

Características de los recubrimientos WC-NiCrBSiFe en función del sistema de proyección térmica

V. Higuera-Hidalgo*, F.J. Belzunce-Varela** y S. Poveda-Martínez*

Resumen El material tipo cermet WC-NiCrBSiFe se emplea como elemento protector frente al desgaste, en elementos de calderas de vapor, como son los sobrecalentadores y recalentadores de vapor, donde las condiciones de servicio tan severas (alta temperatura, erosión por cenizas volantes, etc.) acortan notablemente la vida útil de los materiales convencionales empleados. En este trabajo se ha realizado la proyección térmica de este recubrimiento por arco plasma no transferido, proyección mediante llama a elevada velocidad (HVOF) y proyección por detonación a elevada frecuencia (HFPD). Se determinaron las microestructuras, porosidades, contenidos en óxidos y microdurezas de los distintos recubrimientos obtenidos. También, se llevaron a cabo ensayos de fatiga térmica en condiciones similares a las imperantes en el interior de una caldera, mediante el empleo de un combustor experimental. Finalmente, se determinó la adherencia de las capas a los sustratos receptores, mediante ensayos de tracción. Los resultados obtenidos son discutidos en función de las características específicas de los diferentes sistemas de proyección utilizados.

Palabras clave Proyección térmica. Cermets. Microestructura. Alta temperatura. Calderas.

Influence of thermal-spray procedure on the properties of WC-NiCrBSiFe coating

Abstract WC-NiCrBSiFe coatings are normally used as protection against heat, corrosion and erosion actions encountered in superheater and reheater tubes in power plant boilers. This coating was thermal-spray projected using different procedures (plasma, HVOF and HFPD) onto stainless steel specimens. The microstructures, porosities, oxide contents and microhardnesses of the coatings were determined. Thermal fatigue tests under simulative power plant service conditions were conducted in an experimental combustion chamber and, finally, the adhesion between the substrate and the coating layer was evaluated by means of tensile tests. The obtained results are discussed, and special attention was paid to the specific characteristics of the different spraying procedures.

Keywords Thermal-spray. Cermets. Microstructure. High temperature. Boilers.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de elementos protectores frente a los mecanismos de desgaste imperantes en sobrecalentadores y recalentadores en calderas quemando carbón pulverizado en unidades de potencia, mediante el empleo de técnicas de deposición de materiales por proyección térmica, requiere un profundo conocimiento de las características de estos productos y un amplio estudio de su comportamiento cuando son sometidos a condiciones de servicio muy severas^[1].

La finalidad del presente trabajo es analizar la influencia que tiene el tipo de proyección térmica empleada sobre las características finales de un recubrimiento tipo cermet WC-NiCrBSiFe, utilizando para ello las técnicas de: Plasma, Llama Alta Velocidad (HVOF) y Detonación a Elevada Frecuencia (HFPD).

2. PROYECCIÓN TÉRMICA

La diferencia entre los distintos sistemas de proyección térmica se basa en la fuente energizante

(*) Universidad de Oviedo, Dpto. Construcción e Ingeniería de Fabricación. Campus Universitario, 33203 Gijón, Asturias, España. E. Mail: vhiguera@sci.cpd.uniovi.es

(**) Universidad de Oviedo. Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Campus Universitario, 33203 Gijón, Asturias, España. E. Mail: vhiguera@sci.cpd.uniovi.es

utilizada y el tipo de pistola empleado^[2]. La característica fundamental de un proceso de proyección térmica por arco plasma es conseguir, a través de un arco eléctrico de elevada energía, disociar e ionizar un gas, generalmente inerte, para formar el estado plasma caracterizado por velocidades de proyección del orden de 600 m/s y temperaturas de 10.000 K. Se incorpora a este chorro el material a proyectar, que es fundido y acelerado hasta su impacto con la superficie que se desea recubrir^[3]. En lo que se refiere al proceso HVOF, la elevada energía se consigue en una combustión controlada en la que se consigue un flujo de gases de post-combustión, a una temperatura de 3.400 K y velocidades de las partículas del material a proyectar superiores a los 700 m/s^[4]. La proyección por HFPD, se basa en el cuidadoso diseño de un cañón que permite la detonación de una masa combustible-comburente, de forma cíclica, hasta más de 100 Hz, y controlada, donde se incorpora el material a proyectar. Las partículas del material a proyectar son transportadas en el seno de la corriente de los gases procedentes de la combustión que se encuentran a unos 4.000 K y a velocidades superiores a los 800 m/s^[5].

3. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. Materiales

En el presente trabajo se empleó, como material de sustrato, el acero inoxidable AISI 310 (1,4845 DIN) (25 % Cr, 19 % Ni). Todas las probetas empleadas fueron realizadas de acuerdo a la norma ASTM C633^[6], obtenidas a partir de perfiles calibrados. El recubrimiento se realizó a partir de polvos del material WC-NiCrBSiFe, cuya com-

posición química y granulometría se recogen en la tabla I.

3.2. Proyección térmica

Antes de proceder a la proyección, los sustratos fueron granallados conforme a los procedimientos descritos en la tabla II, donde se muestran también los valores de rugosidad media (Ra) obtenidos después del proceso de preparación superficial descrito.

El material WC-NiCrBSiFe (Fig. 1) fue proyectado térmicamente sobre los sustratos utilizando los parámetros que se exponen en la tabla III.

3.3. Ensayos

El espesor del recubrimiento obtenido, la microestructura, porosidad y contenido de óxidos, fueron determinados empleando técnicas de microscopía óptica. La porosidad y la fracción volumétrica de óxidos se evaluaron de acuerdo a la norma ASTM E562^[7]. Para la determinación de la microdureza Vickers se empleó una carga de 200 g^[8].

Los ensayos de fatiga térmica se realizaron en un combustor experimental de 210 kW de potencia, empleando propano como combustible. La composición de los gases de combustión fue, aproximadamente, idéntica a la que existe en una caldera industrial, manteniéndose durante todo el ensayo un contenido de oxígeno libre entre el 3 y el 3,5 %. Los ciclos de fatiga térmica realizados en el citado combustor consistieron en llevar a cabo cinco ciclos idénticos. Cada ciclo consiste en un primer período de calentamiento a 800 °C (1.073 K), temperatura que se mantiene durante 1 h, seguido de un período de enfriamiento, hasta alcanzar los 100 °C (373K) ($\Delta T_{media} = 12K/min$), al cabo de otra hora.

Tabla I. Composición química del material WC-NiCrBSiFe

Table I. Composition of coating materials WC-NiCrBSiFe

Composición química, %	Ni	Cr	B	Si	Fe	C	WC
Proyección Plasma							
Granulomería 44-105 μ m	51,78	13,26	2,76	3,22	3,15	0,64	25
Proyección ^a HFPD/ ^b HVOF							
Granulometría 16-44 μ m	49,61	13,50	2,73	5,25	3,15	0,68	25

^aHFPD-High frequency pulse detonation

^bHVOF-High velocity oxygen fuel

Tabla II. Preparación superficial mediante granallado

Table II. Grit blasting procedures

Granallado	Plasma	HVOF	HFPD
Abrasivo	Acero angular	Alúmina	Alúmina
Presión aire (MPa)	0,7-1	0,55	0,7
Rugosidad, Ra (mm)	12,7	3,33	4,46

Tabla III. Parámetros más significativos de la proyección térmica efectuada

Table III. Coating materials and thermal-sprayed parameters

Recubrimiento	Plasma - T	HFPD - R	HVOF - S
Aleación micropulverizada	WC-NiCrBSiFe	WC-NiCrBSiFe	WC-NiCrBSiFe
Granulometría (µm)	44 -105	16 - 44	16 - 44
Proyección térmica:	Plasma	HFPD	HVOF
Espesor recubrimiento (µm)	429	450	333
Frecuencia (Hz)	-	60	-
Potencia arco	400A/70 - 80V	-	-
Gas de transporte	Nitrógeno	Nitrógeno	Nitrógeno
Distancia proyección (mm)	125	280	250
Gas plasmógeno y presión (MPa)	N ₂ /H ₂ - 0,34	-	-
Combustible	-	Propileno/Metano	Propileno
Flujo combustible (lpm)	-	55/15	77
Flujo oxígeno (lpm)	-	165	127

Los ensayos de adherencia se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C 633 [6], con el fin de conocer la influencia de los procesos de fatiga térmica en dicha adhesión.

4. RESULTADOS

4.1. Microestructura, microdureza y adherencia de los recubrimientos

La figura 2 muestra la morfología típica de las capas proyectadas. Se representan sólo las microestructuras de las capas proyectadas por plasma y HFPD, siendo muy similares a éstas últimas las obtenidas por HVOF.

Los recubrimientos proyectados, tanto por plasma, llama alta velocidad (HVOF) y detonación a elevada frecuencia (HFPD), afectan a la microdu-

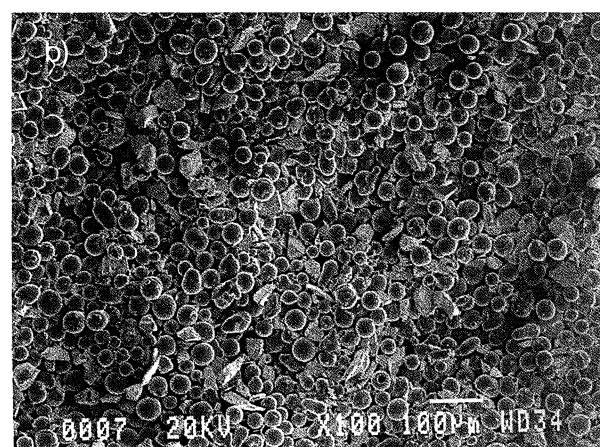


Figura 1. Morfología aleación WC-NiCrBSiFe empleada en las proyecciones. a) Granulometría 44-105 µm. b) Granulometría 16-44 µm.

Figure 1. Morphology of WC-NiCrBSiFe powders. a) Granulometry 44-105 µm. b) Granulometry 16-44 µm.

reza superficial del sustrato receptor (AISI 310), aumentándola de forma considerable, especialmente, en el caso de la proyección por plasma (422 HV) (Fig. 3), alcanzando dicho endurecimiento hasta una profundidad comprendida entre 75-100 µm (HVOF y HFPD) y 225 µm (plasma). Este endurecimiento superficial está muy ligado al proceso de granallado realizado antes de la proyección térmica, (Tabla II). La figura 4 muestra las líneas de deformación producidas a causa de la fuerte deformación plástica que tiene lugar en la región endurecida del sustrato, justo, debajo del recubrimiento.

En la tabla IV se representan los valores medios de microdureza (HV), porosidad y fracción volumétrica de óxidos, así como las desviaciones típicas obtenidas. También, se incluyen en la misma tabla los valores de adherencia de las capas tras su proyección y los valores de adherencia residual

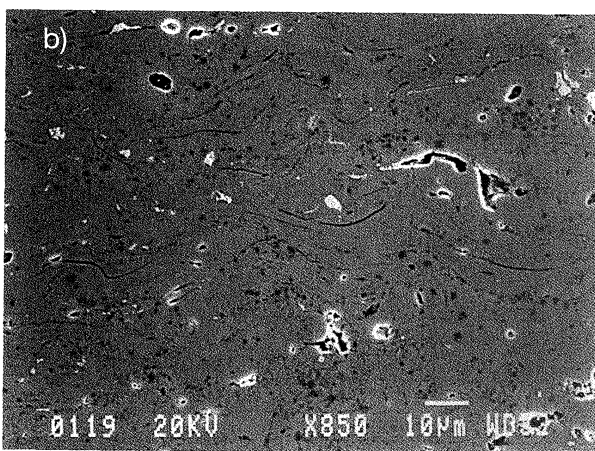
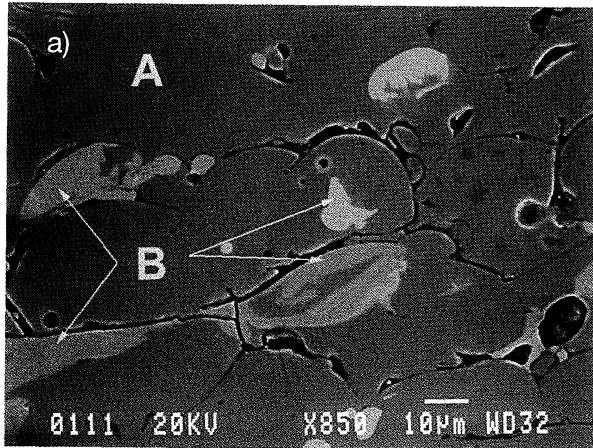


Figura 2. Microestructura del recubrimiento WC-NiCrBSiFe.

Figure 2. Coating microstructure.

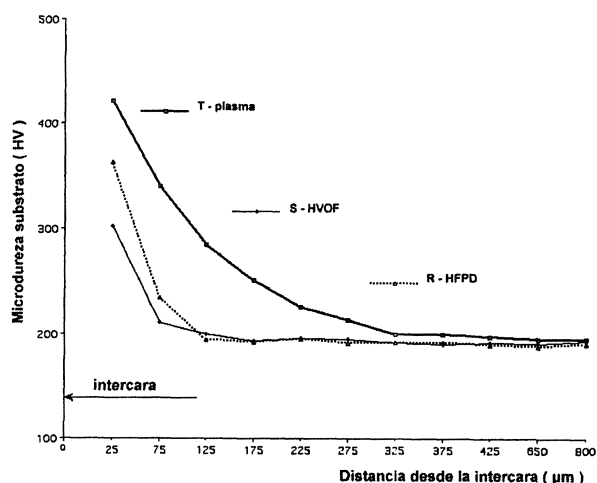


Figura 3. Variación de la microdureza media de un sustrato AISI 310 recubierto por WC-NiCrBSiFe.

Figure 3. As-sprayed substrate microhardness profiles. Distances are measured from the coating-substrate interface. As-sprayed substrate microhardness profiles. Distances are measured from the coating-substrate interface.

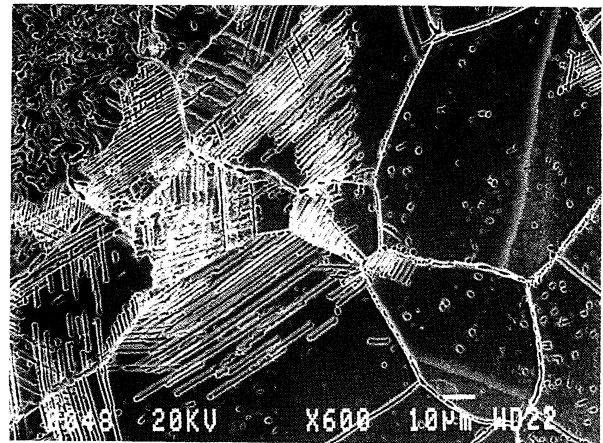


Figura 4. Líneas de deformación en el sustrato en la región cercana al recubrimiento.

Figure 4. Slip bands in the substrate region near the substrate-coating interface.

una vez que estos recubrimientos fueron sometidos a fatiga térmica (100-800 °C /373-1.073K).

El tipo de técnica de proyección empleada influye en la microdureza de las capas WC-NiCrBSiFe, siendo el valor medio (transversal-superficial) para la proyección por plasma, de 832 HV, idéntica para la proyección HVOF para ambas, 130 HV superior al valor obtenido para la misma aleación proyectada por HFPD (698 HV). Una mayor microdureza puede resultar beneficiosa dado el aumento de resistencia al desgaste erosivo que ofrece, si bien, hay que tener en cuenta que estos valores vienen limitados por el riesgo de rotura frágil. Se pone de manifiesto que la proyección por plasma granulometría más gruesa, proporciona valores de la porosidad de la capa apreciablemente mayores que los otros procedimientos de proyección que originan porosidades idénticas. Por otro lado, la proyección por plasma induce la mayor fracción de óxidos, mientras ésta es despreciable para la proyección HVOF.

El procedimiento de proyección afecta, también, al valor de la adherencia de los recubrimientos al sustrato, ya que se obtienen valores aproximados a 60 MPa para las proyecciones HVOF y HFPD y, solamente, 35 MPa, en el caso de la proyección plasma. Tras realizar los ensayos de fatiga térmica en un combustor experimental (100-800 °C /373-1.073 K), la aleación WC-NiCrBSiFe, proyectada por plasma, no mantiene los valores de adherencia iniciales ya que, ésta, disminuye considerablemente, como también, aunque en menor medida, sucede con las otras dos proyecciones, que lo hacen hasta un 57-61 %, respecto a sus respectivos valores iniciales.

Tabla IV. Microdureza de las capas, porosidad y fracción volumétrica de óxidos y adherencia de las capas

Table IV. Coatings microhardness, porosity, volume fraction of oxides and adherence values

Recubrimiento: WC-NiCrBSiFe	Plasma T	HFPD-R	HVOF-S
Microdureza HV en sección transversal	840 ± 39	679 ± 21	794 ± 27
Microdureza HV en sección superficial	824 ± 52	717 ± 43	871 ± 35
Porosidad Vv % en sección superficial	2,0 ± 0,50	0,4 ± 0,25	0,6 ± 0,25
Porosidad Vv % en sección transversal	2,3 ± 0,45	0,6 ± 0,35	0,4 ± 0,15
Oxidos Vv % en sección superficial	1,0 ± 0,35	0,8 ± 0,20	≈ 0
Oxidos Vv % en sección transversal	1,4 ± 0,40	0,9 ± 0,20	≈ 0
Adherencia (MPa) temperatura ambiente	35	63	57
Adherencia (MPa) tras fatiga térmica 100 - 800 °C	12	36	35

5. CONCLUSIONES

Los procesos de proyección térmica empleados para obtener recubrimientos protectores del desgaste producen un importante endurecimiento superficial del sustrato de acero inoxidable, que está muy influenciado por el proceso de granallado previo a la proyección.

La microestructura del recubrimiento depende de la técnica de proyección utilizada: la proyección por plasma da lugar a un recubrimiento con una mayor porosidad y fracción de óxidos que los otros dos procedimientos, que se traduce en una menor adherencia tras la proyección y también en una mayor pérdida de adherencia tras la fatiga térmica. Por el contrario, los recubrimientos realizados por HFPD y HVOF se caracterizan por una alta densidad de capa, una muy alta adherencia tras la proyección y una adherencia suficiente después de la fatiga térmica.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Principado de Asturias a través de la FICYT (Fundación para

el Fomento en Asturias de la Investigación Científica Aplicada y la Tecnología), proyecto número PC-MAT 99-02. Nuestro agradecimiento también a Hidroeléctrica del Cantábrico y al Centro de Proyección Térmica (CPT) de la Universidad de Barcelona, por su colaboración.

REFERENCIAS

- [1] V. HIGUERA-HIDALGO, F.J. BELZUNCE-VARELA, A. CARRILES-MENÉNDEZ y S. POVEDA-MARTÍNEZ, *J. Mater. Sci.* 37 (2002) 649-654.
- [2] S. GRAINGER y J. BLUNT, *Engineering Coatings*, Abington Publishings, UK, 1998, p. 119.
- [3] R.C. TUCKER, *Surface Engineering*, Vol. 5, ASM Handbook. ASM Int., USA, 1994, p. 497.
- [4] J.M. GUILLENAMY, S. ARMADA y J.M. MIGUEL, *Rev. Metal. Madrid* 37 (2001) 161-165.
- [5] I. FAGOAGA, G. BARYKIN, J. DE JUAN, T. SOROA y C. VAQUERO, *Proc. United Thermal Spray Conf.*, Düsseldorf, Germany, edited by DVS-Verlag, 1999, p. 28.
- [6] ASTM C 633, ASTM Standards (1979).
- [7] ASTM E 562, ASTM Standards (1976).
- [8] F.J. BELZUNCE-VARELA, V. HIGUERA-HIDALGO y S. POVEDA-MARTÍNEZ, *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio* 39 (2000) 333-336.