

INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN LA MICRUDUREZA Y EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS APLICADOS MEDIANTE PROYECCIÓN TÉRMICA

Influence of the roughness in the microhardness and wear resistance of thermal spray coating

RESUMEN

En los recubrimientos depositados por rociado térmico, la rugosidad superficial puede reflejar el grado de fusión y la fuerza con que llegan las partículas al sustrato durante la formación de la capa. Una alta unión de las partículas puede permitir baja porosidad del recubrimiento, lo que se puede traducir en un aumento de sus propiedades mecánicas. Es por esto que el interés de este trabajo se centra en el estudio de la influencia que tiene la rugosidad superficial sobre las propiedades mecánicas y tribológicas de recubrimientos de Níquel, Níquel - Carburo de Tungsteno, Níquel - Carburo de Silicio y Carburo de silicio, con el fin de establecer si los resultados de la medida del perfil de rugosidad superficial pueden reflejar el comportamiento de las propiedades mecánicas y tribológicas de estos recubrimientos.

PALABRAS CLAVES: Rugosidad superficial, rociado térmico, recubrimientos de WC y SiC, Propiedades mecánicas, Propiedades Tribológicas.

ABSTRACT

Level of fusion and force required for particles to reach the substrate on coatings deposited by thermal spray can be showed in the roughness. Strength of particles is able to permit low porosity on the coating then its mechanical properties can be improved. This article is focused on the study of influence of the roughness in the mechanical and tribological properties of Nickel, Nickel - Tungsten carbide, Nickel - Silicon carbide and Silicon carbide coatings, in order to know if the measurements of roughness profile can indicate information about the behavior of the mechanical and tribological properties of these coatings.

KEYWORDS: *Roughness, thermal spray, coating of WC and SiC, mechanical properties, tribological properties.*

1. INTRODUCCIÓN

La proyección térmica es considerada como una potencial alternativa para proteger componentes de maquinas y dispositivos que están sometidos a altas exigencias en ambientes de desgaste, corrosión y a altas temperaturas [1]. La demanda de un mejor rendimiento y aumento de la vida útil en estos componentes esta continuamente creciendo y como consecuencia de estos requerimientos, se ha avanzado en los últimos años en el estudio de recubrimientos aplicados por proyección térmica como una opción para aumentar el desempeño de los materiales [2]. La técnica de proyección térmica se basa en el calentamiento del material (en forma de polvo o alambre) hasta fundirlo y luego propulsarlo a una alta velocidad hacia el sustrato para asegurar una buena adherencia y apilamiento de las partículas, hasta forma el recubrimiento cuyas propiedades dependen de la energía térmica y cinética utilizada en el proceso [3]. De las técnicas de proyección térmica el proceso que utiliza

la combustión del oxígeno con el acetileno es la más versátil y económica [4]. Sin embargo, los recubrimientos obtenidos por este proceso tienen desventajas como su alta porosidad (entre 10% y 20%), pobre adherencia con el sustrato y formación de óxidos interlaminares [4].

Entre los materiales más utilizados para la obtención de recubrimientos mediante proyección térmica, el níquel y sus aleaciones con partículas cerámicas, son ampliamente usadas debido a que poseen buena resistencia al desgaste, a la oxidación y a alta temperatura [5]. Adicionalmente, los carburos y los óxidos, son utilizados por su alta dureza, siendo el carburo de tungsteno el más empleado por su buen desempeño tribológico, el cual comúnmente es mezclado con cobalto (en cantidades de 9, 12 y 17% en peso) o níquel (12% aprox.) [6].

El conocimiento de las propiedades de los recubrimientos permite predecir su desempeño en las condiciones a las

ANDRES G. GONZALEZ H.

Ingeniero Metalúrgico.
Estudiante de Maestría en
Ingeniería
Énfasis Materiales
Universidad de Antioquia
andresggonzalezh@yahoo.es

FABIO VARGAS GALVIS

Ingeniero Metalúrgico, M.Sc.
Profesor Asistente
Universidad de Antioquia
vargasf@udea.edu.co

MARÍA ESPERANZA LÓPEZ

Ingeniera de Minas y Metalurgia,
PhD. Universidad de Oviedo
Profesor Asistente
Universidad de Antioquia
melopez@udea.edu.co

que van a ser utilizados, no obstante, no siempre es posible caracterizarlos para determinar directamente sus propiedades y por lo tanto, es necesario hacer correlaciones de las características físicas, con las propiedades físicas y/o químicas para establecer su posible respuesta en las condiciones a las cuales van a ser empleados. [6]. Las propiedades físicas y/o químicas de los recubrimientos generalmente dependen de las variables a las que son aplicados, es decir, depende de la energía térmica y cinética utilizada en el proceso de deposición.

La rugosidad de la superficie de un recubrimiento por proyección térmica puede reflejar el grado de fusión y la fuerza con que las partículas llegan al sustrato, es decir, refleja el grado de compactación y aplanamiento de las partículas durante la formación de la capa. Por lo tanto, una rugosidad suave es el reflejo de un buen aplanamiento de las partículas, lo que permite un mejor contacto y anclaje entre las partículas (a nivel microscópico) incrementando la cohesión entre capas del recubrimiento y disminuyendo su porosidad [7]. El mejoramiento de la cohesión de las partículas y disminución de la porosidad, incrementará la microdureza y el módulo de elasticidad de los recubrimientos [7]. Es así como la rugosidad superficial puede ser un reflejo de la estructura transversal del recubrimiento, de sus propiedades mecánicas y del desempeño especialmente en condiciones tribológicas.

Es por eso que este trabajo se basa en determinar la relación que existe entre la rugosidad, las propiedades mecánicas y el desempeño tribológico de recubrimientos de Ni, Ni-WC, Ni-SiC y SiC, de tal forma que se pueda evaluar la calidad e integridad de estos recubrimientos sin tener que destruirlos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales y Proceso de Proyección Térmica

Se realizó análisis morfológico a cada uno de los polvos utilizados para la obtención de los recubrimientos, mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).

Para la obtención de los recubrimientos, se prepararon sustratos de acero AISI SAE O1, de 0,5 pulgadas de diámetro y 0,5 pulgadas de altura, los cuales fueron cortados en forma de barra cilíndrica. Posteriormente la superficie a recubrir fue preparada con chorro abrasivo de óxido de aluminio, para eliminar óxidos, grasas y demás impurezas, y proporcionar la rugosidad necesaria para garantizar una buena adherencia. Finalmente, se depositaron recubrimientos en forma de monocapa y bicapa, mediante proyección térmica por combustión de acetileno y oxígeno, utilizando la antorcha Eutalloy Ultra Jet, de la marca comercial Eutectic – Castolin. En la Tabla 1 se describe la composición química de cada uno de los recubrimientos estudiados.

Muestra	Recubrimiento Base	Recubrimiento Superior
O-1		Ni
O-2	Ni	Ni - WC
O-3	Ni	50% Ni – 50% SiC*
O-4	Ni	SiC

* % en volumen

Tabla 1. Composición Química de las Muestras.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, en todas las muestras recubiertas se utilizó una capa de Níquel, como material de anclaje entre el sustrato y la capa final de Ni - WC y SiC - Ni. Esto es con el fin de aumentar la adherencia entre el sustrato y el material cerámico, y para evitar un agrietamiento del recubrimiento en el proceso enfriamiento a causa de las diferencias en las dilataciones térmicas de los materiales utilizados.

En la tabla 2 se describen las condiciones a las que fueron depositados cada uno de los recubrimientos.

Muestra	Presión (psi)		Caudal (Ft ³ /hr)		Distancia (cm)*
	Oxígeno	Acetileno	Oxígeno	Acetileno	
O-1	50	12	46.2	13.60	7
O-2			63	25.84	7
O-3			63	25.84	7
O-4			63	25.84	7

* Distancia entre la antorcha y el sustrato

Tabla 2. Condiciones de aplicación de los recubrimientos.

2.2. Caracterización y evaluación tribológica de los recubrimientos

La morfología superficial de cada uno de los recubrimientos fue caracterizada mediante microscopía electrónica de barrido, la rugosidad superficial fue medida con un rugosímetro Starret Sigma VB400 y la microdureza de los recubrimientos fue determinada mediante microindentación en un microdurómetro Shimadzu, aplicando una carga de 100 gramos durante 10 segundos.

Las pruebas de desgaste se realizaron en el tribómetro de la Universidad de Oviedo en la Unidad de Tribología, según la norma G77. La prueba consiste en poner en contacto la superficie de la muestra a evaluar (en este caso los recubrimientos), con un anillo rotatorio fabricado en acero 1043 templado, cuya dureza es de 820HV_{300g} y su diámetro es de 50mm. El ensayo se realizó aplicando una carga de 3 Kg. a una velocidad relativa entre el anillo y la muestra a evaluar de 500 rpm y en un tiempo de 20 min., es decir, 10000 ciclos (1.5707 Kms). En la siguiente figura se muestra el esquema de este ensayo.

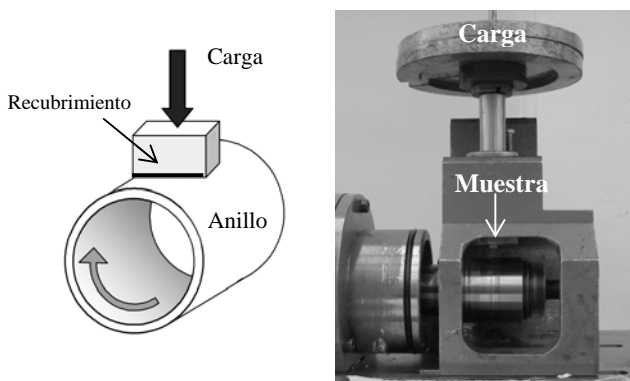


Figura 1. Ensayo de Desgaste según norma G77. [8]

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. Caracterización Morfológica de los polvos utilizados.

Los polvos de Ni, utilizados para la obtención de la capa base y como recubrimiento monocapa en la muestra O-1 poseen una geometría esférica, bastante regular. En la figura 2 se muestra la geometría de este material.

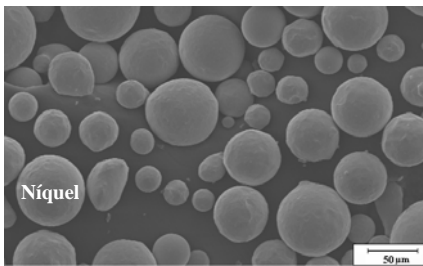


Figura 2. Morfología de los polvos de Ni.

En el material utilizado para obtener el recubrimiento de la muestra O2, las partículas de Ni tienen una morfología esférica bastante regular, mientras que las de WC son agudas e irregulares. Ver figura 3.



Figura 3. Morfología de los polvos de Ni – WC.

Los polvos de Carburo de Silicio (SiC) utilizados para la obtención de la muestra O-3 y O-4 tienen una morfología irregular y puntiaguda. Ver figura 4.

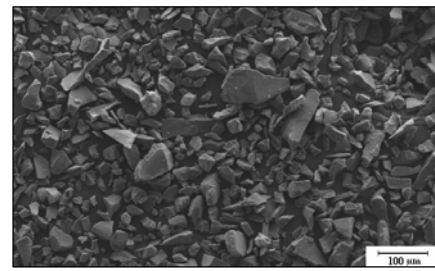


Figura 4. . Morfología de los polvos de SiC

3.2. Caracterización y evaluación tribológica de los recubrimientos

El análisis morfológico realizado a cada uno de los recubrimientos permitió establecer que la superficie del recubrimiento de Ni, correspondiente a la muestra O1, es rugosa e irregular, sin embargo no se evidenció la presencia de partículas sin fundir. Ver figura 5.

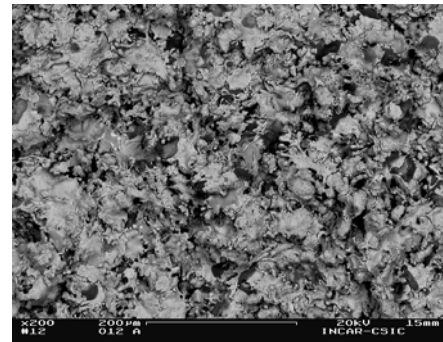


Figura 5. Superficie del recubrimiento de Ni, muestra O-1.

La superficie del recubrimiento de Ni-WC, correspondiente a la muestra O2, evidencia alta rugosidad, con múltiples partículas esféricas y unas cuantas agudas sin fundir. Ver figura 6. Las partículas esféricas sin fundir corresponden al níquel, mientras que las agudas corresponden a carburo de tungsteno, de acuerdo con el análisis morfológico realizado a los polvos utilizados para la obtención de este recubrimiento.

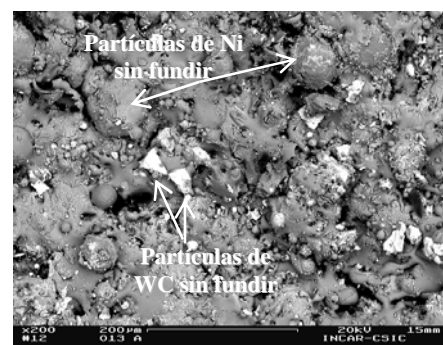


Figura 6. Superficie del recubrimiento de Ni – WC, muestra O-2.

La superficie de la muestra O3 es bastante irregular, producto de una gran cantidad de partículas esféricas sin fundir, las cuales corresponde al níquel utilizado para la obtención de este recubrimiento. Ver figura 7.



Figura 7. Superficie del recubrimiento de Ni 50% – SiC 50%, muestra O-3.

La superficie de la muestra O4, es bastante regular y no evidencia partículas sin fundir. Ver figura 8.

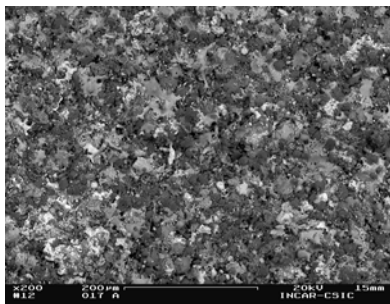


Figura 8. Superficie del recubrimiento de SiC, muestra O-4.

Con el fin de cuantificar el efecto de las partículas sin fundir sobre la topografía de la superficie de los recubrimientos, se determinó el valor promedio de rugosidad Ra, el cual corresponde al promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias del perfil de rugosidad a la línea intermedia en la longitud de medición y está definida por la siguiente ecuación:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1)$$

Donde y es la desviación del perfil de la superficie desde la línea central y L es la longitud de medición [7]. Ver figura 9.

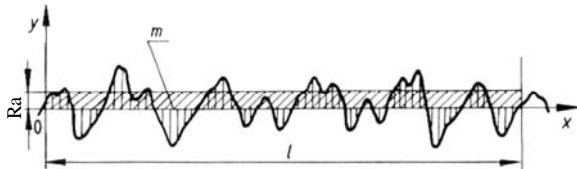


Figura 9. Representación de las variables tenidas en cuenta para el cálculo de Ra.

En la figura 10 se presentan los perfiles de rugosidad superficial, con los correspondientes valores de Ra de cada uno de los recubrimientos estudiados.

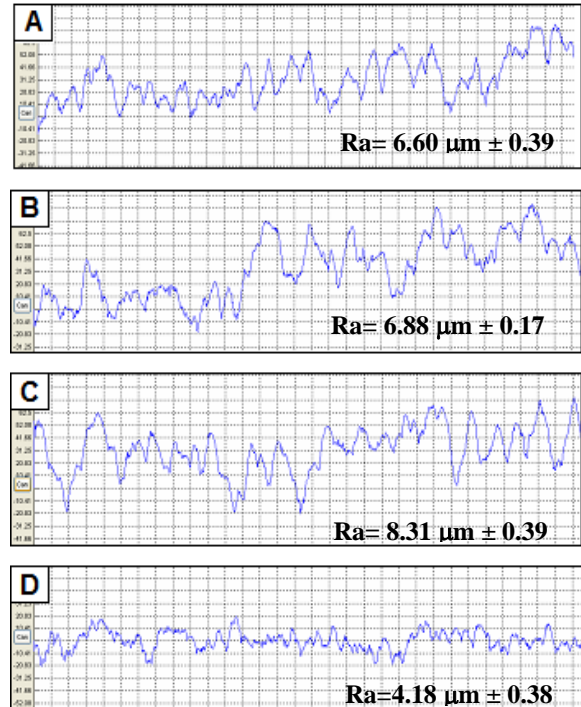


Figura 10. Perfiles de Rugosidad superficial de cada uno de los recubrimientos estudiados.

A) O-1 B) O-2 C) O-3 D)O-4

Los perfiles de rugosidad y los valores de Ra, medidos son acordes con los resultados obtenidos en el análisis morfológico realizado a la superficie de los recubrimientos.

3.3. Microdureza de los recubrimientos.

Con el fin de relacionar las propiedades mecánicas de cada uno de los recubrimientos estudiados, con las características superficiales y con su desempeño tribológico se realizó medida de la microdureza. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Muestra	Microdureza Capa Superior Hv _{100g}	
	Hv	W*(.m)
O-1	168.5	3.67
O-2	770	8.00
O-3	559.25	7.33
O-4	372	6.62

*Módulo de Weibull para los valores obtenidos
 Tabla 3 Resultados de la microdureza medida en la capa superior de los recubrimientos.

3.4. Resistencia al Desgaste

La norma ASTM G77 establece que la huella obtenida a través del ensayo de bloque - anillo debe ser totalmente uniforme, sin embargo, para que se de esta condición se requiere un desgaste profundo en la muestra evaluada. Sin embargo, dado el bajo espesor y alta resistencia al desgaste de los recubrimientos estudiados, fue necesario hacer la prueba en condiciones tales que la huella obtenida fuera superficial y no afectara al sustrato, así esta no fuera uniforme como lo establece la norma. En la Figura 11 se muestra la huella dejada en la superficie de cada recubrimiento.

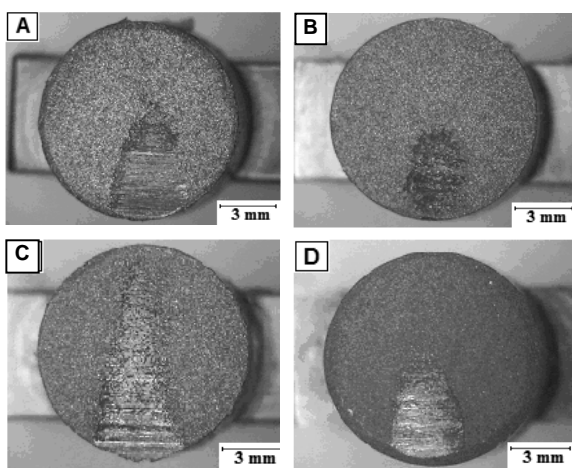


Figura 11. Huellas obtenidas en la prueba de desgaste realizada según norma ASTM G77.
A) O-1 B) O-2 C) O-3 D) O-4.

El volumen perdido en cada uno de los recubrimientos fue calculado a partir del diámetro del anillo, el ancho y longitud de la huella mediante las ecuaciones (2) y (3) [8].

$$\theta = 2 \text{ Sen}^{-1}\left(\frac{b}{D}\right) \quad (2)$$

$$\text{Volumen Perdido} = \frac{D^2 t}{8} [\theta - \text{Sen } \theta] \quad (3)$$

Donde

θ : Angulo entre los extremos de la huella al centro del anillo, rad.

b: Ancho de la huella, mm.

D: Diámetro del anillo utilizado, mm.

t: longitud de la huella. [8]

La pérdida de peso y de volumen calculado a partir de las huellas producidas en el ensayo de desgaste son mostrados en la tabla 4.

Muestra	Perdida de Peso (grs)	Volumen Perdido (mm ³)
O-1	0.0031	0.4578896
O-2	0.0014	0.2034655
O-3	0.0075	0.5069440
O-4	0.0014	0.2752113

Tabla 4. Perdida de peso y Volumen Perdido de los recubrimientos evaluados en el ensayo de desgaste según norma ASTM G77.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al comparar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al recubrimiento de Ni con los del recubrimiento de Ni-WC (muestra O-1 Vs muestra O-2) se puede establecer que la adición de WC favorece la presencia de unas pocas partículas de Ni sin fundir, no obstante, esto no modifica significativamente la rugosidad de la superficie del recubrimiento, pero sí favorece el aumento de su dureza transversal, mejorando la resistencia al desgaste del recubrimiento, por lo tanto a igual rugosidad, la dureza es el factor más importante en la resistencia al desgaste del recubrimiento.

Comparando los resultados obtenidos en el recubrimiento de Ni con los del recubrimiento de Ni-SiC (muestra O-1 Vs muestra O-3), se puede establecer que la adición de SiC, por ser este material más conductor térmicamente que el níquel absorbe buena parte del calor aportado por la combustión del oxígeno y el acetileno, reduciendo el calor disponible para fundir las partículas de níquel, por lo tanto, la superficie del recubrimiento de Ni-SiC, queda con una cantidad apreciable de partículas de Ni sin fundir, las cuales aumentan considerablemente la rugosidad superficial de este recubrimiento, así mismo, la adición de partículas de SiC aumenta la dureza transversal del recubrimiento, no obstante, este recubrimiento presentó un mayor desgaste. Esto indica que a pesar de que el recubrimiento de Ni – SiC, tiene mayor dureza que el de Ni, la mayor rugosidad de su superficie produce unas condiciones tribológicas más severas que conllevan a un mayor desgaste.

El análisis de los resultados obtenidos en la evaluación del recubrimientos de SiC y de Ni-SiC (muestra O-4 Vs Muestra O-3) determina que la mayor rugosidad superficial del recubrimiento de Ni-SiC permite un mayor desgaste, a pesar de que este recubrimiento posee una mayor dureza transversal, lo que confirma que la rugosidad superficial de estos recubrimientos es un factor crítico para su desempeño tribológico.

De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que la rugosidad superficial es un parámetro fundamental en la evaluación del desempeño tribológico de los

recubrimientos estudiados, además es un parámetro fácil de medir y se puede hacer de forma no destructiva.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimientos a los laboratorios de la Unidad de Tribología de la Universidad de Oviedo, España y al programa de movilidad internacional de investigadores de COLCIENCIAS por el apoyo para realizar estos ensayos en la Universidad de Oviedo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] G. Bolelli, V. Cannillo, L. Lusvarghi, T. Manfredini. "Wear behaviour of thermally sprayed ceramic oxide coatings", *Wear*. Vol. 261, pp. 1298-1315, Dic. 2006.
- [2] J. Rodríguez, A. Martín, R. Fernández and J. E. Fernández. "An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings", *Wear*, Volume 255, pp. 950-955, August-September 2003.
- [3] Vargas F., Carretero P., Calderón W., *Memorias del Curso de Termorociado*, I Congreso Internacional de Materiales – II Encuentro Nacional de Ciencia y Tecnología de Materiales, 2001.
- [4] R. González, M.A. García, I. Peñuelas, M. Cadenas, Ma. Del Rocío Fernández, A. Hernández Battez and D. Felgueroso. "Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes", *Wear*, Available online 26 March 2007 in: www.sciencedirect.com.
- [5] R. González, M. Cadenas, R. Fernández, J. L. Cortizo, E. Rodríguez. "Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser", *Wear*, Volume 262, pp. 301-307, February 2007.
- [6] L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coating*. Vol 1. New York: Wiley, 1995, p. 412.
- [7] R. S. Lima, A. Kucuk and C. C. Berndt, "Evaluation of microhardness and elastic modulus of thermally sprayed nanostructured zirconia coatings", *Surface and Coatings Technology*, Volumen 135, p.p. 166-172, January 2001.
- [8] *ASTM Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test, G77*. Jun. 2005.