

# ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS RADIALES Y COMPORTAMIENTO PLÁSTICO DE SISTEMAS RECUBIERTOS (PELICULAS DELGADAS RESISTENTES AL DESGASTE/SUSTRATOS DE ALUMINIO) EN UN ENSAYO DE INDENTACIÓN

## RESUMEN

En este trabajo se estudian los esfuerzos de contacto y la deformación plástica desarrollada en un ensayo de indentación de un sistema recubierto compuesto por una película delgada resistente al desgaste y un sustrato de aluminio. El análisis se basa en simulaciones utilizando el método de los elementos finitos (MEF).

Los resultados fueron analizados con base en la acumulación de material "pile-up" en los bordes de la indentación, cuya altura demostró ser de importancia en el comportamiento de los esfuerzos de contacto. Sin embargo, no fue posible establecer una clara relación entre la deformación equivalente del sustrato y la altura del "pile-up"

**PALABRAS CLAVES:** Sistemas recubiertos, Elementos finitos, Indentación, Esfuerzos de contacto, pile-up

## ABSTRACT

*This work was developed to study the contact stress fields and the plastic strain obtained when the indentation test is conducted on a coated system (wear resistant thin film/aluminium substrate). The analysis was obtained using the finite element method (FEM).*

*The results were analyzed in base to the amount of pile-up material in the indentation edge. The pile-up height evidence the importance in the contact stresses behaviour, however, a direct correlation between the amount of substrate plastic deformation and pile up height was not possible*

**KEYWORDS:** Coated systems, Finite elements, Indentation test, Contact stresses, Pile-up

## 1. INTRODUCCIÓN

La obtención de sistemas recubiertos mediante la deposición de películas delgadas resistentes al desgaste sobre materiales dúctiles es un método bastante utilizado para el mejoramiento tribológico (fricción, desgaste, lubricación) de algunos componentes de la industria metal mecánica [1].

Un método bastante simple para la evaluación del comportamiento mecánico de estos sistemas es el ensayo de indentación [2-15]. Durante este ensayo son desarrollados campos de esfuerzos y deformaciones, los cuales causan la falla por fractura, bien sea adhesiva o cohesiva de estos sistemas. Para el estudio de estos fenómenos en los sistemas recubiertos ha sido bastante utilizado el método de los elementos finitos [10,12,13-15], principalmente en los sistemas compuestos por películas delgadas de materiales con comportamiento elástico y sustratos de materiales con comportamiento elasto-plástico.

Fecha de Recepción: 26 Enero de 2006  
Fecha de Aceptación: 07 Abril de 2006

## EDUARDO A. PÉREZ RUIZ

Ingeniero Mecánico, MSc.  
Programa de Ingeniería Mecánica  
Universidad de Ibagué, Colombia  
epr@nevado.cui.edu.co

## ROBERTO MARTINS DE SOUZA

Engenheiro Mecânico, Ph.D.  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo, Brasil  
robertosouza@poli.usp.br

## IVAN NEGRIN HERNANDEZ

Ingeniero Mecánico, Ph.D.  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Universidad de las Villas, Cuba  
linegrin@uclv.edu.cu

El objetivo de este trabajo es profundizar en el entendimiento del comportamiento mecánico de los sistemas recubiertos con películas delgadas resistentes al desgaste depositadas sobre sustratos dúctiles. Específicamente se busca entender la relación entre la deformación plástica del sustrato y el comportamiento mecánico del conjunto. Para esto, en este trabajo, se simula la indentación utilizando el método de los elementos finitos (MEF), a través del software comercial ABAQUS, en donde se consideraran desde una hasta cinco indentaciones de una esfera sobre el sistema recubierto.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Las simulaciones del ensayo de indentación se realizaron utilizando el software para análisis de elementos finitos ABAQUS, para esto fue utilizada la malla axisimétrica

presentada en la figura 1, la cual considera un sistema compuesto por un sustrato y una película delgada.

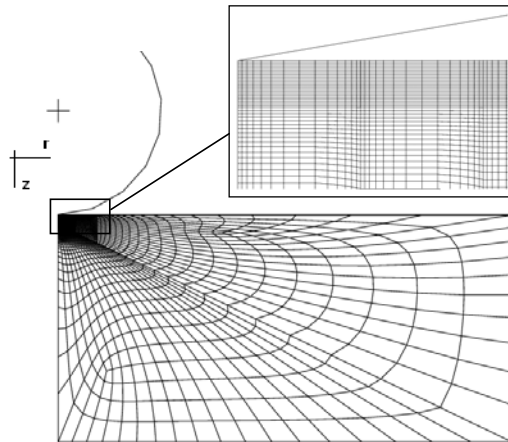


Figura 1. Malla axisimétrica del sistema sustrato/recubrimiento utilizada en la simulación por elementos finitos

En todas las simulaciones el material del sustrato fue considerado con características elasto-plásticas y el material de la película delgada con comportamiento elástico. Las propiedades mecánicas y térmicas de los componentes se presentan en la Tabla 1, en donde  $E$  es el módulo elástico,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson y  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación térmica.

Los valores utilizados para esfuerzo de fluencia ( $\sigma_v$ ) hacen referencia a dos condiciones plásticas en las que se simuló el sustrato. El aluminio AA6061 super envejecido y en la condición de tratamiento térmico AA6061-T6. Las características plásticas en cada uno de estos casos fueron obtenidas en ensayos de tracción realizados a estos materiales [6].

Película	Sustrato (Aluminio AA 6061)
<b>Propiedades Elásticas</b>	<b>Propiedades Elasto-Plásticas</b>
$E = 280 \text{ GPa}$	$E = 68.9 \text{ GPa}$
$\nu = 0.3$	$\nu = 0.33$
-	Esfuerzo de Fluencia* $\sigma_v = 110 \text{ MPa}^\dagger; 295 \text{ MPa}^\ddagger$
<b>Propiedades Térmicas</b>	<b>Propiedades Térmicas</b>
$\alpha = 9.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$\alpha = 23.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

\*Propiedades plásticas obtenidas en ensayo de tracción [6]  
 $^\dagger$ Valor del esfuerzo de fluencia para AA6061 super envejecido  
 $^\ddagger$ Valor del esfuerzo de fluencia para AA6061 en condición T6

Tabla 1. Características de los materiales del sistema recubierto

En la metodología desarrollada se implementan diferentes pasos de simulación. Inicialmente fueron impuestos valores de esfuerzos biaxiales compresivos de 1 GPa en el recubrimiento, con el fin de considerar los esfuerzos intrínsecos que resultan del proceso de deposición. Estos valores son compatibles con los

obtenidos en los procesos de deposición PVD [16]. En el segundo paso de simulación fueron consideradas tensiones térmicas, como resultado del enfriamiento desde los 498 K hasta los 298 K, debido a la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica del recubrimiento y el del sustrato [6]. En el tercer paso de simulación fue considerada una carga normal aplicada a un nodo de referencia del indentador, el cual fue considerado siempre como rígido.

En los estudios de indentación repetida el tercer paso fue repetido hasta alcanzar cinco indentaciones sobre el mismo punto.

La Tabla 2 presenta los parámetros utilizados durante las simulaciones de elementos finitos (MEF)

Parámetros	Simulación 1	Simulación 2
<b>Película</b>		
Espesor ( $\mu\text{m}$ )	2,1	2,1
Esfuerzos residuales (GPa)	1	1
<b>Sustrato</b>	AA 6061-T6	AA 6061
Diámetro del Indentador (mm)	1,59;3,18;6,35	1,59;3,18;6,35
Carga normal (N)	196,1; 294,2; 490,3	196,1; 294,2; 490,3
Coefficiente de fricción Indentador/Sistema	0,3	0,3
Número de Indentaciones	1	1;2;5

Tabla 2. Parámetros utilizados en las simulaciones

### 3. RESULTADOS

La figura 2 presenta el resultado de la distribución de los esfuerzos radiales a lo largo de la superficie de la película delgada, calculados en función de la distancia ( $r$ ) a partir del eje de simetría. En la figura es posible observar que cargas normales altas generan esfuerzos radiales altos. Similarmente, se observa una alta influencia del diámetro del indentador sobre los esfuerzos generados. Como se esperaba entre mayor el diámetro del indentador utilizado, menor es el valor del esfuerzo radial.

La figura 3 presenta detalles de los desplazamientos en la dirección axial ( $u_z$ ) de los nodos localizados a lo largo de la superficie. En esta figura es posible observar la presencia de apilamiento del material (pile-up) a lo largo del borde de la indentación. De la misma forma, es posible observar que pile-ups de menor altura fueron obtenidos cuando fue considerado un indentador de mayor diámetro. (Figura 3a,b). Adicionalmente, la carga demuestra ser un factor determinante con respecto a la altura de pile-up obtenido (Figura 3c,d).

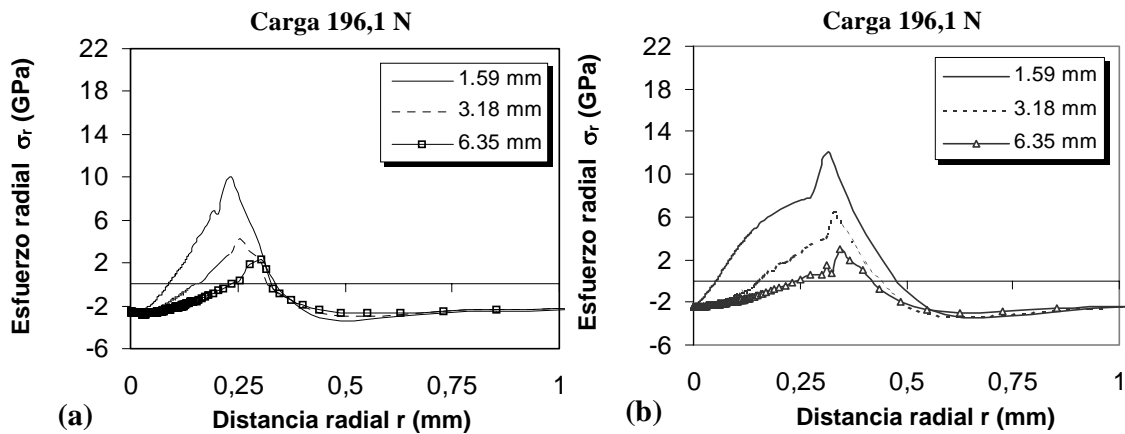


Figura 2. Distribución de los valores de esfuerzo radial. Valores calculados a lo largo de la superficie de la película bajo condición de máxima carga aplicada. (a) Sistema Película/AA 6061-T6; (b) Sistema Película/AA 6061

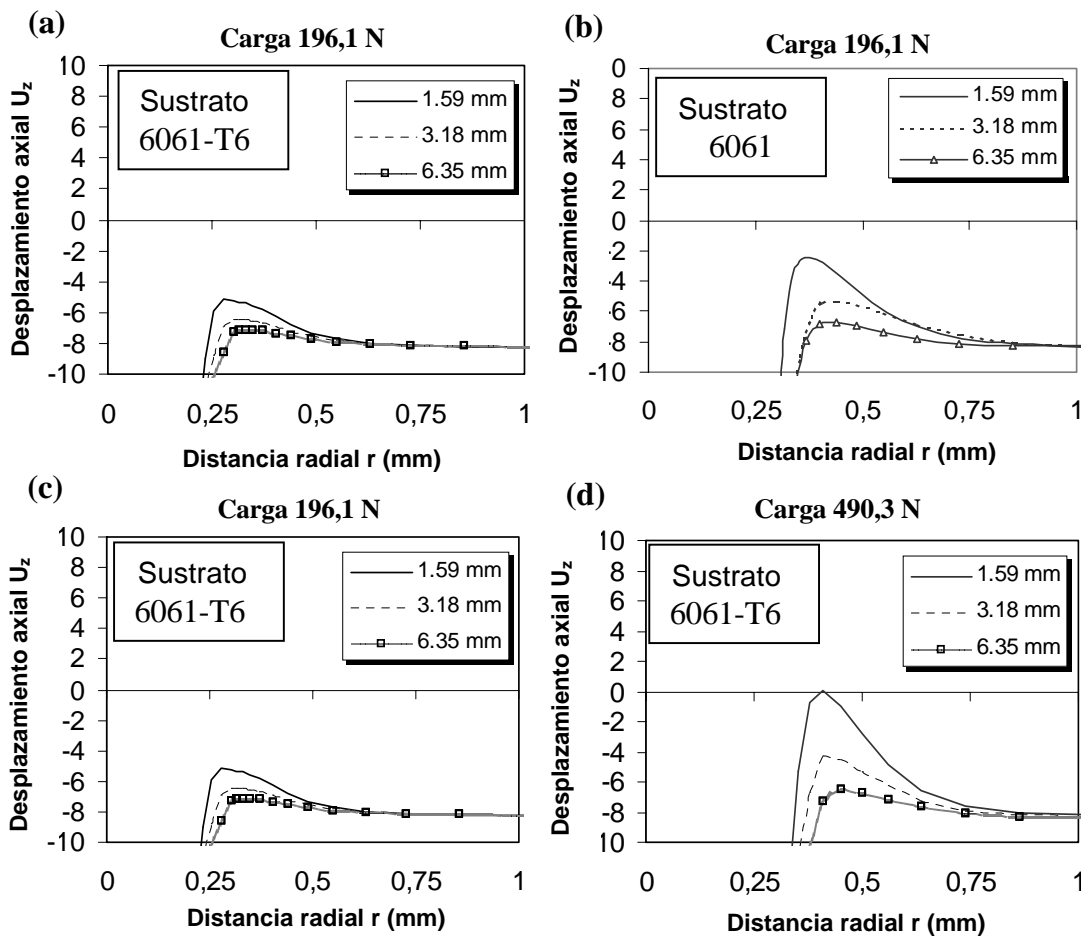


Figura 3. Desplazamiento en la dirección axial ( $u_z$ ). Valores calculados a lo largo de la superficie de la película. (a,b) Influencia del diámetro del indentador para diferentes condiciones plásticas del sustrato. (c,d) Influencia de la carga aplicada al sistema con el mismo sustrato.

La figura 4, presenta el comportamiento de la deformación plástica equivalente ( $\epsilon_p$ ) en la interface película/sustrato. Estos resultados hacen referencia a los nodos localizados en el sustrato en la parte de la interface

con la película. En esta figura es posible observar que se obtienen bajos niveles de deformación plástica cuando se usan mayores diámetros de indentador.

La figura 5 presenta los resultados de la deformación plástica equivalente calculada para los nodos del sustrato en la interface (película/sustrato) después de la simulación de una, dos y cinco indentaciones. En la figura es posible observar que en este caso la deformación plástica equivalente del sustrato aumentó a medida que aumentó el número de ciclos de indentación, especialmente en regiones próximas a los bordes

( $r \approx 0,27\text{mm}$ ). Adicionalmente las simulaciones indican que a pesar de la disminución en el valor de los esfuerzos en función con el número de indentaciones realizadas, el valor de los esfuerzos en el borde del contacto indentador-sistema recubierto tuvo una variación poco significativa. Este comportamiento se observa en la figura 5d.

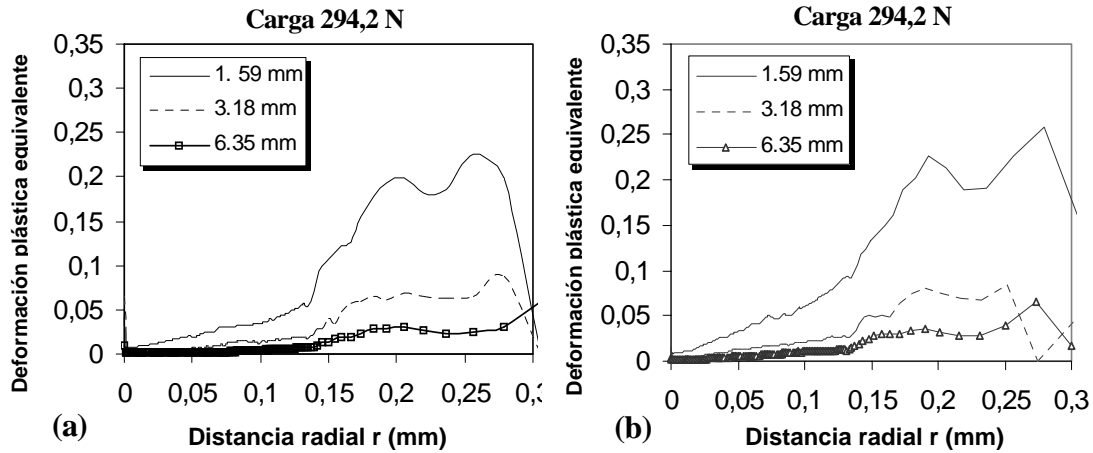


Figura 4. Deformación plástica equivalente. Valores calculados en los nodos localizados a lo largo de la interface película/sustrato. (a) Sistema Película/AA6061-T6; (b) Sistema Película/AA6061

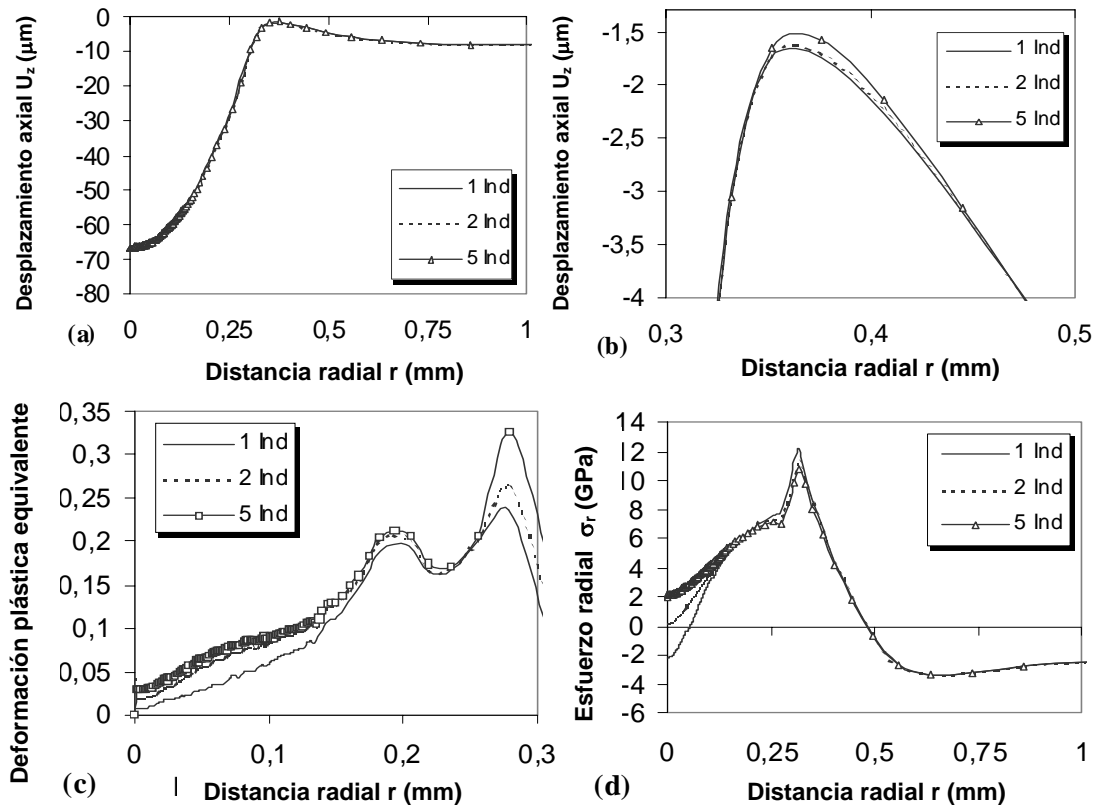


Figura 5. Resultados de repetidas indentaciones en el mismo punto. (a) Desplazamiento en la dirección axial de los nodos a lo largo de la superficie del sustrato; (b) Detalle de los pile-ups; (c) Deformación plástica equivalente; (d) Distribución del esfuerzo radial a lo largo de la superficie de la película.

#### 4. DISCUSIÓN

La distribución de los esfuerzos radiales a lo largo de la superficie de la película depositada es un parámetro importante en los esfuerzos de contacto desarrollados durante la indentación de los sistemas recubiertos. Comúnmente los picos de esfuerzo radial (Figura 2) están asociados con la curvatura o doblez de la película en la región alrededor del contacto. Este doblez debe resultar en esfuerzos radiales de tracción en la superficie de la película y de compresión en la interface del sistema [6].

Podría esperarse que un factor representativo de la amplitud de doblez experimentado por la película en los bordes de la indentación, sea el pile-up obtenido, ya que según algunos investigadores [12], este fenómeno se debe a la deformación plástica del sustrato.

Es interesante observar, como los resultados obtenidos en las simulaciones de la altura del pile-up (Figura 3) presentan una buena correlación con el comportamiento de los esfuerzos radiales (Figura 2) obtenidos en los bordes de la indentación. Sin embargo, al comparar los resultados de la deformación plástica (Figura 4) con los resultados de la altura del pile-up (Figura 3) se aprecia que la distribución de la deformación plástica equivalente del sustrato presenta poca variación en sus valores ante la misma carga de indentación. Relación que no se conserva con los pile-ups. De esta forma, parece no existe una directa relación entre la deformación plástica equivalente en la interface del sistema y los esfuerzos de contacto radiales generados en la superficie de la película como consecuencia del doblez de esta, ante la formación del pile-up.

Un aspecto importante en las simulaciones de repetidas indentaciones, tiene que ver con el comportamiento de la deformación plástica equivalente (Figura 5c), la cual presentó variaciones en sus valores en función del aumento del número de indentaciones realizadas. Estas variaciones fueron particularmente percibidas entre la primera y la segunda indentación y se distribuyen a lo largo de la cavidad de indentación.

#### 5. CONCLUSIONES

En el estudio de los sistemas recubiertos sometidos a ensayo de indentación los resultados indicaron la alta importancia que tiene el fenómeno de apilamiento del material (pile-up) en los bordes de la indentación con respecto a la tendencia a la falla que presenta el sistema.

Los resultados indicaron una dependencia entre la altura del pile-up con respecto a los parámetros de indentación (carga aplicada y diámetro de indentador). Es así como altas cargas y pequeños diámetros condujeron a la obtención de altos picos de esfuerzos radiales en los bordes de la indentación, así como altos valores de pile-up.

Sin embargo, los análisis por elementos finitos no permitieron una clara correlación entre la deformación plástica equivalente del sustrato ( $\epsilon_p$ ) y la altura del pile-up.

De otro lado, cuando el sistema recubierto fue sometido a varios ciclos de indentación, los resultados indicaron que un bajo número de indentaciones no genera diferencias de gran significado en el valor de los esfuerzos radiales desarrollados en la superficie de la película. Los resultados permiten establecer que la mayor propagación de defectos (grietas) en la superficie de la película depositada en un sistema recubierto debe ocurrir en la primera indentación y que el comportamiento durante los siguientes ciclos debe ser predominantemente elástico.

#### 6. AGRADECIMIENTOS

Al Laboratório de Fenomenos de Superficie LFS de la Escola Politécnica de la Universidade de São Paulo, Brasil y a la Fundación de Amparo a la Investigación del estado de São Paulo (Proceso 01/10864-5)

#### 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. HOLMBERG, A. Matthews, H. Ronkainen., *Coatings Tribology*, Tribology International Vol.31 (1998) 107-120
- [2] F.R. BROTZEN, *Mechanical Testing of Thin Films*, Int. Mat. Review., Vol 39 (1994) 24-45
- [3] E. WEPPELMANN, M.V. Swain, *Investigation of the stresses and stress intensity factors responsible for fracture of thin protective films during ultra-micro indentation tests with spherical indenters*, Thin Solid Films., Vol. 286 (1996) 111-121
- [4] N. HUBER, CH. Tsakmakis, *A finite element analysis of the effect of hardening rules on the indentation test*, J. Eng. Mat and Technol., Vol. 120 (1998) 143-148
- [5] A. BOLSHAKOV, G.M. Pharr, *Inluences of Pileup on the Measurement of Machanical Properties by Load and Depth Sensing Indentation Techniques*, J. Mater. Res., Vol. 13 (1998) 1049-1058
- [6] R.M. SOUZA, *Finite Element Modeling of contact stresses during the indentation of wear resistant coatings on soft substrates*, PhD Thesis, Colorado School of Mines, (1999)
- [7] A. ABDUL-BAQI, E. Vander Giessen, *Numerical analysis of indenttion-induced cracking of brittle coatings on ductile substrates*, Int. J. Solids Struct., Vol. 39 (2002) 1427-1442

- [8] S.V. HAINSWORTH, W.C. Soh, *The effect on the substrate on the mechanical properties of TiN coatings*, Surf. Coat. Technol. Vol. 163-164 (2003) 515-520
- [9] S. SIMUNKOVÁ, O. Bláhová, I. Stepánek, *Mechanical properties of thin film-substrate systems*, J. Mat. Process. Technol. Vol. 133 (2003) 189-194
- [10] L. GAN, B. Ben-Nissan, A. Ben-David, *Modelling and finite element analysis of ultra-microhardness indentation of thin films*, Thin Solid Films., Vol. 290-291 (1996) 362-366
- [11] K.J. MA, A. Bloyce, T. Bell, *Examination of mechanical properties and failure mechanisms of TiN and Ti-TiN multilayer coatings*, Surf. Coat. Technol., Vol. 76-77 (1995) 297-302
- [12] N.B. THOMSEN, A.C. Fisher-Cripps, M.V. Swain, *Crack formation mechanisms during micro and macro indentation of diamond-like carbon coatings on elastic-plastic substrates*, Thin Solid Films., Vol. 332 (1998) 180-184
- [13] R.M. SOUZA, G.G.W. Mustoe, J.J. Moore, *Finite element modeling of the stresses, fracture and delamination during the indentation of hard elastic films on elastic-plastic soft substrates*, Thin Solid Films., Vol. 392 (2001) 65-74
- [14] R.M. SOUZA, A. Sinatora, G.G.W. Mustoe, J.J. Moore, *Numerical and experimental study of the circular cracks observed at the contact edges of the indentations of coated systems with soft substrates*, Wear., Vol. 251 (2001) 1337-1346
- [15] E.A. PÉREZ R, R.M. Souza, *Finite element analysis on the effect of indenter diameter and load on the contact stresses during indentation of coated systems*, J. of Meta and Nano Mat., Vol. 20-21 (2003) 763-768
- [16] H. OETTEL, R. Wiedemann, *Residual stresses in PVD hard coatings*, Surf. Coat. Technol., Vol. 76-77 (1995) 265-273