

## **Desempeño de insertos de WC recubiertos con nanomulticapas de [TiN/TiAlN]<sub>n</sub> en el mecanizado del acero endurecido AISI 4340**

### **Performance of WC- inserts coated with nanometric [TiN/TiAlN]<sub>n</sub>- multilayer for the cutting processing of hardened AISI 4340 steel**

*Luis Henry Moreno<sup>1</sup>, Julio Cesar Caicedo<sup>2</sup>, Gilberto Bejarano Gaitan<sup>3\*</sup>, Federico Martínez<sup>4</sup>, Pedro Prieto Pulido<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> Grupo GIDEM, CDT ASTIN, SENA, Calle 52 N.º 2<sup>Bis</sup>-15, Cali, Colombia

<sup>2</sup> Grupo de Películas Delgadas, Departamento de Física, Universidad del Valle, Calle 13 N.º 100-00, Edificio 320, Cali, Colombia

<sup>3</sup> Grupo de Corrosión y Protección, Universidad de Antioquia, Cra 53 N.º 61-30, Medellín, Colombia

<sup>4</sup> Grupo de Materiales Facultad de Ingeniería Mecánica ISPJAE, A.A. 19390, Habana- Cuba

<sup>5</sup> Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, Universidad del Valle, Calle 13 N.º 100-00, Edificio 320, Oficina 1026, Cali, Colombia

(Recibido el 10 de mayo de 2010. Aceptado el 25 de noviembre de 2010)

#### **Resumen**

En el presente trabajo se muestran los resultados de la resistencia al desgaste de insertos de carburo de tungsteno (WC) sin recubrir y recubiertos con multinanocapas de [TiN/TiAlN]<sub>n</sub> con un espesor total promedio del recubrimiento de 4 µm, así como de insertos recubiertos con monocapas comerciales de TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN (TINAL). Se realizaron ensayos de vida útil, análisis de temperatura en la zona de corte, mediciones de rugosidad superficial sobre la pieza y sobre los insertos en la superficie de ataque, análisis de huella de contacto entre viruta-insertos y análisis de composición química (EDS). Los ensayos se realizaron sobre piezas de acero AISI 4340 utilizando régimen de corte de acabado y aplicando altas velocidades de corte (HSC). Los resultados de mecanizado de acero, para un recorrido de 8.000 metros con diferentes insertos de carburo de tungsteno (WC), sin recubrimiento y recubiertos presentaron valores de desgaste de 0,117 mm y

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 55 44, fax: + 57 + 4 + 211 05 07, correo electrónico: gbejarano@udea.edu.co. (G. Bejarano)

0,138 mm; en relación a los insertos recubiertos con 300 y 200 bicapas de TiN/TiAlN, respectivamente. De igual manera, los insertos recubiertos con TINAL exhibieron valores de desgaste de 0,174 mm. Además, los valores de temperatura en la zona de corte y para una velocidad de corte de 176,6 m/mim fueron de 522,6 °C para los recubrimientos con 300 bicapas, de 721,4 °C para aquellos con 200 bicapas, y de 1.327,6 °C para los insertos recubiertos con TINAL. La disminución de la temperatura en la zona de corte, relacionada con un menor coeficiente de fricción y una menor fuerza de corte, contribuyeron al alargamiento de la vida útil de los insertos.

----- **Palabras clave:** Multinocapas, resistencia al desgaste, rugosidad superficial, pulverización catódica

### Abstract

In the present work wear resistance of 4 µm uncoated tungsten carbide inserts (WC) and coated with [TiN/TiAlN]<sub>n</sub> multilayered or with commercial TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN monolayers (TINAL) are examined. Life tests, cutting area temperature analysis, surface roughness measurements on work pieces, roughness measurements on the attacked surface, contact track analysis between chip-insert and chemical composition analysis (EDS) were carried out. Mechanical tests were conducted on AISI 4340 steel parts using cutting regime and applying high speed cutting (HSC). Machining results showed that for a distance of 8,000 m the inserts coated with 300 bilayers exhibited wear values of 0.117 mm, inserts coated with 200 bilayers showed values of 0.138 mm and those coated with TINAL presented wear values of 0.174 mm. Moreover, the temperature values for cutting speed at 176.6 m/mim for 300 bilayers was 522.6 °C, for 200 bilayers was 721.4 °C and 1,327.6 °C for inserts coated with TINAL. Lower temperatures, caused by a lower friction coefficient and cutting force, contribute to life-time increasing at WC inserts.

----- **Keywords:** Multinocapas, resistencia al desgaste, rugosidad superficial, magnetron sputtering

### Introducción

En la actualidad las capas duras depositadas mediante deposición física en fase vapor asistida por plasma, de su nombre en inglés (*Plasma Assisted Physical Vapour Deposition - PAPVD*), como AlCN [1], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-YSZ [2], CrAlN [3], TiCN [4] entre otros, son frecuentemente utilizados para mejorar el comportamiento mecánico y tribológico en muchas herramientas empleadas para aplicaciones en ingeniería [5]. Para entender completamente las relaciones entre

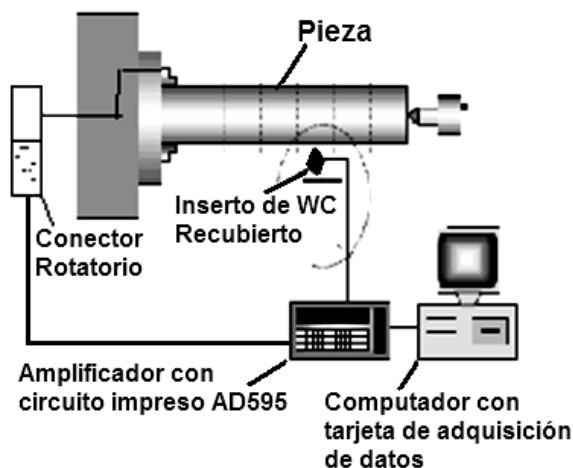
las propiedades intrínsecas del sistema compuesto por la capa-substrato y el comportamiento tribológico de dicho sistema en diferentes condiciones de trabajo, es necesario profundizar en su estudio. Por lo tanto, las demandas actuales para el incremento de la productividad en el sector manufacturero y sobre todo en el mecanizado de alta velocidad, requieren del desarrollo de nuevos materiales, que posean mejores propiedades fisicoquímicas y mecánicas. Los recubrimientos obtenidos por la tecnología del PAPVD, propicia el desarrollo e introducción de nuevos materiales

en forma de multicapas con espesores de tamaño nanométrico (multinancapas), que aplicados sobre piezas de maquinaria y herramientas ofrecen mayor resistencia al desgaste, incluso a elevadas temperaturas y para trabajo en seco, como por ejemplo, nitruro de cromo aluminio (CrAlN) [3], nitruro de titanio aluminio (Ti, Al)N y carbonitruro de titanio (Ti(C,N)) [4], entre otros. También se está investigando el comportamiento de compuestos duros nanoestructurados ternarios y cuaternarios como: (Ti, Zr)N, (Ti,Nb,C)N [4], (Ti,Cr,Al)N, etc. Además, en los últimos años se han desarrollado sistemas más complejos, los cuales se componen de sistemas de multicapas llamadas heteroestructuras o superredes tales como: TiN/TiAlN, TiN/TiCrN, CrN/CrAlN y TiCN/TiNbCN, entre otros, obtenidos por pulverización y co-pulverización, de los cuales todavía no hay estudios amplios, pero que prometen una gran gama de aplicaciones industriales [6-9]. Los estudios sobre métodos reproducibles y normalizados para la determinación de las propiedades tribológicas de capas y multicapas, son generalmente escasos, sobre todo desde el punto de vista del mecanizado. Los estudios desde el punto de vista físico, aunque necesarios, no permiten una evaluación integral de los insertos recubiertos para aplicaciones en el proceso de mecanizado pues, las condiciones bajo las cuales tiene lugar este proceso, son sumamente complejas y difíciles [10-12]. El comportamiento tribológico de un compuesto está determinado por su geometría, composición química y rugosidad del par tribológico, condiciones de trabajo (atmósfera, temperatura, lubricación, carga, etc.), y otros componentes del tribo-sistema. Para entender, explicar o predecir el comportamiento de un componente dado, se debe poseer naturalmente, toda la información pertinente sobre estos parámetros o variables del sistema. Por consiguiente, el número de pruebas para obtener una caracterización general del comportamiento del recubrimiento podría ser muy elevado. Este trabajo de investigación se basó en la evaluación del desgaste de una serie de pastillas (insertos) de carburo de tungsteno WC

sin recubrimiento y recubiertos con multicapas de TiN/TiAlN a través de la realización de un número limitado de pruebas de mecanizado por el proceso de torneado. Además, el principal propósito de este trabajo, fue la evaluación de la influencia del número de bicapas de [TiN/TiAlN]<sub>n</sub> sobre la resistencia al desgaste de las pastillas de WC recubiertas con (TiN/TiAlN), y comparadas con aquellas sin recubrir y con otras pastillas comerciales recubiertas con TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN (TINAL).

## Experimentación

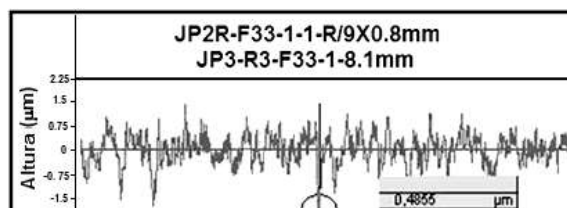
Los recubrimientos se depositaron en el Centro ASTIN del SENA en la ciudad de Cali, Colombia, utilizando un equipo de pulverización catódica balanceado (*balanced Magnetron Sputtering*) asistida con campo magnético r.f., bajo atmósfera reactiva de N<sub>2</sub> y blancos de Ti, y Al (99,9% de pureza), respectivamente. La evaluación y optimización de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de dichos recubrimientos, así como de los parámetros de deposición fueron realizadas en trabajos previos y publicados recientemente [13-15]. Por lo tanto, el primer grupo de muestras se recubrieron con 200 bicapas de TiN/TiAlN, mientras que el segundo grupo se recubrió con 300 bicapas, que corresponde a un periodo  $\Lambda = 20$  nm y  $\Lambda = 13$  nm, respectivamente. Dado que las capas presentan un espesor total del orden de 4  $\mu$ m, el espesor de las monocapas mismas se inscribe en un orden nanométrico. Para el análisis del comportamiento de la temperatura en la zona de corte para los diferentes insertos recubiertos, se diseñó una instalación experimental (ver figura 1), utilizando el método de medición de la temperatura mediante el termopar herramienta-pieza. Dicho termopar se fundamenta en el principio de la fuerza electromotriz (*fem*) que se produce en la unión de dos diferentes materiales y que se registra como una señal eléctrica en milivoltios (mV), que luego es convertida en valores de temperatura [16]. Este tipo de termopar registra la temperatura en la zona interfase virutaherramienta, obteniéndose el valor promedio de la misma.



**Figura 1** Esquema de la instalación experimental para la medición de la temperatura en la zona de corte

En el esquema de la figura 1 se muestra la instalación que permite la medición y registro de la temperatura mediante un conector rotatorio de mercurio que convierte la señal rotatoria de la pieza en el torno, en una señal no rotatoria, la cual es registrada y amplificada en un dispositivo, que dispone de un circuito integrado (C.I.) de señales AD594 de la firma *Analog Device*. Tanto la herramienta como la pieza fueron adecuadamente aisladas para evitar las posibles corrientes parasitas del sistema (ruidos) y así obtener una señal lo más limpia posible. Este tipo de termopar requirió de una calibración para determinar la ecuación característica de calibración voltaje-temperatura, la cual fue utilizada para el cálculo de las temperaturas. Para estos ensayos se utilizaron los siguientes parámetros de trabajo: velocidad de corte 117 m/min, 142 m/min, y 180 m/min, avance 0,07 mm/rev, profundidad de corte 0,2 mm y 0,4 mm, material de la pieza acero AISI 4340 endurecido a 50 HRC. La rugosidad superficial fue medida mediante un perfilómetro *Taylor Hobson* como se presenta en la figura 2, en la que se muestra un ejemplo del resultado parcial de una medición de rugosidad media aritmética ( $R_a$ ) de la superficie de la pieza de acero después del proceso de mecanizado con un inserto de WC recubierto con  $[\text{TiN}/\text{TiAlN}]_{300}$ . Para esta evaluación se realizaron 8 mediciones en la circunferencia de la pieza con dos replicas

de cada ensayo, promediándose las misma. Este perfilómetro, de elevada resolución (0,01 nanómetros), permitió desplazar su sensor sobre la superficie de la pieza colocada sobre un prisma y controlando el valor de su desplazamiento, que en este caso fue de 8 mm.



**Figura 2** Perfil de rugosidad obtenida por perfilometría de la pieza de acero después del proceso de mecanizado con un inserto de WC recubierto con  $[\text{TiN}/\text{TiAlN}]_{300}$

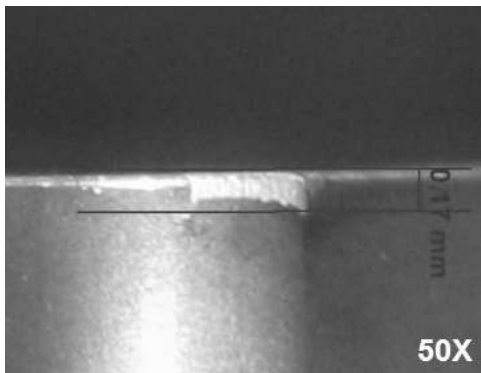
### **Comportamiento del desgaste de los insertos recubiertos**

Para el desarrollo experimental, se utilizó un régimen de corte de acabado ( $v_c = 150$  m/min) considerado de alta velocidad (HSC), en una operación de torneado cilíndrico. Para medir los valores de desgaste se utilizó un microscopio óptico *Karl Zeiss Stemi 2000*, el cual permite precisiones del orden de 0,005 mm, donde se observan los insertos desgastados, lográndose de este modo medir el valor del desgaste como lo muestra la figura 3 [15]. La composición química en la zona de desgaste de los insertos fue determinada mediante espectroscopia dispersiva de rayos-X (EDS) empleando un microscopio electrónico de barrido *Philips XL 30 FEG*, el cual posee un detector de Ge de alta sensibilidad.

### **Huella de contacto**

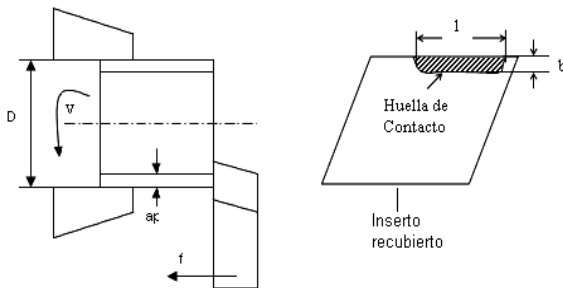
La huella de contacto se midió sobre la superficie de ataque de los diferentes insertos de WC. Esta huella de contacto se asocia a la huella que deja la viruta durante su desplazamiento sobre la superficie de ataque o salida de la viruta donde quedan residuos de hierro. La magnitud de esta huella tiene una incidencia importante sobre

el comportamiento del par tribológico viruta-herramienta, por lo tanto, mientras menor sea este contacto, mejores serán las condiciones de corte dado que esta interacción tribológica contribuye a que la temperatura de corte se concentre más en el borde delantero de la herramienta, posibilitando una mayor evacuación por la viruta. Los ensayos se realizaron con diferentes insertos de carburo de tungsteno (WC), sin recubrimiento y los demás recubiertos con multicapas de [TiN/TiAlN]<sub>n</sub> y de TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN (TINAL), y que fueron el objeto de estudio.



**Figura 3** Microscopía óptica de la medición del desgaste de un inserto de WC recubierto con [TiN/TiAlN]<sub>300</sub>

Los experimentos se realizaron utilizando el corte ortogonal, tal como se observa en la figura 4. Este corte consiste en un tubo de paredes finas con el objetivo de poder observar la huella sobre la superficie de ataque de la herramienta, sin la influencia del radio del vértice ni de la fuerza radial [11].



**Figura 4** Esquema de los ensayos para medición de la huella de contacto sobre los insertos

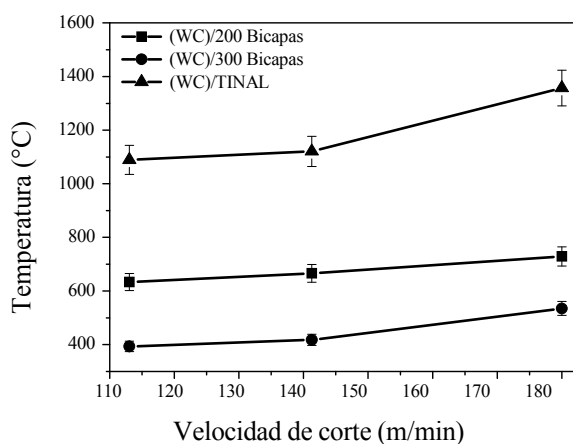
## Resultados y discusión

### Efecto de la temperatura

En la figura 5 se muestran los resultados de temperatura obtenidos para los diferentes insertos recubiertos. En la misma Figura se puede observar que el inserto de TINAL es el que mayor temperatura alcanza, además este inserto alcanzó el valor mayor en los ensayos de rugosidad superficial, asociado a la superficie de ataque, provocando una mayor fricción en la zona de contacto viruta-herramienta. Este hecho propicia que las fuerzas de corte y el desgaste sean mayores y por ende también la cantidad de calor que se genera. En los insertos de WC recubiertos con las multicapas de [TiN/TiAlN]<sub>n</sub> se observó una reducción de la temperatura conforme se incremento el número de multicapas, las cuales generan un mayor número de interfaces con menores espesores individuales; de este modo el efecto de las multicapas con espesores nanométricos (multinocapas), genera un una disipación de la temperatura en las interfaces dado que se tiene dos capas de dos materiales con diferente conductividad térmica, lo que conlleva a un aislamiento térmico del par tribológico dando lugar a una menor temperatura en la zona de corte y obligando a una disipación del calor fundamentalmente a través de la viruta [6, 17,18]. En la figura 5 se evidencia que la temperatura alcanzada en los insertos recubiertos con 200 y 300 capas, es muy inferior al obtenido en la estructura tipo monocapa de TINAL, lográndose el menor valor las muestras de WC recubiertas con [TiN/TiAlN]<sub>300</sub> multicapas.

Por otro lado, se asume que la presencia de recubrimientos tipo multinocapas posibilita una resistencia térmica adicional en el sustrato de WC manteniéndolo a menor temperatura, lo cual ha sido comprobado por diferentes autores [6, 17] y corroborado en los resultados del presente trabajo. Algunos autores consideran que la presencia de las multicapas actúan como una barrera aislante [6, 18], pero otros consideran que la disminución de la temperatura se debe a

las condiciones tribológicas logradas por el par y fundamentadas en la elevada dureza superficial que se alcanza con las multicapas [19, 20]. En términos generales el uso de recubrimientos duros compuestos de capas nanométricas reducen el coeficiente de fricción, incrementan la dureza y actúan como barrera térmica del sustrato, de tal forma que todos esos factores conllevan a una disminución de la fuerza de corte en los procesos de mecanizado y un incremento de la resistencia al desgaste y de la vida útil de las herramientas [7-14, 18,20]. En la Figura 6 se observa el desgaste de un inserto de WC sin recubrir en función de la longitud de mecanizado, realizada mediante una prueba de corte mediante el proceso de torneado. El desgaste del inserto de WC se ajusta con resultados obtenidos por diferentes autores [6, 14, 16].

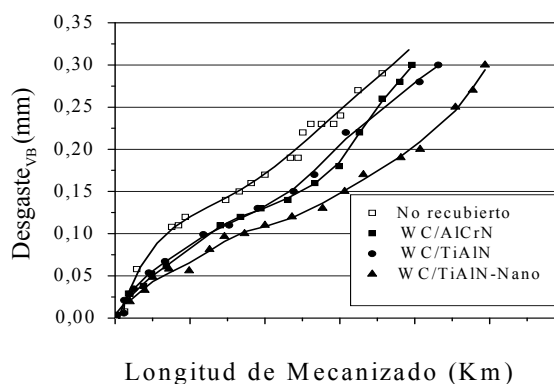


**Figura 5** Temperatura alcanzada por los diferentes insertos recubiertos evaluados con las mismas condiciones de corte

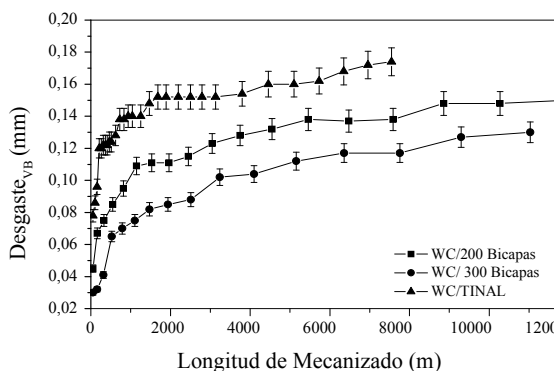
### Desgaste

En la figura 7 se muestran las curvas obtenidas para los diferentes insertos recubiertos. El valor de la longitud recorrida de las siglas en inglés (*SCL-Spiral cutting length*) se calcula según la longitud de la espiral desarrollada por el vértice de la herramienta en contacto con la pieza. Los experimentos se realizaron en régimen de acabado con alta velocidad de corte. En este

caso el mecanismo de desgaste predominante es el abrasivo, debido a las partículas de carburos presentes en la matriz del acero endurecido AISI 4340 [15]. Las partículas duras insertadas en la matriz más blanda del acero AISI 4340 actúan como una rueda abrasiva; además la presencia de las partículas de carburo endurecidos se hizo evidente en los estudios metalográficos realizados al acero AISI 4340. No quiere esto decir que los demás mecanismos de desgaste no estén presentes, pero el predominante es el abrasivo.



**Figura 6** Desgaste en función de la longitud de corte para insertos de WC no recubiertos y recubiertos con diferentes sistemas



**Figura 7** Desgaste de los diferentes insertos de WC recubiertos

También se puede observar que los insertos recubiertos con multinanocapas  $[\text{TiN}/\text{TiAlN}]_{200}$  y  $[\text{TiN}/\text{TiAlN}]_{300}$  presentaron mayor vida útil

o longitud mecanizada, que el inserto de WC recubierto con TINAL [12]. Como resultado de esta investigación se puede establecer que la mayor longitud mecanizada fue para el inserto de [TiN/TiAlN]<sub>300</sub>, lo cual está asociado con una mayor microdureza superficial, menor tamaño de grano y mayor densidad del recubrimiento. Estas características microestructurales y propiedades intrínsecas de estos sistemas, ya han sido estudiados con detenimiento y publicados en trabajos precedentes [10-13].

### Medición de la rugosidad superficial de los diferentes insertos

Otro de los parámetros medidos es la rugosidad superficial en la superficie de ataque de cada uno de los insertos recubiertos utilizados en los experimentos. Esto permite conocer cómo puede influir la rugosidad sobre el contacto viruta-herramienta. Como se observa en la tabla 1 el inserto de WC recubierto con [TiN/TiAlN]<sub>300</sub> es el de menor rugosidad. Estos valores tienen influencia en el comportamiento tribológico del par *viruta-herramienta*. Los valores mayores de rugosidad tienden a aumentar el coeficiente de fricción en la zona de contacto propiciado

incrementos de las fuerzas de corte y la temperatura.

**Tabla 1** Comparación de la rugosidad superficial  $R_a$  de los insertos investigados

Inserto	Recubrimiento	Espesor ( $\pm 0,1 \mu\text{m}$ )	$R_a$ ( $\pm 0,01 \mu\text{m}$ )
1	TINAL	9	0,35
2	[TiN/TiAlN] <sub>200</sub>	4	0,25
3	[TiN/TiAlN] <sub>300</sub>	4	0,20

### Rugosidad superficial de las piezas de acero 4340 después del mecanizado

Los resultados obtenidos de rugosidad superficial sobre las piezas de acero ensayadas, empleando los diferentes insertos recubiertos no presentan diferencias significativas entre ellas y siempre con valores menores de  $1,50 \mu\text{m}$ , ver tabla 2. La rugosidad encontrada de acuerdo a los parámetros estudiados exhibe valores bajos y aceptables para el mecanizado de piezas con elevada exigencia desde el punto de vista de desempeño mecánico.

**Tabla 2** Valores de la huella de contacto obtenida para WC/[TiN/TiAlN]<sub>300</sub>

No	Velocidad (m/min)	$f_n$ ( $\pm 0,01 \text{mm}$ )	$a_p$ ( $\pm 0,1 \text{mm}$ )	$R_a$ media ( $\pm 0,01 \mu\text{m}$ )
1	142	0,07	0,4	0,80
2	142	0,17	0,4	1,48
3	180	0,07	0,4	0,87
4	180	0,17	0,4	1,46
5	142	0,07	0,2	1,22
6	142	0,17	0,2	1,42
7	180	0,07	0,2	0,90
8	180	0,17	0,2	1,40
Valor medio				1,19

Los resultados de insertos de WC recubiertos con monocapas de otros materiales presentados por otros autores, se pueden observar en la tabla 3 [6]. Los resultados presentados en la tabla 3 están muy próximos a los alcanzados en el presente trabajo. Por lo general, los insertos

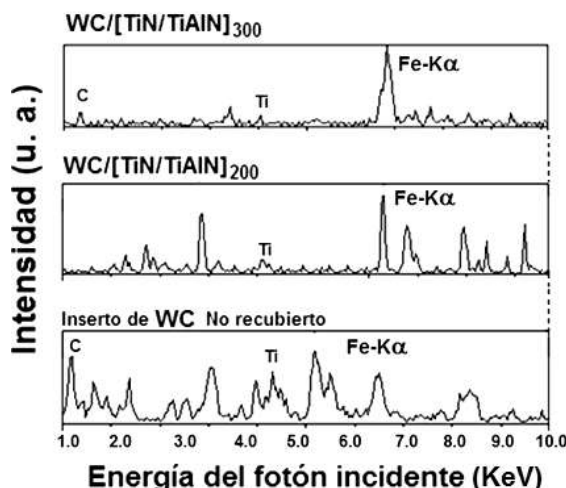
recubiertos con multinanocapas, presentan una gran estabilidad de los filos de las herramientas (insertos de WC) lo cual contribuye a lograr buenos acabados superficiales en las piezas con elevadas exigencias de mecanizado y acabado final.

**Tabla 3** Medición de la huella de desgaste para insertos de WC no recubiertos y recubiertos con diferentes recubrimientos

<i>Parámetros de la huella</i>	<i>WC No recubierto</i>	<i>WC/TiAlN</i>	<i>WC/[TiN/TiAlN] 200 bicapas</i>	<i>WC/[TiN/TiAlN] 300 bicapas</i>
Longitud l (±0,1 mm).	2.780	2.438	2.830	2.455
Espesor b (±0,1 mm).	0,505	0,555	0,376	0,350
Área A (±0,1 mm) <sup>2</sup>	1.403	1.353	1.064	0,859

De acuerdo a los resultados presentados en las tablas 1 y 3 se puede observar que el mejor comportamiento frente al desgaste exhibe una huella con menor longitud, por lo tanto, se concluye que el inserto de [TiN/TiAlN]<sub>300</sub> es el que presenta mejor desempeño tribológico. También es el que mejor comportamiento tuvo frente al desgaste con respecto a la longitud maquinada, lo cual conlleva en cierta medida, a una menor huella de contacto viruta-herramienta [7].

La composición química elemental en la huella de contacto se puede observar en la figura 8 donde se muestran los resultados de espectroscopía de dispersión de rayos-X (EDS) para diferentes insertos de WC, donde se revela el contenido hierro como depósito en la superficie de los insertos debido al fenómeno de adherencia existente en el proceso de corte. De los espectros de EDS se pudo observar que la radiación Kalfa del hierro (FeKα) con una señal alrededor de (~6.4keV), que es característica del contenido de dicho elemento, es menor en las herramientas recubiertas con [TiN/TiAlN]<sub>n</sub>. Dicha radiación se reduce además cuando se incrementan el numero de capas (n), mejorando así las condiciones tribológicas del par herramienta-pieza.



**Figura 8** Espectro de EDS para insertos de WC sin y con recubrimiento, donde se observa la presencia del depósito de hierro en la superficie de la zona de contacto después del proceso de mecanizado

### Conclusiones

A partir de los resultados de los ensayos de los insertos de WC recubiertos con [TiN/TiAlN]<sub>200</sub> y [TiN/TiAlN]<sub>300</sub> y de su análisis teórico se presentan las siguientes conclusiones.



- Los recubrimientos multinanocapas mostraron un excelente comportamiento frente al desgaste, exhibiendo longitudes de mecanizado superiores a 8000 m comparados con insertos de WC recubiertos con monocapas de TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN (TINAL).
- Los insertos de WC recubiertos también lograron disminuir las temperaturas de la zona en la interfase (viruta-herramienta), lo cual contribuye a una mayor vida útil del inserto durante el proceso de mecanizado. Además el sistema de multicapas disipa más eficientemente la temperatura evitando que los recubrimientos comiencen a disminuir su dureza, propiedades mecánicas y tribológicas.
- El estudio de la huella de contacto mostró resultados muy favorables para los insertos de WC recubiertos con multinanocapas, mejorando así el comportamiento del par tribológico al disminuir el rozamiento viruta-herramienta, lo cual contribuye a disminuir las fuerzas de corte en la zona de contacto.
- La rugosidad superficial en la pieza de trabajo (*Ra*) alcanzó valores muy bajos para los diferentes recubrimientos tipo multinanocapas pudiéndose maquinar piezas con las mayores exigencias mecánicas y con mejor acabado superficial, sin superar el valor de *Ra* = 1,50 μm.
- Los valores de rugosidad superficial de los insertos fue muy favorable para los recubiertos con multinanocapas. Esto contribuye a mejorar las condiciones de mecanizado del par viruta-herramienta, facilitando una mejor evacuación del calor hacia la viruta, reduciendo el rozamiento lo que disminuye la temperatura y las fuerzas de corte.
- Se observó que los insertos de WC recubiertos con [TiN/TiAlN]<sub>n</sub> para n = 200 y n = 300 (Λ = 20 nm y Λ = 13 nm) respectivamente presentaron diferencias en los resultados de mecanizado, lo cual indica que las multicapas con n = 300 presentaron menor desgaste y

menor temperatura en la zona de corte. No obstante ambas poseen un comportamiento superior a insertos recubiertos con monocapas tipo (TINAL). Estos resultados son corroborados por los estudios físicos realizados con estos recubrimientos.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo Centro de Excelencia de Nuevos Materiales - CENM, el centro de desarrollo Tecnológico ASTIN-SENA, el Grupo de Películas Delgadas de la Universidad del Valle en Cali-Colombia y el Grupo de Materiales del Departamento de Tecnología en la facultad de Ingeniería Mecánica, ISPJAE, La Habana - Cuba.

## Referencias

1. L. Yate, J. C. Caicedo, A. Hurtado Macías, F. J. Espinoza-Beltrán, G. Zambrano, J. Muñoz Saldaña, P. Prieto. "Composition and mechanical properties of AlC, AlN and AlCN thin films obtained by R. F. magnetron sputtering". *Surf. Coat. Technol.* Vol. 203. 2009. pp. 1904-1907.
2. C. Amaya, W. Aperador, J. C. Caicedo, F. J. Espinoza Beltrán, J. Muñoz-Saldaña, G. Zambrano, P. Prieto. "Corrosion study of Alumina/Yttria-Stabilized Zirconia (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ) nanostructured Thermal Barrier Coatings (TBC) exposed to high temperature treatment". *Corrosion Science.* Vol. 51. 2009. pp. 2994-2999.
3. J. E. Sánchez, O. M. Sánchez, L. Ipaz, W. Aperador, J. C. Caicedo, C. Amaya, M. A. Hernández Landaverde, F. Espinoza Beltrán, J. Muñoz-Saldaña, G. Zambrano. "Mechanical, tribological, and electrochemical behavior of Cr<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N coatings deposited by R. F. reactive magnetron co-sputtering method". *Appl. Surf. Sci.* Vol 256. 2010. pp. 2380-2387.
4. J. C. Caicedo, C. Amaya, L. Yate, W. Aperador, G. Zambrano, M. E. Gómez, J. Alvarado Rivera, J. Muñoz-Saldaña, P. Prieto. "Effect of applied bias voltage on corrosion-resistance for TiC<sub>1-x</sub>N<sub>x</sub> and Ti<sub>1-x</sub>Nb<sub>x</sub>C<sub>1-y</sub>N<sub>y</sub> coatings". *Appl. Surf. Sci.* Vol. 256. 2010. pp. 2876-2883.
5. W. Grzesik, P. Nieslony. "Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating-chip interface". *Wear.* Vol. 256. 2004. pp. 108-117.

6. T. Reginaldo Coelho, Eu-Gene Ng, M. A. Elbestawi. "Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 47. 2006. pp. 263-272.
7. T. Cselle, M. Morstein, L. Geisser, P. Holubar. "Nanostructured coatings for high performance tolos". *Werkzeug Technik*. Vol. 77. 2003. pp. 1-8.
8. J. C. Caicedo C. Amaya, L. Yate, O. Nos, M. E. Gómez, P. Prieto. "Hard coating performance enhancement by using [Ti/TiN]<sub>n</sub>, [Zr/ZrN]<sub>n</sub> and [TiN/ZrN]<sub>n</sub> multilayer system". *Materials Science and Engineering: B*. Vol. 171. 2010. pp. 56-61.
9. J. C. Caicedo, C. Amaya, L. Yate, G. Zambrano, M. E. Gómez, J. Alvarado Rivera, J. Muñoz Saldaña, P. Prieto. "TiCN/TiNbCN multilayer coatings with enhanced mechanical properties". *Appl. Surf. Sci.* Vol. 256. 2010. pp. 5898-5904.
10. E. Uhlmann, J. A. Oyanedel, M. Keunecke. "Machining of high performance work piece materials with cBN coated cutting tolos". *Thin Solid Films*. Vol. 518. 2009. pp. 1451-1454.
11. J. Rech. "Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool-chip interface in orthogonal dry turning. *Surface & Coatings Technology*. Vol. 200. 2006. pp. 5132-5139.
12. G. Bejarano, J. M. Caicedo, E. Baca, P. Prieto, A. G. Balogh, S. Enders. "Deposition of B<sub>4</sub>C/BCN/c-BN multilayered thin films by r. f. magnetron sputtering". *Thin Solid Films*. Vol. 494. 2006. pp. 53-57.
13. G. Bejarano, J. C. Caicedo, A. G. Balogh, S. Gottschalk. "Cutting tools performance enhancement by using a TiN/TiAlN multilayer coating system" *Phys. Stat. Sol.* Vol. 4. 2007. pp. 4260-4266.
14. G. Bejarano, J. M. Caicedo, J. M. Saldaña. "Mechanical and tribological properties enhancement of heat treated AISI 4340 steel by using a TiN/TiAlN multilayer coating system. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. Vol. 44. 2008. pp. 36-42.
15. J. C. Caicedo, F. Martinez, L. H. Moreno, T. S. Battaille, M. E. Gomez, P. Prieto. *Proceedings of Wear evaluation of WC inserts coated with TiN/TiAlN multilayers*. 35th International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films. San Diego-California. 2008. pp. 45-49.
16. D. A. Stephenson. "Tool-Work Thermocouple Temperature Measurement-Theory and Implementation". *Journal of Engineering for Industry. Transaction of the ASME*. Vol. 115. 1993. pp. 432-437.
17. F. Martínez, M. Vidal, T. Sánchez. "Estudio de los fenómenos de desgaste en el proceso de corte con placas recubiertas mediante la tecnología de multicapas nanotecnológicas al elaborar aceros endurecidos". *Proceedings IV Congreso de Ingeniería Mecánica*. La Habana. Cuba. M-3. 2006. pp. 77-81.
18. S. Y. Luo, Y. S. Liao, Y. Y. Tsai. "Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 88. 1999. pp. 114-121.
19. M. K. Jackson, G. M. Robinson, J. S. Morrell. "machining M42 tool steel using nanostructured coated cutting tolos". *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. Vol. 23. 2007. pp. 83-86.
20. T. B. Watmon, A. C. Ijeh. "Coating cutting tools with hard substances lowers friction coefficient and improves tool life". *Proceedings of the international multicongference of engineers and computer scientists*. Vol. 3. 2010. pp. 978-988.