

Recubrimiento de *Stellite 6* sobre acero inoxidable realizado con láser de CO₂ para válvulas de escape de motores diesel^(*)

M. Cadenas*, J.M. Cuetos*, J.E. Fernández*, M.R. Fernández*, L.M. Vega** y J. de Damborenea***

Resumen Para abaratar el coste de recuperación o sustitución de válvulas de escape en motores diesel, estas se fabrican con un material base económico, recubriéndose el asiento de la válvula con otro material al que se exigirá elevada dureza y buena resistencia al impacto, a la corrosión y al desgaste erosivo en caliente (>550 °C) y sin lubricación. Partiendo de esta idea, en el presente trabajo se han determinado los parámetros adecuados para realizar, mediante la técnica de plaqueado láser, un recubrimiento con *Stellite 6*, sobre sustratos de acero AISI 304 (probetas planas) y SAE EV8 (válvulas reales). Sobre las válvulas, se depositaron uno y dos cordones superpuestos, se minimizó la presencia de poros y grietas, modificando el grado de solape inicial y final de los cordones circulares y la potencia en función del ángulo girado. Así, se consiguieron cordones de espesor uniforme. Tras los tratamientos, se estudiaron la dureza, dilución y microestructura final de los distintos recubrimientos, observándose, en los cordones sobre probetas planas, diluciones del 10 % y durezas de 550 HV, mientras que, en las válvulas con un cordón, eran del 25 % y 430 HV, respectivamente. Con dos cordones superpuestos, la dureza llegaba a 470 HV en el cordón superior.

Palabras clave Válvula de escape. Recubrimiento. *Stellite*. Láser. Aleaciones base cobalto.

Laser cladding of *Stellite 6* on stainless steel diesel engine exhaust valves

Abstract To reduce the recovery or the replacement costs of diesel engine exhaust valves, they are manufactured with an economic base material, and a coating which is deposited on the seat valve in order to reach high hardness and good impact, corrosion and high temperature wear resistance (>550 °C) and without lubrication. In this work, appropriate laser cladding parameters have been determined to obtain *Stellite 6* coatings over AISI 304 steel (as plane test specimens) and SAE EV8 steel (as valves) substrates. One and two superimposed tracks were deposited on the seat valves, and modifying the laser power as a function of the rotated angle at the beginning and the end of the circular tracks, pores and cracks have been minimized and the thickness of the track were made uniform. Hardness, dilution and final microstructure of the different coatings have been analysed. A 10 % dilution and 550 HV in the tracks over plane test specimens was observed, while valves with one track showed 25 % and 430 HV respectively. With two superimposed tracks the hardness was up to 470 HV in the upper track.

Keywords Exhaust valve. Coating. Laser cladding. *Stellite*. Co-based alloys.

1. INTRODUCCIÓN

El asiento de las válvulas de escape de los motores diesel de combustión tiene que soportar temperaturas superiores a 550 °C, esfuerzos mecánicos por impacto, rozamiento por deslizamiento y desgaste erosivo y corrosivo a consecuencia de los produc-

tos (haluros y ácidos) que son arrastrados, a alta temperatura y gran velocidad, por los gases generados en la combustión^[1 y 2]. Los daños ocasionados, por mínimos que sean, suprimen la estanqueidad del cierre de la válvula y reducen, en gran medida, la eficiencia del motor^[3].

(*) Trabajo recibido el día 28 de octubre de 2002 y aceptado en su forma final el día 9 de diciembre de 2002.

(*) Univ. de Oviedo. Área de Ing. Mecánica. Sede Dptal. Oeste, edificio 5. Campus Universitario s/n. 33203 Gijón (España).

(**) Univ. de Cantabria. Área de Ing. Mecánica. E. S. Marina Civil. Gamazo 1. 39003 Santander (España).

(***) CENIM-CSIC. Dpto. de Corrosión y Protección. Avda. Gregorio del Amo, 8. 28040 Madrid (España).

Para abaratar el coste que supone la recuperación o sustitución de las válvulas, se suelen fabricar con un material base, relativamente económico (generalmente aceros austeníticos de cromo-níquel), recubriendo, solamente el asiento de la válvula, con un material al que se le exigirá elevada dureza y buena resistencia al impacto, a la corrosión y al desgaste erosivo en caliente (>550 °C) y sin lubricación^[1, 2 y 4]. Por esta razón, en los últimos años, ha tenido gran auge el desarrollo de nuevos recubrimientos y aleaciones para asientos de válvulas y de nuevas técnicas de recargue. El recubrimiento superficial mediante láser (*laser cladding*), tiene un mercado emergente en la recuperación de componentes que han perdido material, como consecuencia del desgaste, y para el desarrollo de motores de altas prestaciones con excelente resistencia al desgaste y a la corrosión^[5]. Las capas obtenidas con esta técnica presentan mayor dureza, una porosidad nula, una excelente unión metalúrgica con el sustrato y dilución y espesor de capa controlables con los parámetros del proceso^[6 y 7].

El objetivo de este trabajo se centra en el estudio de los parámetros adecuados para la obtención de recubrimientos base cobalto sobre probetas reales de geometría complicada mediante el plaqueado láser. Se estudian las distintas variables que afectan al proceso, los ángulos relativos del inyector de polvo y las potencias empleadas, así como la microestructura y dureza de las zonas tratadas.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El plaqueado láser se hizo mediante el clásico montaje consistente en un haz focalizado sobre una superficie a la que intercepta, simultáneamente, junto a una corriente del polvo que se desea constituya el recubrimiento. Para ello, se empleó un equipo láser continuo de CO₂ Rofin Sinar, de 1700 W de potencia nominal con un modo de operación del tipo TEM₀₁*. La inyección del polvo se realizó fuera del cabezal focalizador del láser con un inyector situado a 60° de la horizontal, de 2,5 mm de diámetro, al que le llega el polvo arrastrado por gas argón a 3 bar, a través de una manguera flexible, desde un alimentador de polvo Metco 4MP. Se emplearon caudales de polvo entre 10 y 25 g/min. Una corriente de gas horizontal a la salida de la boquilla proporciona protección adicional al cabezal frente a la proyección de partículas. En la tabla I, se recoge la composición química, tanto del polvo de la aleación empleada como de los materiales base.

Las primeras pruebas se realizaron sobre probetas planas de 60x40x10 mm de AISI 304 (UNE F3504). Una vez definidos los parámetros de procesado y, cómo éstos influían en la geometría, dureza, dilución y microestructura del recubrimiento, se procedió a utilizar, como material base, válvulas de acero inoxidable austenítico SAE EV8, (UNE F-3217), con composición y propiedades físicas ligeramente diferentes. Para el recubrimiento, se ha utilizado Stellite 6 (UNS 30006), que es una

Tabla I. Composición química de los materiales utilizados

Table I. Composition of Stellite 6, AISI 304 and SAE EV8 steel (wt.%)

% masa	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Co	W	Fe
Stellite 6	1,14	0,42	1,22	28,3	2,85	0,68	58,9	5,05	1,26
AISI 304	≤ 0,08	≤ 2	0,28	17,52	8,61				base
SAE EV8	0,48-0,58	8-10	≤ 0,25	20-24	3,25-4,5				

Tabla II. Propiedades físicas de los materiales utilizados

Table II. Physical properties of coating and base materials

Material	Conductividad Térmica (W/Km)	Coef. Dilat. Térmica (20 - 100 °C) (×10 ⁻⁵ K ⁻¹)	Dureza (HV)	Densidad (Kg/dm ³)
Stellite 6 (polvo)	14,82	13,86	425	4,58
AISI 304	15	16	< 210	7,9
SAE EV8	14,5	15,5	365	7,8

aleación base cobalto en forma de polvo, de granulometría entre 45-150 µm. En la tabla II se presentan las propiedades físicas de todos los materiales mencionados.

Se obtuvieron cordones con distintos parámetros, modificando, fundamentalmente, el caudal de polvo, la velocidad del proceso y la desfocalización. Posteriormente, se cortaron las probetas para observar la microestructura, la posible existencia de defectos internos, las dimensiones de la zona tratada y afectada térmicamente y medir microdurezas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se ha comentado anteriormente, en primer lugar, se trató de encontrar los parámetros adecuados mediante la realización de tratamientos sobre probetas planas. Tras los ensayos preliminares, los parámetros óptimos para el procesado con láser de probetas planas son los que se muestran en la tabla III.

Con estas variables se consiguieron cordones de 2,6 mm de ancho y 0,5 mm de espesor, en los que no se detectaron defectos superficiales ni tampoco poros o grietas a lo largo del recubrimiento.

La estructura metalográfica (Fig. 1) presenta tres zonas diferenciadas: una zona de solidificación continua próxima al sustrato (marcada como 1, en la micrografía), una zona intermedia de dendritas más gruesas (2, en la micrografía) y finalmente, la zona más cercana a la superficie del cordón, con dendritas más finas (3, en la misma figura).

En la tabla IV se presentan los análisis realizados en las tres zonas mencionadas, mediante la técnica de dispersión de energías (EDS), que revelan poca variación en la composición de la matriz a lo largo de todo el cordón. También, se pudo apreciar una fase dispersa por la región interdendrítica que, según reveló el análisis EDS, estaba

Tabla III. Parámetros finales del recubrimiento con láser

Table III. Laser treatment parameters

Parámetros	Probetas planas	Asiento de válvulas
Potencia máxima:	1910 W	1910 W
Diámetro del haz:	3,7 mm (= 175 W/mm ²)	5 mm (= 100 W/mm ²)
Caudal de polvo:	20 g/min.	25 g/min.
Velocidad de proceso (o del cabezal giratorio):	5 mm/s	800 °/min. (= 5 mm/s en los puntos centrales del asiento)

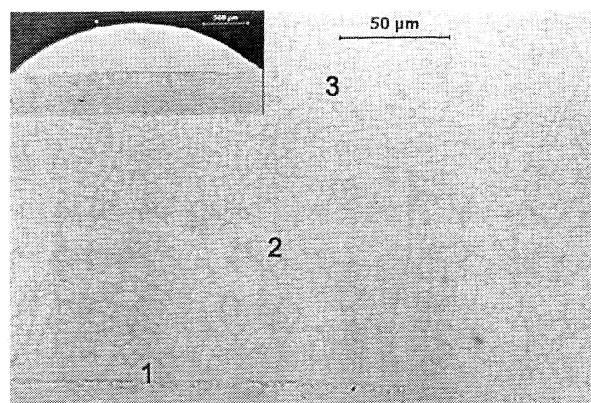


Figura 1. Sección y estructura de un cordón de Stellite 6 sobre AISI 304 realizado con láser.

Figure 1. Optical micrographs of the cross-section of Stellite 6 coating over an AISI 304 stainless steel.

Tabla IV. Composición obtenida por EDS en diferentes zonas de un cordón de Stellite 6 sobre AISI 304 realizado con láser

Table IV. EDS coating composition across the track from surface (3) to interface (1).

% masa	Co	Cr	Fe	Mo	Ni	W
Superficie (3)	49,03	24,14	11,19	0,42	7,22	4,32
Zona central (2)	49,59	23,11	13,19	0,17	7,31	3,57
Interfase (1)	50,66	20,71	14,96	0,11	7,98	2,99

constituida por carburos, principalmente, lo que concuerda con la bibliografía consultada^[8 y 9].

Como se puede observar en dicha tabla, la dilución del hierro es pequeña a lo largo del cordón (entre el 11 y el 13 % en peso). La mayor dilución (15 %) fue hallada en la zona más cercana a la interfase, pero esto asegura un perfecto anclaje entre el sustrato y el cordón. También, es interesante destacar que el contenido en níquel del recubrimiento aumenta, desde un 2,85 % en peso original de la Stellite en polvo hasta un 7 %, lo que indica una apreciable difusión desde el acero inoxidable. Por otro lado, la cantidad de cromo, wolframio y molibdeno disminuyen en el cordón al acercarse al sustrato, mientras que el hierro, el cobalto y el níquel aumentan. El carbono no se contabiliza, por limitaciones de la técnica empleada.

Con respecto a las durezas, los valores encontrados son los que se presentan en la figura 2 y que, en función del tipo de probeta y del tratamiento, llegaban a valores en torno a los 500 HV_{0,2}.

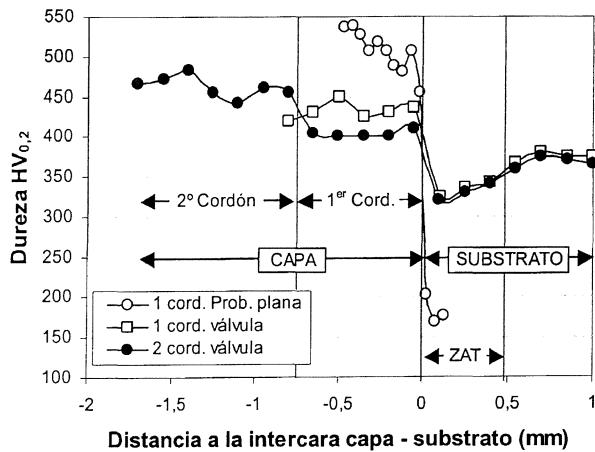


Figura 2. Gráfico de microdurezas y de espesores de cordón.

Figure 2. Microhardness profile vs. depth of the laser treated specimen.

Partiendo de estos parámetros, se procedió a la realización de los tratamientos sobre las válvulas. Para ello, se dispuso de un montaje experimental como el que se presenta en la fotografía de la figura 3, en el que el vástago de la válvula se fijó a un cabezal giratorio que le proporcionaba el movimiento de rotación. Usando, inicialmente, los parámetros utilizados para recubrir las probetas planas no se obtuvieron buenos resultados. En concreto, se comprobó que el sustrato (la válvula) se calentaba mucho más que las probetas planas, lo que provocaba un fuerte aumento en la dilución. Además, se observaron grietas en algunos cordones y los valores de dureza disminuían apreciablemente.

Este diferente comportamiento hay que buscarlo, en primer lugar, en la propia naturaleza del material

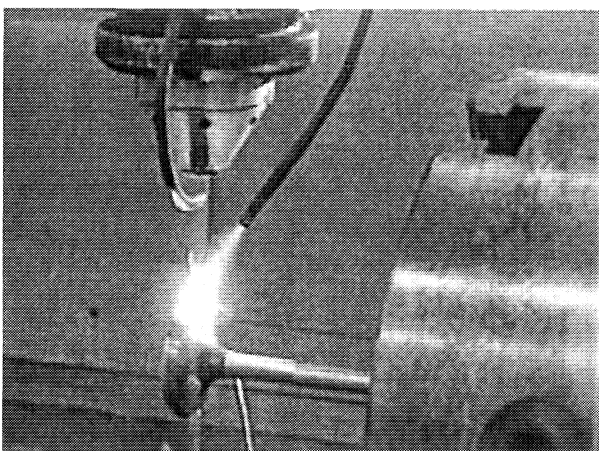


Figura 3. Detalle del proceso de recargue.

Figure 3. CO₂ laser cladding setup for coating exhaust valves.

base empleado. Como se ha presentado en la tabla II, la conductividad térmica del SAE EV8 es ligeramente inferior a la del AISI 304, lo que contribuye a su mayor calentamiento. Por otra parte, el cambio en la forma del sustrato va a influir en la distribución del calor en la superficie de la probeta. Téngase en cuenta que el espesor, en la zona del asiento de las válvulas, varía entre 1 y 4 mm, mientras que en las probetas planas eran bloques de espesor uniforme. Este espesor tan pequeño en las válvulas hace que sea más difícil disipar el calor, alcanzando mayor temperatura y la fusión de más cantidad de sustrato, aumentando la dilución y disminuyendo la dureza.

Por último, los cambios en la disposición del propio proceso de recubrimiento juegan un papel importante en las características finales del mismo. Cuando se recargan probetas planas, su superficie se dispone perpendicularmente a la dirección del haz láser y la tobera del polvo, inclinada en un ángulo cercano a los 60°, respecto a la superficie. Sin embargo, en el recargue del asiento de las válvulas, la superficie a recubrir se sitúa con una inclinación de 45°, respecto a la dirección del haz láser y en dirección casi perpendicular al chorro de polvo que sale de la tobera (Fig. 4a). Esta disposición hace que, al utilizar en las válvulas los mismos parámetros que para el recargue de las probetas planas, la proyección horizontal del ancho del cordón sea bastante menor que el diámetro del haz y, por ello, parte de la radiación láser llega directamente al material causando que éste se caliente excesivamente y se funda (Fig. 4b).

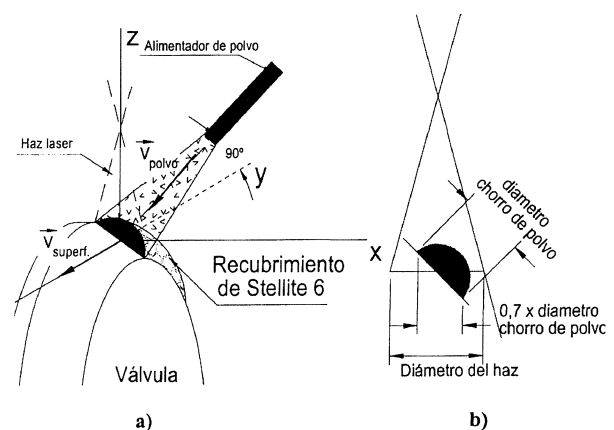


Figura 4. a) Formación del cordón en la válvula. b) Relación entre diámetros del chorro de polvo y del haz en la superficie de la válvula con los parámetros de recargue de las probetas planas.

Figure 4. a) Formation of the track into the valve. b) Relationship among diameter of the powder feeder and the laser beam in the surface of the valve.

Por todos estos motivos, se modificaron los parámetros para recargar las válvulas, de acuerdo con los valores recogidos en la misma tabla III. Como puede apreciarse, no sólo se redujo el caudal de polvo y el tiempo de interacción haz/material, sino que hubo que variar la densidad de potencia del láser en función del ángulo girado en el solape de inicio y fin de los cordones circulares, según el ciclo representado en la figura 5. Esta modificación fue necesaria para lograr cordones de espesor uniforme y evitar poros y grietas en el solape, que es una de las zonas más críticas en este tipo de tratamientos.

Las estructuras obtenidas en probetas sobre válvulas reales, no muestran grandes diferencias con las encontradas en las probetas planas de AISI 304. Es decir, una estructura dendrítica (Fig. 6), con las dendritas más gruesas en la zona cercana al sustrato, pero sin la zona laminar en la separación con el sustrato, tan definida, como en el caso de las probetas planas (Fig. 7).

La evolución de la microdureza del cordón en su zona central puede apreciarse en la figura 2. El espesor del cordón alcanza, en esa zona, los 0,85 mm y su dureza media se sitúa en torno a 430 HV_{0,2}, mientras que la dureza de las dendritas era de 456 HV_{0,1}. Se observa, también, una zona afectada térmicamente (ZAT), de 0,5 mm de espesor, en la que la dureza cae hasta 320 HV_{0,2}, mientras que la dureza del sustrato es del orden de 370 HV_{0,2}. La dilución alcanza valores entre el 20 y el 25 %.

Dado que, la dureza alcanzada en este caso es menor que en las probetas planas de AISI 304 y que el espesor en los laterales del cordón es, de apenas, 0,2 mm, se realizó, también, el recubrimiento del asiento de la válvula superponiendo dos cordones, utilizando los mismos parámetros de proceso para ambos.

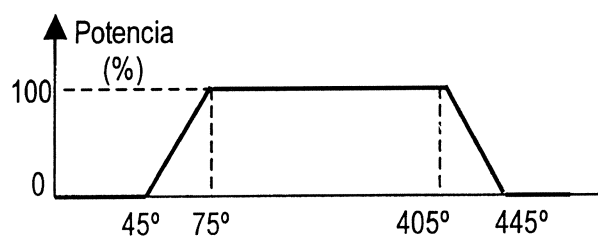


Figura 5. Variación de la potencia láser en función del ángulo girado para el recargue del asiento de las válvulas.

Figure 5. Variation of the laser power as a function of the rotating angle for the cladding of the seat valves.

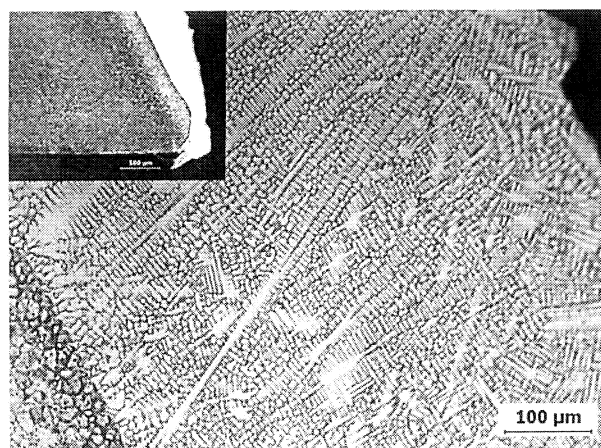


Figura 6. Asiento de válvula de acero SAE EV8 recubierto con un solo cordón de Stellite 6.

Figure 6. Valve seat (SAE EV8 steel) coated with a single Stellite 6 track.

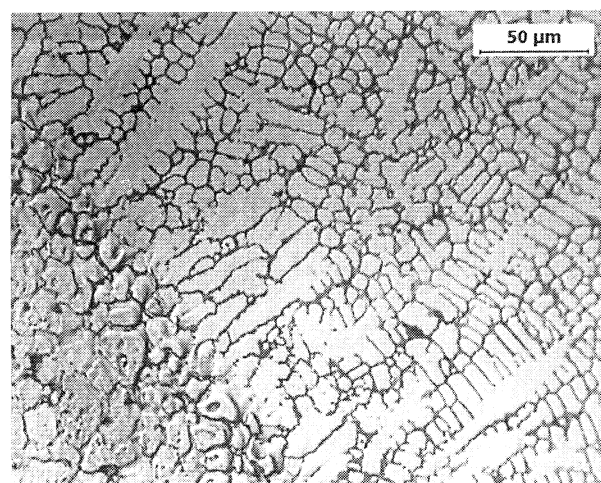


Figura 7. Detalle de la zona de unión con el sustrato en válvulas recubiertas con un cordón.

Figure 7. Detail of the interface base material/clad layer in valves with a single track.

En este caso (Fig. 2), el segundo cordón depositado alcanza, en su zona central, un espesor de 1,1 mm, mientras que el del primero es de 0,75 mm. Se obtuvieron durezas más elevadas, 470 HV_{0,2}, en el cordón superior, y de solo 400 HV_{0,2} para el primer cordón depositado, inferior a la dureza del recubrimiento realizado con un solo cordón. Las durezas de la ZAT y del sustrato son similares al caso de un solo cordón.

Las micrografías de las figuras 8 a 10 confirman este resultado, mostrándonos una estructura dendrítica del cordón superior claramente más afinada que en el cordón inferior. Las dendritas de éste último son, también, más gruesas comparadas con las

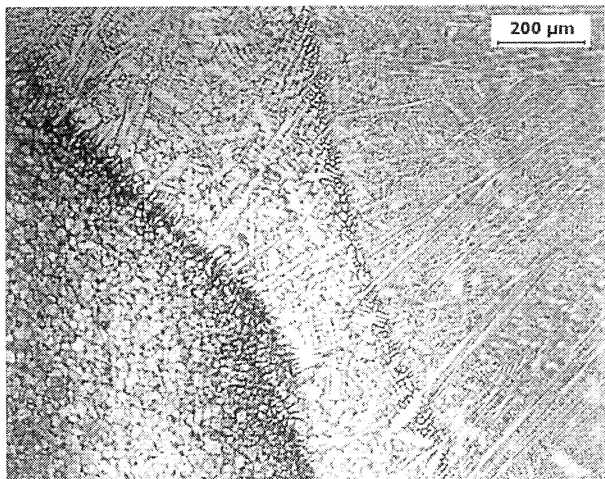


Figura 8. Asiento de válvula recubierto con dos cordones superpuestos de Stellite 6.

Figure 8. Valve Seat after laser cladding of two superimposed tracks Stellite 6.

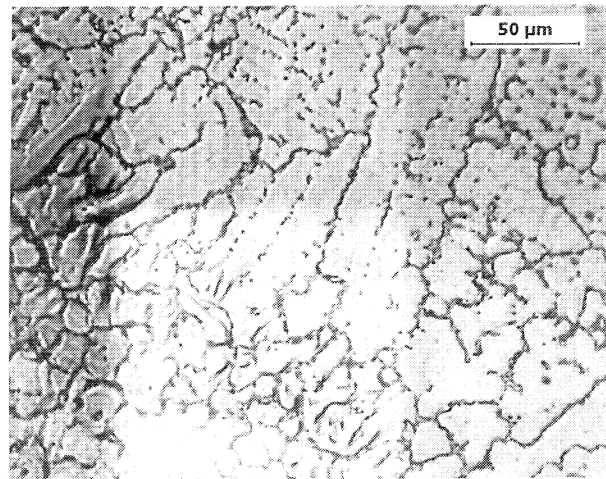


Figura 10. Detalle de la zona de unión con el sustrato en válvulas recubiertas con dos cordones superpuestos.

Figure 10. Detail of the microstructure in the interface coating/base metal in valves coated with two superimposed tracks.

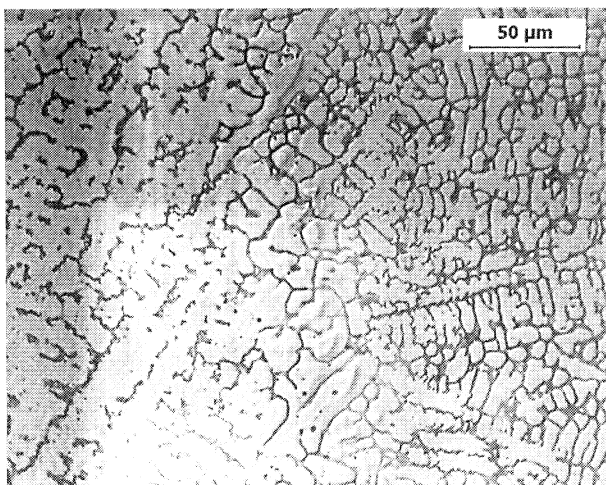


Figura 9. Detalle de la interfase entre el 1er y el 2º cordón en válvulas recubiertas con dos cordones superpuestos.

Figure 9. Details of the interface between the 1st and the 2nd track in valves coated with two superimposed tracks.

del recubrimiento de un solo cordón. El aumento de espesor, debido a la capa previa, mejora el gradiente de temperatura, permitiendo un enfriamiento más rápido de esta segunda capa, mientras que el primer cordón ha estado más tiempo expuesto a altas temperaturas que, en caso de depositar un solo cordón.

4. CONCLUSIONES

Los parámetros de proceso, utilizados para recargar con láser Stellite 6 sobre probetas planas, han de modificarse para recubrir los asientos de las válvu-

las, porque se trabaja con una configuración de proceso y con una geometría de sustratos diferente, que influye en la absorción de energía y en la velocidad de enfriamiento. Son la causa de las diferencias en espesores, diluciones, durezas y estructura micrográfica de los recubrimientos.

Sobre probetas planas de AISI 304, los cordones de Stellite 6 presentaron durezas superiores a 500 HV y dilución en torno al 10 %, sin poros ni grietas. Por otra parte, cuando se realizó un solo cordón sobre las válvulas de SAE EV8, la dureza cayó a 430 HV y la dilución se estimó en un 20-25 %. Cuando se realizaron dos cordones superpuestos, la dureza del cordón superior alcanzó los 470 HV, mientras que la del inferior cayó hasta los 400 HV.

Agradecimientos

Al Ministerio de Educación y Cultura por subvencionar el Proyecto FEDER 1FD97-2020-C01 y C03, "Recubrimiento de válvulas de motores diesel mediante láser de CO₂", marco de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] W. AIHUA, T. ZENGUI y Z. BEIDI, *Weld. Res. Supl.* (April 1991) 106-109.
- [2] B.M. ASTASHKEVICH y G.S. ZINOV'EV, *Weld. Int.* 10 (1996) 394-396.

- [3] C.G. SCOTT, A.T. RIGA y H. HONG, *Wear* 181-183 (1995) 485-494.
- [4] M. KAWASAKI, S. KATU, K. TAKASE, M. NAKAGAMA, R. MORI, M. NEMOTO, S. TAKAGI y H. SUGIMOTO, *Proc. 25th ISATA*, 1992, pp 293-300.
- [5] J. DAMBORENEA, A. CONDE, I. GARCÍA, M. CADENAS, J.M. CUETOS y E. FDEZ. RICO, *Proc. XV International Corrosion Congress*, Granada, 2002.
- [6] S. D'OLIVEIRA, P.S. DA SILVA Y R. VILAR, *Surf. Coat. Tech.* 153 (2002) 203-209.
- [7] A. FRENK, J.D. VANDYOUSSEFI, A. WAGNIÈRE, A. ZRYD y W. KURZ, *Metall. Mater. Trans. B* 28b (1997) 501-508.
- [8] R. COLAÇO, T. CARVALHO Y R. VILAR, *High Temp. Chem. Process* 3 (1994) 21-29.
- [9] Z. WANG, Q. ZHENG, Q. PAN, S. SHI, T. WANG y J. GU, *SPIE* 3862 (1999) 388-391.