., Orozco-Cruz, R., Hernández-Torres, J., & García-González, L. (2021). Mejora superficial del acero AISI 316L mediante depósitos de nitruro de titanio amorfo por técnica de erosión catódica. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 29(84), e3133, <https://doi.org/10.33064/iycuaa2021843133>

RESUMEN

El acero inoxidable AISI 316L por sus características de resistencia a la corrosión en ambientes alcalinos, estabilidad mecánica a altas temperaturas es atractivo para diversas industrias como aeronáutica, automotriz, petroquímica, alimenticia e incluso instrumentos quirúrgicos. No obstante, cuando se encuentra en ambientes ácidos ricos en cloruros no cuenta con la suficiente protección contra la corrosión, lo que resulta perjudicial para sus propiedades mecánicas. Por tanto, se han empleado recubrimientos de nitruro de titanio amorfo con bajos espesores capaces de mejorar sus características superficiales, como el incremento de dureza y resistividad eléctrica de la superficie. El método de síntesis de erosión catódica al ser una técnica física asegura una gran homogeneidad, alta adherencia al sustrato y control del espesor. Por consiguiente, se alcanzó una dureza con valores de 7.17 GPa, con una resistividad de 2.20E+09 ohm-cuadro para T4, con un espesor máximo de ~1.7 μm .

Palabras clave: acero 316L; erosión catódica; recubrimiento; ingeniería de superficie; dureza; resistividad eléctrica.

Recibido: 14 de abril de 2021, **Aceptado:** 11 de octubre de 2021

*Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología, Universidad Veracruzana. Blvd. Adolfo Ruíz Cortines 455, Costa Verde, C. P. 94294, Boca del Río, Veracruz, México. Correo electrónico: jbsantaella@hotmail.com; julihernandez@uv.mx; leagarcia@uv.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8760-6528>; <https://orcid.org/00000002-3517-1323>; <https://orcid.org/0000-0002-0968-6745>

**Instituto de Ingeniería, Unidad Anticorrosión, Universidad Veracruzana. Av. Juan Pablo II s/n, Costa Verde, C. P. 94292, Boca del Río, Veracruz, México. Correo electrónico: rorozco@uv.mx ORCID: <https://orcid.org/00000002-1983-2806>

✉ Autor para correspondencia

ABSTRACT

AISI 316L stainless steel, due to its characteristics of corrosion resistance in alkaline environments, mechanical stability at high temperatures is attractive for various industries such as aeronautics, automotive, petrochemical, food, and even surgical instruments. However, when it is found in acidic environments rich in chlorides, it does not have sufficient protection against corrosion, which is detrimental to its mechanical properties. Therefore, amorphous titanium nitride coatings with low thicknesses have been used to improve its surface characteristics, such as increased surface hardness and electrical resistivity. The cathodic erosion synthesis method being a physical technique ensures high homogeneity, high adhesion to the substrate, and thickness control. Consequently, a hardness with values of 7.17 GPa was achieved, with a resistivity of $2.20E+09$ ohm-square for T4, with a maximum thickness of ~ 1.7 μm .

Keywords: 316L steel; cathodic erosion (Sputtering); coating; surface engineering; hardness; electrical resistivity.

INTRODUCCIÓN

El sector industrial ha demandado materiales estructurales durables, con confiabilidad para mantenerse en operación constante bajo ciertos ambientes de trabajo, por lo cual los aceros inoxidables cumplen muchos de estos requisitos debido a que se han ocupado en grandes cantidades. Dentro de los mismos aceros inoxidables austeníticos destaca el AISI 316L, el cual por sus propiedades como el bajo contenido de carbono limita la posible formación de precipitados de carbono, estabilidad química ante ambientes alcalinos y altas temperaturas (Kant et al., 2018). Sin embargo, como todo material tiene sus limitaciones, como la degradación del material frente ambientes ácidos con gran cantidad de cloruros (Domínguez-Crespo et al., 2018).

Con las nuevas tecnologías de fabricación de recubrimientos ha tomado mucha relevancia mejorar materiales base, pudiendo elevar ciertas características como la dureza superficial, reducir coeficientes de fricción, modificando su resistividad eléctrica superficial, su rugosidad, con espesores muy pequeños que van desde decenas de nanómetros (1×10^{-9} m) hasta unos cuantos micrómetros (1×10^{-6} m) (Yazıcı, Kovacı, Yetim, & Çelik, 2018). Dentro de los procesos para crear recubrimientos con materiales ajenos al material base se encuentran los depósitos por vapor químico (Chemical Vapor Deposition-CVD) (Czetti, Thurner, & Schleinkofer, 2018) y los depósitos por vapor físico (Physical Vapor Deposition-PVD). PVD es de los procesos más controlables por sus condiciones de vacío y alta pureza de los elementos de síntesis, una de las técnicas de los recubrimientos PVD es la de erosión catódica (*sputtering*) (Uddin et al., 2019). La técnica de erosión catódica presenta ventajas como control del espesor, alta reproducibilidad, buena adherencia de diferentes sustratos, versatilidad al usar materiales metálicos, óxidos metálicos o cerámicos y potencial a escalarlo a producción industrial (Bait, Azzouz, Madaoui, & Saoula, 2017; Santaella-González et al., 2019).

Debido a que las mejoras superficiales se realizan con recubrimientos de espesores inferiores a 10 micrómetros es muy importante usar microanálisis para obtener valores reales de las características que presentan los recubrimientos, es por ello que en varios trabajos

han usado microdureza, microtribología, resistencia eléctrica superficial para evaluar la dureza superficial, resistencia al desgaste, coeficiente de fricción y resistividad eléctrica de recubrimientos de diferentes materiales sintetizados por diversos métodos como anodización electroquímica (Hernández Montiel et al., 2021), oxidación térmica (Maytorena-Sánchez et al., 2021) y *sputtering* (Santaella-González et al., 2019). Usar microanálisis permite valorar el desempeño del propio recubrimiento, tratando de evitar la contribución del sustrato, debido a que se pueden emplear cargas pequeñas haciendo la caracterización más sensible y real que con cargas macro serían imperceptibles. Es por ello que las industrias como la óptica, microelectrónica, metal-mecánica, por mencionar algunas que usan la tecnología de recubrimientos también necesitan realizar microanálisis de los recubrimientos de bajos espesores para garantizar la calidad y desempeño de sus productos o procesos.

Algunos recubrimientos se generan con base en el material del sustrato, como los generados por oxidación térmica y anodización electroquímica, lo que hace limitado el uso de otros materiales; sin embargo, la técnica de *sputtering* ha mostrado gran versatilidad para el depósito de recubrimientos duros como el nitruro de titanio (TiN). En su forma cristalina ha sido empleado para mejorar la superficie por sus buenas características como alta dureza, mayor estabilidad a ambientes corrosivos y buena resistencia al desgaste (Yan et al., 2018); sin embargo, también se encuentra en su versión amorfa, que tiene cualidades como mayor resistividad eléctrica que en forma cristalina (Kearney, Jugdersuren, Culbertson, Desario, & Liu, 2018). Por consiguiente, en este trabajo se usó la técnica de erosión catódica para sintetizar recubrimientos de nitruro de titanio amorfo (TiN) sobre acero inoxidable 316 L, de tal manera que se modifiquen las propiedades superficiales para mejorar su dureza, incrementar su resistividad eléctrica, con bajos espesores de recubrimiento para posibles aplicaciones como material biocompatible.

Una muestra alusiva de la aplicación industrial de los recubrimientos de TiN se observa en la figura 1, la cual muestra fresa con recubrimiento de nitruro de titanio que mejora su desempeño al maquinar piezas en una máquina CNC. Gracias a la aplicación del recubrimiento sobre la fresa de corte se alargan los periodos de operación, la vida útil de la herramienta por la elevada dureza del recubrimiento protector.

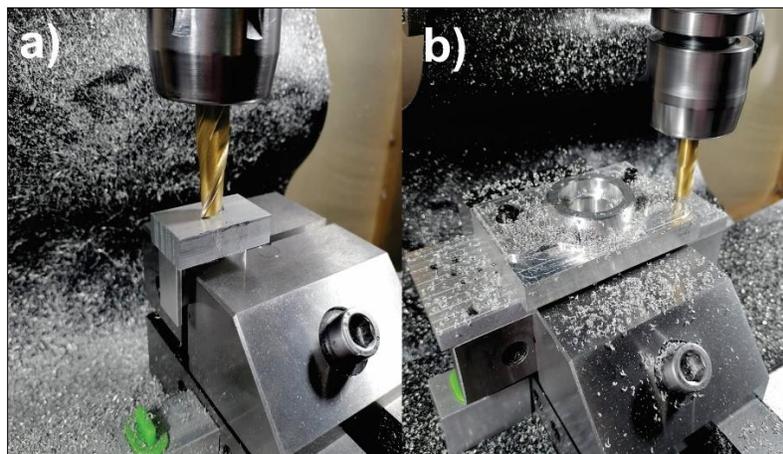


Figura 1. Fresa con recubrimiento de TiN instalada en una máquina CNC: a) en estado estático, b) en el proceso de maquinado. Fotografías tomadas por Jorge Bertin Santaella-González.

MATERIALES Y MÉTODOS

El acero inoxidable 316L fue preparado a partir de una barra circular de 25 mm de diámetro, cortada en especímenes de 3 mm de espesor, posteriormente se realizó un pulido a la superficie con lijas de papel abrasivo de diferentes granulometrías desde 80 hasta 2000, para asegurar una superficie uniforme, seguido de un pulido con acabado espejo con un paño metalográfico y alúmina. A continuación, se limpiaron los sustratos con soluciones de acetona y etanol, para remover grasa y residuos del pulido. Paralelamente se limpiaron sustratos de silicio (Si) con ácido fluorhídrico, acetona y etanol.

Los recubrimientos fueron sintetizados en una cámara de vacío de un sistema de erosión catódica con magnetrón, usando blanco de titanio (Ti) de alta pureza, atmósfera con una mezcla de gases argón + nitrógeno, y se emplearon al mismo tiempo los sustratos de 316L y Si. Los parámetros usados dentro de la cámara fueron 200 W de corriente directa (DC) sobre el blanco de Ti, polarización al sustrato -50V, se realizó una variación en el flujo de nitrógeno de 2.5, 5, 7.5, 10 y 12 sccm (centímetros cúbicos estándar por minuto), se nombraron los ejemplares T1, T2, T3, T4 y T5, respectivamente para cada flujo.

Se realizaron mediciones de microdureza Vickers para examinar la resistencia a la penetración superficial de los recubrimientos mediante el uso de varias cargas que van desde 2, 3, 4, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 y 2000 gramos fuerza (grf), después se realizó un ajuste matemático usando el modelo de indentación de Korsunsky (García-González et al., 2018), el cual permitió separar la dureza del recubrimiento de la influencia del sustrato. Para medir el espesor de los recubrimientos se utilizó un escalón generado al remover una cinta adherida al acero previamente al depósito, y con un perfilómetro Taylor Hobson Metek. Finalmente, se midió la resistividad eléctrica de los recubrimientos depositados sobre Si, con un equipo Keithley 8009 Resistivity Test Fixture.

Se realizó difracción de rayos x (DRX) usando el método de haz rasante para confirmar el estado amorfo del recubrimiento de TiN, mediante un difractómetro Bruker D8 advance, con un ángulo de incidencia de 1°, un tamaño de paso de 0.04° y barrido de 20 a 100°. También se realizó un análisis de la morfología superficial por microscopía electrónica de barrido de emisión de campo con un microscopio JEOL JSM-7600F a 20,000x con un detector de electrones secundarios.

RESULTADOS

La ingeniería de superficies ha desencadenado una modificación de las superficies de los materiales base o sustratos para disminuir sus limitaciones y así prolongar su vida útil y estabilidad ante ambientes agrestes. Es importante la aplicación de microanálisis a los recubrimientos debido a la mayor sensibilidad y confiabilidad de las técnicas de caracterización por el tamaño de los espesores generalmente empleados en la ingeniería de superficies, que tiene aplicaciones en diversas industrias que van desde uso de recubrimientos en lentes ópticos, prótesis e implantes en el cuerpo humano, rodamientos, cojinetes, por mencionar algunos ejemplos. Es por lo que este trabajo ha empleado recubrimientos de nitruro de titanio amorfo depositados por erosión catódica, los cuales dotan al acero inoxidable 316L con mejores propiedades, las cuales se evaluarán a continuación.

Microdureza

La caracterización de microdureza Vickers permite evaluar el cambio superficial en relación con la resistencia a la penetración a diversas cargas mediante un indentador de diamante con geometría piramidal con un ángulo de base de 136° , se realizan 3 mediciones por carga en diferentes puntos del recubrimiento, posterior a esto se les aplicó el modelo matemático de indentación del trabajo propuesto por Korsunsky. En la figura 2 se pueden observar de manera gráfica los datos experimentales del recubrimiento T3 (línea negra con puntos) y la línea gris correspondiente al ajuste del modelo matemático; en el eje de las ordenadas la escala de la dureza en GPa y en el eje inferior la profundidad relativa de la indentación realizada por el diamante Vickers. La grafica sirve para describir el comportamiento del recubrimiento T3 desde las cargas más bajas, donde se ve la contribución de la resistencia en mayor parte por el recubrimiento que es el punto de la dureza más alta, conforme se va incrementando la carga hay un segmento de transición donde comienza a incrementar la contribución del sustrato y la dureza empieza a disminuir gradualmente, donde los valores de dureza influenciados más por el sustrato y tiende aproximarse a la dureza del acero que ronda los 2.14 GPa.

Lo que logra hacer el modelo matemático con base en este comportamiento es separar los valores de dureza de recubrimiento y de sustrato, y con esto dar un valor más real del recubrimiento T3. De modo posterior a cada ajuste, los valores de dureza de cada recubrimiento fueron los siguientes: 1.12, 2.63, 4.17, 7.17, 5.97 GPa para T1, T2, T3, T4, y T5, respectivamente. Esta variación en los valores de dureza está influenciada por la variación en el flujo de gas nitrógeno durante el proceso de síntesis. Este comportamiento ha sido reportado en la literatura (Kumar et al., 2019), esto se debe a que al incrementar el volumen de gases dentro de la cámara cambiarán las condiciones de vacío, al igual que al tener mayor cantidad de gas nitrógeno es más probable que los iones de titanio erosionado del blanco puedan ligarse al gas N_2 y de esta manera formar en mayor cantidad los enlaces Ti-N, esto derivó en la dureza inferior al 316L; por otro lado al incrementar el flujo de nitrógeno se obtuvieron durezas superiores a la del sustrato hasta llegar a un máximo para T4 cercano a 7.17 GPa; es decir, se mejoró aproximadamente 300% la dureza superficial con relativamente bajos espesores como se muestra en la parte de perfilometría.

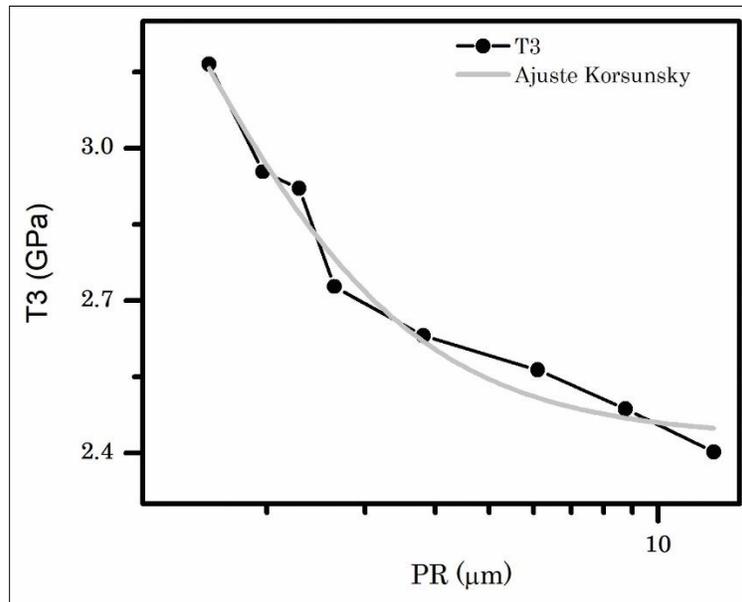


Figura 2. Datos experimentales de dureza para T3 y ajuste Korsunsky.
Elaboración propia.

Perfilometría

Es de gran utilidad conocer los espesores de los recubrimientos, ya que su valor se involucra en varios cálculos o consideraciones de otras caracterizaciones que se pueden realizar a los recubrimientos protectores. Esta caracterización se realizó en un escalón generado por una porción de la superficie cubierta con una cinta resistente al vacío y pos-depósito se desprendió, lo que dejó ver el sustrato enmarcado por el recubrimiento, además redujo las contribuciones en la medición del espesor por otro tipo de técnicas para realizar el escalón. En la figura 3 se puede observar cómo se registra el cambio de altura con respecto al desplazamiento de la punta del perfilómetro desde el sustrato hacia el borde del recubrimiento, lo que genera una respuesta repentina en el cambio de la altura debido al escalón que marca el límite del acero con el recubrimiento T2.

Los espesores fueron de máximo ~ 1.7 micrómetros (μm) para T1, hasta los mínimos muy similares de ~ 0.5 μm para el caso de T4 y T5; para T2 y T3 fueron de ~ 1.2 y ~ 1.0 μm , respectivamente. Esto indica que el incremento en el flujo de nitrógeno dentro de la cámara del sistema de erosión catódica ocasionó un decremento en la tasa de depósito; esto habla de que al haber mayor cantidad de enlaces Ti-N y menor cantidad de iones erosionados del blanco de titanio, posiblemente por una nitruración en la superficie del blanco debido a la difusión de ejemplares de nitrógeno (Dhanaraj, Mohamed, Kamruddin, Kaviyarasu, & Manojkumar, 2021), derive en incrementar la resistividad del blanco y no poder erosionar tan rápido como con flujos de nitrógeno bajos.

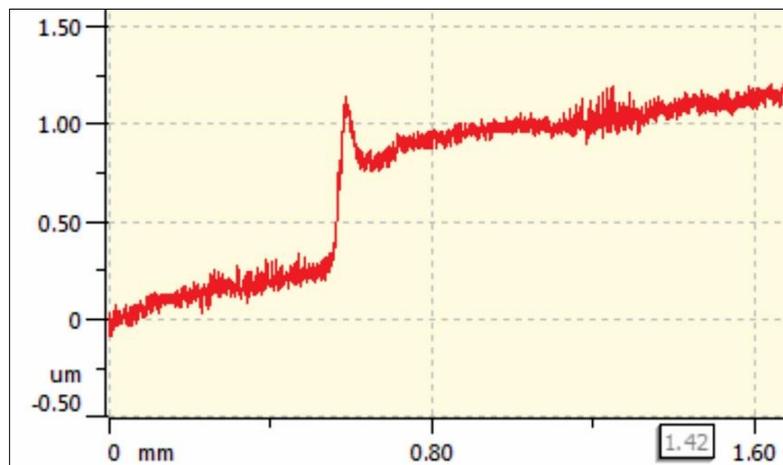


Figura 3. Perfil del espesor de T2 censado por el perfilómetro en la zona del escalón.
Elaboración propia.

Resistividad eléctrica superficial

Otro de los factores importantes en los recubrimientos protectores es limitar la transferencia de iones en la superficie, esto augura que puede tener un buen desempeño cuando el recubrimiento se encuentre en ambientes agresivos con iones que intenten llegar al sustrato. Se realizó la caracterización de resistividad eléctrica superficial; en el caso de los recubrimientos se obtuvieron altos valores de resistividad eléctrica propios de un TiN amorfo debido a que por condiciones de síntesis no se calentó el sustrato y no contaba con la energía suficiente para lograr una buena cristalinidad en los recubrimientos como se ha establecido en la literatura (Kearney et al., 2018; Shukla, Rane, Alphonsa, Maity, & Mukherjee, 2017). Los valores comienzan desde el máximo 1.9 E+10 ohm-cuadro para el caso de T1 y el recubrimiento con la menor resistividad eléctrica fue T3 con valor de 1.2 E+08 ohm-cuadro. Los demás valores se presentan en la tabla 1.

Tabla 1
Resistividad eléctrica de los recubrimientos según el flujo de nitrógeno aplicado

Recubrimiento	Flujo N ₂ [Ω -cuadro]	Resistividad
T1	2.5	1.89E+10
T2	5.0	1.20E+10
T3	7.5	1.27E+08
T4	10	2.20E+09
T5	12	8.32E+09

Nota: Elaboración propia.

Difracción de rayos X por haz rasante

Los valores altos de resistividad demuestran que los recubrimientos son amorfos; sin embargo, para comprobar el estado amorfo de los recubrimientos se realizó la caracterización de DRX al recubrimiento T3 mediante el método de haz rasante con un ángulo de 1°. El difractograma se muestra en la figura 4, en el cual se pueden observar

cuatro picos de difracción identificados como austenita con la carta PDF-2 (00-023-0298), el más intenso el posicionado en 43.47° correspondiente al plano (111), los otros 3 en 50.67° (200), 74.67° (220) y 90.67° (311); lo cual indica que se tiene una estructura de austenita propia del sustrato 316L que es un acero austenítico pero no se observa ningún otro pico de difracción relacionado con el TiN. Esto implica que a pesar de realizar haz rasante se demuestra que el recubrimiento es amorfo y se asegura que los valores altos de resistividad eléctrica son por la falta de cristalinidad del recubrimiento.

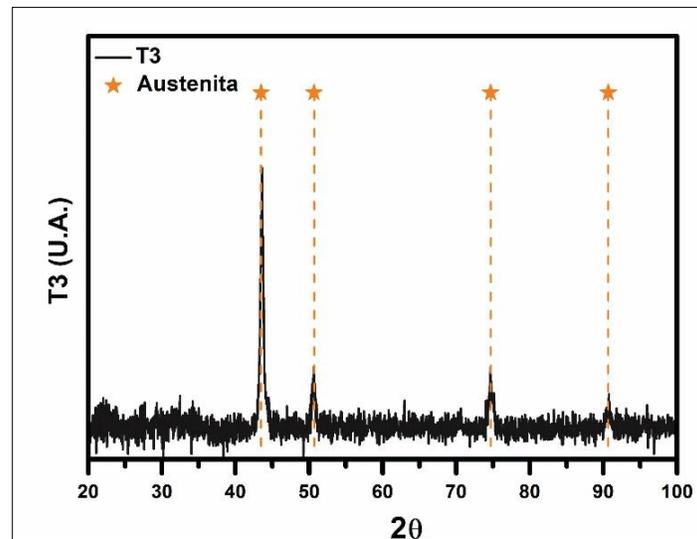


Figura 4. Diffractograma del recubrimiento T3 usando el método de haz rasante. Elaboración propia.

Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo

La figura 5 muestra la morfología superficial de T3 y T5, tomadas mediante un microscopio electrónico de barrido a 20,000 x. En la figura 5 inciso a se pueden observar por toda la superficie pequeñas aglomeraciones de granos de material cerámico constituidos por pequeños entes; los cúmulos de granos no presentan una forma bien definida, indicio de que el material no presenta orientación preferencial; es decir, el recubrimiento no tiene cristalinidad, pues la disposición de los cúmulos es aleatoria. En la figura 5 inciso b se observa la presencia de cúmulos de grano con menor tamaño y rugosidad superficial; no obstante, en ambas podemos observar el nivel de rugosidad del recubrimiento y la uniformidad del depósito propios del método de síntesis de *sputtering*, como se ha demostrado en otros trabajos (García-González et al., 2018; Santaella-González et al., 2019).

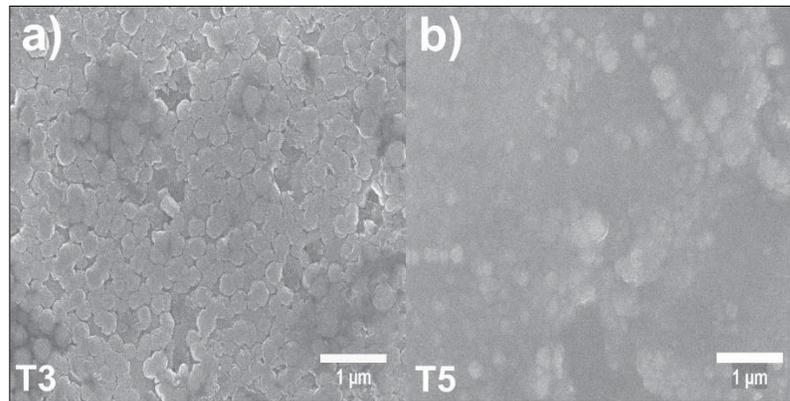


Figura 5. Morfología de la superficie del recubrimiento T3 tomada a 20,000x. Imagen tomada por el equipo de investigación.

DISCUSIÓN

El depósito de recubrimientos de nitruro de titanio con variación en el flujo de nitrógeno como gas reactivo durante el proceso de síntesis provocó que sufrieran cambios desde diferentes tasas de depósito que se traduce en una variación de espesores, cambios estructurales que derivaron en diferentes valores de dureza e inclusive estos cambios se vieron reflejados en los valores de resistividad eléctrica superficial de los recubrimientos. Por los altos valores de resistividad eléctrica y valores cercanos a los 10 GPa de dureza se obtuvieron recubrimientos con una muy baja cristalinidad no censable (Shukla et al., 2017), propios de un nitruro de titanio amorfo, lo cual fue corroborado por difracción de rayos X con haz rasante a 1° ; donde no se mostró ningún pico de difracción relacionado con TiN solamente se pudieron observar los picos de difracción del sustrato 316L.

Al aumentar el flujo de N_2 la presión de trabajo disminuye y el proceso de erosión catódica cambia; es decir, la tasa de depósito se ve disminuida y provoca reducción en los espesores; además con más N_2 en la atmósfera hay mayor probabilidad de generar más enlaces Ti-N, lo que favorece el incremento en la dureza. No obstante, la resistividad eléctrica se mantiene con valores altos y con una tendencia a decrecer ligeramente, pero manteniéndose con valores propios de un nitruro de titanio amorfo. Se pudo observar la morfología superficial de los recubrimientos T3 y T5, los cuales muestran que el recubrimiento es uniforme, tiene presencia de cúmulos de grano que no cuentan con una forma definida y su disposición es de forma aleatoria.

CONCLUSIONES

El estudio mostró que es posible modificar de manera favorable la superficie del acero inoxidable 316L mejorando su dureza y alcanzando valores de 7.17 GPa para la condición de T4 con un flujo de gas nitrógeno de 10 sccm. Asimismo, se logró incrementar la dureza superficial en casi 300% el valor para el acero y valores altos de resistividad eléctrica propios

de un material cerámico amorfo, lo cual limitara el intercambio iónico en la superficie y se obtuvieran valores del rango $1.9 \text{ E}+10$ a $1.27\text{E}+08$ ohm-cuadro para el caso de T1 y T3, respectivamente. Estos valores son debido al uso de un nitruro de titanio amorfo que presenta mayor resistividad eléctrica superficial que el TiN en su versión cristalina, al igual que espesores desde $\sim 1.7 \mu\text{m}$ hasta $\sim 0.5 \mu\text{m}$.

Se ratificó el estado amorfo del recubrimiento T3 por la caracterización de DRX en la cual solo se observaron los picos de difracción relacionados con el 316L y no se identificó ningún pico relacionado con TiN, lo cual sustenta la identificación del material amorfo por los altos valores de resistividad. Los recubrimientos con relativamente bajos espesores lograron mejoras satisfactorias para las propiedades del 316L; se valoró el efecto del incremento del gas reactivo nitrógeno durante el proceso de síntesis en las propiedades de los cinco recubrimientos pero buscando un equilibrio entre valores de dureza, resistividad eléctrica y espesor del recubrimiento se puede corroborar que a flujos de nitrógeno altos se tienen las mejores propiedades como dureza y conservando buena resistividad eléctrica superficial por ser un TiN amorfo, que fue el caso para T4 y T5.

Agradecimientos

Jorge Berfín Santaella-González desea agradecer al programa de posgrado en Materiales y Nanociencia de la Universidad Veracruzana, a CONACYT por la beca otorgada 744482 y a Marco Antonio Escarola-Rosas por el acceso al taller de maquinado MAER CNC.

REFERENCIAS

- Bait, L., Azzouz, L., Madaoui, N., & Saoula, N. (2017). Influence of substrate bias voltage on the properties of TiO_2 deposited by radio-frequency magnetron sputtering on 304L for biomaterials applications. *Applied Surface Science*, 395, 72-77. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.07.101
- Czettl, C., Thurner, J., & Schleinkofer, U. (2018). Knowledge based coating design of CVD TiN-TiBN-TiB₂ architecture. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 71, 330-334. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2017.11.040
- Dhanaraj, R., Mohamed, S. B., Kamruddin, M., Kaviyarasu, K., & Manojkumar, P. A. (2021). Structural properties of TiN thin films prepared by RF reactive magnetron sputtering. *Materials Today: Proceedings*, 36(2), 146-149. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.668
- Domínguez-Crespo, M. A., Torres-Huerta, A. M., Rodríguez, E., González-Hernández, A., Brachetti-Sibaja, S. B., Dorantes-Rosales, H. J., & López-Oyama, A. B. (2018). Effect of deposition parameters on structural, mechanical and electrochemical properties in Ti/TiN thin films on AISI 316L substrates produced by r. f. magnetron sputtering. *Journal of Alloys and Compounds*, 746, 688-698. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.02.319
- García-González, L., López-Huerta, F., Araujo-Pérez, D. J., Zamora-Peredo, L., Flores-Ramírez, N., Vásquez García, S. R., ...Hernández-Torres, J. (2018). Effect of the temperature variation on the hardness and microstructure of TiSiNO coatings obtained by sputtering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 446. doi: 10.1088/1757-899X/446/1/012001
- Hernández Montiel, S., Hernández Torres, J., Araujo Pérez, D. J., Orozco Cruz, R., Morales Hernández, J., Zamora Peredo, L., & García González, L. (2021). Study of the

variation of the voltage and time of the process in the anodizing of TiO₂ with HCl. *ECS Transactions*, 101(1), 199-211. doi: 10.1149/10101.0199ecst

- Kant, R., Mittal, R., Kumar, C., Rana, B. S., Kumar, M., & Kumar, R. (2018). Fabrication and characterization of weldments AISI 304 and AISI 316 used in industrial applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18475-18481. doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.189
- Kearney, B. T., Jugdersuren, B., Culbertson, J. C., Desario, P. A., & Liu, X. (2018). Substrate and annealing temperature dependent electrical resistivity of sputtered titanium nitride thin films. *Thin Solid Films*, 661, 78-83. doi: 10.1016/j.tsf.2018.07.001
- Kumar, P., Bansal, D., Anuroop, Mehta, K., Kumar, A., Rangra, K., & Boolchandani, D. (2019). Optimization of titanium nitride film for high power RF MEMS applications. *Journal of Electronic Materials*, 48, 6431-6436. doi: 10.1007/s11664-019-07435-9
- Maytorena-Sánchez, A., Hernández-Torres, J., López-Huerta, F., Hernández-Campos, M. A., Zamora-Peredo, L., Pacio-Castillo, M., ...García-González, L. (2021). Analysis of the hardness and tribological properties of grade 2 titanium using the thermal oxidation process at different temperatures. *Materials Letters*, 282, 2020-2022. doi: 10.1016/j.matlet.2020.128679
- Santaella-González, J. B., Garcia-Gonzalez, L., Araujo Pérez, D. J., Galvan-Martinez, R., Hernández-Torres, J., Cruz-Jáuregui, M. P., & Morales-Hernández, J. (2019). Microstructural analysis of W-doped TiO₂ thin films deposited by sputtering. *ECS Transactions*, 94(1), 211-217. doi: 10.1149/09401.0211ecst
- Shukla, K., Rane, R., Alphonsa, J., Maity, P., & Mukherjee, S. (2017). Structural, mechanical and corrosion resistance properties of Ti/TiN bilayers deposited by magnetron sputtering on AISI 316L. *Surface and Coatings Technology*, 324, 167-174. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.075
- Uddin, G. M., Jawad, M., Ghufuran, M., Saleem, M. W., Raza, M. A., Rehman, Z. U., ... Waseem, B. (2019). Experimental investigation of tribo-mechanical and chemical properties of TiN PVD coating on titanium substrate for biomedical implants manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5-8), 1391-1404. doi: 10.1007/s00170-018-03244-2
- Yan, Z., Jiang, D., Gao, X., Hu, M., Wang, D., Fu, Y., ... Weng, L. (2018). Friction and wear behavior of TiN films against ceramic and steel balls. *Tribology International*, 124, 61-69. doi: 10.1016/j.triboint.2018.03.031
- Yazıcı, M., Kovacı, H., Yetim, A. F., & Çelik, A. (2018). Structural, mechanical and tribological properties of Ti and TiN coatings on 316L stainless steel. *Ceramics International*, 44(12), 14195-14201. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.022



Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material
La licencianta no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.

CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.