

Eficiencia mecánica y ahorro económico del maquinado de acero para maquinaria por medio de herramientas recubiertas con multicapas aplicando el proceso PVD

Ortega de la Rosa R.¹, Martínez Delgado E. J., Ramírez Sotelo M.¹

*Instituto Tecnológico de Zacatecas
Carretera Panamericana entronque a Guadalajara s/n
Apartado Postal 245, Zacatecas, México*

Haro Rodríguez S.

*Universidad Autónoma de Zacatecas
Unidad Académica de Ingeniería, Maestría en Procesos y Materiales
Av. López Velarde No. 801, C.P. 98060, Zacatecas, México
(Recibido: 31 de enero de 2011; Aceptado: 15 de noviembre de 2011)*

The following investigation analyzes the mechanical properties of tools coated by TiN-TiAlN multi layers using the PVD process and proves their economic savings when these are used as cutting tools. Therefore, it proposes the fact of mechanizing steel with the aim of reducing time and costs on the cutting process. This investigation analyzed two typical materials on cutting tools (High Speed Steel and Ceramics coated either with single layer or multi layers. Usually this type of coated is done on tungsten carbides. The result was a considerable increase on the life span of coated tools by TiN-TiAlN multi layers using the PVD process by up to 280% over those with an HSS. This implies economic savings of \$ 859, 980 Mexican Pesos if it is considered that 73,332 tools were not used. Finally, failures on the tools were characterized and evidenced using scanning electron microscopy (SEM).

Keywords: PVD; Magnetron; TiN; TiAlN; Multilayers

La presente investigación analiza las propiedades mecánicas y el ahorro económico del uso de recubrimientos multicapas de TiN-TiAlN a herramientas de corte. Además la propuesta de mecanizado de acero para maquinaria con la finalidad de reducir tiempos y costos de proceso. Se analizaron dos materiales típicos en las herramientas de corte (Acero rápido y Cerámicos recubiertos con Monocapas y Multicapas). Normalmente este tipo de recubrimientos se realiza sobre carburos de tungsteno. Se obtuvo un incremento en la vida útil de la herramienta recubierta con multicapas TiAlN-TiN por arriba de 283% sobre una de HSS, lo cual implica un ahorro económico considerable de aproximadamente \$859 980.00 correspondientes a 73 332 herramienta menos utilizadas, finalmente mediante Microscopía Electrónica de Barrido, se caracterizaron las fallas en las herramientas.

Palabras clave: PVD; Magnetron; TiN; TiAlN; Multicapas

1. Introducción

Con las demandas de reducción en los costos de manufactura, mayor precisión, mejor acabado superficial, tiempo de proceso más corto en la industria y el trabajar las máquinas a altas velocidades, requiere de materiales de alta dureza y mejores características mecánicas. Para optimizar el funcionamiento y ampliar la vida de las herramientas de corte, es necesario desarrollar varios tipos de recubrimientos [1-7].

El volumen de producción y los costos se deben considerar en los procesos de producción de piezas. En la industria se debe optimizar el proceso maximizando la producción y minimizando los costos [8,9,10]. Para lograr dicho objetivo es necesario considerar todos los costos y el tiempo requerido para maquinar una determinada pieza. Al aumentar la velocidad de corte, disminuye el tiempo de maquinado, mientras que el tiempo al montar y desmontar la pieza permanece constante. El tiempo de maquinado se debe disminuir para incrementar las utilidades. Es importante verificar el costo de operación, ver figura 1.

Por lo cual el desarrollo industrial hoy, tiene un gran interés en el rendimiento de las herramientas de corte, puesto que la demanda de maquinado cada día se ve incrementada, uno de los aspectos a tomar en cuenta es la combinación resistencia-desgaste con un bajo coeficiente de fricción[11], diferentes tipos de recubrimientos han sido diseñados y son descritos en la literatura y define que la rugosidad puede ser dividida en: recubrimientos con alta

Tabla 1. Se muestran los parámetros tecnológicos.

Tiempo de calentamiento en la cámara (min.)	40
Tensión de calentamiento (V)	210
Presión de Cámara (Pa)	0.07
Tensión de apoyo (V)	387
Tiempo por recubrimiento (min.)	42
Cantidad de bombardeos con TiAlN	3
Cantidad de bombardeos con TiN	2
Espesor de la multicapa (µm)	15
Microdureza de la capa (HV)	3291

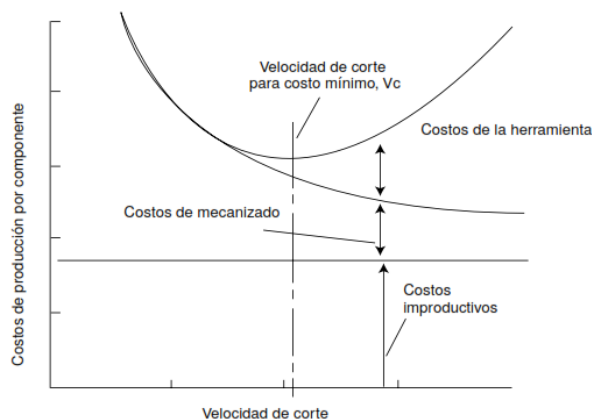


Figura 1. Componentes del costo en una operación de maquinado.

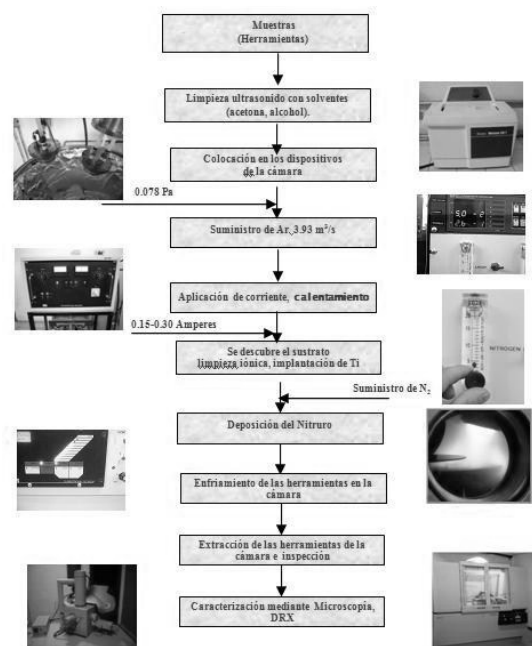


Figura 2. Diagrama Tecnológico.

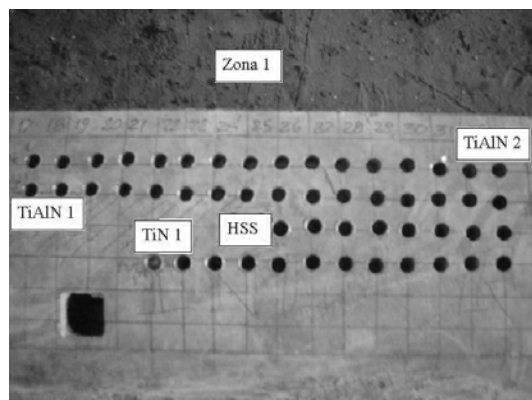


Figura 3. Maquinado en Placa retroexcavadora.

resistencia al desgaste, alta dureza, baja fricción, así como la alta resistencia a la corrosión y buena resistencia a altas temperaturas [12-13]. Las propiedades tribológicas generalmente dependen de la combinación de las propiedades del sustrato, del tipo de recubrimiento, de los parámetros de deposición, en general la correlación que existe entre los parámetros y las propiedades que se requieren.

El maquinado de alta velocidad es manejado en la actualidad por las causas antes mencionadas, presenta muchas ventajas, además de que se está desarrollando el maquinado en seco que evita que el refrigerante que se desecha en el proceso contamine al medio ambiente o al operador, dentro de los valores de proceso tomar en cuenta que el punto crítico es la velocidad de corte y depende principalmente el material de la herramienta de corte [14], lo cual trae como consecuencia un aumento en la temperatura de trabajo.

Es por eso que a partir de todas estas características, se han estudiado las posibles combinaciones del TiN con otros tipos de películas, como por ejemplo: TiN/TiAlN[2], TiN-Cu[7], TiN/AlN[15], Procesos duplex (TiN + nitruración) [14], TiN-TiB₂[17], Al/TiN[18], TiN-Al-TiN[19], TiN con un post-tratamiento de implantación de iones[20], TiN implantado con B+Si[21], Ti/TiN[4,22], CrN-TiN[23] y TiN-W[24].

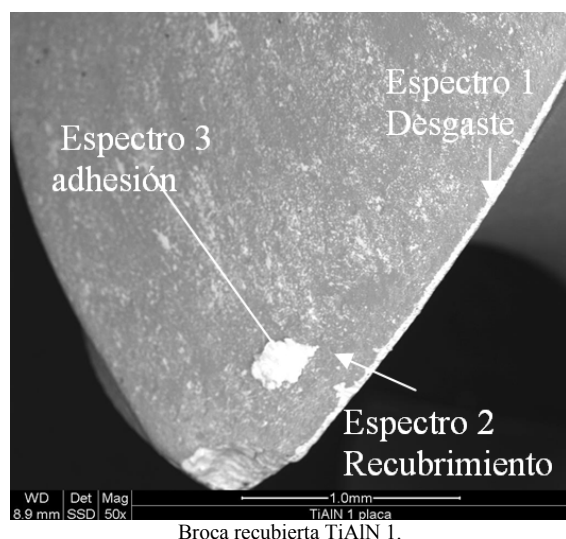
El TiAlN ha demostrado tener ventajas fundamentales ya que forma una capa densa, altamente adhesiva y protectora, que cuando es expuesta al medio ambiente se oxida formando una base de Al₂O₃ cuando la superficie es sometida a calentamientos, evitando la difusión del oxígeno hacia el recubrimiento [13,19,20,25,26].

Las pruebas de rendimiento de las herramientas utilizadas dan como resultado eficiencias de una herramienta recubierta a una sin recubrir por arriba de 283%, esto debido a la mejora en las propiedades tribológicas del TiAlN.

2. Procedimiento experimental

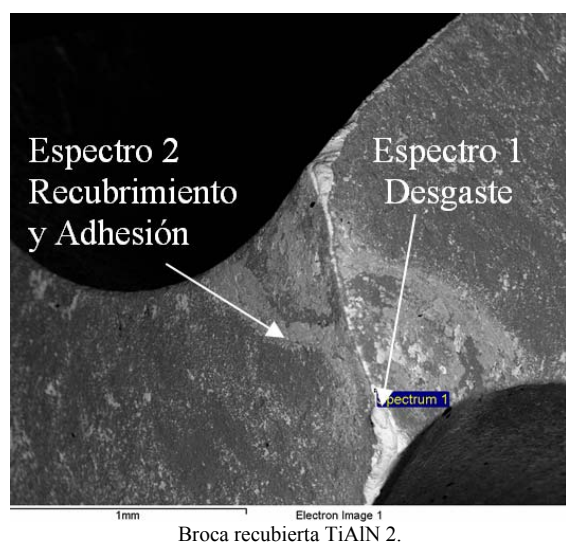
2.1. Deposición del recubrimiento

El recubrimiento de TiN-TiAlN se depositó sobre una broca de acero rápido (HSS) cuyas dimensiones son: diámetro $\phi=6.35\text{mm}$ L=103mm, empleando un blanco de TiAl a una temperatura de sustrato de 450 °C. El equipo utilizado para realizar los recubrimientos fue un sistema de dispersión asistida por Magnetron Vacuum modelo U.S. Este equipo alcanza un vacío residual de 5×10^{-6} Torr, empleando una bomba mecánica y una bomba secundaria difusora. Para mantener baja la temperatura del equipo, se hace circular agua a través de él, lo que permite alcanzar una presión menor más rápidamente, y no exista un sobrecalentamiento que pudiera dañar el cátodo, durante todo el proceso de deposición. Una vez logrado las condiciones máximas de vacío, se aplica una limpieza a la cámara en una atmósfera controlada de Ar y así eliminar la



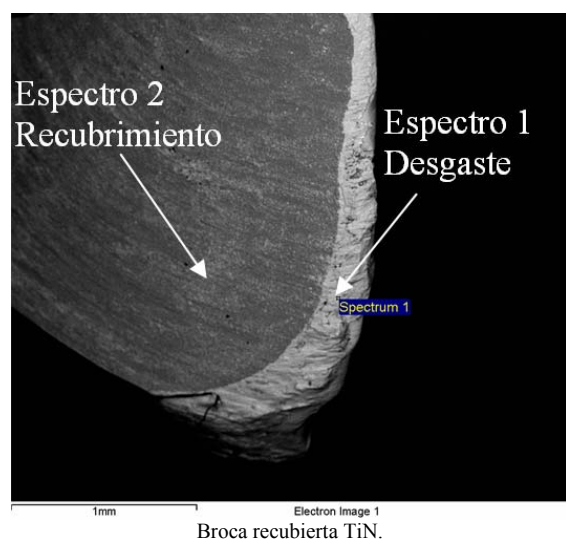
Broca recubierta TiAlN 1.

Figura 4. Falla en broca TiAlN 1.



Broca recubierta TiAlN 2.

Figura 5. Falla en broca TiAlN 2.



Broca recubierta TiN.

Figura 6. Falla en broca TiN.

presencia de O_2 que causaría oxidación de la película. Posteriormente se aplica una potencia de 77 W al cátodo.

Una vez que se forma el plasma, se hace una limpieza de éste, con la muestra cubierta por medio de un obturador, después de 10 min., se descubre la muestra y se hace una limpieza al sustrato por dispersión, por 10 min., con la finalidad de formar una capa intermetálica de acoplamiento entre el sustrato y el recubrimiento y además eliminar imperfecciones superficiales y algunos contaminantes, lo que mejora la adherencia del nitruro. Una vez implantado el titanio mediante el bombardeo iónico con plasma, se comenzó a suministrar el nitrógeno para la formación del plasma de TiN y TiAlN según el caso.

La presión dentro de cámara fue de $2-3 \times 10^{-3}$ Torr (0.3-0.4 Pa). Inicialmente se mantuvo durante 10 minutos funcionando el cátodo de titanio con una tensión de apoyo entre 250-450 V. Pasado este tiempo, se comenzó a depositar una nueva capa de TiN sobre las herramientas durante unos 20 s, se mantuvo la condensación de TiN durante 4 minutos para obtener una capa igual a la formada después de la implantación inicial.

A continuación se comenzó a aplicar el plasma de TiAlN, conectando el cátodo de aluminio-titanio y desconectando el titanio, pero manteniendo la misma presión de nitrógeno y la misma tensión. Este plasma se mantuvo durante 2 minutos.

Terminada esta operación, se volvió a conectar el cátodo de titanio con las mismas condiciones anteriores durante 4 minutos, completando así un ciclo de 10 minutos para comenzar de nuevo la deposición de otra capa de TiN. Es decir, que ambas operaciones de condensación de nitruros se repitió 3 veces con una duración de 10 minutos cada una, realizándose un ciclo completo con un tiempo total de 40 minutos. Este tiempo permite alcanzar un espesor de 14-15 μm de recubrimiento. Todo el proceso se muestra a continuación en la figura 2.

Para estudiar la composición química de la muestra maquinada se utilizó un Espectrofotómetro de Fluorescencia de Rayos X, Marca Rigaku, Modelo 3270. El análisis de las fallas del recubrimiento fueron analizadas con un microscopio electrónico de barrido modelo FEI modelo Quanta 2000 con EDX Oxford Instruments, trabajando en alto vacío y en los modos de electrones retrodispersados y secundarios. Este mismo sistema cuenta con una microsonda EDX y WDX que permite obtener la composición química de los recubrimientos.

2.2. Diseño de experimentos

Para la elaboración de la tecnología se partió de un diseño experimental factorial del tipo 2^n , con el cual se obtuvieron los parámetros de la tabla 2 para alcanzar la máxima microdureza o dureza superficial.

Después de definidas las variables dependientes e independientes se llevó a cabo el diseño experimental para obtener la información adecuada de los efectos que nos da la interrelación de las variables: tiempo de recubrimiento, presión de cámara, tensión de apoyo y a la vez la influencia

Tabla 2. Se muestran las corridas experimentales realizadas.

S_t	Número de corridas	X_1 , tiempo de recubrimiento (min.)	X_2 , presión de cámara, (Pa)	X_3 , Tensión de apoyo, (V)	y, dureza, (HV)
	1	38	0.06	390	3279
	2	42	0.06	390	3280
	3	38	0.08	390	3281
	4	42	0.08	390	3283
	5	38	0.06	370	3286
	6	42	0.06	370	3287
	7	38	0.08	370	3289
	8	42	0.08	370	3290

Tabla 3. Composición química de la muestra

Elemento	C	S	Mn	P	Si
% peso	0.88	0.057	0.67	0.021	0.21
Elemento	Cr	Ni	Mo	Cu	V
% peso	0.16	0.13	0.02	0.30	0.003

Tabla 4. Recubrimientos- Número de barrenos en placa de Retroexcavadora.

Herramienta	No. de Barrenos	Zona
1 HSS	8	1
1 TiAlN 1	17	1
1 TiAlN 2	16	1
1TiN	12	1
2 HSS	6	2
2 TiAlN 1	12	2
2 TiAlN 2	15	2
2TiN	7	2

sobre la variable de microdureza que es la que influye en el coeficiente de aumento de vida útil de la herramienta para así obtener los valores óptimos de las variables independientes y lograr establecer la relación existente entre el rendimiento obtenido con relación a las variables medidas y usando para ello el método de regresión lineal de la forma:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3$$

Para determinar los pasos de las variables independientes se define el nivel de base como: 40 min, 0.06 Pa y 380 V.

La ecuación de regresión lineal resultante del software minitab V14 para el cálculo de la dureza es:

$$Y, \text{ dureza, HV} = 3400 + 0.312 X_1, \text{ tiempo de recubrimiento, min} + 138 X_2, \text{ presión de cámara, Pa} - 0.362 X_3, \text{ Tensión de apoyo, V}$$

$$S = 0.353553 \quad R\text{-Sq} = 99.6\% \quad R\text{-Sq(adjusted)} = 99.3\%$$

2.3. Análisis de maquinado

Se observa en la figura 3 la zona trabajada así como la eficiencia mecánica de cada herramienta. Para el caso de la placa de retroexcavadora se consideró la cantidad de barrenos que se maquinaron hasta llegar a la falla de la herramienta de acuerdo a la tabla 4.

3. Resultados

En la tabla 4 se muestran los resultados alcanzados con las brocas en producciones seriadas.

En este caso, el trabajo realizado fue barrenado de orificios auxiliándose de un taladro de columna.

Obsérvese los coeficientes de vida útil como se incrementan en las brocas con el aumento de la microdureza hasta llegar a 3290 HV. Se comprende que la influencia debido a la alta dureza, es de mayor importancia que presentan las herramientas recubiertas.

Debido al bajo coeficiente de fricción entre la herramienta recubierta y el material que se elabora, que

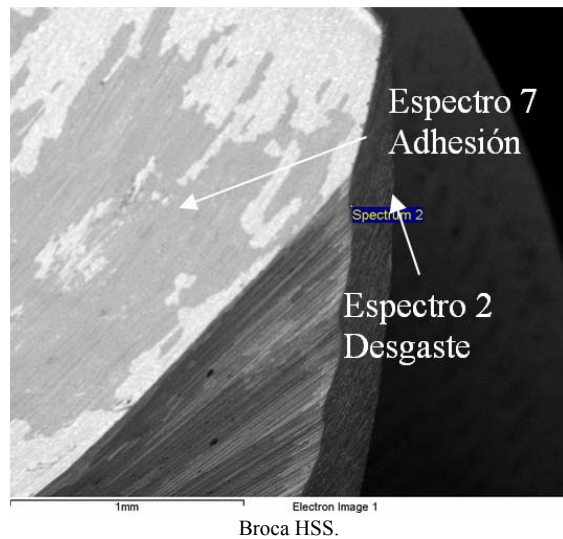


Figura 7. Falla en broca acero rápido.

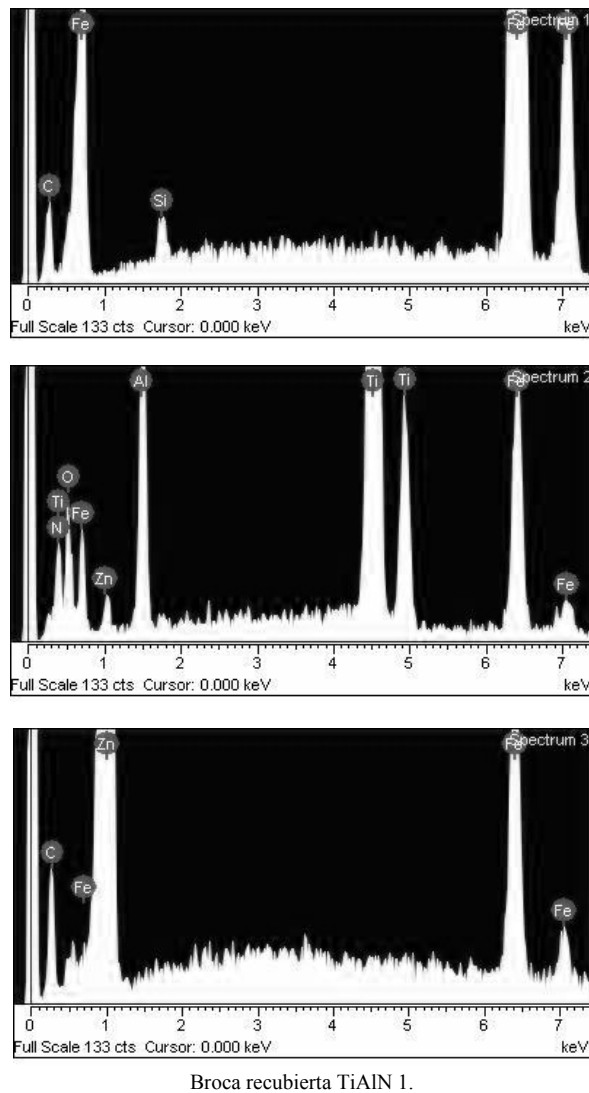


Figura 8. Espectros en broca TiAlN 1.

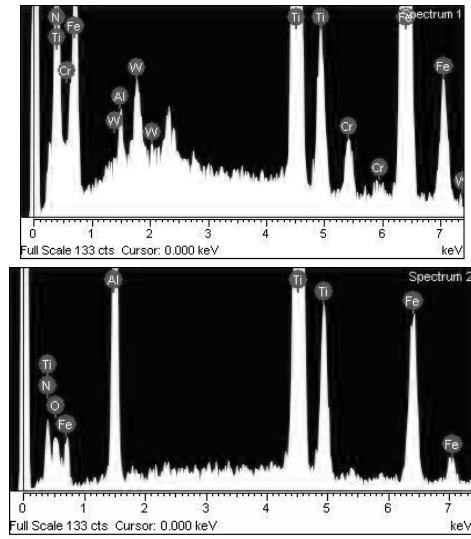


Figura 9. Espectros en broca TiAlN 2.

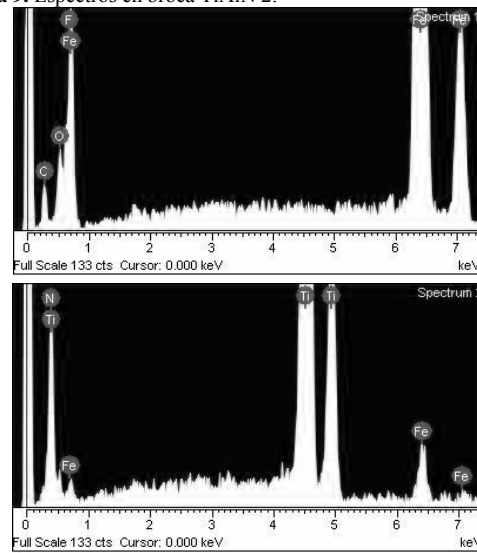


Figura 10. Espectros en broca TiN.

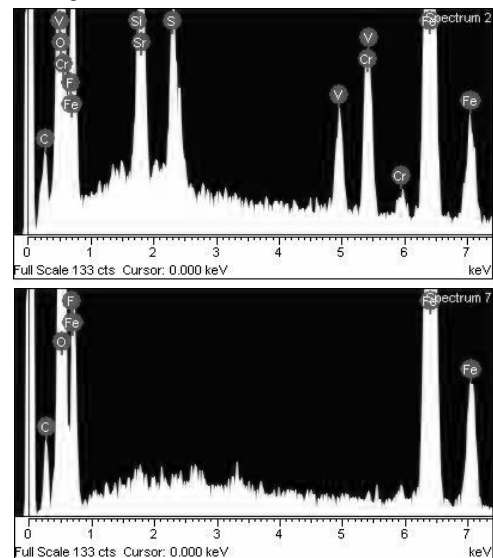


Figura 11. Espectros en broca HSS.

puede ser acero, bronce, aluminio, etc. Disminuyen los sobrecalentamientos locales en la zona de corte y en el filo de la herramienta. Esto permite la conservación del filo por mas tiempo y por tanto garantizar un trabajo mas duradero y estable.

Tabla 5. Análisis puntual. TiAlN 1

PESO (%)	C	O	N	Si	Al	Ti	Fe	Zn	Total
Espectro 1	6.93	-	-	0.65	-	-	92.43	-	100
Espectro 2	-	19.45	6.11	-	6.14	50.97	16.32	1.00	100
Espectro 3	12.44	-	-	-	-	-	11.34	76.22	100

Tabla 6. Análisis puntual. TiAlN 2.

PESO (%)	O	N	W	Al	Ti	Fe	Cr	Total
Espectro 1	-	21.11	2.63	0.86	30.22	43.02	2.16	100
Espectro 2	16.09	26.20	-	11.67	37.38	8.27	0.40	100

La alta microdureza alcanzada en la superficie de las herramientas garantiza un mínimo de desgaste lo cual permite un mayor tiempo de explotación de la herramienta lo que se ve confirmado con los resultados alcanzados.

3.1 Análisis de eficiencia

En la figura 3, así como en la tabla 4 se puede apreciar la zona de maquinado y la eficiencia de cada una de las herramientas que se utilizaron para esta prueba como son: brocas de HSS, y recubiertas con TiN, TiAlN. Se observa que para este tipo de material la eficiencia de una herramienta recubierta con TiAlN está por arriba de 283% sobre una de HSS.

3.2 Microanálisis de Imágenes mediante SEM

La caracterización de microscopía se realizó en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca FEI modelo Quanta 200 equipado con un espectrómetro EDX Oxford Instruments. Se realizó un análisis químico con el objetivo de encontrar la distribución de los elementos que se encontraron de las herramientas de corte utilizadas y así como ubicar el mecanismo de falla de cada una. Las fallas comunes en los recubrimientos trabajados fueron:

- desgaste
- adhesión
- desprendimiento
- fractura

A continuación se proporciona un análisis detallado de los recubrimientos, así como su análisis químico y fallas a cada una de las muestras maquinadas:

3.2.1 Fallas que se presentaron en:

En las figuras 4,5,6 y 7 se observa la zona de estudio en cada herramienta así como sus fallas mecánicas.

En la figuras 4,5 y 7, el espectro se tomó en esos puntos, debido a que presentaba diferencia de contraste, lo cual indica la presencia de un material extraño a las brocas recubiertas y de acero rápido, basándose en los resultados de composición obtenidos en el microanálisis, los cuales se

presentan en las siguientes tablas para las diferentes herramientas, se concluye que es material de maquinado adherido a la herramienta, así como fracturas y desprendimientos del recubrimiento. Esto se analiza a continuación en base a los difractogramas realizados a cada prueba.

3.2.2 Análisis puntual de las fallas que se presentaron

La figura 8 muestra los espectros obtenidos en los tres puntos analizados de la figura 4, El espectro 1 y 3 contiene la composición del material maquinado adherido a la herramienta. El espectro 2 indica el recubrimiento que se utilizó para esta prueba.

La figura 9 muestra los espectros obtenidos en los dos puntos analizados de la figura 5 El espectro 1 muestra elementos correspondientes a la matriz de la broca de acero rápido y parte de recubrimiento, también se nota un área de desgaste. El espectro 2 contiene contaminantes en el maquinado y el recubrimiento que se utilizó para esta prueba (TiAlN) e impurezas, como se puede observar en la tabla 6.

La figura 10 muestra los espectros obtenidos en los dos puntos analizados de la figura 6, El espectro 1 muestra elementos correspondientes al material maquinado, también se nota un área de desgaste. El espectro 2 contiene contaminantes en el maquinado y el recubrimiento que se utilizó para esta prueba (TiN).

La figura 11 muestra los espectros obtenidos en los dos puntos analizados de la figura 7, El espectro 2 muestra elementos correspondientes a la matriz de la broca de acero rápido y el espectro 7 contiene la composición del material maquinado adherido a la herramienta.

1.- Se logró poner a punto una tecnología que permitió la obtención de un recubrimiento a base de nitruros mediante bombardeo de plasma iónico a alto vacío.

Tabla 7. Análisis puntual. TiN.

PESO (%)	C	O	N	F	Ti	Fe	Total
Espectro 1	5.48	2.24	-	0.94	-	91.34	100
Espectro 2	-	-	13.98	-	81.61	4.41	100

Tabla 8. Análisis puntual. HSS.

PESO (%)	C	O	Si	S	V	Cr	Fe	Sr	Total
Espectro 2	5.49	34.20	2.64	2.12	2.99	5.65	40.68	8.51	100
Espectro 7	7.21	35.61	-	-	-	-	57.66	-	100

4. Conclusiones y recomendaciones

2.- Con la tecnología aplicada se obtuvieron recubrimientos con una dureza superficial de unos 3290 HV lo cual garantiza un desgaste muy por debajo de lo normal, permitiendo incrementos de la vida útil en las herramientas estudiadas.

3.- El efecto económico anual, recubriendo 73 332 herramientas del tipo estudiadas es de aproximadamente \$859 980.00 por la no compra de unas 96 666 herramientas, además de otros efectos por ahorro de tiempo, energía, hrs. hombre.

4.- Se recomienda la adquisición de Titanio y Aluminio de alta pureza para introducir de una manera sistemática y masiva este tipo de recubrimiento.

Los límites de rendimiento aumentan claramente cuando se han utilizado herramientas recubiertas con multicapas de TiN-TiAlN, sustancialmente más larga que las convencionales o recubiertas con TiN o TiAlN.

Debido a una vida útil mas prolongada y a una menor tiempo de paro de máquina se podrá maquinar con mayor rentabilidad por lo cual su productividad aumenta, debido a lo anterior los costos se reducen.

Agradecimientos

Agradezco, a los directivos e investigadores del I.T. de Zacatecas y Saltillo su apoyo para la realización de este trabajo, a los investigadores del posgrado en Procesos y Materiales de la Universidad Autónoma de Zacatecas, al CONACYT por el financiamiento del proyecto. A los Drs. José M. Albella del ICMM Madrid, España, Luis Nerey Luna de la Universidad de los Andes, por sus valiosas sugerencias.

Referencias

[1]. T. Cselle; "With High Performance Machining and Flexible Coating Go into the New Economy", Cutting Tools and Machining System, Gorham Conference (2001).
 [2]. N. J. M. Carvalho; "Low Friction and Wear Resistant Coatings", Goningen University (2001)
 [3]. D.L. Smith; "Thin-Film Deposition", Mc Gaw Hill (1995).
 [4]. T. A. Li, H. Li, F. Pan; Surface and Coatings Technology, 137, 225 (2001).

[5]. J. J.R. Tucka, A.M. Korsunsky, D.G. Bhatc, S.J. Bulla; Surface and Coatings Technology, **139**, 63 (2001).
 [6]. P. Patsalas, C. Charitidis, S. Logothetidis; Surface and Coatings Technology, **125**, 335 (2000).
 [7]. J. L. He, Y. Setsuhara, I. Shimizu, S. Miyake; Surface and Coatings Technology, **137**, 38 (2001).
 [8]. J. J. Coronado; Estudios Gerenciales, **094**, 39 (2005)
 [9]. L. Zheng, X.M. Yang, Z.H. Zhang, T.I. Liu; Computers in Industry, **59**, 254 (2008)
 [10]. Lu Yan , Ren Jianlan; Energy Procedia, **5**, 90 (2011).
 [11]. P. Cosemans , X. Zhu , J.P. Celis , M. Van Stappen; Surface and Coatings Technology, **174**, 416 (2003)
 [12]. L. Cunha, M. Andritschky, L. Rebouta and K. Pisehow, Surf. Coat. Technol. **116**, 1152 (1999).
 [13]. Da-Yung Wang, Yen-Way Li, Chi-Long Chang and Wei-Yu Ho, Surf. Coat. Technol. **114**, 109 (1999).
 [14]. S. Ekinović, D. Tufekčić and S. Nezirović The quality of machined surface in high-speed turn milling of ductile steel. 1st International Conference on Advanced Technologies for Developing Countries, Slavonski Brod, Croatia September 12-14 (2002)
 [15]. D. G. Kim, T. Y. Seong, Y. J. Bayk; "Oxidation behavior of TiN/TiAlN multilayers films prepared by the ion beam assisted deposition", Korea Institute of Science and Technology (2001).
 [16]. M. Khaled, B. S. Yilbas, J. Shirokoff; Surface and Coatings Technology, **148**, 46 (2001).
 [17]. C. Mitterer, P.H. Mayrhofer, J. Musil, Vacuum 71, 279 (2003).
 [18]. Byun Jeong Soo; Rha, Kwan Goo Kim, Jae Jeong Kim, Woo Shik Kim, Hak Nam Cho, Hae Seok Kim, Hyeong Joon, Journal of Applied Physics, **78**, 1719 (1995).
 [19]. Kim Soo-Hyun, Nam Ki Tae, Datta Arindom, Kim Ki-Bum, Journal of Applied Physics, **9**, 5512 (2002).
 [20]. D.Y. Wang, M.Ch. Chiu, Surface and Coatings Technology, **156**, 201 (2002).
 [21]. Z. Werner, J. Piekoszewski, Vacuum, **70**, 93 (2003).
 [22]. C. Le Paven-Thivet, C. Sant, F. Gillon, P. Houdy, Scanning, **22**, 258 (2000).
 [23]. X.T. Zeng, S. Zhang, S.Q. Sun, Y. C. Liu, "Nanometric-layered crn/tin thin films: mechanical strength and thermal stability", Gintic Institute of Manufacturing Technology.
 [24]. M.A. Brett, V.A. Alves, A. Cavaleiro, Proceedings of the Symposium on Corrosion and Corrosion Protection, The Electrochemical Society Inc., **22**, 912 (2001).
 [25]. D.Y. Wang, Y.W. Li, C.L. Chang, Surface and Coatings Technology, **114**, 109 (1999).
 [26]. E.J. Bienk, H. Reitz, N.J. Mikkelsen, Surface and Coatings Technology, **76**, 475 (1995).