

# Comportamiento tribológico de los recubrimientos nanocristalinos de CrC-NiCr obtenidos por proyección térmica HVOF

A. IGARTUA<sup>1</sup>, G. MENDOZA<sup>1</sup>, A. FORN<sup>2</sup>, J.A. PICAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Tecnológico Fundación TEKNIKER .20600 Eibar, Spain

<sup>2</sup> Universitat Politècnica Catalunya . Vilanova i la Geltru, 8800, Spain

Una de las características más importantes de los recubrimientos de proyección térmica HVOF es su resistencia al desgaste. En este proyecto, se han investigado las características del recubrimiento nanocristalino de CrC-NiCr y su efecto en las propiedades mecánicas y tribológicas del material. De acuerdo con los ensayos realizados, los recubrimientos nanocristalinos CrC-NiCr proporcionan una rugosidad un 66% menor, que los recubrimientos estándar, lo que produce una importante mejora en las propiedades de fricción (reducción coeficiente de fricción del 38%) y desgaste (reducción del desgaste del 84%).

**Palabras clave:** Proyección térmica HVOF, recubrimientos de CrC-NiCr, Microdureza, Tribología

## Tribological behaviour of HVOF thermal sprayed nanocrystalline CrC-NiCr coatings

One of the most important uses of HVOF thermal plasma spray coatings is for wear resistance. In this work, the characteristics of nanocrystalline CrC-NiCr coating and their effect on the mechanical properties and tribological behaviour of the material have been investigated. The objective of this study is the replacement of hazardous hard chromium plating technology used today in industry for an efficient and clean HVOF technology, using micro and nanocrystalline CrC-NiCr coatings. Commercially available CrC-NiCr powder was mechanically treated, in order to obtain nano powders. Later the HVOF thermal spray process was used to produce conventional and nanocrystalline CrC-NiCr coatings. The ultra-microindentation technique was applied to evaluate the grain size effect in the hardness and the elasto-plastic properties of the coating. Difference in roughness has been determined by profilometry. The coating microstructures were characterised by SEM and optical microscopy and the porosity percentage was determined by Image Analysis technique. In order to evaluate the friction and wear properties of different substrate materials a reciprocating sliding motion has been used. CrC-NiCr standard coatings shows better tribological properties than WC-CoCr coatings.

**Keywords:** HVOF Thermal Spraying, CrC-NiCr coatings, Microhardness, Tribology.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los recubrimientos por proyección térmica de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr se están empleando para mejorar la resistencia al desgaste y disminuir el coeficiente de fricción entre diferentes componentes en la industria de automoción (1, 2, 3). Por otro lado, estos recubrimientos pueden ser una alternativa a los recubrimientos electrolíticos de cromo duro empleados actualmente en la industria. El empleo de recubrimientos Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr asegura la eliminación de Cr (VI) empleado en los procesos galvanicos, lo que supone beneficios para el medio ambiente y para la salud.

La velocidad hipersónica del proceso HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) conjuntamente con su temperatura relativamente baja permite conservar las características nanocristalinas en el recubrimiento. Además, la alta energía cinética adquirida por las partículas del polvo asegura una buena cohesión en el recubrimiento y permite producir recubrimientos basados en carburos con una mínima porosidad (4).

El objetivo de este estudio es caracterizar el comportamiento mecánico y resistencia al desgaste de los recubrimientos HVOF de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr, obtenidos a partir de nanocomposites de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr sinterizados, con la finalidad de aumentar el tiempo de vida de los materiales recubiertos.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales estudiados en este trabajo han sido los recubrimientos de Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 75% + NiCr20 25% en peso y Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub> 60% + NiCr20 40% en peso depositados, empleando el proceso de proyección térmica

HVOF, en un sustrato de acero con un espesor de aproximadamente 30 µm. Los polvos utilizados fueron polvos comerciales (2075-NiCr y 2060-NiCr) producidos por Woka (Alemania). Con la finalidad de obtener polvo nanocristalino, el polvo comercial fue triturado, aglomerado, sinterizado y densificado (las condiciones exactas del proceso de producción del polvo son propiedad de la compañía Woka).

Para proyectar los polvos de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr, se empleó una pistola C-CJS HVOF con una configuración de boquilla k5.2 (Thermico, Alemania). Los parámetros de proyección empleados para producir el recubrimiento en un sustrato de acero están resumidos en la *tabla I*.

TABLA I: PARÁMETROS DE PROYECCIÓN PARA PRODUCIR LOS RECUBRIMIENTOS Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr

Flujo de combustible (Keroseno)	12 l/h
Flujo de Hidrógeno	6 m <sup>3</sup> /h
Flujo de Oxígeno	45 m <sup>3</sup> /h
Caudal de N <sub>2</sub> (gas portador del polvo)	0.8 m <sup>3</sup> /h
Velocidad de alimentación del polvo	4 kg/h
Eficiencia de deposición	52%
Densidad	6.6 gr/cm <sup>3</sup>

La morfología del polvo y la microestructura del recubrimiento se examinaron empleando un microscopio electrónico de barrido (SEM). Las características mecánicas del recubrimiento se determinaron con un sistema de ensayos de ultra-microdureza (Fisherscope H100), con una carga aplicada de 100 mN (5).

La evaluación tribológica del material se realizó empleando un tribómetro oscilatorio "SRV" con una configuración "cilindro sobre disco" la cual se muestra en la *figura 1*, empleando el sustrato y el contra-material de la aplicación final. El material del disco empleado fue un acero bonificado 42CrMo4 y el material del cilindro un acero bonificado C45 recubierto por HVOF. El lubricante usado en los ensayos fue una grasa compleja de litio con S<sub>2</sub>Mo. Las condiciones de ensayo fueron las siguientes: Carga: 50/200N; Tiempo: 1hora; Frecuencia: 50Hz; Amplitud: 1mm; Temperatura: 70°C. El coeficiente de fricción medio y la masa perdida (mg) fueron recogidos en cada ensayo.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Morfología y microestructura del polvo

La *figura 2* muestra las diferencias morfológicas entre los polvos de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr antes y después del proceso de producción respectivamente. La preparación mecánica de los polvos esféricos de Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr lleva a la formación de aglomerados irregulares, como se muestra en la imagen SEM (*figura 2c*). Partiendo del polvo estándar con un tamaño comprendido entre 10 - 30 μm se obtuvo el polvo nanoestructurado con una distribución de tamaño final, determinada por Woka (Alemania), entre 1,4 a 15 μm en los polvos de CrC75-NiCr25 (50% menor que 5.2 μm) y de 0,2 a 24μm en los polvos CrC60-NiCr40 (50% menor que 9.3 μm). En las *figuras 2b* y *2d* (SEM) se observa la microestructura interior del material, mostrando la presencia de dos fases, granos de carburo (oscuros) y la fase matriz de NiCr (clara). El polvo estándar contiene pequeñas cantidades de porosidad (*figura 2b*), que desaparecen después del proceso de densificación (*figura 2d*).



Figura 1: Configuración "Cilindro sobre disco"

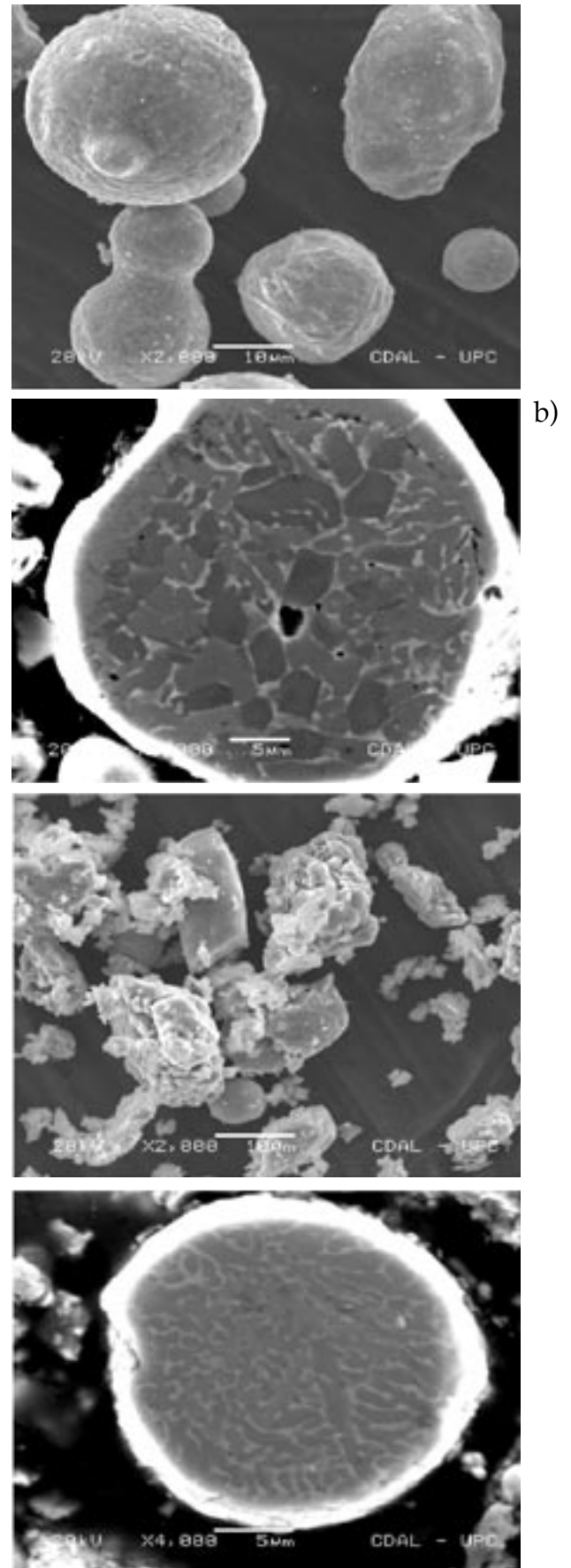


Figura 2: Morfología y microestructura interna del polvo: a) y b) estándar Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr, c) nanoestructurado CrC75-NiCr25 y d) nanoestructurado CrC60-NiCr40.

### 3.2. Caracterización del recubrimiento

La figura 3 muestra la sección transversal de los recubrimientos estándar CrC75-NiCr25 y el nanoestructurado CrC60-NiCr40, en la que puede observarse las zonas claras correspondientes a la fase matriz de NiCr y las zonas oscuras del CrC. El tamaño de grano en los recubrimientos nanoestructurados está caracterizado por una estructura bimodal con partículas de CrC superiores a 1µm junto con carburos por debajo de una micra (regiones nanocrystalinas).

### 3.3. Propiedades mecánicas

Los ensayo de ultra-microindentación proporcionan valores de la carga aplicada y profundidad de penetración para los procesos de carga y descarga. La figura 4 muestra las típicas curvas de carga y descarga para los recubrimientos standard de CrC75-NiCr25 y para los recubrimientos nanoestructurados de CrC75-NiCr25 y CrC60-NiCr40. Los ensayos se han realizado en una sección transversal pulida de las muestras.

La tabla II muestra los resultados de los ensayos realizados. La microdureza y características elásticas del recubrimiento CrC75-NiCr25 son más altas que las correspondientes al recubrimiento de CrC60-NiCr40. Esto es consecuencia de la mayor fracción de volumen de la fase de carburo duro presente en el recubrimiento de CrC75-NiCr25. Por otro lado la microdureza del recubrimiento nanoestructurado de CrC75-NiCr25 es menor que la del estándar CrC75-NiCr25. Este hecho puede ser debido al proceso de decarburación y descomposición de los carburos durante el proceso HVOF.

TABLA II: RESULTADOS DE ULTRA-MICRODUREZA (CARGA APLICADA: 100 mN)

	HU (Mpa)	Hplas (Mpa)	E/(1-ν²) (Gpa)	Recuperación Elástica (%)
Estándar-CrC75-NiCr25	9641	19456	272	45
Nano-CrC75-NiCr25	7670	12487	260	38
Nano-CrC60-NiCr40	7063	11883	225	36

### 3.4. Rugosidades y propiedades tribológicas

Los resultados de los ensayos tribológicos se muestran en la tabla III. La rugosidad de la superficie es en general el parámetro más crítico, siendo determinante en las propiedades de fricción y desgaste bajo condiciones lubricadas. La disminución del tamaño del polvo supone una reducción de la rugosidad superficial y una mejora en las propiedades tribológicas bajo condiciones de lubricación. Así el recubrimiento nanoestructurado de CrC75-NiCr25 (tamaño de polvo: 1,4-15µm) disminuye la rugosidad un 48% y el desgaste un 42% en comparación con el recubrimiento nanoestructurado de CrC60-NiCr40 (tamaño de polvo: 0,2-24µm), siendo estas características ligeramente mejores después del microsellado.

TABLA III: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS "CILINDRO SOBRE DISCO"

	Tamaño del polvo	Rugosidad (Ra, µm)	Coficiente medio de fricción	Pérdida de masa (mg)
CrC75-NiCr25 Estándar	10 - 30	4,5	0,26	6,87
Nano-CrC60-NiCr40	0,2 - 24	3,7	0,20	4,16
Nano-CrC60-NiCr40 sellado	0,2 - 24	3,2	0,20	3,43
Nano-CrC75-NiCr25	1,4 - 15	1,9	0,21	2,40
Nano-CrC75-NiCr25 sellado	1,4 - 15	1,5	0,16	1,05

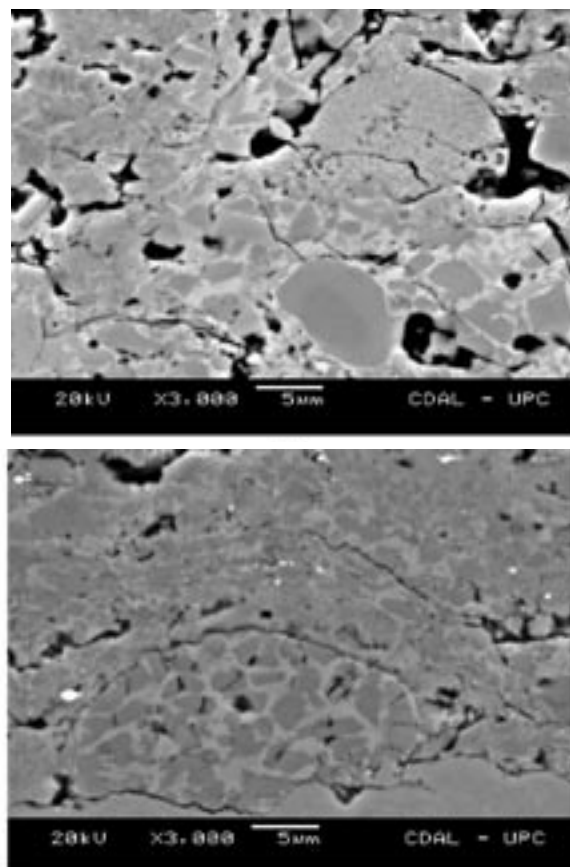


Figura 3: Imágenes SEM de una sección pulida transversal de: (a) recubrimiento estándar CrC75-NiCr25 y (b) recubrimiento nanoestructurado CrC60-NiCr40.

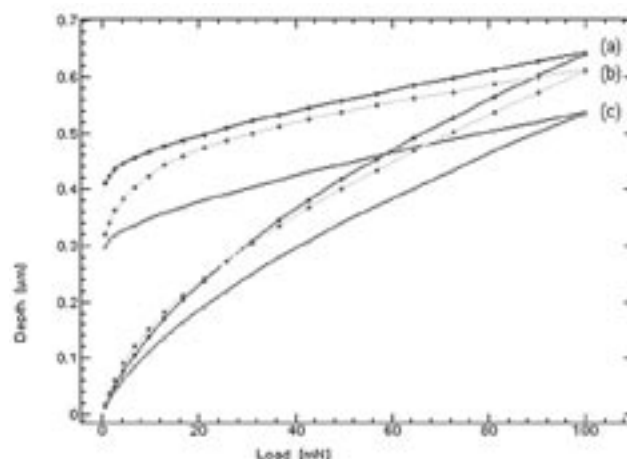


Figura 4: Curvas de carga y descarga de los recubrimientos: a) nanoestructurado CrC60-NiCr40, b) nanoestructurado CrC75-NiCr25 y c) estándar CrC75-NiCr25.

## 4. CONCLUSIONES

La dureza de los nano-recubrimientos es menor a la de los recubrimientos estándar, probablemente debido a un proceso de descomposición del carburo y decarburación durante la proyección HVOF. Este hecho, puede reducir las operaciones de rectificado y granallado necesarias para obtener una superficie final muy lisa de los componentes recubiertos y una disminución del tiempo de fabricación, lo que supone productos más baratos (la dureza del recubrimiento de CrC-NiCr aumenta el coste de las operaciones de rectificado).

En los ensayos tribológicos realizados bajo condiciones lubricadas, cuando se emplean el sustrato y contramaterial de la aplicación final, la rugosidad del recubrimiento parece ser el parámetro más importante que determinar las propiedades de fricción y desgaste. A menor tamaño del polvo, menor rugosidad y mejores propiedades de fricción y desgaste. El sellado del recubrimiento reduce también la rugosidad y mejora las propiedades de fricción y desgaste.

Se ha logrado una reducción de la rugosidad de hasta el 66%, una reducción del desgaste de hasta el 84% y del coeficiente de fricción de hasta el 38% mediante el empleo recubrimientos nanocristalinos de CrC-NiCr. Para algunas aplicaciones, una rugosidad final de  $1,5\mu\text{m}$  puede ser útil para eliminar el proceso de rectificado. Para otras aplicaciones, se necesitará una mayor reducción de rugosidad, pero el coste de rectificado se reducirá considerablemente.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran aprovechar esta oportunidad para agradecer a la Comisión Europea, por la financiación de este trabajo a

través del Proyecto: "The replacement of hard chromium coatings for mechanical components through High Pressure Nano structure HVOF coatings", contrato G5RD-CT-2000-00231, así como al resto de los participantes de este proyecto SAPES, OSVAT, CRFiat, WOKA, Univ. Roma, Térmico, Univ. Dinamarca, Metec.

## BIBLIOGRAFIA

1. S. Zimmermann , H. Kreye, Chromium carbide coatings produced with various HVOF spray systems, Proceedings of the 9<sup>th</sup> National Thermal Spray Conference, ASM International, Materials Park, Ohio, USA, p. 147, 1996.
2. K.J. Stein, B.S. Schorr, A. Marder, Wear, 224, p. 153, 1999.
3. A. R. Barbezat, Nicoll, A. Sickinger, Wear 529, pp. 162-164, 1993.
4. M. R. Dorfman , B.A. Kushner, J. Nerz, A.J. Rotolico, Proceedings of 12th International Thermal Spraying Conference, London, UK, p. 108, 1989.
5. J.L. Loubet., J.M. Georges, G. Meille, Microindentation Techniques in Materials Science and Engineering, ASTM STP 889, p. 72, 1986.

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03

