



## DESARROLLO DE ESTRATEGIA Y SENSORIZACIÓN EN PROCESO DE LMD PARA REPARACIÓN DE GEOMETRÍAS TIPO *BLISK*

JOSE EXEQUIEL RUIZ, HAIZEA GONZÁLEZ, MAGDALENA CORTINA, JON IÑAKI ARRIZUBIETA, AITZOL LAMIKIZ

Universidad del País Vasco (UPV/EHU)  
Departamento Ingeniería Mecánica  
Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, España

(Recibido 30 de marzo de 2018, para publicación 15 de julio de 2018)

**Resumen** – A medida que aumentan las exigencias en los procesos industriales de fabricación y reparación, existe una marcada tendencia a incorporar nuevas tecnologías, como la de LMD (*Laser Metal Deposition*). El sector aeronáutico no es ajeno a dicha evolución y, por lo tanto, el presente trabajo estudia la posibilidad de realizar la fabricación de componentes de turbina tipo *blisk*, así como también su reparación, utilizando tecnología LMD. Dentro del mismo trabajo se propone una metodología para la sensorización del proceso y la captación de parámetros como la temperatura de aporte y la altura de la geometría. Con el fin de cumplir dichos objetivos se procede a la fabricación de un *blisk*, aportando en 5 ejes, con la tecnología aditiva ya citada, la geometría de los alabes a un núcleo de material como sustrato. Para su realización se han evaluado diferentes estrategias de aporte, así como la accesibilidad y viabilidad del proceso mediante CAM, para optimizar las trayectorias y evitar posibles colisiones con las geometrías ya generadas. La propuesta para la sensorización tiene en cuenta las elevadas temperaturas que pueden alcanzarse durante el proceso, así como su rápido descenso; razones por las cuales se opta por un pirómetro de dos colores para la captación de temperatura y un sensor láser para la medida de distancia a la pieza.

**Palabras clave** – LMD, *blisk*, sensorización, monitorización, temperatura, sensor de altura, Inconel 718.

### 1. INTRODUCCIÓN

El uso de la fabricación aditiva en la industria aeronáutica se encuentra en pleno crecimiento. Este tipo de tecnología adecuada y adaptada a los procesos de fabricación convencionales ofrece una gran versatilidad, tanto en el diseño de las piezas como en las futuras reparaciones necesarias tras su uso. Esto último es de especial interés, teniendo en cuenta que dichas piezas suelen ser de un alto valor añadido [1].

El proceso de *Laser Metal Deposition* (LMD) junto al *Selective Laser Melting* (SLM) son los procesos más extendidos en el ámbito aeronáutico. Sin embargo, solo el LMD es capaz de crear piezas de gran volumen hoy en día. A su vez, ofrece una capacidad que elude todavía al SLM, siendo el único capaz de realizar reparaciones en piezas.

El LMD dispone de un amplio abanico de materiales con los que puede trabajar, siendo muchos de ellos típicos en el sector aeronáutico, como Inconel 718, Hastelloy X, Titanio y otros [2]. Entre otras virtudes, el LMD, además dispone de la capacidad de incluir diferentes materiales en la misma pieza, realizando saltos graduales o totales en la composición del polvo que inyecta, o incluso de crear geometrías de materiales diferentes al sustrato en que se apoyan.

El proceso de LMD consiste en utilizar un láser como fuente de calor puntual que, enfocado en la superficie del sustrato, crea una zona o baño fundido (*melt pool*). El material de aporte se inyecta a través de una boquilla (*nozzle*), en forma de hilo o polvo, y llega hasta dicho baño fundido donde se adhiere al sustrato generando una nueva capa de material. Durante el proceso se utiliza un gas inerte de protección, normalmente argón (Ar), que evita que los materiales reaccionen con el oxígeno u otros gases presentes. A su vez, cuando el material a aportar se encuentra en forma de polvo, este es arrastrado a través de conductos hasta la boquilla también gracias a un gas inerte [3].

Los parámetros de entrada habituales del proceso suelen ser, la velocidad de avance en las trayectorias de aporte (*feed rate*), la potencia suministrada por el láser, y el caudal másico de polvo. La combinación de estos parámetros establece características de forma en los cordones de material aportado, que definen la calidad de estos en base a su relación de aspecto. Es decir que, en función de los tres parámetros de entrada ya mencionados, el cordón presentará una geometría específica, definida por su ancho, alto y ángulo de mojado [4]. El ancho del cordón tiene una relación directa con la potencia del láser absorbida por el sustrato, mientras que el alto de este depende del caudal de material aportado. La potencia absorbida por el sustrato depende de varios factores, algunos pertenecientes al material base como su temperatura o su acabado superficial, mientras que otros pertenecen al propio proceso, siendo los más importantes la potencia suministrada y la velocidad de avance. De esto último se deduce la importancia de conocer la temperatura del baño fundido, ya que es un valor que depende directamente de la potencia absorbida. Si dicha temperatura varía en el tiempo, se puede conocer su valor y corregir la potencia de entrada para mantener el proceso estable.

## 2. EQUIPAMIENTO Y METODOLOGÍA

La fabricación de la pieza tipo *blisk* se ha realizado completamente en el Centro de Fabricación Avanzada de la Escuela de Ingeniería de Bilbao.

El proceso de LMD fue llevado a cabo en una célula de aporte por láser que utiliza como base un centro de mecanizado de 5 ejes con CNC Fagor8070. Dicha célula está equipada con un láser de fibra de alta potencia, Rofin FL010, con una longitud de onda de 1070 nm, capacidad máxima de 1 kW y acoplado a una fibra de 100  $\mu\text{m}$ . El haz se conduce por dicha fibra y tras pasar el conjunto de lentes produce un spot circular de 2 mm de diámetro en el punto focal de la boquilla.

La célula cuenta con una boquilla de inyección de polvo de diseño propio EHUCoax2015 [5] y un suministrador de polvo Sulzer Metco Twin 10-C. Para el proceso se ha utilizado argón como gas inerte, tanto para la atmosfera protectora como para el arrastre del polvo y la protección de las lentes.

El material base utilizado para el proceso fue un disco de Inconel 718, sometido a un tratamiento térmico de una hora a 940°C y posteriormente mecanizado para mejorar y homogeneizar el acabado superficial previo al aporte.

El polvo de metal utilizado para el aporte fue Hastelloy X y su composición en peso se encuentra detallada en la tabla 1.

### 2.1. Parametrización del material

La primera etapa del proyecto consiste en la caracterización del material Hastelloy X, para ello se aporta una serie de cordones únicos en los que se ensayan diferentes parámetros, tabla 2. Tras los cuales, se selecciona la combinación de parámetros utilizada en el ensayo número 12:

La geometría resultante del cordón número 12 puede observarse en las siguientes imágenes mostradas en la Fig. 1. En las mismas se puede analizar la relación de aspecto que muestra el cordón, y ver que su ancho es mayor a tres veces el alto, con lo que se prosiguen los experimentos con dichos parámetros.

### 2.2. Estrategias de aporte

Después de evaluar las dimensiones de los alabes del *blisk* y las del cordón único, se estima que la geometría de aporte puede conseguirse con el solape de dos cordones; por lo tanto, para el proceso se evaluaron dos estrategias diferentes. La primera consistía en realizar el aporte de todos los alabes del *blisk* capa a capa, es decir, que se realizaría la primera capa de todos los alabes antes de proseguir con la

Tabla 1. Composición química.

(% en peso)												
Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B	Nb	Al	Ti
47 (bal)	22	18	9	1.5	0.6	0.1	≤1	≤1	≤0.008	≤0.5	≤0.5	≤0.15

Tabla 2. Parámetros de cordones únicos.

Ensayo	Potencia Láser (W)	Avance (Feed Rate) (mm/min)	Caudal de polvo (g/min)
Ensayo 1	500	500	4
Ensayo 2	600	500	4
Ensayo 3	700	500	4
Ensayo 4	400	400	4
Ensayo 5	500	400	4
Ensayo 6	600	400	4
Ensayo 7	500	500	6
Ensayo 8	600	500	6
Ensayo 9	700	500	6
Ensayo 10	400	300	3
Ensayo 11	500	300	3
Ensayo 12	600	300	3

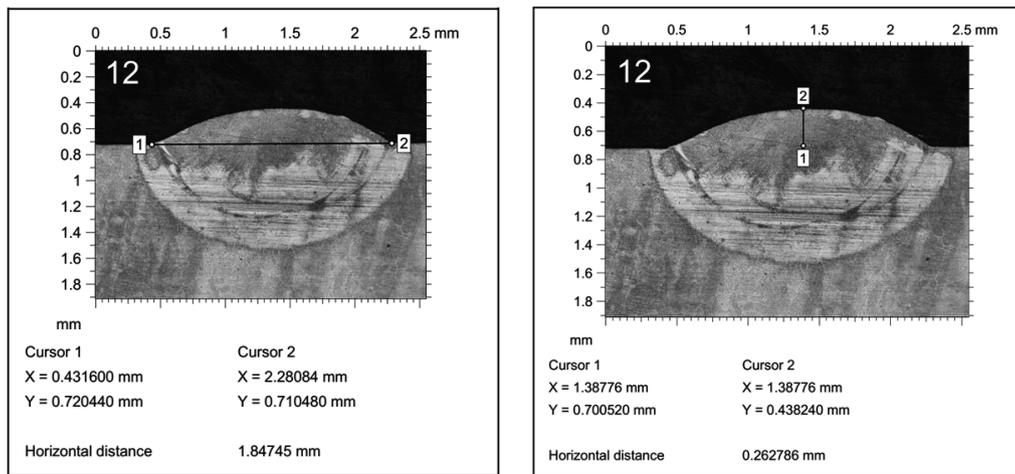
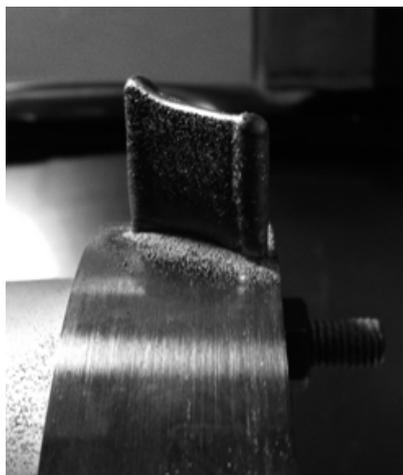
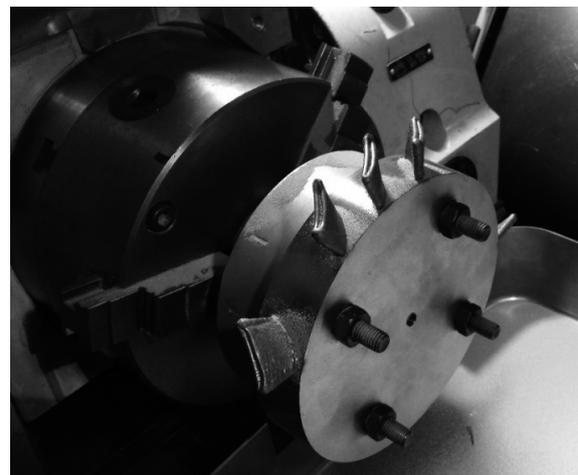


Fig. 1. Geometría del ensayo número 12.



(a) Defecto de acumulación de material



(b) Ensayo de estrategias helicoidales y accesibilidad

Fig. 2. Diferentes estrategias de aporte.

siguiente, y así sucesivamente. La segunda estrategia consistía en aportar un alabe completo con una trayectoria helicoidal teniendo en cuenta el solape de ambos cordones y la accesibilidad de la boquilla, para no colisionar con las geometrías ya aportadas [6].

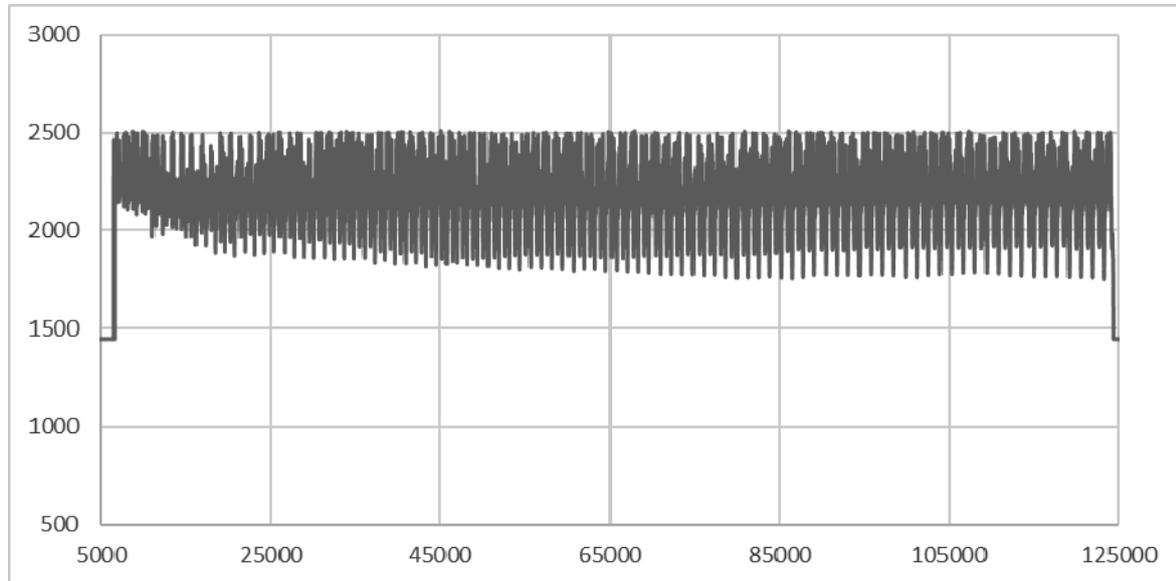


Fig. 3. Temperatura captada ( $^{\circ}\text{C}/\text{tiempo}$  – cada unidad de tiempo es 16 ms aproximadamente).

De ambas estrategias se opta por la segunda ya que se observa en la primera un defecto por acumulación de material en la zona de inicio y fin de las diferentes capas, Fig. 2 (a).

Mientras que en la Fig. 2 (b) se observa como la estrategia helicoidal ofrece un mejor resultado así como también la posibilidad de aportar un alabe entre otros dos, ya que durante el proceso fueron aportados primero los alabes de los extremos y luego el central.

### 2.3. Sensorización

En los pirómetros de un color, o canal, debe conocerse la emisividad del material, previo a la toma de mediciones y en las condiciones del ensayo, y por lo tanto no son adecuados para este proceso. Siendo que la emisividad depende entre otros factores de la temperatura y el acabado superficial y en los procesos de LMD el material pasa de sólido a líquido y viceversa, y por lo tanto la variación de dicha emisividad no es despreciable.

Por lo mencionado anteriormente, para la captación de la temperatura se opta por un pirómetro de dos colores o canales. La diferencia fundamental con un pirómetro de un canal o convencional, es que la medida no depende de la emisividad del material, en un amplio rango de temperaturas. En estos pirómetros de dos canales, se capta la radiación que emite el cuerpo caliente en dos longitudes de ondas diferentes, pero no muy separadas entre sí, asumiendo que la emisividad variará para ambas longitudes de ondas de manera similar [7].

El equipo utilizado para estos experimentos fue un pirómetro de dos colores IMPAC Pyrometer IGAR 12-LO (Luma Sense Technologies), con longitudes de onda de  $1.52\ \mu\text{m}$  a  $1.64\ \mu\text{m}$  [8].

Las temperaturas captadas superaron los  $2100^{\circ}\text{C}$  como puede observarse en la Fig. 3.

Por otra parte, se propuso también la sensorización de la altura de la geometría aportada mediante un sensor láser de distancia, con un error en la repetición de la medida menor a  $200\ \mu\text{m}$ , *Micro laser distance sensor* HG-C Series (Panasonic) [9]. La captación de dicha medida se llevó a cabo repitiendo la trayectoria de la última capa de aporte utilizando el sensor previamente referenciado. De esta manera se puede conocer la desviación existente entre la altura real de aporte y la teórica programada. En la Fig. 4 se observa la medida captada para una altura teórica de 30 mm. La diferencia en los extremos se debe fundamentalmente a la dinámica de la máquina durante el aporte, ya que el radio de curvatura en las esquinas de los alabes es muy pequeño y la inercia de la máquina impide alcanzar la velocidad necesaria. Esto se traduce en una menor velocidad de avance y por lo tanto una mayor densidad de energía.

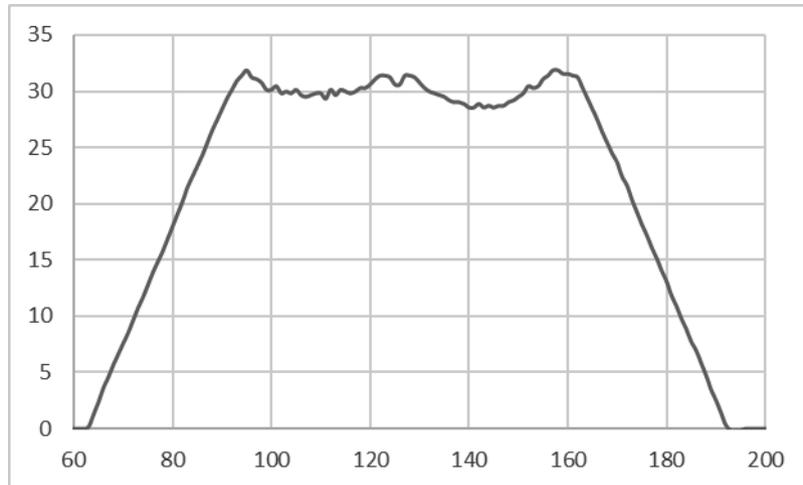


Fig. 4. Altura captada con sensor (mm/mm – Altura por distancia recorrida).

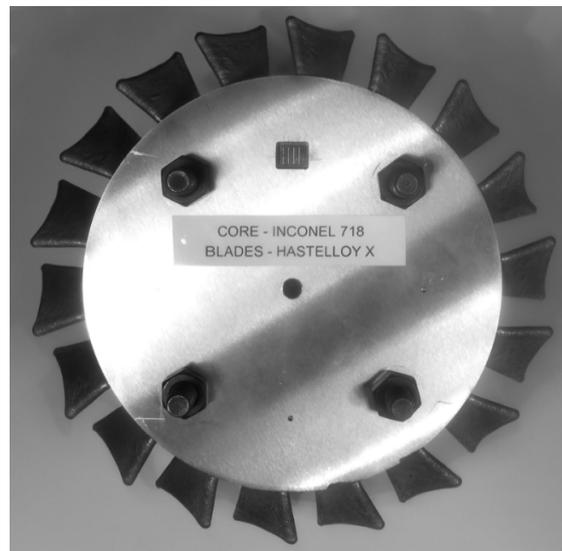


Fig. 5. Proceso de LMD terminado.

### 3. CONCLUSIONES

El presente trabajo demuestra la capacidad de fabricación de un componente de turbina tipo *blisk* mediante el proceso de LMD (Fig. 5) realizado en 5 ejes; la viabilidad de la reparación de dicho componente se desprende de la capacidad de acceso de la boquilla al aportar cualquiera de los alabes sin colisiones con los ya existentes. A su vez se ha conseguido aportar un material diferente al del sustrato, demostrando también la capacidad del proceso de LMD para trabajar con diferentes materiales en la misma pieza.

La sensorización del proceso abre las puertas al control de parámetros de entrada como pueden ser la potencia del láser en función de la temperatura, o la velocidad de avance y el caudal de polvo en función de la altura de cordón.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación se ha llevado a cabo dentro del marco del proyecto Transfron3D POCTEFA 90/15.

## REFERENCIAS

- [1] Liu, R., Wang, Z., Sparks, T., Liou, F., Newkirk, J., “Aerospace applications of laser additive manufacturing”, *Laser Additive Manufacturing*, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00013-0> (2017)
- [2] Jyothish Kumara, L., Krishnadas Nairb, C.G., “Laser metal deposition repair applications for Inconel 718 alloy”, *Materials Today: Proceedings*, 4, 11068–11077 (2017)
- [3] Gasser, A., *Laser Metal Deposition*, Tailored light 2, Springer (2011)
- [4] Toyserkani, E., Khajepour, A., Corbin, S., *Laser Cladding*, CRC Press (2004)
- [5] Arrizubieta J.I., Taberero I., Ruiz J.E., Lamikiz A., Martínez S., Ukar E. “Continuous coaxial nozzle design for LMD based on numerical simulation”, *Phys. Procedia* 56, 429–438 (2014)
- [6] Calleja, A., Taberero, I., Ealo, J.A., Campa, F.J., Lamikiz, A., López de Lacalle, L.N. “Feed rate calculation algorithm for the homogeneous material 5 deposition of blisk blades by 5-axis laser cladding”, *Int. J. Adv. Manufacturing Technology*, DOI10.1007/s00170-014-6057-3 ISSN: 0268-3768 (2014)
- [7] Purtonen, T., Kalliosaari, A., Salminen, A., “Monitoring and adaptive control of laser processes”, *Physics Procedia*, 56, 1218 – 1231 (2014)
- [8] LumaSense Technologies. Especificaciones técnicas de pirometro de dos colores. Enlace online: <https://www.lumasenseinc.com/EN/products/temperature-measurement/infrared-thermometers/impac-pyrometers/series-12/pyrometer-impac-igar-12-lo.html>
- [9] Panasonic Corporation. Especificaciones técnica de sensor de distancia. Enlace online: <https://www3.panasonic.biz/ac/e/fasys/sensor/photoelectric/hg-c/spec/index.jsp>

## STRATEGY AND MONITORING DEVELOPMENT ON LMD PROCESS FOR BLISK TYPE GEOMETRIES REPAIR

**Abstract** – As the requirements on manufacturing and repairing processes increase, the integration of new technologies, such as LMD, are hot topics in the industries. Aeronautical industry is not an exception for such evolution, hence, the present work studies the manufacturing and repair process for a blisk type geometry by LMD technology. The study also presents a sensing methodology for the monitoring of temperature and height. To that end, a set of 5-axis blades is manufactured by LMD process on a core substrate, generating a blisk type geometry. On the one hand, different additive strategies are studied evaluating accessibility and feasibility via CAM, aiming to improve the trajectories and avoid collisions with the generated parts. On the other hand, a two-color pyrometer is proposed for the temperature monitoring, considering the high values it reaches and its quick decrease. In addition, a laser distance sensor is used for the height measurement of the blades.

**Keywords** – LMD, Blisk, Sensorization, Monitoring, Temperature, Height sensor, Inconel 718.