

Optimización de la eficiencia del proceso de aporte por láser de recubrimientos de alta dureza mediante el estudio de diferentes tipos de boquillas coaxiales

Optimization of the efficiency of the laser metal deposition process applied to high hardness coatings by the analysis of different types of coaxial nozzles



Pedro Ramiro-Castro¹, Mikel Ortiz-Edesa¹, Amaia Alberdi-Gurrutxaga¹ y Aitzol Lamikiz-Mentxaka²

¹ Fundación Tecnalia Research and Innovation (España)

² Universidad del País Vasco | UPV/EHU (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8836>

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el número de máquinas herramienta que integran tanto el proceso de mecanizado como el proceso de aporte por láser va en aumento, ofreciendo la posibilidad de combinar ambos procesos a conveniencia cuando sea necesario. Este hecho aumenta la flexibilidad de las máquinas multiproceso convirtiéndolas en máquinas híbridas [1-3] y cambiando el concepto clásico de fabricación al permitir generar estructuras "near-net shape" mediante fabricación aditiva en vez de tener que obtener la preforma mediante el mecanizado de una gran cantidad de material. Sin embargo, aunque el proceso de aporte por láser o LMD mediante polvo ofrece ventajas en cuanto a los residuos generados comparándolo, desde un punto de vista cuantitativo, con el mecanizado convencional, desde el punto de vista cualitativo los residuos generados en el aporte laser son más difíciles de gestionar. De hecho, uno de los principales retos de las máquinas híbridas, y que también es el más desconocido para el público especializado, es la dificultad de combinar las operaciones de aporte de material y mecanizado debido a los diferentes tipos de residuos que se generan.

Dependiendo de las condiciones de aporte, la eficiencia del proceso en térmi-

nos de cantidad de polvo que realmente se aporta respecto del total que se inyecta, puede llegar a ser del 50 % [4], lo que supone que el 50 % de polvo restante cae dentro de la máquina y se dispersa. Así pues, el polvo no aportado es un elemento presente en el ambiente [5], en las virutas, en la taladrina, y en la mesa y las guías de la máquina. En este punto, es importante tener en cuenta que la granulometría del polvo empleado en LMD oscila desde 30 hasta 145 micras de diámetro. Algunos de los problemas generados son:

- Los sistemas de filtrado convencionales no separan estas partículas de la taladrina, por lo que, al ser reutilizada, la taladrina presenta las partículas de polvo no filtrado entrando en contacto con pieza y herramienta [6], pudiendo dañar la superficie de ambas y provocando un proceso de mecanizado deficiente. Además, estas partículas entran en contacto con todos los elementos del sistema de bombeo y distribución de la taladrina pudiendo deteriorarlos.
- El polvo presente en las virutas puede entrar en contacto con elementos móviles del sistema mecánico de extracción de virutas, acumulándose y generando daños a medio-largo plazo.
- El contacto de la taladrina con las partículas de polvo metálico genera lodos finos que deben ser tratados aparte mediante un filtrado con banda continua de papel o precapa más típico en rectificadoras [7].
- El contacto o la inhalación del polvo metálico tiene riesgos para la salud del operario dependiendo del material, concentración ambiental y del tiempo de exposición [8-9].

Por lo tanto, es necesario desarrollar sistemas de limpieza, filtrado y extracción del polvo residual de las operaciones de aporte. Sin embargo, el coste y eficacia de estos sistemas serán más críticos cuanto menor sea la eficiencia del proceso de aporte independientemente de la posibilidad de reutilizar el polvo residual [10-11]. Como consecuencia, todos los problemas descritos pueden reducirse alcanzado un proceso de aporte de alta eficiencia, donde el material aportado apenas genere residuos.

A pesar de que los parámetros principales que rigen el proceso LMD son la potencia del láser, diámetro del haz láser o spot, la velocidad de avance y el flujo másico de polvo [12], la eficiencia máxima que se puede alcanzar está muy condicionada a una correcta selección de otros parámetros (p. ej. distancia de la boquilla al sustrato), al tipo de boquilla seleccionado (lateral, coaxial discreta de varias vías o coaxial continua) y a la disposición de trabajo (aporte con el cabezal vertical o inclinado sobre sustrato horizontal o inclinado). No obstante, aunque se conoce que estos factores son influyentes, la cuantificación de sus efectos no es clara en muchos casos.

Un caso muy habitual en diferentes sectores industriales es el recubrimiento de componentes de revolución [13-14], que posteriormente se van a emplear en maquinaria. Normalmente, en la producción de recubrimientos de gran dureza en geometrías de revolución mediante LMD, la disposición típica es la del cabezal laser trabajando en posición vertical mientras que el sustrato gira sobre su propio eje de revolución, por lo que el flujo de polvo no sufre grandes desviaciones de dirección por la gravedad. Aunque teóricamente las boquillas coaxiales continuas [15] alcanzan mayores eficiencias que las discretas trabajando verticalmente, no está claro si son capaces de conseguir la misma productividad tanto en superficie recubierta por minuto como en cantidad de material aportado por hora.

El presente trabajo detalla el estudio realizado mediante el aporte de cordones empleando tres tipos de boquillas diferentes (dos coaxiales continuas de distinto diámetro y una discreta de 4 vías) en términos de eficiencia, productividad y

calidad con el objetivo de comparar sus resultados y cuantificar cual es la mejor opción para la aplicación antes descrita.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

Actualmente, los materiales en polvo utilizados habitualmente en recubrimientos realizados por LMD suelen ser aleaciones de base níquel, cobalto o hierro que tradicionalmente se han empleado en recubrimientos realizados por proyección térmica debido a su gran dureza, alta resistencia a la corrosión y/o buenas propiedades en aplicaciones a altas temperaturas. Pese a que hay gran cantidad de trabajos realizados aportando aleaciones de base cobalto y níquel [16-17] generalmente con precalentamiento del sustrato [18-19], el material seleccionado para los revestimientos ha sido una aleación de base hierro, en concreto Eutroloy 16606A, debido a los buenos resultados obtenidos en trabajos previos donde se obtuvieron recubrimientos de gran resistencia y dureza sin defectos y sin necesidad de precalentamiento del sustrato [4], siendo este último del mismo material que el empleado en el presente trabajo.

El sustrato que se ha utilizado es un cilindro templado de 74 mm de diámetro y 160 mm de longitud de acero aleado 42CrMoS4 con una dureza de 52 HRC, típicamente usado en la producción de husillos, cigüeñales y ejes.

2.2. MAQUINA HÍBRIDA

Como se ha mencionado anteriormente, todo el trabajo se ha desarrollado en la máquina híbrida IBARMIA ZVH45/1600 Add+process (Fig. 1). Esta máquina multiproceso combina la tecnología LMD con la capacidad de fresado en 5 ejes y torneado. Esta máquina está equipada con el cabezal laser de Precitec YC52LMD, un alimentador de polvo Sulzer Metco TWIN-10-C y

un generador laser Rofin FL030 de 3 KW con una longitud de onda de 1,07 μm .

Las boquillas que se han usado para este estudio son una coaxial discreta y dos coaxiales continuas. El cabezal laser dispone de un sistema modular que permite cambiar fácilmente de un tipo de boquilla a otro. La boquilla discreta (Fig. 2.a) se compone de 4 vías que inyectan el polvo de manera coaxial al haz laser, generando un diámetro teórico de polvo en el punto de máxima concentración de 2 mm. Su mayor ventaja es la capacidad de aportar en ángulo sin grandes pérdidas de eficiencia respecto al aporte en vertical ya que el flujo de polvo sale a mayor velocidad que en un sistema coaxial continuo y las desviaciones debidas a la gravedad afectan solo levemente a la trayectoria del polvo. Por el contrario, las boquillas coaxiales continuas (Fig. 2.b), distribuyen el polvo en un anillo coaxial al haz láser que cae por gravedad, concentrando de manera más eficiente el polvo, pero con la desventaja de estar diseñadas para aportar solo verticalmente. En este trabajo se han usado dos boquillas coaxiales continuas de diámetros mínimos teóricos de flujo de polvo de 1mm y de 0,50 mm respectivamente.

2.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.3.1. Caracterización de las boquillas

El proceso de aporte láser mediante polvo metálico se caracteriza por fundir el sustrato generando un baño fundido donde el polvo inyectado es "atrapado" generando una unión metálica de gran calidad. Los parámetros principales de este proceso son la potencia laser (P), el avance del cabezal (F), el flujo másico de polvo inyectado (\dot{m}_p) y el diámetro del spot laser. Sin embargo, antes de seleccionar los parámetros principales del proceso, es importante caracterizar en cada boquilla la distancia focal del polvo (distancia en la que el flujo de polvo converge y alcanza

su diámetro mínimo), la anchura del baño fundido y la distribución de polvo en el flujo, ya que esto permitirá sacar el máximo rendimiento a cada tipo de boquilla. Las tres boquillas seleccionadas presentan distintos puntos y diámetros de concentración del flujo por lo que cada una precisará de distintos tamaños de baño fundido en el sustrato. Se debe resaltar que el diámetro del flujo de polvo se va reduciendo hasta converger en una distancia donde el diámetro es mínimo para luego volver a dispersarse (Fig. 2) y que la eficiencia del proceso aditivo depende de la cantidad de polvo metálico atrapado en el baño fundido. Es por esto por lo que el tamaño del baño fundido debe ser de una dimensión similar o mayor a la del diámetro de máxima concentración del flujo de polvo para poder atrapar la mayor cantidad de material posible.

En primer lugar, se ha determinado la distancia focal del polvo. Una mala selección de esta distancia definirá una posición de trabajo que no será capaz de sacar el máximo rendimiento del proceso de aporte, independientemente de los valores de los parámetros principales. Esta distancia se ha determinado en primer lugar de una manera aproximada mediante el análisis de imagen del flujo de polvo para diferentes boquillas (Fig. 2). Este análisis se ha realizado mediante el software Clemex Captiva®. A partir de este valor aproximado, se ha optimizado su valor midiendo la concentración de polvo a distintas distancias de trabajo. Para ello, se ha empleado la misma metodología utilizada por Taberner et al. [20], que consiste en utilizar recipientes con diferentes diámetros y medir la cantidad de polvo que recoge cada uno de ellos a distintas distancias de la boquilla. Mediante este estudio, se ha encontrado el diámetro mínimo del foco de polvo para cada tipo de boquilla y su posición respecto a la misma (distancia focal).

Como se ha comentado anteriormente, la cantidad de polvo que puede ser "atrapado" por el proceso depende del tamaño del baño fundido que se puede generar en el sustrato mediante el láser y depende (sin aportar material) de los tres parámetros con los que se calcula la densidad de energía: potencia del láser, diámetro del spot y velocidad de avance. Para estudiar los efectos de estos tres parámetros en la anchura del baño fundido, se han medido las huellas que deja el haz láser sobre el sustrato para diferentes condiciones de diámetro de spot, potencia del láser y velocidad de avance en la distancia óptima entre sustrato y boquilla.

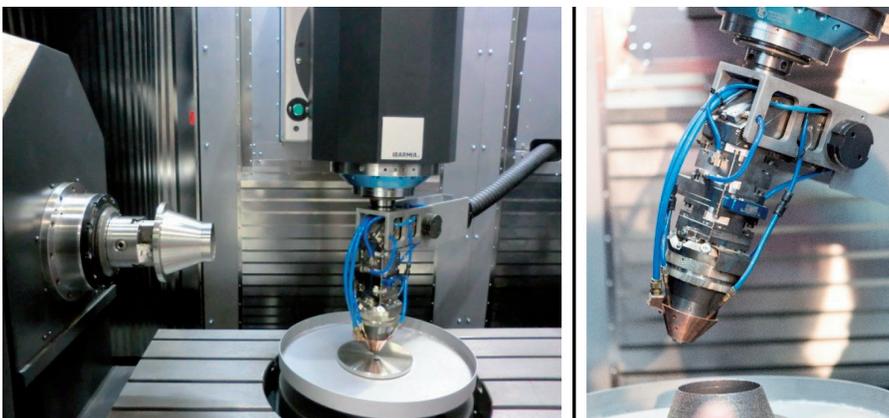


Fig. 1: Máquina híbrida IBARMIA ZVH45/1600 Add+process

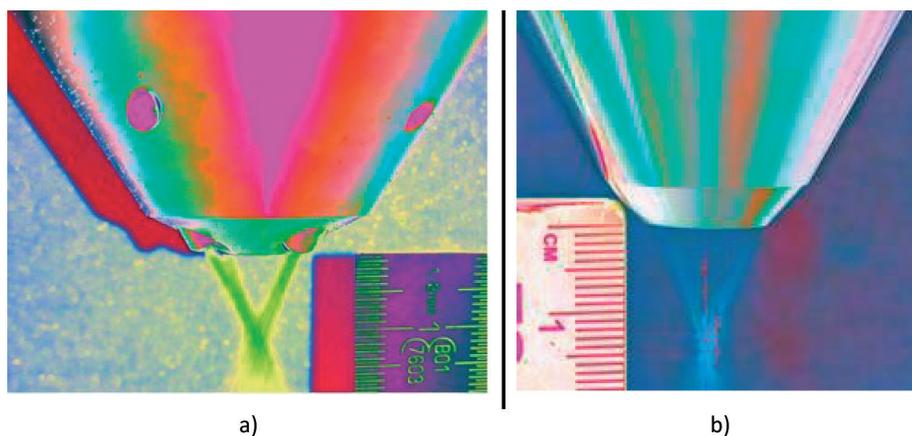


Fig. 2: Análisis de imagen del flujo de polvo de una boquilla coaxial discreta a) y continua b)

Hay que tener en cuenta que la máxima potencia que se puede emplear viene definida por el límite del equipo utilizado (recomendado no sobrepasar 2700 W) y la densidad de potencia (potencia del láser dividida por el área del spot). Valores elevados de potencia con un diámetro de spot reducido, generaran humo y partículas que pueden dañar las lentes del cabezal láser. Por tanto, este estudio también ha servido para establecer los límites de potencia para cada diámetro del haz dependiendo de la violencia del proceso y de los daños percibidos en la lente protectora del cabezal. Como ejemplo, en el caso de la boquilla coaxial continua de diámetro 0,50 mm, la potencia máxima empleada ha sido de 2100 W.

El diámetro del spot láser depende a su vez de dos aspectos. El primero es el ajuste de un mecanismo manual (que denominaremos **ruleta focal**) presente en el cabezal láser que mueve las lentes colimadoras aumentando o disminuyendo el diámetro del spot. El segundo es la propia divergencia del haz láser que hace que el diámetro aumente a mayor distancia del cabezal láser al sustrato.

Evidentemente, a menor velocidad la anchura del baño fundido será mayor al interactuar el láser más tiempo en la misma zona. En este sentido, en estudios previos [4] se pudo comprobar que la eficiencia del proceso aumenta al disminuir la velocidad de avance. Sin embargo, también se observaba que para valores de velocidad por debajo de 750 mm/min la eficiencia parece estancarse en un valor máximo. Debido a este hecho, se han establecido unas velocidades de avance de 500 y 900 mm/min en este estudio.

2.3.2. Estudio del cordón individual

Una vez se han caracterizadas las boquillas y se ha determinado la distancia focal, se ha realizado un estudio de opti-

mización de los 4 parámetros principales para cada tipo de boquilla. Para ello, se han aportado cordones individuales bajo diferentes combinaciones de parámetros atendiendo a la ventana de estudio definida en la Fig. 3. a. La caracterización previa de las boquillas ha permitido establecer el rango de análisis adecuado para cada uno de los parámetros de estudio. Estos parámetros son la potencia laser (P), el avance del cabezal (F), el flujo másico de polvo inyectado (\dot{m}_p) y el diámetro del spot laser.

El rango de velocidades de estudio

$$MDR = A \cdot \rho \cdot F \quad (1) \quad \eta = \frac{MDR}{\dot{m}_p} \quad (2)$$

elegido ha sido el mismo para todas las boquillas ya que se ha pretendido mantener la productividad del proceso en velocidad de recubrimiento. Establecer el rango de potencias y flujo másico ha sido más complicado ya que en función de la boquilla empleada, varían tanto la distancia y diámetro focal del flujo de polvo como el diámetro del haz láser en la zona de aporte. Además, se ha pretendido obtener una tasa de aporte mayor de 0,5 kg/h en todos los casos estudiados. Por lo tanto, el rango de ensayo de las potencias y el flujo másico de polvo ha sido calculado para cada boquilla utilizando como criterio indicador la relación potencia dividida por el flujo másico lo cual da como resultado la energía por unidad de masa de polvo. En este cálculo, no se ha tenido en cuenta el flujo másico total, sino el flujo másico que queda dentro de las dimensiones de la anchura del baño fundido a esa potencia y por tanto queda "atrapado". El rango de la energía por gramo de polvo está en todas las boquillas entre 16 y 7 KJ/g. Los datos necesarios para este cálculo han sido obtenidos en la fase de caracterización de cada boquilla.

Por su parte, el flujo másico de polvo está regulado por un disco giratorio que transporta el polvo desde la tolva donde está depositado hasta el conducto donde es mezclado con el gas que lo va a arrastrar hasta la boquilla. Como el flujo másico de polvo no se puede establecer de forma directa ya que está regulado por el porcentaje de la velocidad de giro (R) del disco del alimentador de polvo, se ha procedido a pesar el polvo recogido en un contenedor durante 3 minutos para asociar los diferentes valores de porcentaje de rotación empleados con el flujo másico de polvo.

Para definir la combinación de parámetros óptima, los cordones han sido aportados en un cilindro (Fig. 3. b y c) y posteriormente analizados en términos de microestructura, altura (H), anchura (W), penetración en el sustrato (b) y área de la sección transversal del cordón (A) (Fig. 4. b). Para ello, se han obtenido secciones transversales de todos los cordones, y se han analizado y medido mediante el software Clemex Captiva®. La dilución (d), eficiencia (η) y la tasa de material aportado (MDR, Mass Deposition Rate) han sido calculados mediante las siguientes ecuaciones:

$$d (\%) = \left(\frac{b}{b + H} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

2.3.3. Estudio del Cordón solapado (recubrimientos)

El estudio del cordón individual ha permitido seleccionar las mejores combinaciones de parámetros para aportar recubrimientos con las diferentes boquillas. Se han considerado como adecuados los cordones que no han presentado defectos (poros y grietas) y con una tasa de aporte MDR superior a 0,50 Kg/hora.

Estas condiciones se han utilizado para solapar 8 cordones en un cilindro de acero girando en el torno mientras el cabezal láser avanza en el eje horizontal. Los recubrimientos se han realizado con un porcentaje de solapamiento entre cordones del 40 % y el 50 % de la anchura del cordón individual para generar un espesor de capa uniforme (Fig. 4. a y c). En los recubrimientos obtenidos, además de las características estudiadas en el cordón individual (H, W, b, MDR, η y d), también se ha calculado la productividad del proceso (Pr) mediante la ecuación 4, entendiéndose productividad como la superficie recubierta por minuto. En el caso del cordón solapado, se ha pesado el cilindro antes y después de ser recubierto para

calcular la eficiencia en base al peso del material aportado. La estructura de los recubrimientos también ha sido analizada en busca de defectos y se han realizado mediciones de dureza Rockwell (HRC) en cada recubrimiento.

$$Pr = W \cdot (1 - \% \text{ de solapamiento}) \cdot F \quad (4)$$

3. RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS BOQUILLAS

El estudio de la distribución del flujo de polvo a distintas alturas y diámetros (Fig. 5.a) ha rebelado la distancia óptima de trabajo donde se concentra la mayor cantidad de polvo en el menor diámetro posible para cada tipo de boquilla. Sabiendo esa distancia, se ha realizado el estudio de la anchura del baño fundido a distintas potencias y diámetros del spot laser (Fig. 5.b) para seleccionar el más aproximado al diámetro del punto focal de polvo.

El estudio de la anchura del baño fundido se ha realizado teniendo en cuenta que la densidad de potencia es mayor a menor valor de la ruleta focal. Por tanto, en el momento que se ha percibido que el cabezal láser podía sufrir daños con determinadas potencias y valores de la ruleta focal, se ha desistido de continuar con ese valor de la ruleta focal a potencias mayores (Fig. 5.b).

3.2. ESTUDIO DEL CORDÓN INDIVIDUAL

El análisis cuantitativo de los resultados ha permitido obtener las siguientes conclusiones en relación con la eficiencia del polvo y la tasa de aporte:

- Con la boquilla discreta de 4 vías la eficiencia es menor que el 50 %. Sin embargo, con las boquillas continuas en todos los casos se obtiene una eficiencia superior al 50 %.
- Con la boquilla continua de 0,50 mm y R=20 %, se obtiene el valor de efi-

ciencia máxima (80%). Sin embargo, en estos casos, la tasa de aporte es menor que 0,50 kg/h.

- Con la boquilla discreta de 4 vías se obtienen mayores tasas de aporte que con la boquilla continua de 1 mm, y con esta última, tasas mayores que con la boquilla continua de 0,50 mm.

En cuanto a la calidad de los cordones aportados, hay que destacar que los cordones aportados con un flujo de polvo superior al correspondiente a un 50 % de rotación R, han presentado poros. La Tabla 1 contiene los mejores resultados en términos de eficiencia, tasa de aporte y calidad (sin poros ni grietas) para cada tipo de boquilla.

Los resultados ponen de manifiesto que, para un mismo flujo másico, el avance tiene una mayor influencia que la potencia en la altura y el área del cordón (lógicamente al reducir la velocidad se deposita más material en menos superficie) mientras que la eficiencia y la anchura dependen en mayor medida de la potencia, obteniéndose los mejores resultados con la máxima potencia utilizada.

3.3. ESTUDIO DEL CORDÓN SOLAPADO (RECUBRIMIENTOS)

Los resultados obtenidos en los recubrimientos se muestran en la Tabla 2. Se han omitido los resultados correspondientes a la boquilla continua de 0,50 mm debido a que, con los parámetros utilizados, todos los recubrimientos han presentado defectos relacionados con falta de fusión por exceso de polvo (zonas con grandes huecos y dilución mínima con el sustrato) a partir del tercer cordón solapado. En el caso de la boquilla discreta de 4 vías, los solapes realizados con un 50 % de solapamiento no han presentado poros. En el caso de la boquilla coaxial continua de 1 mm, los cordones realizados con un solapamiento del 50 % han presentado una mínima concentración de poros de 75-35 μm. Sin embargo, los obtenidos con un solapamiento del 40 % no han presentado defectos.

Por otro lado, se ha observado que la productividad tiene una tendencia lineal con la altura del recubrimiento para cada tipo de boquilla (Fig. 6. b) y que con la boquilla continua de 1 mm se obtienen productividades un poco mayores que con la boquilla discreta de 4 vías. Sin embargo, la productividad obtenida con la boquilla continua de 0,50 mm es menor, ya que las anchuras de los cordones son menores.

Los recubrimientos han presentado

Tipo de boquilla	P [W]	R [%] / \dot{m} [g/min]	F [mm/min]	Valor de la ruleta focal
Discreta 4-vías	1500-2000-2500	50-75 / 21,9-31,6	500-900	10
Continua de 1 mm	2100-2400-2700	30-40 / 12 -15,8	500-900	8
Continua de 0,50 mm	1500-1800-2100	20-30 / 7,9-11,8	500-900	4

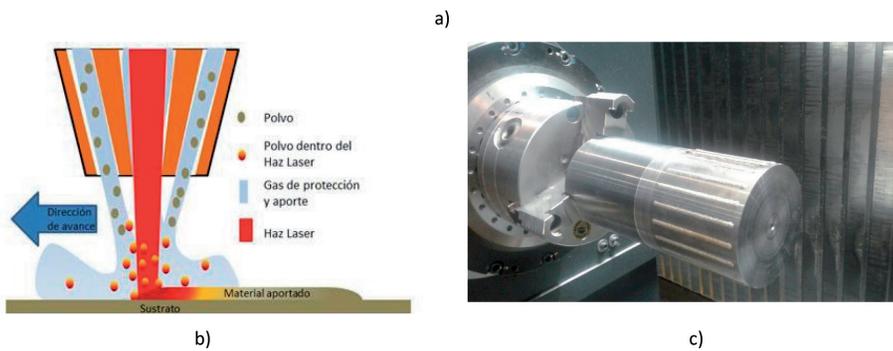


Fig. 3. a) Parámetros de estudio utilizados para cada una de las boquillas; b) Esquema del proceso de aporte por láser; c) Cordones individuales aportados en un cilindro de acero 42CrMoS4

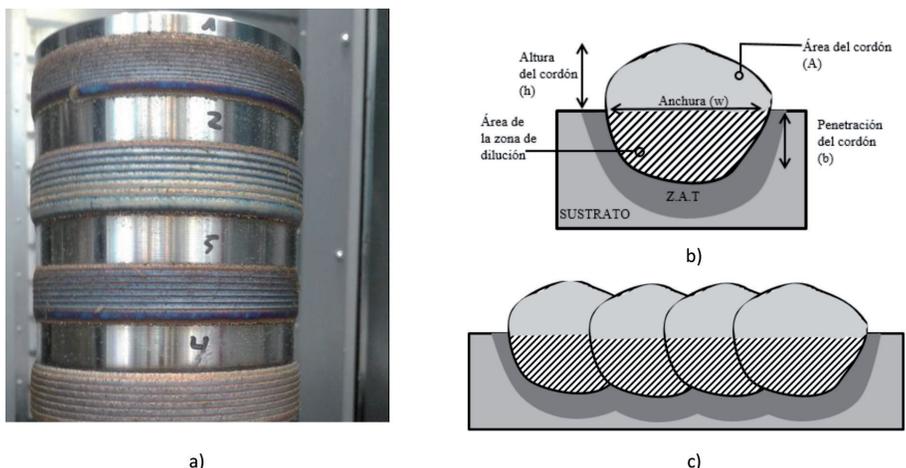


Fig. 4. a) Solapes Eutroloy 16606A en cilindro de acero 42CrMoS; 4. b) Esquema del cordón individual; 4. c) Esquema del cordón solapado

una dureza superior a 60 HRC, aunque el calor generado en el proceso provoca una pérdida de dureza en los primeros milímetros del sustrato por debajo del recubri-

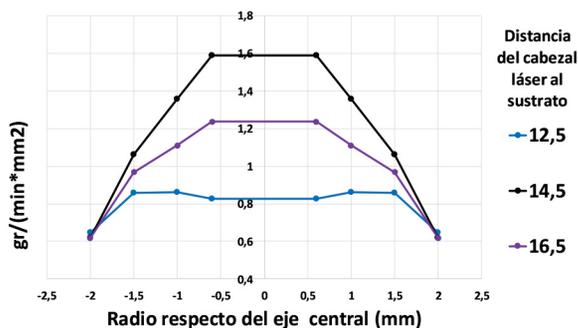
miento debido a un proceso de revenido muy localizado, volviendo a los valores iniciales a partir del cuarto milímetro de profundidad desde la superficie (Fig. 6. c).

4. CONCLUSIONES

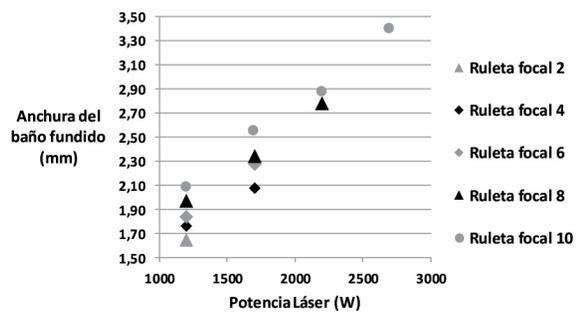
Los resultados de este estudio ponen de manifiesto el potencial del aporte por láser de Eutroloy 16606A sobre acero

INPUTS					OUTPUTS				
Tipo de boquilla	R [%]	P [W]	F [mm/min]	Ruleta Focal	H [mm]	W [mm]	A [mm ²]	η [%]	MDR [kg/h]
Discreta 4-vías	50	2500	500	10	0,87	3,32	2,28	45,76	0,58
Coaxial continua de 1 mm	40	2700	500	8	1,06	3,48	2,71	68,76	0,64
Coaxial continua de 0,50 mm	30	2100	500	4	1,15	2,41	2,19	71,82	0,52

Tabla 1. Resultados de los cordones individuales



a)



b)

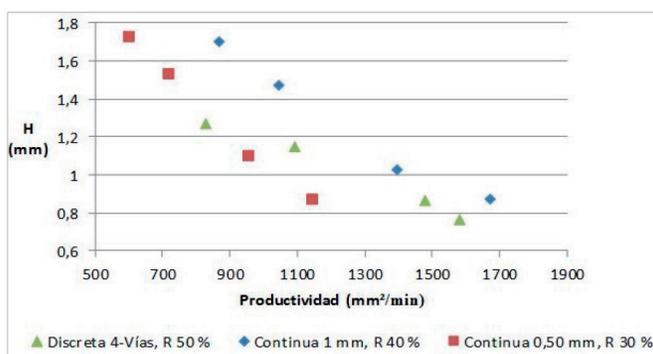
Fig. 5.a) Distribución del polvo con la boquilla discreta de 4 vías; b) anchura del baño fundido con la boquilla discreta de 4 vías con distintos valores de la ruleta focal a una distancia de 14,5 mm y avance de 900 mm/min

INPUTS						OUTPUTS					
Tipo de Boquilla	R [%]	P [W]	F [mm/min]	Ruleta Focal	Solapamiento (%)	H [mm]	d [%]	Pr [mm ² /min]	η [%]	MDR [kg/h]	HRC
Discreta 4-Vías	50	2500	500	10	50	1,27	21,9	830	43,7	0,58	62
Coaxial continua de 1 mm	40	2700	500	8	40	1,47	28,6	1044	80	0,75	63

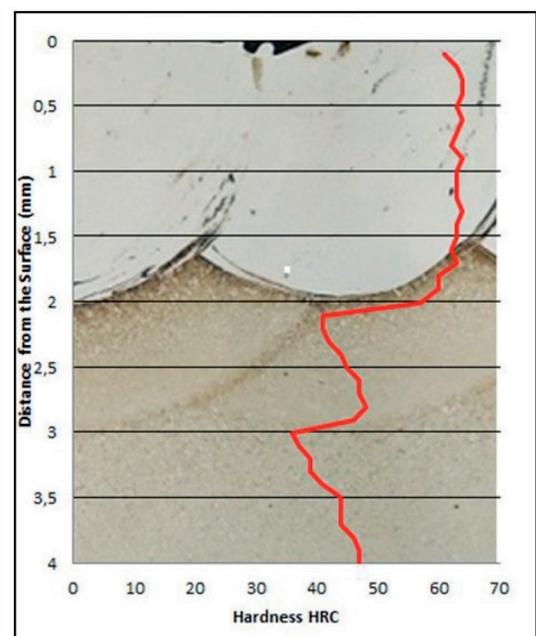
Tabla 2. Resultados de los recubrimientos



a)



b)



c)

Fig. 6. a) macrografía de un recubrimiento realizado con una boquilla discreta; b) relación entre productividad y espesor del recubrimiento; c) perfil de durezas en un recubrimiento realizado con la boquilla continua de 1 mm

42CrMoS4 como alternativa en la reparación de recubrimientos en geometrías cilíndricas y en el recubrimiento selectivo de zonas de geometría compleja, permitiendo recuperar o mejorar las propiedades del material base y aumentar su ciclo de vida en uso.

La boquilla coaxial continua de 1 mm ha demostrado ser la mejor opción en el aporte de recubrimientos con el cabezal láser trabajando en vertical superando en eficiencia, productividad y tasa de aporte a las demás boquillas sin perder dureza y calidad del recubrimiento. La boquilla coaxial continua de 0,50 mm no es una opción si se pretende mantener la tasa de aporte del proceso ya que se debe reducir el flujo másico de polvo (y como consecuencia la tasa de aporte) para obtener recubrimientos sin defectos. Además, el cordón generado es de menor anchura por lo que la productividad es menor comparando con las otras boquillas.

Utilizando verticalmente una boquilla coaxial continua de 1 mm es posible obtener recubrimientos de Eutroloy 16606A en acero 42CrMoS4 sin precalentamiento, con un 80 % de eficiencia del polvo aportado, espesor de recubrimiento de 1,47 mm, productividad de 1044 mm²/min, dureza de 63 HRC y tasa de aporte de hasta 0,75 kg/hora, superando así, los resultados obtenidos con una boquilla coaxial discreta de 4 vías y una boquilla coaxial continua de 0,50 mm.

La zona afectada térmicamente del sustrato presenta una reducción de dureza debida a un proceso de revenido de una profundidad no mayor de 4 mm desde la superficie del recubrimiento.

Una correcta selección de la distancia de trabajo, boquilla y parámetros principales aumenta notablemente la eficiencia del proceso no solo sin perder productividad sino además aumentando la tasa de aporte, reduciendo el polvo residual en 0,56 Kg por hora de proceso y, por tanto, reduciendo la carga de trabajo a la que están sometidos todos los elementos relacionados con la gestión del material metálico en polvo.

PARA SABER MÁS

[1] Yamazaki, T. (2016). Development of A hybrid multi-tasking machine tool: Integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 42, 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.193>

[2] Jones, J., McNutt, P., Tosi, R. et al. (2012). Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine. 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - an

Additive Manufacturing Conference, 821-827. Retrieved from <http://www.scopus.com>

[3] Karunakaran, K. P., Pushpa, V., Akula, S. B. et al. (2008). Techno-economic analysis of hybrid layered manufacturing. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, 4 (1-2), 161-176. <https://doi.org/10.1504/IJISTA.2008.016364>

[4] Ramiro, P., Alberdi, A., Ortiz, M. et al. (2018). Characteristics of Fe-, Ni- and Co-based powder coatings fabricated by laser metal deposition without preheating the base material. *Procedia CIRP*, 68, 381-386. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.099>

[5] Munoz, A. A., Sheng, P. (1995). An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 53, 736-758. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01764-R](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01764-R)

[6] Quality surface finishing filtration. (2018). *Filtration + Separation*, 55 (3), 32-35. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(18\)30256-8](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(18)30256-8)

[7] Ruffino, B., Zanetti, M. C. (2008). Recycling of steel from grinding scraps: Reclamation plant design and cost analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (11), 1315-1321. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.012>

[8] Instituto nacional de seguridad, salud y bienestar en el trabajo (inssbt). Fichas técnicas internacionales de seguridad química [en línea]. [Fecha de consulta: 10 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.inssbt.es/portal/site/inssbt/>

[9] Kennedy, S. M., Chan-Yeung, M., Marion, S. et al. (1995). Maintenance of stellite and tungsten carbide saw tips: Respiratory health and exposure-response evaluations. *Occupational and Environmental Medicine*, 52 (3), 185-191. <https://doi.org/10.1136/oem.52.3.185>

[10] Renderos, M., Torregarai, A., Gutierrez-Orrantia, M. E. et al. (2017). Microstructure characterization of recycled IN718 powder and resulting laser clad material. *Materials Characterization*, 134, 103-113. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.09.029>

[11] Asgari, H., Baxter, C., Hosseinkhani, K. et al. (2017). On microstructure and mechanical properties of additively manufactured AISi10Mg_200C using recycled powder. *Materials Science and Engineering*, 707, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.041>

[12] Toyserkani, E., Khajepour, A. and Corbin, S.F. (2004). *Laser cladding* CRC press.

[13] Koehler, H., Partes, K., Seefeld, T. et al. (2010). Laser reconditioning of crankshafts: From lab to application. *Physics Procedia*, 5 (A), 387-397, ISSN 1875-3892. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.160>

[14] Arias-González, F., del Val, J., Comesaña, R., et al. (2017). Production of phosphor bronze coatings by laser cladding. *Procedia Manufacturing*, 13, 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.031>

[15] Arrizubieta, J. L., Taberero, I., Exequiel Ruiz, J. et al. (2014). Continuous coaxial nozzle design for LMD based on numerical simulation. *Physics Procedia*, 56 (C), 429-438. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.146>

[16] Hemmati, I., V. Ocelik, and J. Th M. De Hosson. (2013). Toughening mechanism for Ni-Cr-B-Si-C laser deposited coatings. *Materials Science and Engineering*, A 582

(10/10), 305-315. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.06.010>

[17] Bartkowski, D., Mhynarczak, A., Piasecki, A. et al. (2015). Microstructure, microhardness and corrosion resistance of stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding. *Optics Et Laser Technology*, 68 (5), 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.12.005>

[18] Aubry, P., Blanc, C., Demirci, I. et al. (2016). Analysis of nickel based hardfacing materials manufactured by laser cladding for sodium fast reactor. *Physics Procedia*, 83, 613-623. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.064>

[19] Zhang, H., Shi, Y., Kutsuna, M. et al. (2010). Laser cladding of colmonoy 6 powder on AISI316L austenitic stainless steel. *Nuclear Engineering and Design*, 240 (10), 2691-2696. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.05.040>

[20] Taberero, I., Lamikiz, A., Ukar, E. et al. (2010). Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding. *J Mater Process Technology*, 210 (15), 2125-2134. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.036>

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Europea por su apoyo al proyecto "PARADDISE: a Productive, Affordable and Reliable solution for large scale manufacturing of metallic components by combining laser-based ADDITIVE and Subtractive processes with high Efficiency" (subvención 723440), que es una iniciativa de "Photonics and Factories of the Future Public Private Partnership". Los autores también agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación del proyecto "ADDICLEAN: tecnología híbrida de fabricación ecoeficiente de piezas de alto valor añadido" (RTC-2015-4194-5). Los autores agradecen por último a la Viceconsejería de Tecnología, Innovación y Competitividad, por la financiación del proyecto "ADDISEND: cooperación científica en fabricación aditiva para un control robusto de la cadena de valor" (nº expediente kk-2018/00115) dentro del programa Elkartek 2018.