

## MICROESTRUCTURA Y RENDIMIENTO DE BROCAS HELICOIDALES DE ACERO AISI M2 CON TRATAMIENTOS PVD Y DUPLEX

D. Martínez Krahmer<sup>(1)</sup>, P. Corengia<sup>(1)</sup>, D. Russo<sup>(1)</sup>, D. A. Egidi<sup>(1)</sup>, F. Rodríguez<sup>(2)</sup> y A. Cabo<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro de Investigación y Desarrollo en Mecánica, C.C. 157, B1650WAB San Martín, Buenos Aires, Argentina. [corengia@inti.gov.ar](mailto:corengia@inti.gov.ar)

<sup>(2)</sup> Comisión Nacional de Energía Atómica, Avda. Gral. Paz 1499 – (1650) San Martín, Buenos Aires, Argentina. [rodrigo@cac-nea.gov.ar](mailto:rodrigo@cac-nea.gov.ar)

<sup>(3)</sup> Ionar S.A., B1650LOP, Buenos Aires, Argentina. [ionar@uolsinectis.com.ar](mailto:ionar@uolsinectis.com.ar)

### RESUMEN

En este trabajo se analizaron el rendimiento y la microestructura de brocas helicoidales comerciales DIN 338 de acero AISI M2 de 6mm de diámetro con tratamientos PVD (Physical Vapour Deposition) y Dúplex (Nitruración iónica seguida de un recubrimiento de TiN por PVD). La caracterización metalúrgica se realizó mediante microdureza y microscopía óptica y electrónica de barrido. El rendimiento de las brocas fue evaluado por pruebas de duración por agujereado. Se estudió además la existencia de una relación entre algunas variables geométricas de las brocas y el rendimiento.

Las herramientas fueron nitruradas en un equipo industrial empleando una mezcla de gases compuesta por 25% N<sub>2</sub> + 75% H<sub>2</sub>, bajo una descarga DC-pulsada a 773 K durante 30 min.

Las películas de TiN de un espesor promedio de 3 µm, fueron depositadas por PVD cathodic arc, empleando una tensión de polarización del sustrato de -75V.

El rendimiento fue evaluado mediante el método t-test. Los resultados evidenciaron que las brocas de acero AISI M2 con tratamiento Dúplex presentaron una mejora significativa en el rendimiento, perforando en promedio un número de orificios superior en un 41% en relación a las brocas tratadas sólo con PVD. Además, para todos los grupos de brocas estudiados, se observó que no existe una relación entre el rendimiento y las propiedades geométricas analizadas.

**Palabras claves:** brocas helicoidales, acero AISI M2, ensayos de rendimiento, tratamientos PVD y Dúplex.

### 1. INTRODUCCIÓN

Junto con el torneado, el agujereado representa una de las operaciones por arranque de viruta más importantes, comprendiendo a escala mundial alrededor del 33% de todas las operaciones empleadas en el corte de metales [1].

Como consecuencia de este liderazgo, surge la necesidad de desarrollar brocas construidas con nuevos materiales, o en el caso que se emplean aquellos ya existentes como el acero rápido, generar mejoras mediante tratamientos que modifiquen sus propiedades frente al desgaste, en forma volumétrica (tratamiento criogénico) o superficial (Nitruración iónica, recubrimientos PVD o Dúplex).

Durante el transcurso del siglo veinte se produjeron dos hechos tecnológicos relevantes que promovieron un enorme avance en dicha dirección: por un lado, la producción de lingotes de acero rápido empleando técnicas pulvimetalúrgicas, que garantizan una microestructura, composición química, y distribución de carburos homogénea, y por otro lado la utilización

de la técnica de recubrimiento PVD para revestir las herramientas de acero rápido con nitruro de titanio.

Aún en la actualidad, a pesar de su limitada capacidad de corte en comparación con otros materiales usados para la fabricación de herramientas, el acero M2 presenta dos ventajas muy importantes que consisten en ser el único que puede ser trabajado en forma económica con los procesos tradicionales de arranque de viruta tales como el agujereado, torneado, fresado y rectificado y, en segundo lugar, se trata del material de menor costo usado para la fabricación de herramientas de arranque de viruta. Estas razones son las que estimularon las ininterrumpidas investigaciones que, hasta la actualidad, buscan mejorar la capacidad de corte de las herramientas realizadas con este material.

El recubrimiento obtenido por PVD posee un bajo coeficiente de rozamiento, baja conductividad térmica y elevada dureza, permitiendo incrementar las condiciones de corte (fundamentalmente la velocidad de corte) con el consecuente aumento de la productividad. Así mismo este recubrimiento introduce una fuerte mejora en la calidad de los orificios en términos de su acabado superficial y circularidad [1].

Por todos los motivos expuestos, el acero rápido continúa dominando el escenario mundial entre los materiales empleados para la fabricación de herramientas de corte, superando todavía el 50% [2], y constituyendo para algunos tipos de herramientas (brochas, creadores de engranajes), la única alternativa. Mas aún, de las brocas de acero rápido que se emplean en la industria a nivel mundial, más del 50% están recubiertas, la mitad de ellas con nitruro de titanio [1].

No se cuentan con antecedentes regionales de trabajos que cuantifiquen las mejoras introducidas por los tratamientos de superficie aplicados a brocas de acero rápido, y por ello se realizaron inicialmente ensayos tendientes a establecer la mejora en el rendimiento de brocas tratadas por nitruración iónica respecto de brocas sin nitrurar [3].

Continuando estas investigaciones, en el presente estudio se evaluaron brocas recubiertas con TiN-PVD y tratamiento dúplex, efectuándose la caracterización metalúrgica de ambos grupos mediante microscopía óptica, electrónica de barrido y microdureza. Además, el rendimiento fue evaluado por pruebas comparativas de duración por agujereado. Se analizó también la posible relación entre algunas características geométricas de las brocas (Angulo de punta  $\epsilon$ , de incidencia  $\alpha$  y espesor de núcleo  $s$ ) que varían como consecuencia del proceso de fabricación, y su rendimiento.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales y tratamientos

Para realizar las pruebas de rendimiento se emplearon brocas helicoidales comerciales DIN 338 de 6mm de diámetro, construidas en acero AISI M2, cuya composición química nominal fue la siguiente (% peso): 0,9%C; 6%W; 5%Mo; 4% Cr; 2% V; Fe balance.

La nitruración iónica de las brocas Dúplex fue realizada por la empresa IONAR S.A. siendo las condiciones de proceso las indicadas en la Tabla I.

**Tabla I.** Condiciones de nitruración

Parámetro	Valor
Atmósfera	25% N <sub>2</sub> + 75% H <sub>2</sub>
Tiempo de nitruración	30 min.
Voltaje entre electrodos	750 V
Densidad de corriente	1,03 mA. cm <sup>-2</sup>
Atmósfera	6 hPa
Temperatura	773 K
ton – toff	70 – 200 $\mu$ s

El tratamiento PVD fue efectuado en un equipo asistido por plasma marca NISSIN, modelo RPM-R3-J en el Laboratorio de Recubrimientos y Tratamientos

Superficiales del Departamento Materiales, CAC-CNEA. Las condiciones de proceso de ambos grupos de brocas (PVD y Dúplex) se indican en la Tabla II.

**Tabla II.** Condiciones de proceso de PVD

Parámetro	Valor
Gases empleados	N <sub>2</sub> y Ar
Corriente de arco	80 A
Tensión de polarización del sustrato	- 75V
Presión de trabajo	25 mTorr
Intercapa de Ti	~ 0,3 $\mu$ m
Recubrimiento TiN	~3 $\mu$ m

### 2.2 Análisis microestructural y microdureza

Las brocas pertenecientes a ambos grupos se prepararon metalográficamente para su análisis. Las microestructuras fueron reveladas usando el reactivo nital 3% y fueron examinadas con un microscopio óptico Zeiss Axiotech y un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca Philips SEM 505. La microdureza fue determinada con un microdurómetro Vickers (Akashi, MVK-H2) usando una carga de 25 g. El espesor del recubrimiento y la capa nitrurada fueron analizados mediante imágenes SEM.

### 2.3 Pruebas de rendimiento

Para la realización de las pruebas de rendimiento se emplearon 5 brocas con tratamiento PVD y otra cantidad igual de brocas con tratamiento dúplex.

Las pruebas de duración fueron realizados en un Centro de Mecanizado horizontal Kearney & Trecker MM200 con control Allen & Bradley. Los agujeros se realizaron sobre una placa de acero AISI 4140 de dureza Brinell promedio HB 176±10 con dimensiones aproximadas de 410x410x50 mm, cuadrada y fresada por ambos frentes (previamente al agujereado se efectuaron centros-guía utilizando una broca de centro).

Las pruebas de rendimiento y las condiciones de corte fueron fijadas tomando como referencia las recomendaciones del Instituto METCUT [4]. Para el mecanizado de los agujeros se empleó un aceite emulsionable sintético al 5%.

En la Tabla III se presentan los valores para las principales variables empleadas durante los ensayos de agujereado: diámetro de la broca D, velocidad de corte Vc, avance por vuelta A, profundidad de los orificios H, entre centro E y voladizo de la broca L respecto de la boquilla de agarre (cada agujero de 18mm de profundidad fue mecanizado en tres etapas, descargando viruta luego de haber profundizado 6mm en cada una).

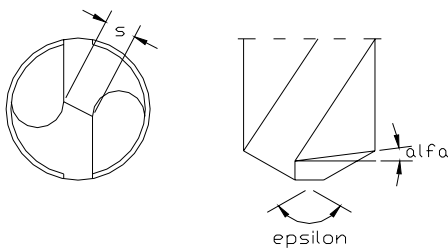
Para los especialistas en herramientas es un hecho conocido que cuando se emplean herramientas de acero rápido, la finalización de su vida útil puede

sobrevenir en forma abrupta [5], por lo que no es posible medir la evolución de  $V_B$  (ancho de la faja de desgaste, en mm) en el plano de incidencia de la broca, conforme transcurre la prueba de perforado, y en consecuencia, se escogió como criterio de interrupción del ensayo, la aparición de chirrido constante durante el agujereado.

**Tabla III.** Variables de los ensayos de rendimiento

D (mm)	Vc (m/min)	A (mm/v)	H (mm)	E (mm)	L (mm)
6	42	0,15	18	7	59

Las variables geométricas de las brocas se midieron en un banco óptico Dormer para medición de brocas, siguiendo las pautas establecidas por DIN 1414-1[6] y DIN 1414-2[7] (Ver Fig. 1).

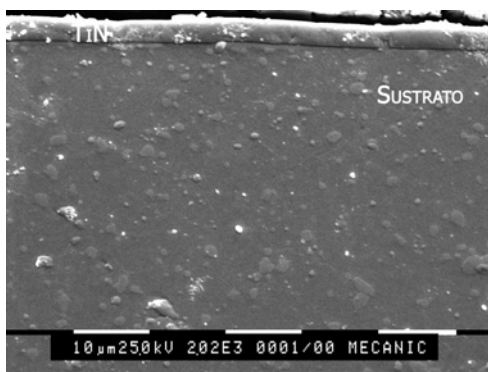


**Figura 1.** Variables geométricas que pueden influir sobre el rendimiento de la broca.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis microestructural y microdureza

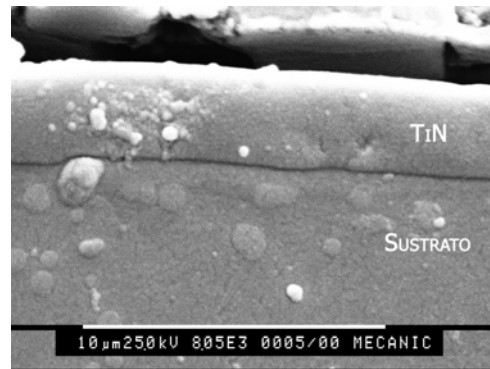
En las Figuras 2 y 3 se observan imágenes SEM de la sección de una muestra recubierta mediante PVD con un depósito de TiN de aproximadamente  $3\mu\text{m}$  de espesor.



**Figura 2.** Imagen SEM de la sección de una broca recubierta por PVD.

La Figura 4 corresponde a una imagen SEM de la sección de una broca con tratamiento dúplex, donde se observa un recubrimiento de TiN obtenido por PVD seguido por una zona de difusión característica del proceso de nitruración de este tipo de acero. Se observó que el espesor de la zona de difusión es de aproximadamente  $10\mu\text{m}$ . La microdureza del

recubrimiento TiN fue de aproximadamente 2500 HV.

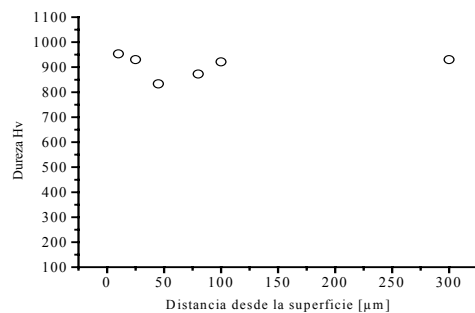


**Figura 3.** Imagen SEM correspondiente a broca recubierta por PVD



**Figura 4.** Imagen SEM correspondiente a broca con tratamiento Dúplex.

La Figura 5 presenta el perfil de microdureza de la muestra con tratamiento Dúplex. En este perfil no se observa una variación significativa en los valores de microdureza. El valor de dureza del sustrato es de aproximadamente 900 HV.



**Figura 5.** Perfil de microdureza

#### 3.2 Control dimensional de las brocas

Las brocas evaluadas cumplen los requerimientos dimensionales de DIN 1414-1 correspondientes a las tres variables analizadas.

En la tabla IV se presentan los valores promedio de las características geométricas medidas con sus

correspondientes desviaciones estándar  $\sigma$  para el conjunto de brocas ensayadas.

**Tabla IV.** Resultados del control dimensional

Resultados para las mediciones de las brocas	Angulo de punta $\epsilon$ (°)	Angulo de incidencia $\alpha$ (°)	Espesor de núcleos (mm)
Promedio	118,6	16	1,24
Desvío estándar	$\pm 1$	$\pm 0,6$	$\pm 0,08$

### 3.3 Pruebas de rendimiento

En la tabla V se presentan los resultados estadísticos del t-test, donde se indican para cada tipo de broca: el número de orificios promedio Nop; la desviación estándar  $\sigma\%$ , la varianza Va; el número de mediciones n y los valores  $t_0$  y  $t_{0,05,8}$ .

**Tabla V.** Resultados de las pruebas de rendimiento

Tipo de broca	Nop	$\sigma\%$	Va	n	$t_0$	$t_{0,05,8}$
TiN-PVD	20	$\pm 45$	82,5	5	1,63	1,86
Dúplex	28	$\pm 25$	42,7	5		

Los resultados obtenidos indican un incremento promedio de un 41% en el número de orificios realizados por las brocas con tratamiento dúplex respecto de las brocas con tratamiento PVD, y comparadas por el método estadístico t-test, las diferencias existentes entre los promedios de los orificios obtenidos por ambos tipos de brocas resultaron ser significativas.

Además, realizadas las 6 regresiones lineales entre cada una de las 3 variables geométricas medidas y el número de orificios realizados por cada grupo de brocas estudiados, se obtuvieron en todos los casos coeficientes de correlación  $R^2$  inferiores a 0,46.

## 4. CONCLUSIONES

Las brocas con ambos tratamientos presentaron recubrimientos continuos de TiN de  $\sim 3 \mu\text{m}$  de espesor. En el caso de las brocas dúplex las capas nitruradas fueron uniformes con espesores de  $\sim 10 \mu\text{m}$ .

Los ensayos realizados permitieron verificar estadísticamente que las brocas con tratamiento dúplex presentaron una mejora significativa en el rendimiento respecto de las tratadas con PVD, además de presentar una desviación estándar menor.

El análisis de regresión lineal evidenció la ausencia de una relación individual entre las variables geométricas estudiadas y el rendimiento de las brocas, en los rangos obtenidos para cada una de las variables, para todos los grupos de brocas estudiados. Trabajos previos [3] indican que sólo existe una relación entre la geometría y el rendimiento en brocas cuando las mismas no poseen ninguna clase de tratamiento posterior a su fabricación.

Si bien es posible obtener aumentos sustanciales de las condiciones de corte cuando se utilizan herramientas revestidas, estas condiciones suelen conducir a la rotura de la broca en servicio provocando costosas paradas de máquina y el descarte de la pieza sobre la que se produjo la rotura. Debido a que las brocas de acero rápido son herramientas pensadas para ser reafiladas, es posible concluir que aquellas con tratamientos superficiales y/o recubrimientos deben ser utilizadas en el rango alto de las condiciones de corte sugeridas para brocas sin tratamientos post-fabricación. Así será posible alcanzar incrementos notables en la vida útil, minimizando las roturas en servicio y conservando la posibilidad de volver a ser afiladas.

## 5. REFERENCIAS

- [1] H.K. Tönshoff, W. Spintig, W. König and A. Neises, Machining of holes and developments in drilling technology, Annals of the CIRP, Vol. 43/2/1994, pp. 551-561.
- [2] Sandvik Coromant, "El mecanizado moderno – Manual práctico", Departamento de ediciones técnicas de Sandvik Coromant, Suecia, 1994, pp. III – 7.
- [3] D. Martinez Kraemer, D. Russo, D.A.Egidi, P. Corengia y A.Cabo, Rendimiento de brocas helicoidales de acero AISI M2 nitruradas por plasma dc-pulsado y sin nitrurar, Jornadas Sam, Congreso Conamet, Simposio Materia 2003, San Carlos de Bariloche, Argentina, pp. 464 – 467.
- [4] Machinability Data Center, Machining Data Handbook, Third edition, Metcut Research Associates Inc., Cincinnati, 1980, pp. 12-71.
- [5] D.Ferraresi, Fundamentos da usinagem dos metais, Editora Edgard Blücher Ltda., Sao Paulo, Brasil, 1995, pp. 410-422 , 439-441.
- [6] DIN 1414-1, Technische Lieferbedingungen für Spiralbohrer aus Schnellarbeitsstahl, Teil 1: Anforderungen, Juni 1998.
- [7] DIN 1414-2, Technische Lieferbedingungen für Spiralbohrer aus Schnellarbeitsstahl, Teil 2: Prüfung, Juni 1998.

## AGRADECIMIENTOS

A los Dres. Adolfo Rodrigo del CAC-CNEA y Mikel Zatarain de la Asociación de Investigación Tekniker, España.

## DEDICATORIA

A la memoria de nuestros compañeros y amigos, Ing. Mario Quintero y Hugo Helguero.