

## ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DEPOSITADOS MEDIANTE PROYECCIÓN TÉRMICA SOBRE ACERO AL CARBONO.

### Study Of The Wear Resistance Of Coatings Deposited On Carbon Steel By Thermal Spray

#### RESUMEN

Se estudió la resistencia al desgaste de recubrimientos de Ni – Al, Ni – SiC, Ni - WC y Ni – W- Co, depositados mediante proyección térmica sobre sustratos de acero al carbono. Los recubrimientos fueron obtenidos mediante combustión de oxígeno- acetileno con una antorcha Eutalloy de la marca registrada Eutectic Castolin.

El material utilizado fue caracterizado químicamente mediante absorción atómica (AA), espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y difracción de rayos X (DRX). El análisis morfológico tanto del material depositado, como de los recubrimientos obtenidos se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB).

La resistencia al desgaste de los recubrimientos se determinó por deslizamiento abrasivo sobre una superficie de SiC con tamaño de grano 600, a una velocidad relativa de 550 RPM durante 20 minutos y con una carga de 937,5 gramos aplicada en dirección normal a la superficie del recubrimiento. Los resultados obtenidos permiten establecer que estos recubrimientos mejoran la resistencia al desgaste abrasivo del sustrato sobre el cual fueron depositados.

**PALABRAS CLAVES:** Desgaste abrasivo, proyección térmica, recubrimientos.

#### ABSTRACT

Coatings of Ni – Al, Ni – SiC, Ni -WC y Ni – W- Co, were deposited and its capacity to protect of the abrasive wear effects on the steel substrate where they were deposited was studied. Coatings were obtained by thermal spraying using oxygen - acetylene combustion gotten by an Eutalloy torch of the Eutectic Castolin trade mark.

Materials for coatings were chemically characterized by means of Atomic Absorption (AA), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) and X Ray Diffraction (DRX). The morphologic analysis of materials deposited and coatings was carried out by means of Scanning Electronic Microscopy (SEM).

Wear resistance of coatings was tested by abrasive sliding on a surface of SiC sieve 600, with 550 RPM, during 20 minutes and loading 937,5 g. Results obtained allow establishing that these coatings improve the resistance to the abrasive wearing of the substrate on which they were deposited.

**KEYWORDS:** *Wear abrasion, thermal spray, coatings.*

#### 1. INTRODUCCIÓN

El interés industrial hacia materiales de alto desempeño, como el Níquel (Ni) y mezclas con SiC, WC, Co, y otros materiales, ha crecido progresivamente gracias a su buen desempeño en condiciones de desgaste, corrosivas y de alta temperatura; los últimos desarrollos en cuanto a la

aplicación de éstos materiales han estado direccionadas a su utilización como recubrimiento, por lo que técnicas como la proyección térmica empiezan a ser utilizadas para la obtención de éstos sobre superficies metálicas.

La proyección térmica es una técnica que utiliza la energía térmica y cinética para calentar el material a

#### SERGIO ECHEVERRI

Estudiante Ingeniería de Materiales.  
Universidad de Antioquia  
Sergio.7629@gmail.com

#### JULIANA BEDOYA

Estudiante Ingeniería de Materiales.  
Universidad de Antioquia  
julibe@gmail.com

#### FABIO VARGAS

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

depositar y posteriormente propulsarlo hacia el sustrato para formar el recubrimiento por apilamiento de partículas. [1]

Esta es una de las tecnologías de modificación superficial que ha tenido un amplio crecimiento en los últimos años, gracias a su bajo costo, fácil aplicación sobre diferentes geometrías y tamaños, al desarrollo de equipos avanzados y de materiales de alto desempeño para la obtención de los recubrimientos; no obstante, los recubrimientos obtenidos aún presentan problemas, como defectos estructurales (poros, grietas, partículas sin fundir, falta de adherencia entre la capa y el sustrato, y entre las diferentes partículas que conforman el recubrimiento), lo que puede poner en riesgo su desempeño, a pesar de las buenas propiedades que tienen los materiales utilizados para obtener los recubrimientos. [2-3]

Las aleaciones de Ni – Al promueven la formación del compuesto  $Ni_3Al$ , conocido como gamma prima ( $\gamma'$ ) [4], que favorece el endurecimiento por precipitación, las aleaciones de Ni-W-Co, son reconocidas por su excepcional resistencia al desgaste, el SiC y el WC son materiales que poseen una alta dureza y buena resistencia al desgaste, es por esto que en este trabajo se estudió la resistencia al desgaste abrasivo de los recubrimientos obtenidos mediante proyección térmica con estos materiales.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la primera etapa se realizó la caracterización química y morfológica de los polvos utilizados para la obtención de los recubrimientos, posteriormente se obtuvieron los recubrimientos a estudiar y finalmente se realizó a cada uno de ellos la prueba de desgaste abrasivo.

Para la obtención de los recubrimientos, se prepararon sustratos de acero al carbono, los cuales fueron cortados en forma de barra cilíndrica con un diámetro y altura de 2,54 cm. Posteriormente la superficie a recubrir fue preparada con chorro abrasivo de arena, 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, con la composición química que se describe en la Tabla 1.

Para la aplicación de los recubrimientos se utilizó una antorcha de proyección térmica por combustión de oxígeno-acetileno, referencia Eutalloy Ultra Jet de la marca comercial Eutectic-Castolin.

CÓDIGO DE LA MUESTRA	SISTEMA	COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL RECUBRIMIENTO	
M0	Sustrato	Sin capa	
M1	Monocapa	Ni - Al	
M2	Bicapa	Capa base	Ni - Al
		Capa superior	Ni - W - Co
M3	Bicapa	Capa base	Ni - Al
		Capa superior	SiC
M4	Bicapa	Capa base	Ni - Al
		Capa superior	Ni - WC

**Tabla 1.** Características de las muestras utilizadas en el estudio

Las pruebas de desgaste se realizaron sobre una superficie de SiC con tamaño de grano 600, a una velocidad relativa de 550 RPM durante 20 minutos y con una carga de 937,5 gramos aplicada en dirección normal a las superficies en contacto.

Cada una de las muestras fue sometida a deslizamiento abrasivo sobre diferentes puntos del disco (28,5; 58,5 y 83 mm del centro), con el fin de evaluar su resistencia en diferentes condiciones de fricción y a distancias recorridas de 313,5; 643,5 y 913,5 metros respectivamente. En la Figura 1 se muestra el montaje realizado para llevar a cabo estas pruebas.



**Figura 1.** Montaje de la prueba de desgaste.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

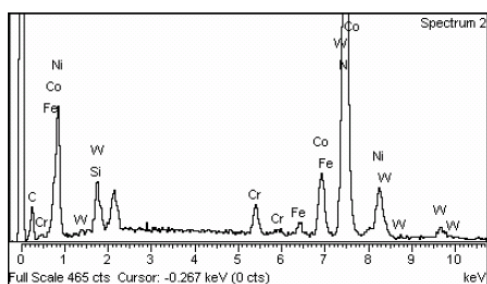
### 3.1 Análisis Químico

El análisis químico del material utilizado para depositar los recubrimientos se realizó mediante absorción atómica (AA), espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y difracción de rayos X. En la Tabla 2 se presentan los resultados de la prueba de absorción atómica realizada a

los polvos de Ni – Al y en la Figura 2 se muestra el espectro EDS obtenido para el material de Ni – W – Co.

ELEMENTO	PORCENTAJE (EN PESO)
Ni	97,5
Al	2,04
C	0,05

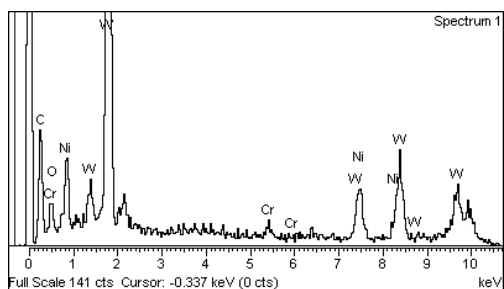
**Tabla 2.** Resultados de la prueba de absorción atómica realizada a los polvos de Ni- Al.



**Figura 2.** Espectro obtenido en el análisis realizado por EDS a la muestra de Ni – W - Co

De la Tabla 2 se puede establecer que los polvos de Ni – Al, contienen trazas de carbono correspondientes a impurezas adquiridas posiblemente durante su manipulación. En el espectro de la Figura 2 se puede observar que los polvos de Ni – W – Co, además poseen Si, Fe, Cr y C, estos dos últimos en pequeñas cantidades.

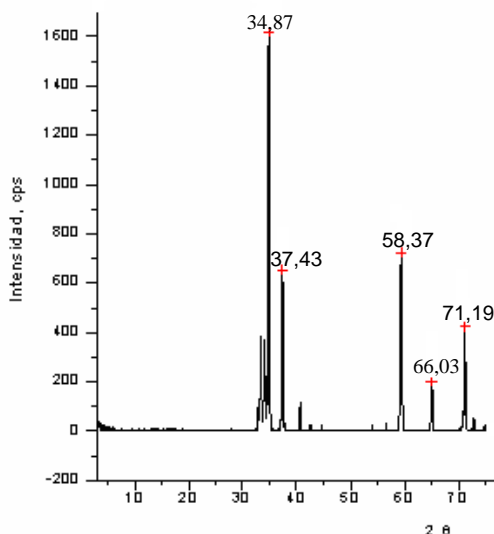
En las figura 3 y 4 se presenta el espectro EDS obtenido en el análisis químico realizado a la muestra de Ni – WC y el difractograma obtenido en el análisis realizado al polvo de SiC respectivamente.



**Figura 3.** Espectro obtenido en el análisis realizado por EDS a la muestra de Ni – WC.

El espectro de la figura 3 permite establecer que este material corresponde a una mezcla de partículas de níquel (Ni), con carburos de tungsteno (WC) y trazas de cromo.

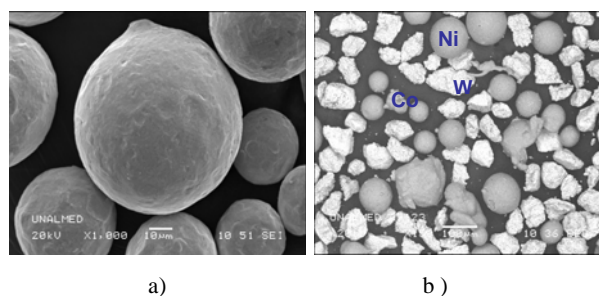
El difractograma de la figura 4 es similar al estándar internacional N° 2933 correspondiente a SiC con estructura hexagonal.



**Figura 4.** Espectro de difracción de rayos X obtenido en la muestra de SiC.

**Análisis Morfológico**

La morfología de los polvos y de los recubrimientos obtenidos se analizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). En la Figura 5 se puede apreciar las características físicas de los polvos de Ni – Al y Ni – W – Co – Fe - Si – Cr.



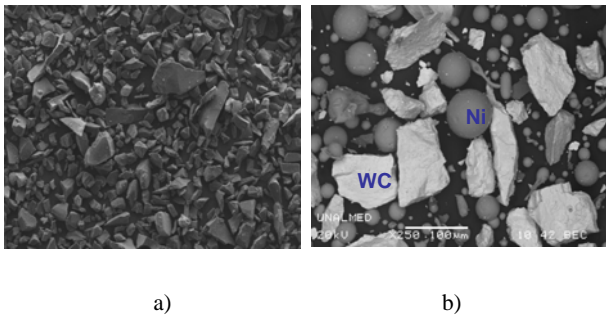
**Figura 5.** Características Morfológicas a) Polvos de Ni – Al b) Polvos de Ni – W – Co – Fe – Si – Cr.

Como se puede observar en la Figura 5a), las partículas de Ni – Al, tienen una forma esférica uniforme, lo que favorece la reducción de defectos estructurales como partículas sin fundir y en caso de que estos se presenten sobre la superficie de abrasión su efecto sobre las condiciones de desgaste es bajo, ya que cada partícula de estas puede rodar sobre las superficies en contacto sin producir grandes daños.

En la Figura 5b) se puede apreciar la forma irregular de las partículas de Ni - W - Co - Fe - Si - Cr, especialmente las de tungsteno, que por su forma puntiaguda y de mantenerse así sobre la superficie del recubrimiento, pueden resultar altamente nocivas para su resistencia al desgaste abrasivo.

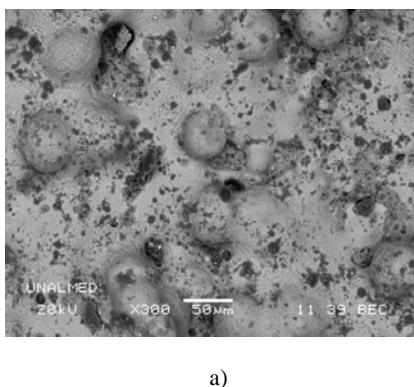
En la Figura 6 se puede observar las características físicas de los polvos de SiC y Ni - WC, donde se puede establecer que las partículas de SiC (Figura 6a) poseen una morfología puntiaguda que al ser sometida al proceso de desgaste mediante abrasión puede influir drásticamente en la resistencia al desgaste de este material.

Para el caso del Ni - WC (Figura 6b), se puede observar que las partículas de Ni poseen forma esférica y el WC forma puntiaguda.

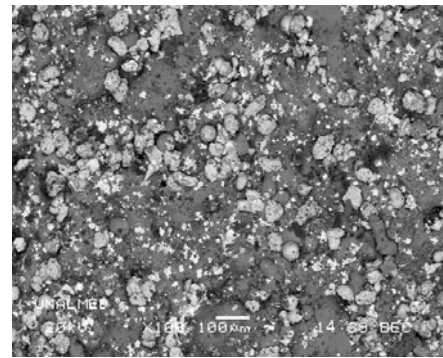


**Figura 6.** Características Morfológicas  
a) Polvos de SiC b) Polvos Ni - WC

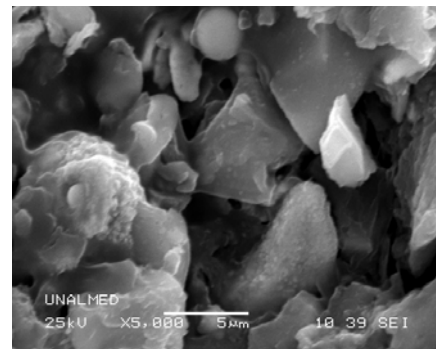
En la Figura 7 se puede observar las características superficiales de los recubrimientos obtenidos.



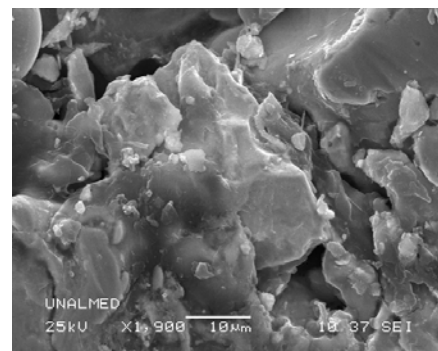
a)



b)



c)



d)

**Figura 7.** Características Morfológicas de la superficie de los recubrimientos obtenidos.

a) M1 b) M2 c) M3 d) M4

En la Figura 7a) se observa que la superficie del recubrimiento de Ni - Al (M1) posee unas cuantas partículas esféricas sin fundir embebidas en una capa de níquel fundido, mientras que la superficie del recubrimiento de Ni - W - Co - Fe - Si - Cr (M2) mostrada en la figura 7b), posee una mayor cantidad de partículas sin fundir y su geometría es más irregular.

Las muestras M3 y M4 poseen gran cantidad de partículas de SiC y WC sin fundir lo que genera una

superficie rugosa y con aristas agudas, tal y como se puede apreciar en las figura 7c) y 7d).

MUESTRA	DISTANCIA DESDE EL CENTRO DEL DISCO (mm)	DISTANCIA RECORRIDA (m)	MASA PERDIDA (g)
M0-1	28.5	313,5	0.13
M0-2	58.5	643,5	0.099
M0-3	83	913,5	0.076
M1-1	28.5	313,5	0.076
M1-2	58.5	643,5	0.045
M1-3	83	913,5	0.048
M2-1	28.5	313,5	0.120
M2-2	58.5	643,5	0.097
M2-3	83	913,5	0.083
M3-1	28.5	313,5	0.042
M3-2	58.5	643,5	0.045
M3-3	83	913,5	0.059
M4-1	28.5	313,5	0.038
M4-2	58.5	643,5	0.057
M4-3	83	913,5	0.105

**Tabla 3.** Resultados de la prueba de desgaste abrasivo realizado a cada una de las muestras

### 3.3 Prueba de Desgaste Abrasivo

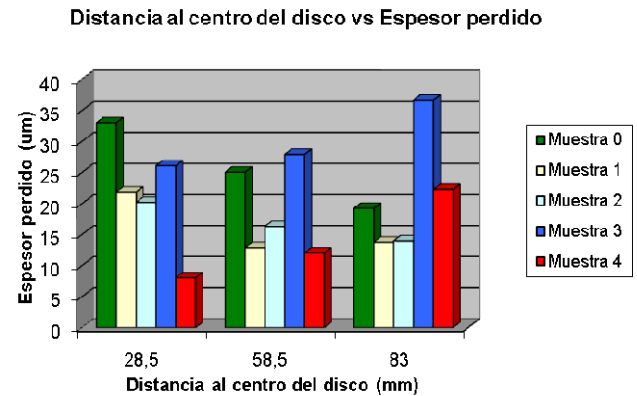
En la Tabla 3, se presentan los resultados de pérdida de masa obtenidos durante las pruebas de desgaste abrasivo.

DISTANCIA DESDE EL CENTRO DEL DISCO (mm)	ESPESOR PERDIDO				
	M0	M1	M2	M3	M4
28.5	33	21.83	20.23	26.1	8.05
58.5	25.08	12.92	16.35	27.96	12.08
83	19.26	13.78	13.99	36.66	22.26

**Tabla 4.** Relación distancia y espesor perdido

A partir de la masa perdida y de la densidad de cada recubrimiento, se calculó el espesor perdido en cada muestra por efecto del desgaste abrasivo, teniendo en cuenta que el área desgastada fue de 5,06 cm<sup>2</sup> (correspondiente a una barra circular de 2,54 cm de diámetro). En la Tabla 4 se relacionan las distancias desde el centro del disco (mm) con los espesores perdidos en cada una de las muestras.

En la figura 8 se presentan los resultados de pérdida de espesor de cada una de las muestras evaluadas en las diferentes condiciones de desgaste abrasivo a las que fueron sometidas.



**Figura 8.** Relación del espesor perdido en cada una de las muestras evaluadas en función de las condiciones de ensayo.

### 4. CONCLUSIONES

Dadas las condiciones de ensayo, las muestras evaluadas a una distancia cercana al centro del disco (28,5 mm), experimentan unas condiciones abrasivas más severas, lo que produce en las muestras M0, M1 y M2 un mayor desgaste que el generado a una distancia mayor del centro (58,5 y 83 mm), a pesar de que las muestras recorren una menor distancia abrasiva cuando son ensayadas cerca al centro del disco.

A pesar de lo anterior, en los recubrimientos de SiC - Ni y WC - Ni (M3 y M4), cuya superficie es aguda, irregular y poco sinterizada, se obtuvo un mayor desgaste abrasivo a distancia lejana al centro del disco, lo que indica que para estas muestras es más crítico el efecto de la mayor distancia recorrida.

Lo anterior posiblemente se debe al efecto combinado de la baja sinterización de las partículas de SiC y WC, obtenida durante la aplicación de los recubrimientos y su morfología puntiaguda e irregular, lo cual bajo el efecto de los esfuerzos aplicados durante el ensayo provoca el desprendimiento de estas partículas, las cuales entran a hacer parte de la superficie de desgaste durante toda la distancia recorrida, acelerando el deterioro del recubrimiento.

Los recubrimientos de Ni - Al y Ni - W - Co - Fe - Si - Cr, correspondientes a las muestras M1 y M2, son un medio efectivo para proteger del desgaste abrasivo a sustratos de acero al carbono; aún con la aplicación de altos esfuerzos y baja distancia recorrida o viceversa.

A pesar de la alta dureza y excepcional resistencia al desgaste que presentan los materiales de Ni – W – Co, la resistencia al desgaste abrasivo que se obtiene en recubrimientos de estos materiales es muy similar a la de los recubrimientos de Ni – Al, esto posiblemente se debe a que los recubrimientos de Ni – W – Co, como los de la muestra M2, poseen en su superficie partículas de W sin fundir, las cuales tienen una forma puntiaguda e irregular, que pueden resultar nocivas para la resistencia del recubrimiento si estas se fracturan o se desprenden y entran a hacer parte de la superficie de desgaste.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

El profesor Alejandro Toro y al Ingeniero Juan Felipe Santa del Laboratorio de Microscopía Avanzada de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Al profesor Alejandro Echavarría del Laboratorio de Biomateriales de la Universidad de Antioquia.

Al señor Alberto Zapata del Laboratorio de Materialografía de la Universidad de Antioquia.

Al grupo GIPIMME, por todo su apoyo técnico y económico.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Pawlowski Lech. John Wiley & Sons. The science and Engineering of Thermal Spray Coatings. 1995. pp 108 - 125.

[2] Davis J. ASM International. Handbook of thermal spray technology. 2004. pp 266 - 268.

[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] Avner S., Introducción a la Metalurgia Física, ed McGraw- Hill. 1977. pp 401 – 410

[5] Vargas F., Latorre G. Uribe I., “Behavior of thermal spray coatings against hydrogen attack”, CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol.2, Número 4, Diciembre del 2003.