

# Comportamiento mecánico y la corrosión de aceros de herramientas nitrurados y recubiertos con PAPVD

## Mechanical behavior and corrosion of steeltools nitrided and coated PAPVD

**Humberto José Jiménez**

Ph.D. en Metalurgia  
Fundación para el Desarrollo de la Ciencia  
y Tecnología del Estado Bolívar  
Universidad Gran Mariscal de Ayacucho  
Barcelona Venezuela  
humbertoj.jimenez@gmail.com

**Mariana Henriette-Staia**

Ph.D. en Metalurgia  
Escuela de Ingeniería Metalúrgica  
y Ciencia de los Materiales  
Universidad Central de Venezuela  
Caracas, Venezuela  
mhstaia@gmail.com

**Eli Saúl Puchi-Cabrera**

Ph.D. en Metalurgia. Escuela de Ingeniería Metalúrgica  
y Ciencia de los Materiales  
Universidad Central de Venezuela  
L'Université Lille Nord de France  
Lille, France  
Eli.Puchi@univ-lille1.fr

**Resumen—** En los últimos años, la ingeniería de superficie ha venido optimizando los sistemas recubiertos y tratamientos superficiales mediante la aplicación de tecnologías asistidas por plasma. Tanto los recubrimientos duros obtenidos por PAPVD como PACVD pueden proveer una mejora significativa en las propiedades superficiales del sustrato en términos de sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. Los recubrimientos hacen parte integral del desarrollo de nuevos materiales y se busca desarrollar técnicas y materiales que permitan optimizar los sistemas para conferirles las características microestructurales que garanticen el perfil de propiedades idóneo para mejorar la eficiencia e incrementar la vida útil de los componentes industriales y dispositivos. Por lo tanto, este trabajo presenta los resultados de la caracterización de sistemas recubiertos a base de TiN y TiAlN obtenidos mediante deposición física en fase vapor asistida por plasma (PAPVD), en cuanto a su comportamiento mecánico y frente a la corrosión, cuando se utilizan como sustrato los aceros de herramienta D2 y H13, tanto en su condición original como nitrurados.

**Palabras clave—** Recubrimientos PAPVD, resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas, aceros de herramienta.

**Abstract—** In recent years, surface engineering has been employed for the optimization of coated systems, as well as other surface treatments, by means of plasma-assisted technologies. Hard coatings obtained both by PAPVD and PACVD can improve significantly the surface properties of the substrate in terms of its mechanical

properties and corrosion resistance. Coatings are an integral part of the expansion of new surface engineering technologies. Therefore, the surface engineering field seeks the development of new techniques and materials in order to optimize such coated systems. The ultimate aim is to provide them with the required microstructural features to ensure suitable surface properties and to increase the life of industrial parts and components. This paper presents the main results of the characterization of the mechanical properties and corrosion resistance of a TiN and TiAlN coatings deposited onto D2 and H13 tool steels by PAPVD. The steel substrates were employed both in their original condition, as well as after nitriding.

**Keywords—** PAPVD coatings, corrosion resistance, mechanical properties, tool steel.

### 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de técnicas de deposición en la última década ha permitido la introducción de varios procesos y tecnologías aplicadas en la producción de recubrimientos duros para herramientas de corte y perforación, las cuales representan una clase importante de materiales de ingeniería avanzada para las tecnologías de manufactura de componentes empleados en diversos sectores industriales tales como: petróleo, metalmecánica y minería. La aplicación de recubrimientos duros,

con alta resistencia al desgaste, comenzó a mediados de los años 60 y hoy en día, casi 70% de todas las herramientas de corte y perforación son recubiertas. Por lo tanto, los recubrimientos hacen parte integral del desarrollo de nuevos materiales y para esto, se ha hecho un esfuerzo considerable en desarrollar técnicas y materiales que cumplan con la demanda creciente de aumento de la vida útil de estas herramientas [1].

En general, las herramientas de corte y perforación son fabricadas a partir de carburos cementados, aceros rápidos, materiales cerámicos, “cermets”, diamante policristalino, nitruro de boro y otros tipos de materiales [2]. De estos, alrededor del 40-45% son a base de carburos cementados y una parte igual son a base de aceros de herramienta. Los métodos empleados para mejorar tanto las propiedades mecánicas, como dureza, así como para aumentar la resistencia al desgaste o a la corrosión de los aceros de herramientas, se han basado tradicionalmente en realizar tratamientos termoquímicos, tales como: carburización, nitruración y nitrocarburación, los cuales han sido revisados recientemente [3].

También, el desarrollo de los métodos de deposición de recubrimientos duros delgados a través de técnicas, tanto de deposición química en fase vapor (CVD) como deposición física en estado de vapor (PVD), ha permitido aumentar la resistencia a la corrosión y estabilidad química de las herramientas, así como su dureza superficial. Mediante estas técnicas, se puede depositar una amplia variedad de recubrimientos duros como: carburos, nitruros, boruros, óxidos y sus mezclas. Sin embargo, para aplicaciones de herramientas de corte sólo ciertos compuestos son adecuados, debido a sus propiedades únicas y su facilidad de deposición. Los recubrimientos más utilizados comercialmente en la industria de herramientas de corte son: TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN, TiCN, TiAlN, TiAlCr, AlCrN [4], [5].

Los recubrimientos duros obtenidos por PVD como TiN y TiAlN han sido estudiados por muchos investigadores, ya que contribuyen a un aumento considerable en la resistencia al desgaste de las herramientas de corte. Una revisión bibliográfica extensa sobre el uso de TiAlN realizada por PalDey y Deevi [6] demostró la excelen-

te resistencia térmica y la oxidación de estos sistemas recubiertos. Dichos autores presentaron los posibles métodos de deposición de estos materiales, así como una detallada comparación entre el desempeño de estos recubrimientos y los de TiN, Ti(C,N) y (Ti,Zr)N en los procesos de maquinado. No obstante, la aplicación de recubrimientos duros obtenidos por PVD sobre el sustrato, no garantiza un comportamiento tribológico óptimo sin el adecuado pre tratamiento del mismo, debido a la deformación plástica de este, lo cual pudiera resultar, eventualmente, en la falla del recubrimiento. Con el fin de aumentar la dureza e incrementar el soporte de carga del mismo, los tratamientos más comunes que se emplean previamente a la deposición del recubrimiento duro, pueden ser de nitruración gaseosa, iónica o líquida, así como la nitrocarburación [2]-[9].

En los últimos años, se ha logrado incrementar la vida útil de piezas y componentes a través de la deposición de recubrimientos duros sobre sustratos previamente tratados, mediante los llamados “sistemas dúplex”, alcanzándose excelentes propiedades superficiales y estabilidad mecánica de los sistemas recubiertos [10]-[13]. Sin embargo, cabe mencionar, que los cambios en la arquitectura de los sistemas recubiertos han afectado considerablemente sus propiedades mecánicas y, a pesar de la extensa información existente referente a la microestructura y su relación con los parámetros de deposición, se conoce muy poco sobre la respuesta frente al desgaste a alta temperatura, “fretting”, corrosión y tribocorrosión. Esta información es imprescindible para validar un nuevo recubrimiento en su empleo a escala industrial.

Por lo tanto, el objetivo primordial del presente trabajo es la evaluación del comportamiento frente a la corrosión de un acero de herramienta nitrurado, con y sin recubrimientos duros del tipo TiN y TiAlN depositadas mediante técnicas de PVD.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para realizar la investigación propuesta se utilizaron muestras de dos tipos diferentes de acero de herramientas: D2 y H13, cuya composición química se determinó utilizando métodos de fluorescencia. De estos materiales se obtuvieron las muestras por estudiar, para lo cual se realizó un

corte mecánico empleando un equipo de disco abrasivo que permitió alcanzar las dimensiones requeridas. Dichas muestras se acondicionaron superficialmente; empleando papeles de carburo de silicio; siguiendo la secuencia: 80, 120, 240, 400 y 600, lo cual permitió asegurar una superficie lisa y libre de óxido. Las probetas, previamente preparadas, fueron nitruradas en baño de sales a nivel industrial mediante un precalentamiento durante una hora y luego, tratamiento termoquímico a 540°C durante dos horas y media.

Varias muestras típicas de este grupo de probetas nitruradas fueron cortadas a lo largo de la sección transversal; preparadas metalográficamente, atacadas químicamente y observadas en un microscopio óptico marca OLYMPUS, modelo PMG 3, el cual tiene acoplado un sistema de análisis de imágenes LECO 3001. Este análisis permitió observar en detalle y caracterizar el espesor de la capa blanca y la zona de difusión. Posteriormente, se procedió a realizar ensayos de microdureza Vickers en la sección transversal, empleando una carga de 10 g, con el fin de determinar la variación de la dureza en la capa nitrurada. De esta manera, fue posible establecer la variación de la dureza en función de la distancia desde la superficie e inferir el espesor de la capa que debe ser eliminada antes de realizar la deposición de los recubrimientos de TiN y TiAlN. Una vez removida dicha capa, se procedió al envío de las muestras para la deposición de los recubrimientos duros de TiN y TiAlN. Esta deposición se realizó en la empresa BALZERS, INC en los Estados Unidos de Norte América. Así, se depositaron los recubrimientos comerciales BALINIT® A (TiN) y BALINIT® FUTURA NANO (TiAlN), los cuales permitieron obtener las muestras con el recubrimiento dúplex.

Para la realización de los ensayos de polarización se utilizó un área de exposición de  $\sim 0,06$  cm<sup>2</sup> y se verificó la conductividad eléctrica de las muestras. Se usó una solución aireada de 3,5 g de NaCl disuelto en 1000 ml de agua destilada. Los ensayos se llevaron a cabo en una celda universal de 5 entradas empleada en la realización de ensayos electroquímicos. Dicha celda está constituida, básicamente, por la muestra de trabajo (colocada en el orificio central), los contra electrodos de grafito puro (colocados en los orificios laterales), el electrodo de calomelano

saturado (SCE) (colocado en el orificio oblicuo) y un termómetro (colocado en el orificio lateral secundario).

Los ensayos de resistencia a la polarización se realizaron en un equipo potenciostato / galvanostato, controlado por un programa capaz de variar, automáticamente, el potencial a una velocidad constante entre dos potenciales presentes; así como de registrar la curva de potencial versus densidad de corriente. El montaje y preparación de la celda se llevaron a cabo siguiendo las especificaciones de las normas ASTM G5-87; usando como referencia un electrodo de calomelano saturado (SCE), así como contra electrodos de grafito de alta pureza. Todos los ensayos se llevaron a cabo sin agitación mecánica. Algunas de las muestras se ensayaron mediante técnicas de resistencia a la polarización lineal, introduciéndose directamente en la celda de trabajo a una temperatura de 25 °C y midiéndose el potencial de corrosión a circuito abierto (Eoc) por un lapso de 2800 s, a fin de estabilizar dicho potencial antes de realizar los ensayos electroquímicos. Estos ensayos se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la Norma ASTM G59-97. Asimismo, se efectuaron los ensayos de polarización potenciodinámica para cada uno de los tiempos de exposición de las muestras en la solución salina. Estos ensayos también se realizaron en una solución aireada; a una temperatura de 25 °C; con un potencial inicial  $E = -250$  mv con respecto al Eoc y un potencial final  $E = 1600$  mv con respecto al electrodo de referencia (SCE); a una velocidad de barrido de potencial de 0,334 mv/s. Por medio de estos ensayos, se determinaron las zonas activas y pasivas de la aleación. El trazado de las curvas potenciodinámicas comenzó por la rama catódica, continuando luego por la rama anódica.

Para determinar la morfología y composición química elemental de los recubrimientos, se utilizaron dos microscopios electrónicos de barrido; uno marca Hitachi modelo S-2440 y otro marca Philips modelo CM-20; ambos con un potencial de aceleración de 20 kV. Para el microanálisis químico se empleó un espectrómetro de Dispersión en Energía de Rayos X (EDS) acoplado al MEB marca Edax, modelo DX4. Las imágenes fueron obtenidas en modo de electrones secundarios, previamente metalizando las superficies.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Caracterización química, microestructural y mecánica de los aceros de herramienta

Los resultados del análisis químico de los aceros de herramienta se muestran en la Tabla I, los cuales se enmarcan dentro de las especificaciones establecidas para ambos tipos de aceros.

Las Figuras 1 y 2 ilustran las fotomicrografías ópticas y electrónicas correspondientes a los aceros nitrurados D2 y H13, respectivamente, en donde es posible identificar tanto la capa blanca (A) como la zona de difusión (B). Mediante el empleo del analizador de imágenes se logró medir el espesor de las mismas en los dos aceros investigados. La Tabla II resume la información concerniente a sus dimensiones.

Fig. 1. FOTOMICROGRAFÍAS ÓPTICA (A) Y ELECTRÓNICA (B) DEL ACERO D2 NITRURADO

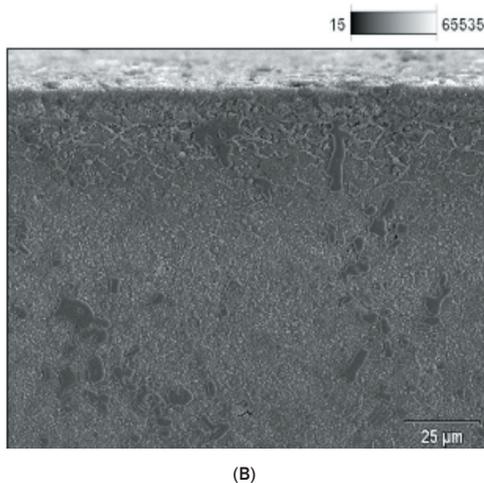
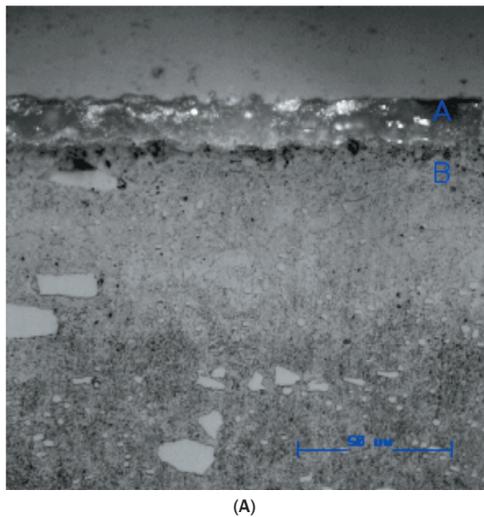
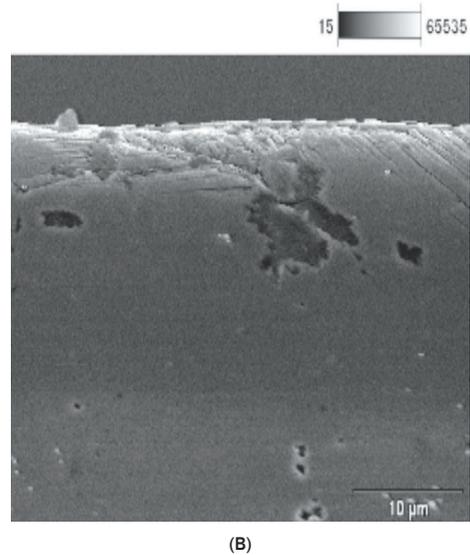
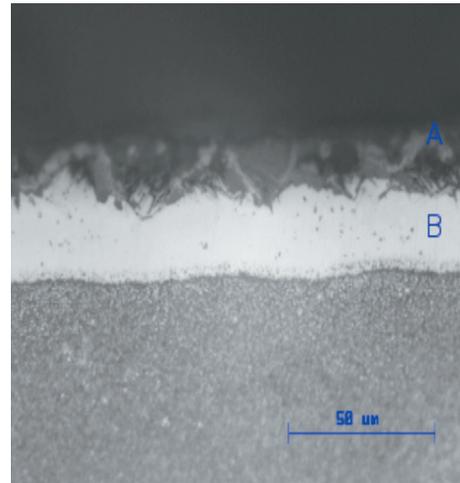


Fig. 2. FOTOMICROGRAFÍAS ÓPTICA (A) Y ELECTRÓNICA (B) DEL ACERO H13 NITRURADO



Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de indentación Vickers para la medición de la dureza en sección transversal de ambos aceros nitrurados, se presenta en las Figuras 3 y 4, respectivamente. También, en estas figuras se indica cuánto se debe maquinar en cada caso con el fin de eliminar la capa de compuestos que puede ser perjudicial en el desempeño, tanto desde el punto de vista del comportamiento frente a la corrosión, como desde el punto de vista de la influencia que puedan tener estos compuestos frágiles en la adhesión de los recubrimientos duros que serán depositados posteriormente. Este cálculo se hizo basándose en el estudio de Hernández *et al.* [14], el cual permite estimar la cantidad de material a ser removido a partir del perfil de dureza.

TABLA I  
ANÁLISIS QUÍMICO DE COMPROBACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ACERO D2 y H13.

Acero	Elementos (% peso)							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	Fe
D2	1,55	0,35	0,25	11,80	0,80	0,95	-	Bal.
H13	0,39	0,70	1,10	6,20	3,80	0,95	10,90	Bal.

TABLA II  
ESPEORES DE LA CAPA BLANCA Y ZONA DE DIFUSIÓN

Acero	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	
	Capa Blanca	Zona Difusión
D2	$38,3 \pm 1,8$	$16,7 \pm 0,8$
H13	$15,9 \pm 3,0$	$20,6 \pm 0,9$

Fig. 3. VARIACIÓN DE LA DUREZA VICKERS CON LA DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE PARA EL ACERO NITRURADO D2

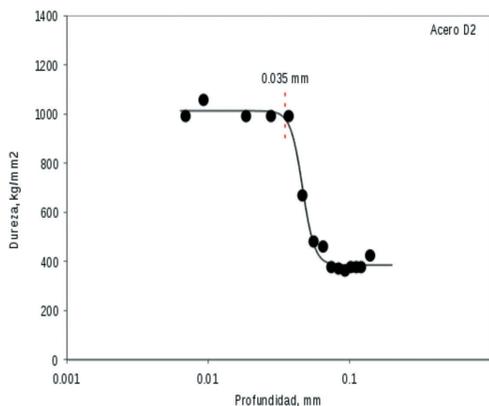
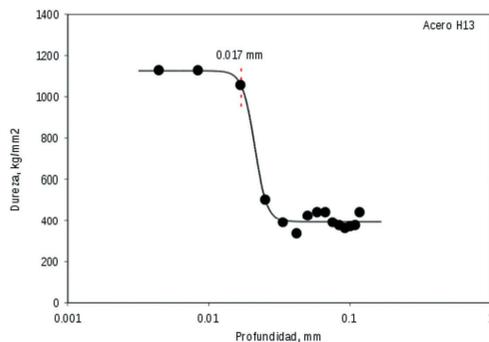


Fig. 4. VARIACIÓN DE LA DUREZA VICKERS CON LA DISTANCIA DESDE LA SUPERFICIE PARA EL ACERO NITRURADO H13

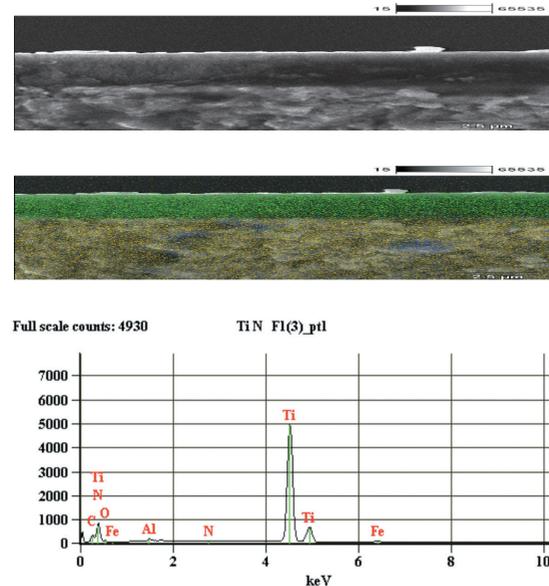


### 3.2. Caracterización microestructural y mecánica de los aceros de herramienta nitrurados y recubiertos con TiN y TiAlN

En la Figura 5, se presenta la fotomicrografía por MEB de la sección transversal fracturada de la muestra de acero recubierto con TiN, en donde se aprecia una microestructura densa; pasando

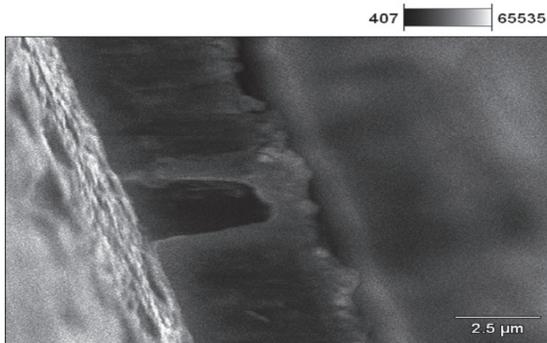
de una formación columnar de granos a una estructura equiaxial. Este fenómeno es típico de un recubrimiento PVD que ha sido obtenido mediante un proceso de deposición, bajo un intenso bombardeo iónico, promoviendo así, el desarrollo de una película densa de alta calidad estructural con elevada dureza. En la misma figura, se presenta un espectro EDS, que indica la composición aproximada del recubrimiento. El análisis de la distribución de elementos realizado, sobre la sección transversal de la muestra, indica la presencia de oxígeno (color rojo), así como del material nitrurado (color amarillo) debajo del recubrimiento (color verde).

Fig. 5. CARACTERÍSTICA MICROESTRUCTURAL Y COMPOSICIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS DE TiN



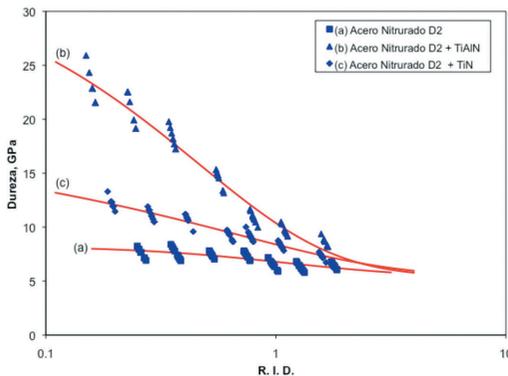
La Figura 6 presenta las características microestructurales de los recubrimientos de TiAlN, las cuales indican la presencia de un recubrimiento más denso.

Fig. 6. CARACTERÍSTICA MICROESTRUCTURAL DE LOS RECUBRIMIENTOS DE TiAlN



Los resultados de las indentaciones Vickers, llevadas a cabo con cargas variables entre 25 y 1000 g sobre la superficie de los recubrimientos, se presentan en la Figura 7. Como se puede observar, el sistema recubierto constituido por el acero D2 y el recubrimiento de TiAlN presentan una mayor dureza compuesta, indicando así que este recubrimiento tiene una mayor dureza intrínseca en comparación con el de TiN.

Fig. 7. VARIACIÓN DE LA DUREZA COMPUESTA CON LA PROFUNDIDAD RELATIVA DE INDENTACIÓN (RID) PARA LOS SISTEMAS RECUBIERTOS QUE INVOLUCRAN AL ACERO D2 COMO SUBSTRATO



Empleando el modelo propuesto por Puchi-Cabrera [15], es posible obtener los valores de la dureza intrínseca de los recubrimientos, así como de las constantes  $\beta_0$  y  $n$ , que de acuerdo con dicho modelo, caracterizan el comportamiento de los sistemas recubiertos. El valor de dichas constantes se presenta en la Tabla III.

TABLA III  
DUREZA INTRÍNSECA DE LOS RECUBRIMIENTOS TiN y TiAlN

Substrato	Recubrimiento	Dureza (GPa)	$\beta_0$	$n$
D2	TiN	18,2	0,25	0,40
	TiAlN	33,6	0,39	0,74

La determinación de la dureza intrínseca del recubrimiento se realizó empleando el acero más duro, en este caso, el acero D2. La misma no depende del substrato, por lo que mediante el empleo del modelo propuesto por Puchi-Cabrera [13] aplicado a los datos de dureza compuesta, es posible realizar la caracterización de los sistemas recubiertos sometidos a cargas de indentación.

### 3.3. Evaluación de la resistencia a la corrosión de las muestras nitruradas y recubiertas con TiN y TiAlN

Los resultados de los ensayos de polarización lineal para las muestras D2 y H13 nitruradas, antes y después de la deposición de los recubrimientos de TiN y TiAlN, se presentan en la Tabla IV. Las Figuras 8 y 9, ilustran los resultados de los ensayos de polarización para las muestras recubiertas, correspondientes a ambos aceros. Para facilitar la comparación del comportamiento en la solución acuosa de cloruro de sodio, se presentan en la misma figura los resultados correspondientes a las muestras de estos dos aceros; tanto sin nitrurar como nitrurados y en este último caso, con y sin la capa blanca.

En función de los resultados obtenidos en cuanto a la resistencia a la polarización ( $R_p$ ) y densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), se puede observar que para el grupo del acero D2, la condición más resistente a la corrosión es la correspondiente al acero nitrurado con ausencia de la capa blanca; en comparación con las condiciones correspondientes a las muestras del acero nitrurado con capa blanca; así como a las muestras del acero nitrurado recubiertas. Esto se puede explicar, ya que los recubrimientos de TiN y TiAlN, poseen una superficie mucho más heterogénea, con presencia de poros, partículas de Ti sin reaccionar y diferentes defectos que ocasionan la aparición de pares galvánicos; situación propicia para activar en mayor proporción el fenómeno de disolución del material.

El material nitrurado con capa blanca se comporta de la misma manera debido a la gran cantidad de nitruros de hierro y cromo que se forman durante el proceso de nitruración. Cabe destacar, que la capa blanca es porosa, tiene una gran cantidad de fisuras y no ofrece protección adecuada a la corrosión y ni soporte de carga a las piezas que

serán utilizadas para aplicaciones tribológicas. No obstante a todas estas características mencionadas, se evidencia en los resultados que independientemente de la modificación superficial que se practique, la resistencia a la corrosión del acero D2 con respecto al acero H13 sin recubrimiento es relativamente menor.

En cuanto al sistema que involucra al acero H13 como sustrato, la mayor resistencia a la corrosión corresponde al sistema recubierto con TiAlN, mientras que en segundo lugar, se en-

cuentra el acero H13 nitrurado sin capa blanca. El sistema recubierto con TiN presenta la menor resistencia a la corrosión y este resultado es muy posible que se deba a la heterogeneidad de la superficie del recubrimiento; lo cual sugiere que el crecimiento de la película fue poco controlado, generando, muy posiblemente, una alta cantidad de partículas de Ti sin reaccionar; lo cual constituye la clave en la activación del proceso de disolución del material por su propensión a formar múltiples pares galvánicos con el TiN.

TABLA IV  
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE POLARIZACIÓN LINEAL

Condición	Rp ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$i_{\text{corr}}$ (A/cm <sup>2</sup> )
Sustrato Acero D2		
Sustrato	950.0	2.73E-05
Nitrurado con capa blanca	1347.8	1,92E-05
Nitrurado sin capa blanca	3635.7	7,15 E-06
Nitrurado y recubierto con TiN	1864.7	1,39 E-05
Nitrurado y recubierto con TiAlN	1734.7	1,49E-05
Sustrato Acero H13		
Sustrato	1939.3	1,34 E-05
Nitrurado con capa blanca	2041.8	1,27 E-05
Nitrurado sin capa blanca	2238.1	1.16 E-05
Nitrurado y recubierto con TiN	1292.8	2,01 E-05
Nitrurado y recubierto con TiAlN	2506.9	1,03 E-05

Fig. 8. CURVAS DE POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA DE LAS MUESTRAS DE ACERO D2 EN SUS DIVERSAS CONDICIONES

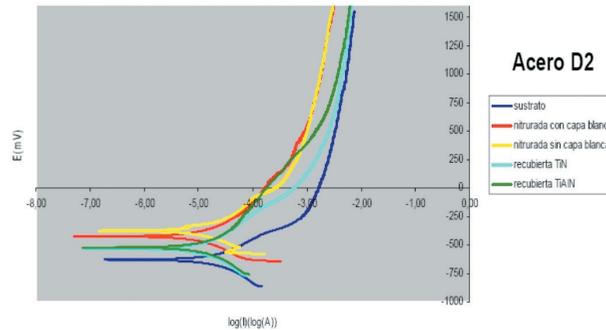
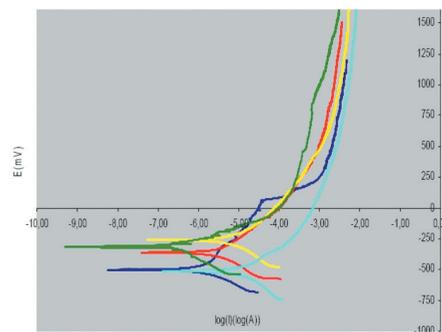


Fig. 9. CURVAS DE POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA DE LAS MUESTRAS DE ACERO H13 EN SUS DIVERSAS CONDICIONES.



Por otro lado, el acero nitrurado sin capa blanca presenta una resistencia a la corrosión un poco más baja que el nitrurado con capa blanca y esto indica que durante el proceso de nitruración se formó una cantidad menor de nitruros de cromo, como era de esperarse, debido a que el porcentaje de Cr en el acero H13 es casi la mitad de la correspondiente al acero D2. En este caso, la heterogeneidad de la superficie no es tan alta como para generar una actividad electroquímica que disminuya la resistencia a la corrosión a valores similares al D2 nitrurado con capa blanca.

#### 4. CONCLUSIONES

La capa nitrurada de las muestras de acero D2 es superior a la obtenida en el acero H13, presentando una elevada dureza superficial y características microestructurales similares.

El sistema recubierto con TiAlN, depositado sobre el acero D2, presenta una mayor dureza compuesta, indicando así, que este recubrimiento tiene una mayor dureza intrínseca en comparación con el de TiN; como lo muestran los valores obtenidos mediante la aplicación del modelo propuesto por Puchi-Cabrera.

La condición más resistente a la corrosión del acero D2 es la correspondiente al acero nitrurado con ausencia de la capa blanca; siendo menos favorables las condiciones correspondientes a las muestras recubiertas con TiN, TiAlN, así como las muestras de acero nitrurado con capa blanca.

Independientemente de la modificación superficial que se aplique, el acero H13 presenta un mejor comportamiento frente a la corrosión en comparación con el acero D2 y cuando es recubierto con TiAlN constituye el sistema recubierto más resistente a la corrosión en comparación a las demás condiciones evaluadas, de acuerdo con los valores de resistencia a la polarización y densidad de corriente de corrosión reportados.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación para el Desarrollo de la Ciencia y a Tecnología en el Estado Bolívar, por el financiamiento otorgado al proyecto de investigación titulado “Comportamiento frente a la corrosión de aceros de herramientas nitrurados y recubiertos por PAPVD. Pro-

yecto Fundacite Bolívar – UCV, 2010” y al Centro de Nuevos Materiales y Corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela, a través de la Ayuda Institucional No AIB-08-85-39-2012.

#### REFERENCIAS

- [1] T. Cselle, O. Coddet, C. Galamand, P. Holubar, M. Jilek, J. Jilek, A. Luemkemann, M. Morstein, “Triplecoatings3@– New generation of PVD-Coatings for cutting tools,” in *Journal of machine manufacturing*, vol. 49, Issue E1, pp.19-25, 2009.
- [2] L.N. López de Lacalle, A. Lamikiz, J. Fernández de Larrinoa and I. Azkona, “Advanced cutting tools” in *Machining of Hard Materials*, cap.2, Davim, J.P, pp.33-85, 2011.
- [3] F. Czerwinski, “Heat treatment-conventional and novel applications,” in *Publisher: InTech*, Cap.5, Ed.Frank Czerwinski, pp.73-112, Sep. 2012.
- [4] S. K. Khrais, Y.J. Lin, “Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel,” *Wear* 262, pp.64–69, 2000.
- [5] G.S. Fox-Rabinovich, B.D. Beake, J.L. Endrino, S.C. Veldhuis, R. Parkinson, L.S.Shuster, M.S.Migranov, “Effect of mechanical properties measured at room and Elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings,” in *Surface and Coatings Technology* 200, pp.5738–5742, 2000.
- [6] S. PalDey, S.C. Deevi, “Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review”, in *Materials Science and Engineering*, vol. 342, issue 1-2, pp. 58 – 79, Feb. 2003.
- [7] Li-Ho Chiu, Chang-Hui Wu, Heng Chang, “Wear behavior of nitrocarburized JIS SKD61 tool steel,” *Wear* 253, pp. 778–786, 2002.
- [8] ASM Handbook, “Heat Treating,” vol.4, pp 608-619, 1998.
- [9] ASM Handbook, “Surface Engineering,” Vol. 5, pp 2023- 2026, 1998.
- [10] M. R. Cruz, M. H. Staia, J. Feugeaas, “Tribologías en Aceros con Tratamientos Superficiales Tipo Duplex, una revisión,” en *Revista Facultad de Ingeniería UCV*, vol. 20, no. 1, Mar. 2005.
- [11] R. Rodríguez-Baracaldo, J. A. Benito. E. S. Puchi-Cabrera, M. H. Staia, “High temperature wear resistance of (TiAlN) PVD coating on untreated and gas nitrated AISI H13 steel with different heat treatments,” *Wear*262 (3), pp. 380-389, 2007.

- [12] G. Bejarano, M. Gomez, M. Arroyave, "Deposition and characterization of duplex treated coating system applied on hot work steel AISI H13," en Revista Latinoamericana de Metalurgia, vol. 32, no. 2, pp. 218-224, Dic. 2012,
- [13] H. Çalışkan, C. Kurbanoglu, P. Panjan and D. Kramar, "Investigation of the performance of carbide cutting tools with hard coatings in hard milling based on the response surface methodology," in Int J Adv Manuf Technol, no. 66, pp.883-893, 2013.
- [14] M. Hernandez, M.H. Staia, E.S. Puchi-Cabrera, "Evaluation of microstructure and mechanical properties of nitrided steels," in Surface and Coatings Technology, vol. 202, no. 10, pp. 1935-1943, 2010.
- [15] E. S. Puchi - Cabrera, "A new model for the computation of the composite hardness of coated systems," in Surface and Coatings Technology, no, 160, pp.177-186, 2002.