

## **Mejoramiento de propiedades mecánicas y tribológicas en herramientas industriales mediante aplicación de recubrimientos multicapa de TiN/ZrN**

### **Improvement of mechanical and tribological properties in industrial tools by means of application of TiN/ZrN multilayer coatings**

*Maryory Astrid Gómez<sup>1\*</sup>, Gilberto Bejarano Gaitán<sup>1</sup>, Jaime Alberto Osorio<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Grupo de Corrosión y Protección, Universidad de Antioquia, SIU Calle 62 N.º 52-59 Medellín, Colombia

<sup>2</sup>Grupo de Estado Sólido, Universidad de Antioquia, SIU Calle 62 N.º 52-59 Medellín, Colombia

(Recibido el 27 de agosto de 2009. Aceptado el 12 de abril de 2010)

#### **Resumen**

En el presente trabajo se depositaron recubrimientos multicapa de TiN/ZrN con 10 bicapas y recubrimientos monocapa de TiN y ZrN mediante pulverización catódica magnetrón r.f. Además, el recubrimiento multicapa se aplicó en fresadoras y se evaluó su desempeño en términos de vida útil de la herramienta. Los recubrimientos se caracterizaron a escala de laboratorio mediante difracción de rayos X, microscopía de fuerza atómica, microdureza Knoop, pruebas de desgaste mediante CaloTest y medidas de adhesión por la prueba de rayado. El recubrimiento multicapa superó a los recubrimientos monocapa en resistencia al desgaste, dureza superficial y carga crítica soportada. La adhesión mostrada por todos los recubrimientos fue muy buena como para ser considerados recubrimientos para aplicaciones industriales. Se incrementó la vida útil de fresas industriales en un 54,1 % con la aplicación del recubrimiento multicapa.

----- *Palabras clave:* Recubrimientos duros, nitruro de circonio, nitruro de titanio, pulverización catódica, propiedades mecánicas, propiedades tribológicas

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 66 79, fax: + 57 + 4 + 219 66 79, correo electrónico: mgomez@udea.edu.co (M.A. Gómez)

## Abstract

Most of the hard coatings have good wear and corrosion resistance; they have been widely used commercially to increase the life span of some industrial elements, for example, cutting tools, sprockets, bearings and components for industrial machinery. In this work TiN/ZrN multilayer coatings were deposited with 10 bilayers by r.f. magnetron sputtering technique, which was also used to deposit monolayer coatings of TiN and ZrN. In addition, the multilayer coating was applied in milling tools and their performance was evaluated in terms of tool life. The coatings were characterized to laboratory scale through X-ray diffraction, atomic force microscopy, Knoop micro hardness, wear tests by CaloTest and adhesion measures by scratch test. The multilayer coating exceeded the monolayer coatings in wear resistance, surface hardness and critical load supported. The adhesion showed for all the coatings was very good as to be considered industrial coatings. The life span of the milling tools were increased to 54.1 % with the application of the multilayer coating.

----- *Keywords:* Hard coatings, zirconium nitride, titanium nitride, magnetron sputtering, mechanical properties, tribological properties

## Introducción

La industria manufacturera utiliza en sus procesos productivos herramientas y máquinas con elementos y piezas que se desgastan rápidamente bajo condiciones severas de operación. Los fenómenos del desgaste, la oxidación y la corrosión causan millonarias pérdidas, que pueden llegar a representar hasta el 25 % de los costos de producción, afectando el precio del producto final y con ello los niveles de productividad y competitividad de las empresas [1,2]. Una alternativa para mitigar los problemas del desgaste es la deposición de recubrimientos duros sobre la superficie de éstos. En este sentido la deposición física en fase vapor de monocapas cerámicas principalmente nitruros, carburos y carbonitruros basados en metales de transición han permitido aumentar la vida en servicio de componentes de maquinaria, herramientas, moldes etc. Recubrimientos de CrN, TiN, ZrN, TiAlN, CrC, CrAlN, entre otros, han sido utilizados exitosamente debido al aumento de la dureza superficial, reducción del coeficiente de fricción y mejora de la resistencia al desgaste y a la corrosión [3-6]. Este tipo de recubrimientos están creciendo rápidamente en productos comerciales como moldes de inyección en procesamiento de polímeros y aleaciones de aluminio [5- 7]. Sin embargo, de-

bido a las condiciones de operación cada vez más severas en los procesos de corte y conformación de los materiales, las exigencias tecnológicas son mucho mayores en lo que respecta a las propiedades que deben poseer las herramientas y elementos de máquinas. Es así como las investigaciones en el campo de los recubrimientos duros se han centrado en el desarrollo de multicapas nanométricas alternadas de materiales de naturaleza metálica y otros de perfil cerámico [8-10].

Los recubrimientos multicapa presentan claras ventajas sobre los recubrimientos monocapa depositados en condiciones similares, i) muestran aumento en su dureza al mejorar la resistencia a la propagación de las grietas, ii) por la relajación de las tensiones del recubrimiento disminuyen la acumulación de esfuerzos compresivos los cuales aumentan con el espesor de los recubrimientos monocapa, iii) presentan mejores propiedades tribológicas al aumentar la adhesión entre el recubrimiento y el sustrato y iv) el depósito periódico restringe el crecimiento de grano columnar; todas estas ventajas conducen a minimizar las posibilidades de delaminación y fractura frágil que se pueden dar en los recubrimientos monocapa [11-13]. El depósito de los recubrimientos multicapas por pulverización catódica conlleva a la forma-

ción de múltiples interfases las cuales determinan fuertemente las propiedades físicas y mecánicas de estas estructuras multicapas [12-14].

El TiN y el ZrN poseen la misma estructura cristalina fcc, un módulo de cizalla y módulo de Young de alrededor de 30 GPa y 350 GPa, respectivamente, y propiedades similares, como alto punto de fusión (TiN: 2.950 °C, ZrN: 2.982 °C), buena resistencia térmica y química y alta dureza. Por lo tanto, la combinación de estos materiales en estructuras multicapa es promisoría para aplicaciones de alta exigencia, esto ha motivado la realización del presente trabajo [15].

Julio C. y colaboradores [16] depositaron multicapas de TiN/ZrN variando el número de bicapas de 1 a 8, obteniendo las mejores propiedades mecánicas y tribológicas con el sistema depositado con 8 bicapas. Con base en ello este trabajo se centró en el depósito, caracterización y evaluación en producción de un recubrimiento multicapa de TiN/ZrN con 10 bicapas y un espesor total de 4 micrómetros. Como sustratos se utilizaron muestras de acero AISI M2 endurecido y probetas testigos de Silicio (100). Propiedades como dureza, adherencia, desgaste, y microestructura cristalina fueron evaluadas y comparadas con las de las monocapas y con las de las muestras sin recubrir. Finalmente se llevó a cabo una evaluación de los recubrimientos en condiciones reales de producción y mediante ensayos de mecanizado de diferentes fresas recubiertas.

## Parte experimental

### *Depósito de los recubrimientos*

Los recubrimientos de TiN/ZrN se depositaron utilizando un equipo de pulverización catódica con blancos de Ti y de Zr (99,9% de pureza) en una atmósfera de argón/nitrógeno (93% Ar y 7% N<sub>2</sub>), temperatura de 250° y presión de 2,1x10<sup>-2</sup> mbar. Como sustratos se utilizaron el acero AISI M2, ampliamente utilizado en la fabricación de herramientas de corte y de maquinado por arranque de viruta, así como silicio, el cual permite fácilmente algunas caracterizaciones especiales de los recubrimientos. Previo al depósito de los recubrimientos, los sus-

tratos fueron sometidos a una limpieza con alcohol isopropílico, acetona y secados en un horno de convección a 120°C. Una limpieza final al interior de la cámara se llevó a cabo tanto en los blancos como en los sustratos mediante bombardeo iónico. Seguidamente se depositó una capa adherente de 300 nm de Ti y Zr para las monocapas de TiN y ZrN, respectivamente, y de Ti para las multicapas de TiN/ZrN. Para el depósito de las multicapas se utilizó un sistema de escudos (shutters) que se actuaban mecánicamente y de forma alternada entre los blancos de circonio y titanio. La potencia aplicada a ambos blancos fue de 350 W. El espesor total del recubrimiento fue de 4 micrómetros y se depositaron multicapas con 10 bicapas.

### *Caracterización de los recubrimientos*

La estructura cristalina y la topografía de los recubrimientos fue determinada por difracción de rayos X mediante el uso de un difractor marca ANTON PAR en el modo de ángulo rasante, con un voltaje acelerador de 40 kV, corriente 30 mA y utilizando la radiación Cu K $\alpha$  ( $\lambda=1,5405\text{\AA}$ ), así como un microscopio de fuerza atómica AFM Nanosurf easyscan2, en modo de contacto. La dureza de los diferentes recubrimientos fue determinada por microindentación en un equipo Shimadzu tipo M con un indentador Knoop aplicando una carga de 150 mN. Mediante el método de rayado, y utilizando un equipo Scratch Microtest MTR2, se caracterizó la adherencia del recubrimiento al sustrato y se determinó el coeficiente de fricción de todos los recubrimientos. Para ello se utilizó una punta de geometría Rockwell C diamante cónico con punta esférica de radio de 200  $\mu\text{m}$  y ángulo apical de 120°, se aplicó una tasa de carga de 4 N/s y una velocidad de rayado de 1 mm/min. La carga máxima fue de 90 N para una longitud total de la raya de 6 mm. La evaluación del desgaste se llevó a cabo mediante el método del Calo Test (según norma DIN 1.071). La probeta en cuestión se sujetó a un soporte plano con una inclinación de 35° y se sometió a contacto dinámico con una bola esférica de acero con un diámetro de 42,7 mm, humedecida con una solución de diamante altamente abrasiva de pasta de 0,5 micras y girando a 60 rpm

durante un tiempo de 120 s, la carga aplicada en dirección normal a la muestra fue de 2,5 N. Durante el movimiento relativo de las dos superficies la muestra presenta una pérdida de masa por desgaste, dejando sobre la superficie una huella concéntrica en forma de cráter, cuyo volumen puede ser calculado conociendo el diámetro de la huella y su profundidad [17-18].

### **Evaluación del desempeño del recubrimiento multicapa en producción industrial**

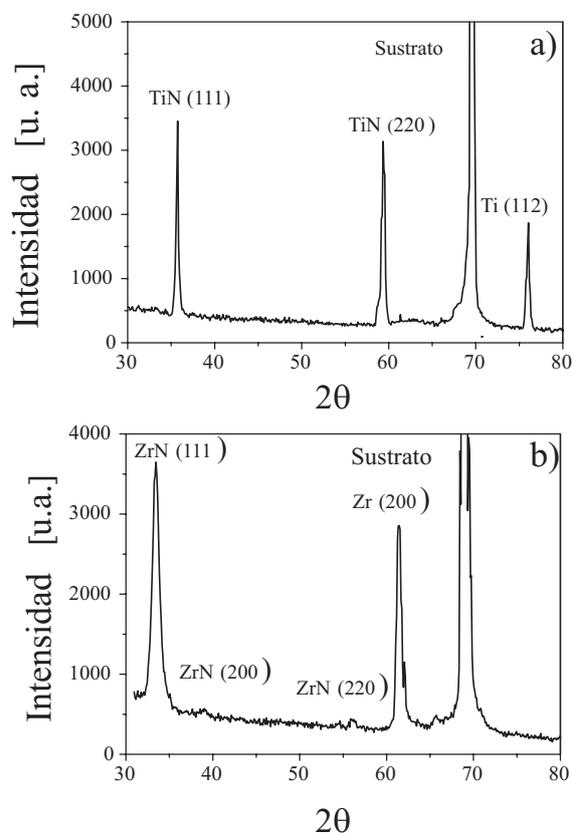
Adicionalmente se depositaron recubrimientos multicapa TiN/ZrN con 10 bicapas sobre fresas utilizando los mismos parámetros de depósito descritos para la obtención del recubrimiento multicapa con el fin de hacer la caracterización del sistema a escala de laboratorio. Las fresas fueron evaluadas en Industrias ESTRA S.A. Para esta evaluación se maquinó acero AISI P20 en estado de suministro, con una velocidad de corte de 40 m/min, avance de 0,03 mm/dte-rev y profundidad de 2 mm. El criterio de evaluación fue el volumen de material removido hasta que apareciera el primer indicio de desgaste de las fresas, el cual es detectado por el operario en el momento que se incrementa la fuerza de corte por pérdida del filo de la fresa, lo que además se ve reflejado en un deterioro del acabado superficial de la pieza de trabajo. Con base en ello el inicio de la pérdida del filo de la fresa no es un momento muy preciso y depende mucho de la pericia del operario, por lo cual el tiempo transcurrido hasta ese momento se toma como un tiempo promedio aproximado. Para la evaluación del desgaste de las fresas recubiertas se utilizaron tres fresas para cada una de las dos referencias y se tomó el volumen de desgaste promedio de cada referencia.

## **Resultados y discusión**

### **Composición microestructural y morfología de los recubrimientos**

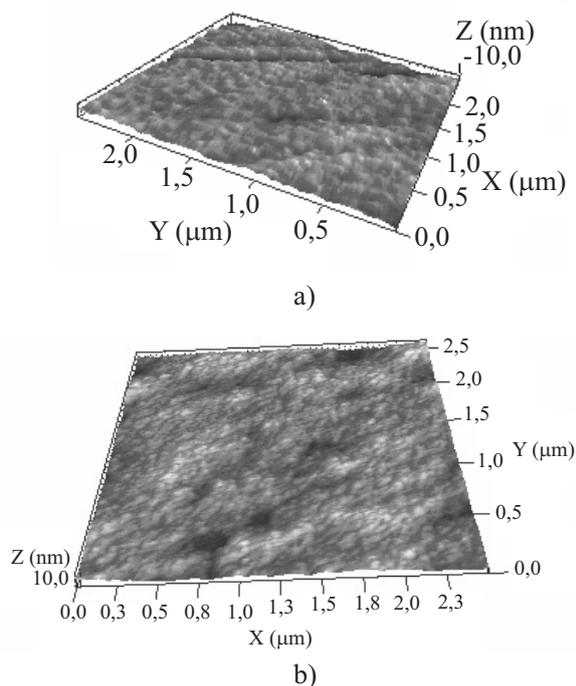
En la figura 1 se observan los difractogramas de ZrN y de TiN, cuyos picos intensos demuestran,

que los recubrimientos depositados son estequiométricos y presentan una alta cristalinidad. Estos recubrimientos presentan una orientación preferencial en el plano (111), el TiN posee además un pico intenso en el plano (220). Lo anterior demuestra que estos recubrimientos crecieron preferencialmente en la dirección (111), donde se obtienen los mayores valores de dureza y módulo de elasticidad [19]. Estos picos se encuentran ligeramente corridos hacia ángulos de difracción mayores con respecto a los picos de difracción del mismo material en polvo, el cual se considera libre de tensiones. El anterior comportamiento es debido a las tensiones compresivas inducidas por el intenso bombardeo con iones de argón a raíz del voltaje Bias aplicado a los sustratos de -100V [20-21]. De igual manera se aprecian los picos de difracción del Ti y del Zr originados por las respectivas monocapas adherentes depositadas previamente con un espesor aproximado de 300 nm.



**Figura 1** Difractograma de rayos X para a) monocapa de TiN y b) monocapa de ZrN depositados sobre silicio

En la figura 2 se observan las imágenes de AFM de una monocapa de TiN y del recubrimiento multicapa de TiN/ZrN con 10 bicapas depositadas sobre sustratos de acero, los recubrimientos presentan una rugosidad de 15 y 18 nm y un tamaño de grano de 107 y 82 nm, respectivamente. El anterior comportamiento es acorde a la reducción del periodo de modulación de las multicapas, el cual tiene un valor aproximado de 400 nm para las diez bicapas, lo cual conduce a una disminución del espesor de las monocapas individuales y con ello a la reducción del tamaño de grano.



**Figura 2** Imágenes de AFM de 2,5 x 2,5 mm<sup>2</sup> a) monocapa de TiN y b) multicapa con 10 bicapas de TiN/ZrN

### ***Propiedades mecánicas y tribológicas de los recubrimientos***

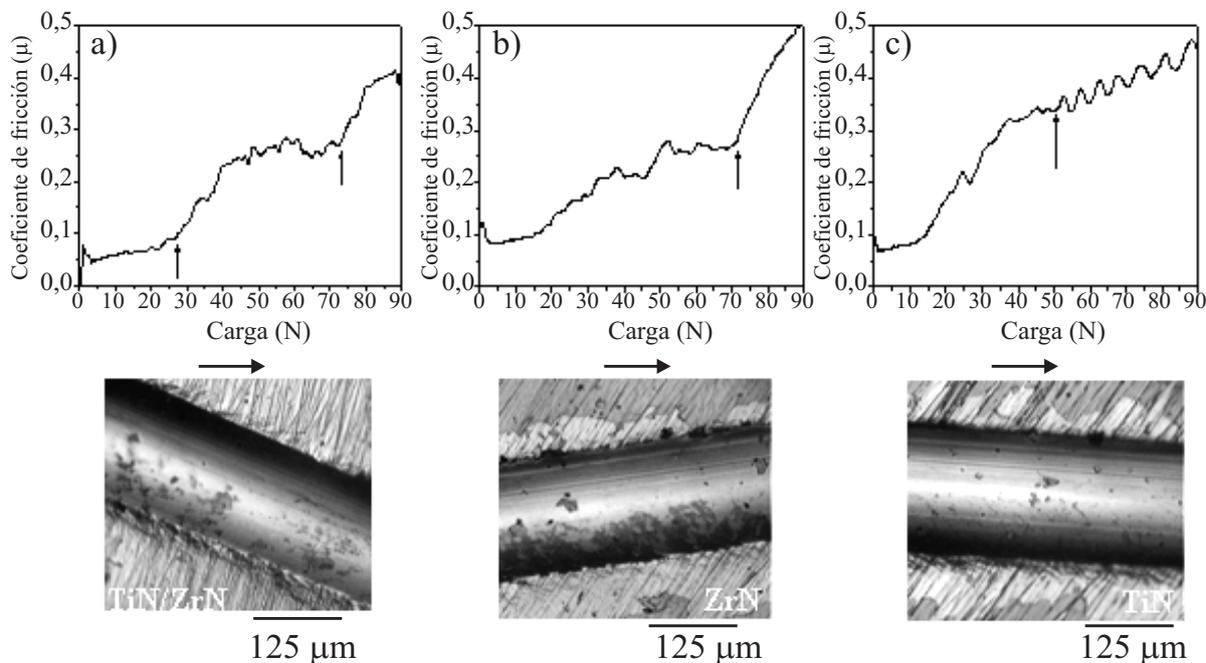
Para conocer la adhesión de los recubrimientos se determinó la carga mínima que produce un fallo durante la prueba de rayado, esta carga se denomina carga crítica para el sistema recubrimiento-sustrato. A partir de los datos suministrados por el

sistema de medida se observa el comportamiento del coeficiente de fricción y donde éste presenta un aumento abrupto sugiere alguna falla del recubrimiento, la cual en este caso puede ser el inicio de agrietamiento alrededor del indentador, desprendimiento de la película o la producción de un canal en el cual todo el recubrimiento ha sido removido.

La figura 3 presenta el comportamiento de los coeficientes de fricción con la carga aplicada para el recubrimiento multicapa TiN/ZrN y los dos recubrimientos monocapa estudiados ZrN y TiN respectivamente. Para los tres recubrimientos al inicio de la prueba los coeficientes de fricción presentan valores alrededor de 0,1 los cuales corresponden al valor de fricción de los recubrimientos cuando son evaluados contra diamante, seguidamente estos valores empiezan a incrementar lentamente en la medida en que avanza el ensayo posiblemente debido a la aparición de las primeras microgrietas, algo típico en los recubrimientos duros y que se asocia a las diferencias de ductilidad entre el recubrimiento y el sustrato, algunos autores llaman este valor carga crítica menor que para el caso de la multicapa sería 28 N como lo señala la flecha en la figura 3a y alrededor de 20 N para los recubrimientos monocapa. En las gráficas de la figura 3 se encuentra señalada con flechas la carga crítica ( $L_c$ ) o carga crítica mayor (para algunos autores) y es donde efectivamente falló la adhesión del recubrimiento, a partir de este valor los coeficientes de fricción exhiben un aumento abrupto debido a que empieza el contacto entre la punta de diamante y el sustrato [22]. Las imágenes (figura 3) muestran el aspecto de las huellas de rayado después de la falla del recubrimiento, las flechas indican el sentido de desplazamiento de la punta de diamante sobre la muestra. El modo de falla a la carga crítica fue muy similar en todos los recubrimientos lo que permite hacer comparaciones con sentido entre las diferentes muestras, en todas las muestras ocurrió desprendimiento del recubrimiento al interior de la huella residual además, en los dos recubrimientos monocapa también hubo

desprendimiento en la zona cercana a la huella, en los tres recubrimientos se observa falla adhesiva. Cuando la punta de rayado entra en contacto con el recubrimiento, este último queda sometido a un esfuerzo tensil transversal a la dirección de desplazamiento de la punta, debido a la carga aplicada ocurre una deformación elasto-plástica en el sistema recubrimiento-sustrato. Una

vez la punta pasa ocurre la recuperación de la deformación en la cual ocurrió, en este caso, agrietamiento a través del recubrimiento a lo largo de la huella, el agrietamiento fue detenido en la interfase debido a que el sustrato es un material más dúctil comparado con el recubrimiento que corresponde a un material frágil como es el caso de los cerámicos.

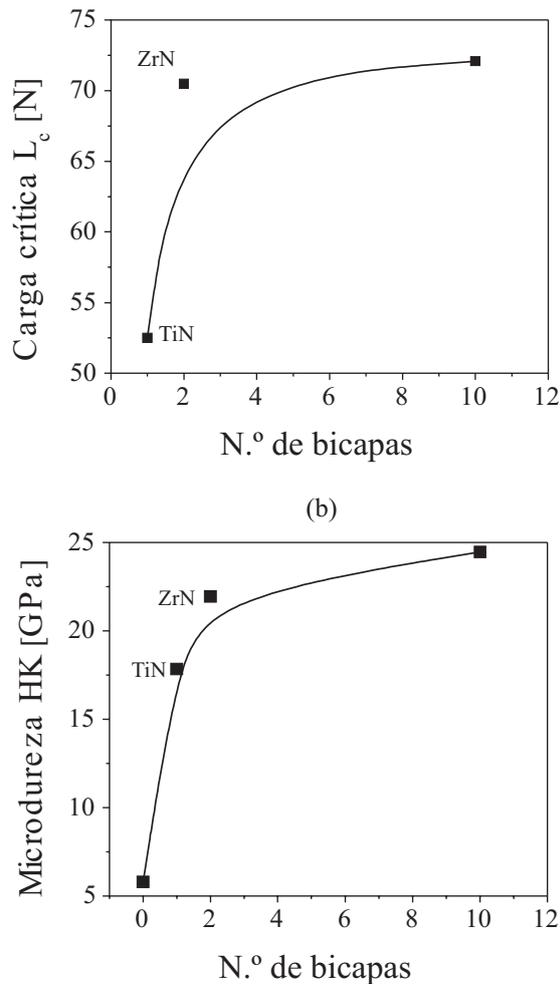


**Figura 3** Coeficientes de fricción vs. carga aplicada durante las pruebas de rayado para a) multicapa TiN/ZrN con 10 bicapas, b) monocapa de ZrN y c) monocapa de TiN

La figura 4 muestra la carga crítica y microdureza de los recubrimientos de TiN (asignada con 1 bicapa), ZrN (asignada con 2 bicapas) y de TiN/ZrN con 10 bicapas depositados sobre las muestras de acero, las cuales fueron determinadas por el método de rayado y microindentación Knoop, respectivamente. La muestra de acero M2 sin recubrir se registró aquí con cero bicapas.

La mayor adherencia de 72,1 N registrada para el sistema TiN/ZrN puede ser explicada en el incremento de la energía de adhesión del sistema, dado a la mayor capacidad de absorber la energía bajo carga externa por el diseño

mismo de las multicapas. En este sentido, la capa adherente de titanio y las multicapas del tenaz TiN pueden absorber, por deformaciones elásticas o elasto-plásticas, un elevado nivel de la energía transferida al sistema por la carga aplicada. De igual manera y como ya se discutió anteriormente, las múltiples interfaces y bordes de grano bloquean el crecimiento y avance de las microgrietas que se forman durante el rayado mejorando la adherencia del recubrimiento [8, 18, 19, 23]. El recubrimiento monocapa de ZrN también mostró una buena adherencia, mientras que la monocapa de TiN mostró la menor adhesión al sustrato.



**Figura 4** a) Carga crítica y b) Microdureza de las muestras recubiertas con TiN, ZrN y TiN/ZrN con 10 bicapas. Como referencia se incluye la dureza del sustrato (asignada con 0 bicapas)

Claramente se aprecia un incremento de la dureza en función del tipo de recubrimiento, pasando de 5,8 GPa para la muestra sin recubrir a 24,5 GPa para el sustrato de acero recubierto con 10 bicapas de TiN/ZrN. La dureza de los recubrimientos depositados en este trabajo se encuentra por debajo de los valores determinados por otros investigadores a través de la nanoindentación, debido a la influencia de la dureza del sustrato por la carga aplicada relativamente elevada. La alta dureza resulta, entre otros factores, por las tensiones inducidas de compresión generadas

por el bombardeo iónico del recubrimiento (voltaje bias), por el tamaño nanométrico de los granos, que conllevan a una mayor densidad de fronteras de grano por unidad de volumen y que inducen a obstaculizar el desplazamiento de las dislocaciones existentes en el recubrimiento. Este es en especial el caso, cuando se depositan películas delgadas o recubrimientos multicapas. Otro factor que contribuye a obstaculizar el movimiento de las dislocaciones es el mayor número de interfaces entre las monocapas, lo que trae como consecuencia un incremento adicional de la dureza [23-25].

En la tabla 1 se pueden observar los diámetros y las profundidades de las huellas dejadas sobre la superficie desgastada de las muestras evaluadas mediante el método de Micro-Calotest. Debido a que en las pruebas de desgaste que se realizan los resultados obtenidos están influenciados por la carga normal aplicada sobre el contacto tribológico, la velocidad del movimiento relativo entre el par en contacto y la distancia total recorrida, en la práctica no es el volumen desgastado el parámetro de interés, sino la tasa de desgaste, este es el parámetro que indica la resistencia que tiene un material al desgaste. En el presente trabajo se determinó la tasa de desgaste de los recubrimientos aplicando la ecuación (1):

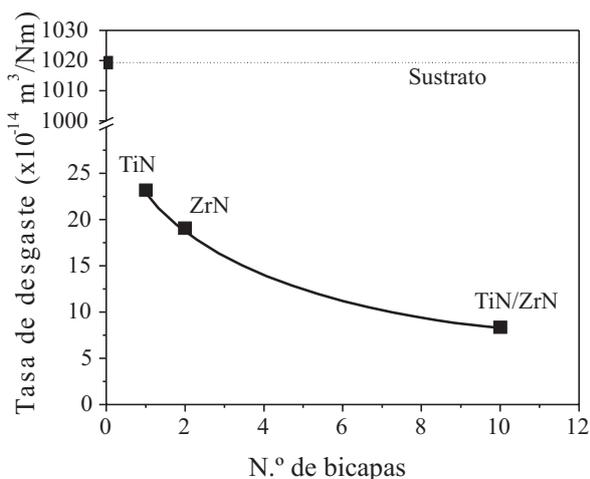
$$k = \frac{V}{Wx} \quad (1)$$

Donde  $k$  es la tasa de desgaste,  $V$  es el volumen de material desgastado,  $W$  es la carga normal aplicada y  $x$  es la distancia total recorrida.

**Tabla 1** Datos obtenidos en la prueba de Microdesgaste por el método de Calotest

Muestra	Diámetro de la huella ( $\mu\text{m}$ )	Profundidad ( $\mu\text{m}$ )	Volumen ( $\mu\text{m}^3$ )
Acero M2	367,78	0,79197	42069,68
TiN	142,95	0,11964	960,16
ZrN	136,09	0,10844	788,78
TiN/ZrN-10	110,79	0,07187	346,49

La figura 5 muestra las tasas de desgaste para los recubrimientos monocapa y para el recubrimiento multicapas. De acuerdo a los valores de la tabla 1 se aprecia un incremento sustancial en la resistencia al desgaste con cualquiera de los recubrimientos respecto a la resistencia mostrada por el sustrato. En la figura 5, sin embargo es evidente que cuando se aplica el recubrimiento multicapa TiN/ZrN con 10 bicapas la tasa de desgaste se reduce a la mitad comparada con los recubrimientos monocapa de TiN y ZrN. Este comportamiento está estrechamente relacionado con el incremento de la dureza de los recubrimientos depositados con 10 bicapas. [10, 12, 26, 27].



**Figura 5** Comportamiento de la tasa de desgaste del recubrimiento multicapas de TiN/ZrN y de las monocapas de TiN y ZrN

### Desempeño del recubrimiento multicapa TiN/ZrN

Los resultados de las pruebas de fresado realizadas en aplicación industrial en un proceso de desbaste se presentan en la tabla 2, y tal como se puede apreciar el volumen de material removido hasta la aparición del primer indicio de desgaste de la herramienta se incrementó considerablemente para las fresas de 10 mm de diámetro recubiertas con el sistema multicapa de TiN/ZrN. El incremento porcentual de la vida útil de la herramienta se ve influenciado aparentemente

por el diámetro de la fresa de acuerdo a dichos resultados. Teniendo en cuenta que los parámetros de corte (velocidad de corte, avance, profundidad) fueron constantes para todos los ensayos, la fuerza de corte se incrementa con el aumento del área de contacto o de la longitud de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, la cual a su vez se incrementa con el diámetro de la fresa de acuerdo a las siguientes ecuaciones [28, 29]:

$$Lc = \frac{1000 \times Q}{p \times f} \quad (2)$$

$$Fc = Ke \times Lc \times b \quad (3)$$

Dónde Lc es la longitud de contacto en mm, Q el volumen removido en cm<sup>3</sup>/min, p es la profundidad de corte en mm, f es el avance en mm/min, Ke es la fuerza de corte específica en N/mm<sup>2</sup>, b es el ancho de contacto en mm y Fc la fuerza de corte total en Newton. La mayor área de contacto asociada a una fuerza de corte mayor explica el menor desgaste y el mayor volumen de viruta removida por la fresa de 10 mm de diámetro en comparación con la de 12 mm. Resultados similares fueron alcanzados por K. Czechowski y colaboradores y Liu Hianhuba y colaboradores . [30, 31].

**Tabla 2** Resultados de las pruebas de desgaste de los recubrimientos de TiN/ZrN con 10 bicapas, realizado a través del fresado de un acero AISI P20

Díámetro de fresa (mm)	Volumen removido sin recubrimiento (cm <sup>3</sup> )	Volumen removido con recubrimiento (cm <sup>3</sup> )	Incremento de la vida útil
10	18,1	31,6	75,0%
12	97,6	130,2	33,3%
Promedio total			54,1%

### Conclusiones

La aplicación de un recubrimiento monocapa de TiN mejora la dureza superficial 3 veces de

un acero AISI M2 endurecido y la resistencia al desgaste en tres órdenes de magnitud, sin embargo de los recubrimientos estudiados esta monocapa mostró las más pobres propiedades seguida de la monocapa de ZrN que presentó mayores valores de dureza, resistencia al desgaste y carga crítica. El recubrimiento multicapa TiN/ZrN con 10 períodos de bicapa mostró el mejor desempeño en las pruebas de laboratorio presentando la mayor carga crítica, una dureza superficial de casi 5 veces superior a la del sustrato y una tasa de desgaste en la escala de  $10^{-14}$  m<sup>3</sup>/Nm, un valor muy bajo comparado con otros recubrimientos duros estudiados en la literatura, mientras que los recubrimientos monocapa presentaron tasas de desgaste en la escala de  $10^{-13}$  m<sup>3</sup>/Nm

Mediante la aplicación de recubrimientos multicapa de TiN/ZrN con 10 bicapas se logró incrementar la dureza y la resistencia al desgaste del acero AISI M2 de tal manera, que los primeros ensayos de fresado sobre una placa de acero AISI P20 en estado bonificado condujeron a un incremento promedio de la vida útil de las fresas de un 54,14 %. En esta medida se abre un espacio importante para la aplicación de dichos recubrimientos en este tipo de herramientas con miras a reducir los costos de mantenimiento y de los tiempos improductivos en los procesos de maquinado. De igual manera se propone continuar con el estudio de la dependencia de la dureza y resistencia al desgaste del acero AISI M2 recubierto con un sistema TiN/ZrN con un mayor número de bicapas, que permita optimizar el periodo de modulación del sistema y de las propiedades antes mencionadas.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al SENA, a COLCIENCIAS, Industrias ESTRA S.A. y a la convocatoria Sostenibilidad de la Universidad de Antioquia por la financiación del proyecto.

### Referencias

1. D. H. Mesa Grajales, A. Sinatora, "El desgaste de materiales, enfrentarlo o dejarlo de lado y asumir los riesgos". *Scientia et Technica*. Vol. 22. 2003. pp 87-91.

2. The Economic Effects of Corrosion and Wear, <http://hts.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles/ACFAA74.pdf>. Consultada el 14 de julio de 2009.
3. G. Zambrano, H. Riascos, P. Prieto, "Multicapas de metal-cerámico-carbono tipo diamante (DLC): un camino para la obtención de recubrimientos superduros". *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* Vol. 27. 2003. pp. 1-30
4. D. Garcia, U. Piratoba, "(Ti,Al)N coatings on AISI 4140 by r.f. sputtering". *DYNA*. Vol. 152. 2007. pp. 181-185.
5. Y. L. Su, T. H. Liu, C. T. Su, J. P. Yur, W. H. Kao, S. H. Yao. "Tribological characteristics and cutting performance of Cr<sub>x</sub>C-coated carbide tools". *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 153-154. 2004. pp. 699-706.
6. Y. L. Su, T. H. Liu, C. T. Su, S. H. Yao, W. H. Kao, K. W. Cheng. "Wear of CrC-coated carbide tools in dry machining". *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 171. 2006. pp. 108-117.
7. O. Salas, K. Kearns, S. Carrera, J. J. Moore. "Tribological behavior of candidate coatings for Al die casting dies". *Surf. Coat. Technol.* Vol. 172. 2003. pp. 117-127.
8. H. C. Barshilia, K. S. Rajam. "Performance evaluation of reactive direct current unbalanced magnetron sputter deposited nanostructured TiN coated high-speed steel drill bits". *Bull. Mater. Sci.* Vol. 30. 2007. pp. 607-614.
9. J. Paulitsch, P. H. Mayrhofer, W. D. Münz, M. Schenkel. "Structure and mechanical properties of CrN/TiN multilayer coatings prepared by a combined HIPIMS/UBMS deposition technique". *Thin Solid Films*. Vol. 517. 2008. pp. 1239-1244.
10. M. Braic, V. Braic, M. Balaceanu, G. Pavelescu, A. Vladescu. "Plasma deposition of alternated TiN/ZrN multilayer hard coatings". *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. Vol. 5. 2003. pp. 1399-1404.
11. E. Martínez, J. Romero, A. Lousa, J. Esteve, "Wear behavior of nanometric CrN/Cr multilayers". *Surf. Coat. Technol.* Vol. 163-164. 2003. pp. 571-577.
12. C. J. Tavares, L. Revouta, B. Almeida, J. Bessa e Sousa, M.F. da Silva, J.C. Soares. "Deposition and characterization of multilayered TiN/ZrN coatings". *Thin Solid Films*. Vol. 317. 1998. pp. 124-128.
13. D. J. Li, F. Liu, M. X. Wang, J. J. Zhang, Q. X. Liu. "Structural and mechanical properties of multilayered gradient CrN/ZrN coatings". *Thin Solid Films*. Vol. 506-507. 2006. pp. 202-206.

14. M. A. Gómez, J. Romero, A. Lousa, J. Esteve. "Tribological performance of chromium/chromium carbide multilayers deposited by r.f. magnetron sputtering". *Surf. Coat. Technol.* Vol. 200. 2005. pp. 1819-1824.
15. S. Ulrich, C. Ziebert, M. Stüber, E. Nold, H. Holleck, M. Göken, E. Schwitzer, P. Schloßmacher. "Correlation between constitution, properties and machining performance of TiN/ZrN multilayers". *Surf. Coat. Technol.* Vol. 188-189. 2004. pp. 331-337.
16. J. C. Caicedo, G. Bejarano, M. E. Gómez, P. Prieto, C. Cortéz, J. Muñoz. "Nanostructured multilayers of TiN/ZrN obtained by magnetron sputtering". *Phys. Stat. Sol. (c)* Vol. 11. 2007. pp. 4127-4133.
17. V. Podgursky, A. Gregor, E. Adoberg, P. KuluProc. "Wear of hard coatings evaluated by means of KaloMax". *Estonian Acad. Sci. Eng.* Vol. 12. 2006. pp. 419-426.
18. S. Lakel, K. Almi, Y. Berriche. "Micro-scale abrasive wear testing of CrNx coatings". *Romanian Reports in Physics.* Vol. 59. 2007. pp. 113-120.
19. P. Lazar, J. Redinger. "Density functional theory applied to VN/TiN multilayers". *Physical Review B.* 76. Vol. 174112. 2007. pp. 1-9.
20. H. C. Barshilia, N. Selvakumar, K. S. Rajam, K. Gopinadhan. "Investigation of interface properties of sputter deposited TiN/CrN superlattices by low angle x-ray reflectivity". *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 41. 2008. pp. 205409-205420.
21. J. J. Zhang, M. X. Wang, J. Yang, Q. X. Liu, D. J. L. "Enhancing mechanical and tribological performance of multilayered CrN/ZrN coatings". *Surf. Coat. Technol.* Vol. 201. 2007. pp. 5186-5189.
22. S. Zhang, D. Sun, Y. Fu, H. Du. "Toughness measurement of thin films: a critical review". *Suf. Coat. Technol.* Vol. 198. 2005. pp. 74-84.
23. Z. J. Liu, P. W. Shum, Y. G. Shen. "Hardening mechanisms of nanocrystalline Ti-Al-N solid solution films". *Thin Solid Films.* Vol. 468. 2004. pp. 161-166.
24. S. Komiya, S. Ono, N. Umezu. "Hardness and grain size relations for thick chromium films deposited by hallow cathode discharge". *Thin Solid Films.* Vol. 45. 1977. pp. 473-479.
25. R. F. Bunshah. "Structure/Property Relationships For Hard Coatings". *Handbook of Hard Coatings.* Ed. Noyes Publications Park Ridge. New Jersey. U.S.A. 2001. pp. 159-165.
26. M. S. Konchady, S. Yarmolenko, D. M. Pai. "Nanoscratch behaviour, structure and nanoindentation of multilayer TiN/CrN coatings". *International Journal of Surface Science and Engineering.* Vol. 2. 2008. pp. 439-456.
27. C. Mendibide, J. Fontaine, P. Steyer, C. Esnouf. "Dry sliding wear model of nanometer scale multilayered TiN/CrN PVD hard coatings". *Tribology Letters.* Vol. 17. 2004. pp. 779-789.
28. Procesos de mecanizado fresado (1) [http://isa.umh.es/ asignaturas/tftm/mecanizado\(3\).pdf](http://isa.umh.es/ asignaturas/tftm/mecanizado(3).pdf). Consultada el 1 de diciembre de 2009.
29. Fresadora <http://es.wikipedia.org/wiki/Fresadora>. Consultada el 1 de diciembre de 2009.
30. K. Czechowski, I. Pofelska-filip, B. Królicka, P. Szlosek, B. Smuk, J. Wszolek, A. Kurlito, J. Kasina. "Effect of nitride nano-scale multilayer coatings on functional properties of composite ceramic cutting inserts". *Bull. Pol. Ac.: Tech.* Vol. 53. 2005. pp. 425-431.
31. L. Jianhua, D. Jianxin, Z. Jinlong. "Wear patterns and mechanisms of ZrN coated tools in machining of hardened steel". *International Journal of Machining and Machinability of Materials.* Vol. 1. 2006. pp. 324-332.