

Aplicación de recubrimientos multicapa para el mejoramiento de la productividad de las empresas

Application of multilayer coatings to improve the companies productivity

Recibido: 03-07-10. Aceptado: 30-11-10

JAIR EUGENIO NIETO¹
LUIS HENRY MORENO CHÁVEZ²
CÉSAR ANDRÉS AMAYA HOYOS³

Resumen

El objetivo del presente trabajo es introducir al lector en el área de los recubrimientos multicapa los cuales se vislumbran como una solución efectiva ante el problema del desgaste de diversas herramientas o dispositivos. Inicialmente se hace una revisión en la cual se muestran las razones que hicieron de los recubrimientos duros algo indispensable en muchos sectores industriales. A continuación se comentará acerca de los sistemas multicapa y sus bondades en cuanto al incremento de sus propiedades mecánicas para finalmente mostrar dos casos reales de aplicación de este tipo de recubrimientos y los resultados obtenidos.

Palabras clave: Deposición física de vapor; pulverización catódica asistida por campos magnéticos; recubrimientos multicapa; tratamiento dúplex; desgaste; propiedades mecánicas.

Abstract

The aim of this paper is introduce the reader to the area of multilayer coatings, which appear as an effective solution to the inherent problem of wear on several tools or devices. Initially we review where it shows the reasons why hard coatings have become indispensable in most industrial sectors. Below is mentioned a little about obtaining multilayer system and its benefits in terms of increasing its mechanical properties, to finally show two cases of actual application of such coatings and the results obtained.

Keywords: Physical vapor deposition; magnetron sputtering; multilayer coatings; duplex treatment; wear; mechanical properties.

Integrantes del grupo GIDEMP, Grupo de Investigación en Desarrollo de materiales y Productos del Centro ASTIN

- ¹ Ingeniero Mecánico – Universidad del Valle. Ms.C(s) Ingeniería con énfasis en Materiales – Universidad del Valle. Profesional Laboratorio de Recubrimientos Duros CDT – ASTIN SENA jenieto@sena.edu.co
- ² Ph.D (s) Ingeniería con énfasis en Materiales – Universidad del Valle. Profesional Laboratorio de Recubrimientos Duros CDT – ASTIN SENA. lhmoreno@sena.edu.co
- ³ Ms.C Ingeniería con énfasis en Materiales – Universidad del Valle. Profesional Laboratorio de Recubrimientos Duros CDT-ASTIN SENA. c_amaya@misena.edu.co

Introducción

Debido a la incursión de países como el nuestro en economías desarrolladas como las de Europa y Estados Unidos, las cuales exigen unos estándares de calidad superiores a los del mercado nacional, los industriales han visto la necesidad de realizar grandes esfuerzos para incrementar la productividad y calidad de sus productos. Ello ha despertado gran interés en la aplicación de nuevos materiales y tratamientos superficiales en los procesos productivos de diversos sectores de la industria nacional. Los materiales de alta dureza son muy importantes en estos procesos ya que se debe tener un control específico en las

variables de trabajo. Para que dichos procesos sean más competitivos y rentables, se deben incorporar variaciones tecnológicas de vanguardia que garanticen grandes tirajes con cortos ciclos de producción, bajos costos de mantenimiento, pocos reprocesos y productos de buena calidad pero respetando siempre las buenas prácticas de trabajo frente a los problemas ambientales. Con base en lo anterior, el mejoramiento de las herramientas de producción y conformado en las industrias metalmeccánica y del plástico es una necesidad urgente, y nuevos materiales, mejores diseños y modernas tecnologías junto con tratamientos de superficie son algunos de los medios para lograr este fin.

Si bien es cierto que la industria siempre ha buscado la reducción del desgaste y la corrosión con el objetivo de mejorar el desempeño de sus herramientas y piezas de maquinarias por medio de técnicas como los tratamientos térmicos y recubrimientos tradicionales (galvanizado, anodizado, cromado y soldadura) conocidas actualmente como técnicas clásicas, han sido los progresos en la ciencia de materiales y en las tecnologías de vacío los que han permitido en las dos últimas décadas el desarrollo de procesos avanzados de recubrimiento.

Para los casos de trabajo exigente se presenta una alternativa de fabricación económica y flexible basada en la deposición de estos materiales en forma de recubrimientos a través de la técnica de la deposición física en fase de vapor (PVD)*, (Raymond, 1996). Estos materiales obtenidos en recubrimientos presentan tamaños de grano del orden de los nanómetros, lo cual disminuye significativamente la cantidad y tamaño de los defectos así como las imperfecciones cristalinas y presenta mejores propiedades físicas y mecánicas. Por esta razón, los recubrimientos duros han sido utilizados en el mejoramiento superficial puesto que permiten un importante incremento en la dureza y en la resistencia al desgaste y a la corrosión, así como una estabilidad química y una excelente resistencia a la abrasión (Rinker y Steinfurt, 1996; Hans, 1998).

En consecuencia, los recubrimientos duros obtenidos por PVD se han hecho indispensables en la mayor parte de los sectores industriales así como en componentes electrónicos, superconductores, industria óptica (lentes y espejos), industria aeronáutica, herramientas de alta dureza, moldes para inyección de plástico, implantes e instrumental médico, entre otros (Dimitrova *et al.*, 2000).

Sin embargo, debido a los diversos requerimientos exigidos para que un material pueda ser usado como recubrimiento protector y proporcione un mejoramiento en las propiedades superficiales de los elementos sobre los cuales

es depositado, se ha concluido que una buena adhesión al sustrato, una alta estabilidad química con el material en contacto y una elevada dureza son los requerimientos fundamentales en un sistema de protección. En este sentido, las estructuras tipo multicapas (deposición secuencial de capas de diferentes materiales) han sido utilizadas por muchos años como variante en la tecnología de los recubrimientos y llevado a la solución de problemas de adhesión, reacción química y tensiones.

Recubrimientos multicapa

Los recubrimientos en forma de multicapas constan de dos o más capas de materiales diferentes que se depositan de forma alternada sobre un sustrato y generalmente de manera periódica. La estructura de un recubrimiento multicapa consiste de capas internas iniciales que están en contacto con el sustrato o material que se va a recubrir denominadas por varios autores como intercapas, capa semilla o capa de acople, las cuales poseen una excelente adhesión al sustrato. Posteriormente se depositan capas alternadas de metales de transición tales como el nitruro de titanio (TiN) y el nitruro de circonio (ZrN), que en general poseen una alta dureza, elevada resistencia mecánica, buena tenacidad, bajo coeficiente de fricción y una excelente estabilidad química, como se puede observar en la Figura 1. El arreglo TiN/ZrN se repite de manera periódica manteniendo el espesor total del recubrimiento (h) constante.

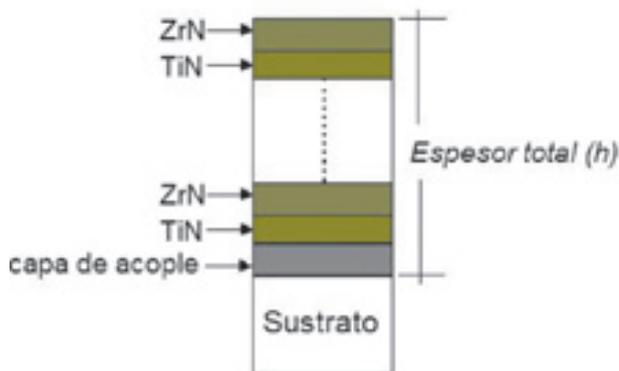


Figura 1. Esquema de un recubrimiento multicapa.

De otro lado, la selección de los materiales que componen la multicapa es muy compleja. Los requerimientos de un sistema sustrato/recubrimiento se muestran en la Figura 2, en la cual se identifican tres subsistemas, cada uno con exigencias muy específicas (Subramanian *et al.*, 1996).

* Del acrónimo en inglés Physical Vapor Deposition



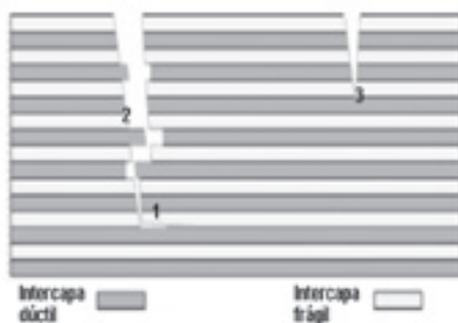
Figura 2. Esquema de un sistema sustrato/recubrimiento multicapa.

El control de la microestructura, la morfología superficial y la evolución de los recubrimientos es muy importante dados el desempeño y tiempo de vida útil de las herramientas recubiertas. El crecimiento de estructuras en multicapa con dimensiones a escala nanométrica ha atraído la atención de la comunidad científica e industrial en los años recientes gracias a su aplicación como protección antidesgaste. Algunos de estos recubrimientos –actualmente llamados heteroestructuras– tales como recubrimientos de capas alternadas de TiN/ZrN, TiN/AlN, TiN/NbN o TiN/VN exhiben una alta dureza (>20 GPa ≈ 2039 HV) y ofrecen potenciales ventajas para la molienda en seco, el taladrado y el torneado. En años recientes recubrimientos duros multicapa a escala nanométrica han mostrado propiedades atractivas contra el desgaste y la corrosión en metales (Bejarano *et al.*, 2005). Las mejoras en las propiedades mecánicas se presentan en la deposición alternada de dos o más capas química o mecánicamente diferentes, de tal forma que la concentración de tensiones y las condiciones para la propagación de nanogrietas pueda ser controlada (Figura 3). Por lo tanto la estructura de multicapas puede actuar como inhibidor de estas nanogrietas además de incrementar la resistencia a la fractura (Carvalho *et al.*, 2003).

La técnica más utilizada en la obtención de recubrimientos multicapa es magnetrón *sputtering* reactivo. Esta técnica permite un buen control de los parámetros de deposición tales como presión, potencia aplicada, temperatura, voltaje de polarización del sustrato y composición del gas durante el proceso de deposición. Los recubrimientos multicapa son generalmente obtenidos utilizando un sistema de pulverización multi-blanco (Bejarano *et al.*, 2007). Por otro lado, es bien conocido que los mecanismos de desgaste en recubrimientos PVD incluyen desprendimiento cohesivo y adhesivo, abrasión, desgaste por fatiga y desgaste por tribo-oxidación, los cuales dependen de las condiciones tribológicas y de las propiedades mecánicas y químicas del recubrimiento.

Entre estas estructuras en multicapa se encuentran los recubrimientos antidesgaste para aplicaciones en procesos de mecanizado (Braic *et al.*, 2003), (Musil, 2000). Alta dureza, buena adhesión al sustrato, alta estabilidad química y bajo coeficiente de fricción hacen de estas estructuras buenas opciones para disminuir el desgaste (Holleck, 1986). En trabajos recientes, la alta dureza y la tenacidad de las capas nanométricas en recubrimientos multicapa han mostrado ventajas adicionales como recubrimientos protectores contra la corrosión y desgaste en herramientas y partes de mecanizado. Algunos de estos sistemas multicapa son llamados superredes, por ejemplo, Zr/ZrN, ZrN/TiN, y TiN/TiAlN, los cuales evidencian durezas por encima de los 30 GPa (aproximadamente 3059 HV) y una mayor eficiencia en el mecanizado de alta velocidad (Holleck, 1986).

Cuando el acero es mecanizado diferentes mecanismos de desgaste toman lugar, tales como abrasión, adhesión, oxidación y difusión. Estos actúan simultáneamente según la temperatura. La abrasión es un fenómeno predominante a bajas velocidades de corte, la adhesión a velocidades medias y la difusión a altas velocidades de corte. Los valores para la velocidad a la cual el máximo valor de desgaste ocurre podrían depender de diferentes factores, tales como



Mecanismos de mejora

1. Desviación de la fractura en la interfase
2. Paso por una capa más dúctil
3. Aumento del radio en la punta de la grieta al llegar a la interfase

Figura 3. Ventaja de un recubrimiento en multicapas. Su estructura dificulta la propagación de grietas.

la combinación de los materiales de la herramienta y la pieza de trabajo, el tiempo de contacto entre ellos y la geometría de la herramienta, entre otros (Guo and Janowski, 2004; Oxley, 1989). Estos avances en la ciencia de superficies permiten generar soluciones efectivas, las cuales redundan en el aumento de vida útil de dispositivos o herramientas en un proceso productivo.

Casos de aplicación

Actualmente el Centro ASTIN del SENA ubicado en la ciudad de Cali, en su laboratorio de recubrimientos duros tiene a disposición de los industriales de la región del Valle del Cauca y del resto del país una planta semi-industrial con la cual ofrece el servicio de recubrimiento de diversas herramientas, piezas, dispositivos y partes de maquinaria propios de las industrias metalmecánica, papelera, de transformación de materiales poliméricos y alimentaria. Este tipo de tecnología funciona desde el año 2003 y su objetivo general es incrementar la eficiencia y la vida útil de las herramientas de producción en serie utilizadas en la transformación de materiales metálicos, poliméricos, cerámicos y compuestos mediante la aplicación de los recubrimientos duros obtenidos por la tecnología de deposición física en fase de vapor (PVD).

Para ello cuenta con un equipo magnetrón *sputtering* multi-blanco que se puede apreciar en la Figura 4.



Figura 4. Planta semi-industrial Laboratorio Recubrimientos Duros CDT ASTIN SENA.

Mediante este equipo el laboratorio ofrece a la industria y a los grupos de investigación del país interesados en esta clase de tecnologías los siguientes recubrimientos en sistemas tipo monocapa y multicapa:

- Nitruro de titanio (TiN)
- Nitruro de circonio (ZrN)
- Nitruro de cromo (CrN)

- Nitruro de boro cúbico (c-BN)
- Carburo de titanio (TiC)
- Carbonitruro de titanio (TiCN)
- Nitruro de titanio aluminio (TiAlN)

En el esquema presentado en la Figura 5, el cual es una vista en corte de la cámara de vacío, podemos observar que el equipo cuenta con cuatro brazos o cañones enfrentados y equidistantes al punto central donde se posiciona la herramienta que se va a recubrir. En este caso se trabaja el ejemplo con un recubrimiento multicapa de TiN/ZrN (nitruro de titanio-nitruro de circonio). Para lograr la deposición alternada de las capas, se posicionan los blancos (discos de 4" de diámetro y espesor de 0.250" de alta pureza) de titanio (Ti) y de circonio (Zr) en cada uno de los cañones superiores. Debido a que el equipo cuenta con un dispositivo llamado *obturador* que consiste en una lámina que cubre la superficie del cañón la cual está sujeta a un eje cuyo movimiento se puede controlar desde el exterior de la cámara de vacío una vez iniciado el proceso de pulverización de los blancos, es posible determinar qué tipo de material se está depositando sobre la herramienta durante un periodo determinado.

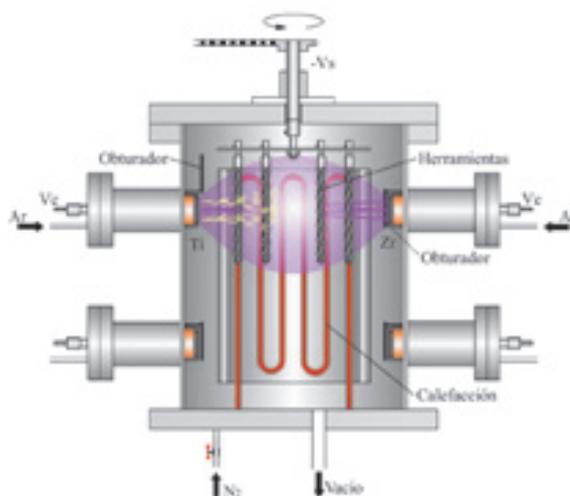


Figura 5. Esquema del proceso de obtención de recubrimientos multicapa de TiN/ZrN en planta semi-industrial del CDT ASTIN SENA.

Teniendo en cuenta esto, en el esquema de la Figura 5 al encontrarse *abierto* el cañón del Ti y *cerrado* el cañón de Zr se estaría depositando una monocapa de TiN, ya que se está trabajando en una atmósfera de argón-nitrógeno. Transcurrido un determinado tiempo, la configuración se invierte cerrando el obturador del cañón de Ti y abriendo el obturador del cañón de Zr con lo cual se obtiene un recubrimiento de ZrN sobre nuestra herramienta. De esta manera coordinando el sistema de apertura y cierre de los

obturadores con el sistema de rotación de la herramienta es posible depositar recubrimientos tipo multicapa de nitruros de metales de transición conservando el espesor total del recubrimiento. Este tipo de recubrimientos han sido aplicados y probados en aplicaciones industriales reales bajo diversos parámetros de procesamiento. A continuación se presentan dos de estos casos: uno en la industria de transformación de material polimérico y el otro en la industria metalmeccánica. Debido a las cláusulas de confidencialidad firmadas entre el centro ASTIN y los clientes no es posible para efectos de esta publicación utilizar el nombre de las empresas en los casos presentados a continuación.

Caso 1: Utilización de recubrimientos multicapa en procesos de transformación de materiales poliméricos

Una prestigiosa empresa de la ciudad de Cali dedicada a la transformación de polímeros por inyección y con su propio taller de fabricación de moldes, produce tapas en polietileno de alta densidad o PEAD para crema dental en un molde de desenroscado automático de múltiples cavidades (dieciséis en total). Los machos están elaborados en acero P20 (DIN 1.2330) y no fueron sometidos a proceso de temple y revenido con el fin de que conservaran una alta tenacidad para soportar las fuerzas de flexión a las que se ven sometidos durante la operación del molde, por tanto su dureza corresponde a la de su estado bonificado. Para producir la expulsión de las tapas una vez se han desenroscado, se hace uso de un casquillo de expulsión elaborado en acero XW-5 (DIN 1.2436) tratado térmicamente y con una dureza de 55 HRC. aproximadamente. Debido a las diferencias en sus durezas, el macho sufre una fuerte abrasión por el movimiento de giro y el deslizamiento relativo respecto al casquillo. Esta es la causa por la cual, tras una semana de producción constante del molde, los machos sufren un alto desgaste en la zona de contacto con el casquillo lo que produce un polvillo negro que es trasladado a las piezas inyectadas y genera rechazo por parte del cliente, puesto que estas tapas hacen parte de un producto higiénico cuya presentación debe ser impecable ante el consumidor. Ante esta situación, la empresa procedió a mejorar la dureza superficial de los machos mediante un tratamiento de nitruración por sales, sin embargo el problema de desgaste continuaba presentándose durante el proceso de inyección. Como medida final, se optó por la aplicación de recubrimientos PVD, para lo cual se realizó una visita técnica a la empresa con el fin de recopilar información acerca de las variables del proceso de inyección que permitiera determinar qué tipo de recubrimiento ofertado por el laboratorio del Centro ASTIN era el más adecuado. Tras un análisis de las diferentes variables involucradas

en el proceso, se propone recubrir los machos nitrurados con un recubrimiento multicapa de TiN/ZrN. Para tal fin tras el proceso de nitrurado, fue necesario la eliminación de la capa de costra que quedó remanente en la superficie de las piezas y por último se sometieron a un proceso de recubrimiento mediante PVD magnetrón *sputtering* multiblanco con el recubrimiento antes mencionado. Imágenes del desgaste del macho nitrurado y el resultado tras ser recubierto se pueden apreciar en la Figura 6.



Figura 6. a) Macho nitrurado que indica zona de desgaste tras proceso de inyección. b) Machos nitrurados recubiertos con sistema multicapa TiN/ZrN.

En la Figura 7 se puede apreciar la diferencia en el desempeño entre los machos sin recubrimiento y los machos sometidos a recubrimiento.



Figura 7. Incremento de vida útil en semanas de machos recubiertos durante proceso de inyección de PEAD. La flecha indica que al momento de corte de la toma de datos, los machos continuaban trabajando sin presentar el problema del polvillo negro generado por el proceso de desgaste.

En este caso la vida útil de los machos se incrementó drásticamente ya que se generó un recubrimiento tipo *dúplex* (combinado con deposición de un recubrimiento PVD para producir una superficie con óptimas propiedades tribológicas). El tratamiento superficial es aplicado antes de la deposición del recubrimiento a fin de incrementar el desempeño de la superficie, usualmente por el incremento de la carga que puede soportar el recubrimiento para evitar el agrietamiento o el desprendimiento bajo carga debido a la deformación de la superficie del sustrato. El objetivo de usar una combinación *dúplex* de un tratamiento superficial y un recubrimiento es por lo tanto proveer un efecto de sinergia tal que el desempeño resultante sea mejor que el que las entidades individuales podrían dar solas (Holmberg y Matthews, 2009). En el presente caso se logró generar un recubrimiento *dúplex no-in situ*, es decir, que

los procesos de nitruración y recubrimiento se realizaron en etapas separadas, lo cual demostró ser efectivo en la disminución del coeficiente de fricción, la tasa de desgaste y un incremento de la dureza superficial de la pieza. En la Figura 8 se presenta un esquema de lo que significa un recubrimiento *dúplex*.

Caso 2: Utilización de recubrimientos multicapa en procesos de mecanizado de metales

Una empresa de amplio reconocimiento nacional, ubicada en la sabana de Bogotá posee un gran parque de maquinaria y herramientas que va desde tornos y fresadoras convencionales hasta tornos y fresadoras CNC de última generación. Debido a los grandes volúmenes de producción que se manejan, las herramientas de corte sufren un alto desgaste a pesar de que son refrigeradas en forma adecuada y de que son utilizados los parámetros recomendados para su uso. Ante esta situación y con el objetivo de aumentar la productividad, disminuir los costos de operación y reducir los tiempos muertos generados por el constante cambio de las herramientas de corte, se llevó a cabo el recubrimiento de algunas de ellas con un recubrimiento multicapas de $B_4C/BCN/c-BN$ (nitruro de boro cúbico) puestas en operación en las mismas condiciones habituales. Imágenes de algunas de las fresas recubiertas se pueden apreciar en la Figura 9.



Figura 9. a) Fresas antes del proceso de recubrimiento. b) Fresas recubiertas con recubrimiento multicapas de $B_4C/BCN/c-BN$



Figura 8. Recubrimiento *dúplex no-in situ* generado en los machos del molde para inyección de polipropileno.

Como resultado de esta evaluación se observó que todas las herramientas tuvieron un mejor desempeño en comparación con el presentado antes de ser recubiertas. Los resultados de este trabajo pueden apreciarse en la Figura 10.

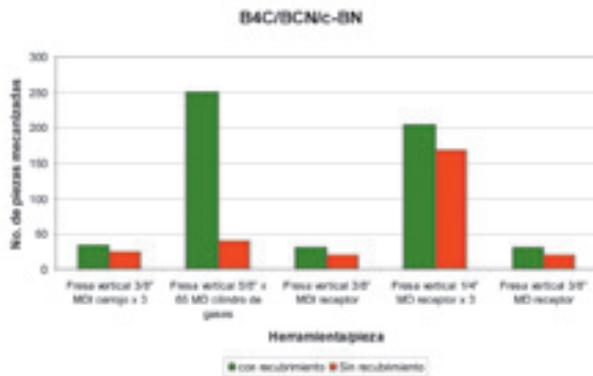


Figura 10. Desempeño de fresas recubiertas y sin recubrimiento durante proceso de mecanizado.

Como puede observarse en la gráfica, el desempeño de las fresas no fue homogéneo pues mientras unas obtuvieron mejoras de hasta un 500% otras solo alcanzaron una mejora en su vida útil del 21,4%. Lo anterior fue analizado en conjunto con el personal de la empresa y se llegó a la conclusión de que el proceso de afilado al que habían sido sometidas no había sido el mejor, lo cual influyó drásticamente sobre los resultados obtenidos. Como conclusión, además de la evidente mejora presentada en la productividad conseguida con el uso de recubrimiento en sus piezas, se tiene que el proceso de afilado de las herramientas de corte es un punto muy importante en su desempeño, lo cual ha sido demostrado ya a través de investigaciones realizadas a nivel mundial.

Conclusiones

Los recubrimientos multicapa de metales de transición, surgen como una solución real y efectiva ante los diversos problemas de desgaste que se presentan en sectores productivos, tales como el metalmecánico y de la transformación del plástico, y logran porcentajes de mejoras considerables que se traducen en ahorro de dinero por disminución de tiempos muertos durante el proceso. Esto es posible gracias a las propiedades mecánicas sobresalientes de este tipo de recubrimientos, producto de diversos mecanismos que

solo tienen lugar en estructuras de capas alternadas de diversos materiales.

Fue posible recubrir piezas con tratamiento superficial previo de nitrurado con un sistema de recubrimiento multicapa el cual no presentó problemas de adherencia. Esto representó una mejora considerable en el desempeño de las piezas durante el servicio, lo cual abre la posibilidad de utilizar recubrimientos tipo dúplex aun si estos no son desarrollados de forma secuencial al interior de la cámara, proceso que permitiría abarcar diversos sectores industriales enfrentados a problemas de desgaste.

Referencias

- BEJARANO, G.; CAICEDO, J. M.; PRIETO, P.; BALOGH, A. G. and ENDERS, S. *En*: Thin Solid Films. 494 (2005); p. 53-57
- BEJARANO, J. G.; CAICEDO, J. C.; ADAM; BALOGH, G. and GOTTSCHALK, S. *En*: Phys. stat. sol. (c) 4, No. 11 (2007); p. 4260-4266
- BRAIC, M. *et al.* Plasma deposition of alternate TiN/ZrN multilayer hard coatings. *En*: Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 5, No. 5 (2003); p. 1399-1404
- BRAIC, M., BRAIC, V., BALACEANU, M., PAVELESCU, G. and VLADESCU, A. Plasma Deposition of Alternate TiN/ZrN Multilayer Hard Coatings. *En*: Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. Vol. 5 (2003); p. 1399 - 1404
- CARVALHO, N. J. *et al.* *En*: Thin Solid Films. 429 (2003); p. 179-189
- DIMITROVA, V. *et al.* *En*: Surface and Coatings Technology. 123 (2000); p. 12-16
- GUO, Y. B. and JANOWSKI, G. M. Microstructural characterization of white layers formed during hard turning and grinding. *En*: Transactions of NAMRI/SME. Vol. 32 (2004); p. 367-374
- HANS, J. *En*: Geschichte Altamerikas. Vol. 9 (1998); p. 39-40
- HOLLECK, H. Material selection for hard coatings. *En*: J. Vac. Sci. Technol. Vol. 4 (1986) p. 2661-2666.
- HOLMBERG, K. and MATTHEWS, A. Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering (Tribology and Interface Engineering). Coatings Tribology, Vol. 56, Second Edition. Elsevier Science, 2009
- MUSIL, J. Hard and superhard nanocomposite coatings. *En*: Surf. Coat. Technol. Vol.125 (2000); p. 322-327
- OXLEY, P. L. B. The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability. Chichester, England: Ellis Horwood, 1989
- RAYMOND, K. Ceramics ease up the machining of high - hardness parts. *En*: American Machinist. Vol. 140 (1996); p. 36-39
- RINKER, U. and STEINFURT, C. *En*: European Production Engineering. Vol. 20 (1996); p. 12-14
- SUBRAMANIAN, C.; STRAFFORD, K.; WILKS, T.; WARD, L. and MATER. *En*: J. Proc. Technol. vol. 56 (1996); p. 385