Cod. 9379 | Tecnología de productos metálicos | 3316.08 Servicios de fabricación de productos metálicos

Monitorización y control térmico mediante cámara infrarroja en la fabricación de piezas con la técnica de aporte por láser

Thermal monitoring and control by infrared camera in the manufacture of parts with laser metal deposition

Jon Flores-Prado[1], Iker Garmendia Sáez-de-Heredia[1] e Itziar Cabanes-Axpe[2]
[1] Fundación Tekniker (España)
[2] UPV/EHU. Escuela de Ingeniería de Bilbao (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9379

La fabricación aditiva de componentes metálicos ha visto incrementado su desarrollo en los últimos años, llegando a ser considerada una de las tecnologías más prometedoras en la actualidad. Sus principales ventajas frente a las técnicas tradicionales sustractivas son el ahorro de material y la capacidad de fabricar piezas complejas y personalizadas con un peso reducido. Además, la fabricación aditiva por deposición directa de material metálico mediante láser, denominada Laser Metal Deposition (LMD), es capaz de fabricar piezas de gran tamaño con mayores tasas de aporte [1].

Sin embargo, aún presentan un amplio margen de mejora para que la fiabilidad del proceso asegure cierta calidad en las construcciones. La robustez del proceso reside en la uniformidad y la repetibilidad del cordón de deposición a lo largo de la fabricación [2] que, a su vez, dependen de los parámetros del proceso (potencia del láser, tasa y velocidad de aporte, principalmente) y las condiciones del proceso (temperatura de la pieza o distancia entre boquilla y sustrato, entre otros). En la construcción de geometrías 3D, las variaciones de las condiciones del proceso durante la fabricación dificultan el establecimiento de los parámetros del proceso. Con el fin de otorgar robustez y estabilidad a la tecnología, es necesario implementar una adaptación de los parámetros en función de las condiciones [3].

Para mejorar las capacidades de la fabricación aditiva, las técnicas de monitorización y de control han cobrado mayor interés. La monitorización permite, mediante la medición de diferentes señales, conocer las condiciones durante el proceso [4] analizó y clasificó los factores involucrados en la fabricación aditiva para integrar posteriormente estrategias de control. En su estudio, categorizó los factores de la siguiente manera: parámetros del proceso, características dinámicas observables y parámetros que caracterizan la calidad de la pieza.

En la literatura, se encuentra varios trabajos de fabricación aditiva en los que integran un sistema de control para homogeneizar las características del cordón de deposición a medida que avanza la construcción. Las condiciones térmicas durante la deposición determinan las características del cordón, por lo que gran parte de los sistemas de control propuestos se basan en la monitorización del baño fundido a través del puerto óptico (coaxial). Los principales dispositivos de captura utilizados son pirómetros [6] y cámaras de rango visible [7] o infrarrojas [8]. Algunos trabajos [6–8] han comparado los resultados obtenidos en sistemas donde se implementaron controles en lazo cerrado para adaptar la potencia del láser en función de la monitorización, logrando mejorar los resultados frente a otros esquemas sin control. Sin embargo, el brillo del baño fundido puede variar con las irregularidades del sustrato, obteniendo medidas erróneas de la temperatura o la geometría del baño [9].

Otro de los problemas encontrados en la construcción de geometrías 3D mediante tecnologías aditivas es la dificultad para disipar el calor. Esto provoca mayores temperaturas en la pieza, y la monitorización de la superficie (de forma off-axial) ofrece la posibilidad de conocer la distribución y evolución térmica global de la pieza. En [10] se analizó la influencia de los tiempos de enfriamiento entre deposiciones de capas, en las condiciones térmicas de las paredes durante su fabricación por soldadura de gas y arco metálico (GMAW). Demostró la reducción de la capacidad de disipación de calor con el crecimiento de la pared y la atenuación de este efecto mediante el aumento del tiempo de enfriamiento. De este modo, las paredes que alcanzaron mayores temperaturas durante la fabricación obtuvieron una superficie menos uniforme.

Tras analizar la literatura, en este trabajo se propone la monitorización térmica off-axial dirigida al registro de las condiciones térmicas del componente durante la fabricación por LMD. Además, con la finalidad de aumentar las capacidades de componentes tridimensionales, se plantea un sistema de control basado en la adaptación de los tiempos de espera entre capas a partir de la temperatura global del componente. La experimentación descrita en este estudio demuestra que la estabilidad de las condiciones térmicas a lo largo del proceso de fabricación otorga homogeneidad a las construcciones por LMD.

1. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA TEMPERATURA EN LA UNIFORMIDAD GEOMÉTRICA

Con objeto de plantear una estrategia de control basada en la señal de la cámara termográfica, es importante analizar la correlación entre los parámetros del proceso y la temperatura de la pieza fabricada. En este apartado se describe el equipamiento y sistema de adquisición involucrados en los ensayos experimentales, así como la metodología empleada en la fabricación de paredes y el análisis de los datos de la monitorización.

1.1. EQUIPAMIENTO Y SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Los experimentos se realizan mediante un sistema LMD. Como fuente de energía se emplea un láser Rofin DY022 2,2kW Nd:YAG, guiado a través de una fibra de 600 µm de diámetro hasta un cabezal de recargue láser coaxial YC50 de Precitec. La conducción y la distribución del polvo se realiza mediante una boquilla de aporte discreto desarrollada por Fraunhofer ILT. El láser incide sobre la zona de trabajo en la superficie donde se aporta el material y se funde generando la unión. Se utiliza un alimentador de polvo Sulzer Metco Twin-10C para realizar el suministro del material metálico. El conjunto de sistemas que componen el cabezal de aporte LMD está montado sobre el extremo de un robot ma-

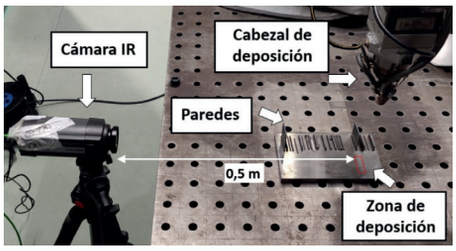


Fig. 1: Disposición de los sistemas durante la experimentación

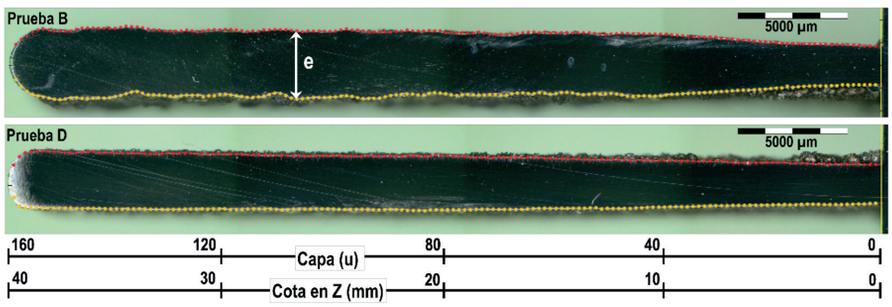


Fig. 2: Procesado de imágenes del perfil de las paredes para el cálculo de la evolución del espesor mediante identificación automática del contorno. La prueba B se ha fabricado con un tiempo de espera entre capas constante de 1,2 segundos y la prueba D con un tiempo de espera de 5 segundos

nipulador IRB4400 de 6 ejes de ABB, por lo que es este el que dota de movimiento al sistema de aporte.

Respecto al sistema de medición y monitorización de la temperatura de la superficie depositada, se utiliza una cámara térmica infrarroja Flir A325. Esta dispone de un rango espectral de 7,5-13 µm y una resolución de 320x240 píxel. La cámara se ha instalado completamente de cara a la pieza fabricada, a la misma altura que esta, y a una distancia de 0.5 m para evitar ser alcanzada por las partículas de polvo caliente precipitadas (figura 1). En estas condiciones, la resolución espacial de la cámara es de 2,2 píxel/mm. La cámara ha sido previamente calibrada para tres rangos de temperaturas, pero en este trabajo se ha empleado únicamente el mayor de ellos, que abarca temperaturas de 300 °C a 2000 °C.

El polvo metálico utilizado en los experimentos es acero inoxidable martensítico AISI 431, comercializado como Metco 42C y cuya temperatura de fusión es 1494-1545 °C. La deposición se realiza sobre sustratos de acero al carbón C45E.

1.2. METODOLOGÍA DE ENSAYOS

Para analizar la influencia de la temperatura en la homogeneidad geométrica del material depositado, se propone fabricar geometrías 3D en forma de paredes compuestas por 140 cordones individuales de 40 mm solapados verticalmente y depositados de forma alterna en un sentido y en el otro. Todas las paredes se fabrican utilizando unos parámetros del proceso iguales, tomando como variable el tiempo de espera empleado entre la deposición de una capa y la siguiente.

La primera serie experimental, dirigida al estudio de la influencia de la temperatura en la homogeneidad geométrica, se compone de 6 paredes donde en cada una de ellas se ha utilizado un tiempo de espera constante diferente de 0, 1.2, 3, 5, 8 y 12 segundos, correspondientes a las pruebas A-F.

En estos ensayos se analiza la calidad geométrica de las paredes mediante la medición de la evolución del espesor de la pared. Se ha considerado una relación directa entre la capacidad de mantener unas condiciones de la deposición constantes y la uniformidad de la estructura obtenida. El incremento de la temperatura a medida que avanza la fabricación provoca el aumento del baño fundido y de la cantidad de material depositado, lo que genera mayores dimensiones de los cordones.

En la figura 2 se muestra el procesado de las imágenes de las secciones de las paredes cortadas por abrasión, donde se realiza el reconocimiento del contorno a partir de las parejas de puntos (rojo/amarillo) que representan el espesor de la pared. La homogeneidad geométrica se mide mediante las desviaciones estándar relativas (DER) de la evolución del espesor.

1.3. ANÁLISIS DE LA MONITORIZACIÓN TÉRMICA

En la figura 3 se muestra la monitorización registrada de la distribución y evolución térmica de la pared durante el proceso. En este caso, la distribución térmica tras la deposición de la capa 100 de la prueba *D* en el instante de finalización de la deposición y transcurridos 1,25 y 5 segundos. En dicha imagen se puede observar que las mayores temperaturas se acumulan en la parte superior tras el paso del láser, alrededor del baño fundido. A medida que el calor se disipa, la distribución térmica es cada vez más uniforme en toda la superficie.

Se considera que las condiciones térmicas dadas en la zona superior influyen directamente en la temperatura que se alcanza durante la deposición del siguiente cordón, ya que es la base sobre la que se deposita la siguiente capa. Por lo tanto, el procesado de la señal recibida de la cámara consiste en la conversión de la intensidad del brillo en el valor de temperatura por cada píxel. Además, se identifica la zona de interés comentada, señalada con un cuadro negro en la figura 3, y se calcula la temperatura media.

La cámara térmica utilizada capta la intensidad del brillo en el rango infrarrojo y calcula la temperatura en función del valor de la emisividad que, a su vez, depende de varias variables, como el acabado o la longitud de onda entre otros. Debido a la variabilidad de su valor, se estima un valor constante según la emisividad de los aceros tratados térmicamente (0,5). Por lo tanto, en lugar de utilizar temperaturas absolutas, este trabajo se basa en un tratamiento cualitativo de las temperaturas.

2. NUEVO PLANTEAMIENTO DE CONTROL BASADO EN LA ADAPTACIÓN DE LOS TIEMPOS DE ESPERA ENTRE CAPAS

Debido a la influencia de los tiempos de espera en la temperatura de la pieza durante la fabricación y, por lo tanto, en las condiciones geométricas, como se demuestra en el siguiente apartado, en este estudio se plantea un método de control basado en la adaptación de los tiempos de espera. A partir del control de las condiciones térmicas durante la deposición, el objetivo es conseguir un mayor grado de homogeneidad en las deposiciones y, por tanto, en las piezas fabricadas. Al manipular el instante de inicio de la deposición del siguiente cordón, es posible controlar el tiempo disponible para que la pared disipe el calor acumulado y, por lo tanto, la temperatura de la pared en ese instante. Por lo tanto, es posible depositar todos los cordones sobre unas condiciones térmicas iguales. De esta forma, además de mantener constantes los parámetros del proceso, se mantienen también las condiciones térmicas previas a cada deposición.

La nueva estrategia de control se basa en la información capturada por la cámara mediante un código propio implementado en Matlab®. Tras su procesamiento, el controlador envía al sistema de fabricación la señal que permite iniciar la deposición de cada cordón. A partir del momento de finalización de cada cordón, el código calcula la temperatura de la sección mencionada en cada fotograma recibido, observando

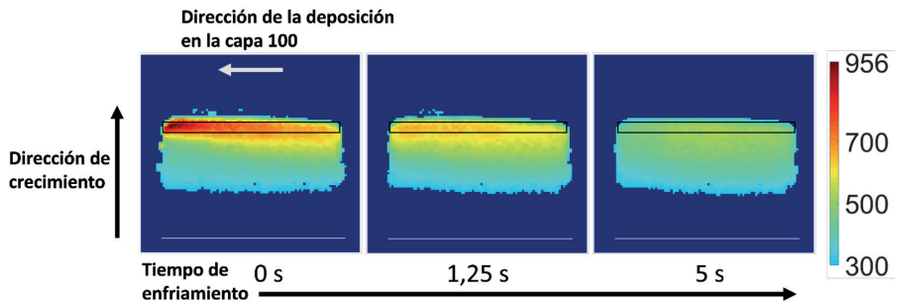


Fig. 3: Evolución y distribución térmica de la superficie de la pared durante el enfriamiento tras la deposición de la capa número 100 en el instante de finalización y transcurridos 1,25 s y 5 s

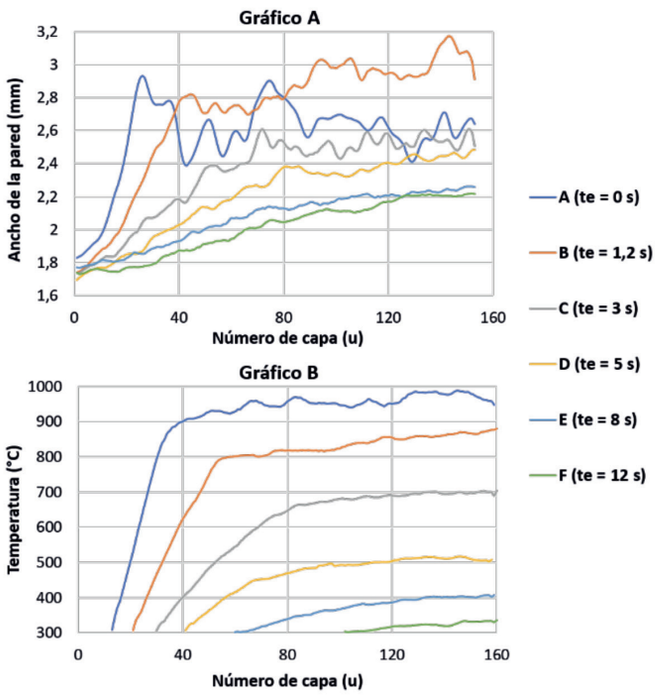


Fig. 4: Gráficos de los resultados de las paredes (pruebas A-F) fabricadas con distintos tiempos de espera (te): Evolución del espesor de la pared (Gráfico A) y evolución de la temperatura en el instante anterior al comienzo de la deposición de cada capa (Gráfico B)

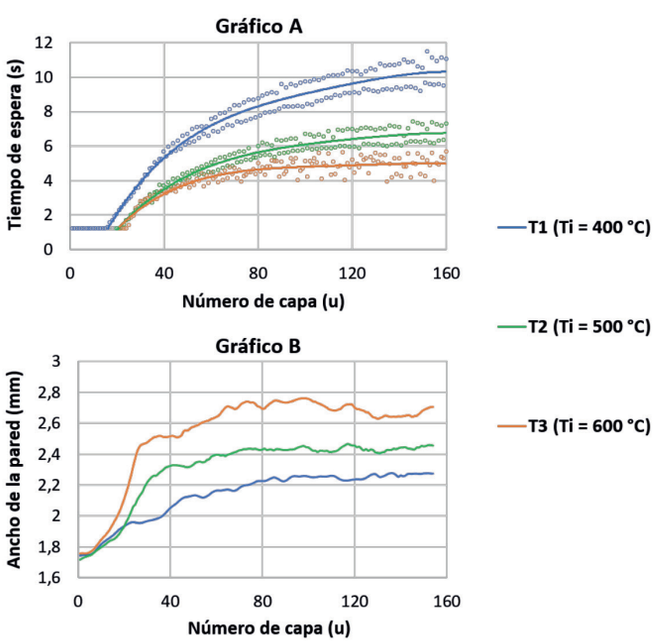


Fig. 5: Gráficos de los resultados de las paredes (T1-T3) fabricadas con el control basado en los tiempos de espera: tiempos de espera por número de capa (a) y evolución del espesor de las paredes (b)

la evolución del enfriamiento. La señal de inicio se envía en el momento que la temperatura calculada alcanza la temperatura deseada, instante en el que comienza a depositarse el siguiente cordón. De este modo, el tiempo de espera adaptado corresponde al tiempo necesario para que la temperatura de la pared descienda hasta el límite establecido.

3. RESULTADOS

3.1. TIEMPOS DE ESPERA CONSTANTES

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en las 6 paredes (Pruebas A-F). En la figura 6 se observa la acumulación de calor producida en la construcción en función del número de capas depositadas y su efecto en el espesor resultante. El gráfico B representa la evolución de la temperatura en el instante que precede a la deposición de cada uno de los cordones y el evidente efecto de los tiempos de espera. La utilización de mayores tiempos favorece el enfriamiento de la construcción entre capa y capa que, además de aportar un ascenso de la temperatura más lento, estos se acaban estabilizando en valores inferiores debido a la compensación entre calor introducido y disipado.

La comparación de ambos gráficos refleja una clara relación entre la temperatura y el espesor. En las primeras capas, también la evolución del espesor (gráfico A) presenta una tendencia ascendente que se acentúa en las paredes donde se han utilizado menores tiempos de espera. Sin embargo, en el momento que la temperatura se estabiliza, no todas las paredes presentan un valor estable del espesor. Cuanto mayor es la temperatura previa a la deposición, además de obtener espesores mayores, también aumenta el grado de irregularidad del espesor. Por lo tanto, la homogeneidad geométrica se reduce con el aumento de las temperaturas.

Una vez definida dicha relación, se propone la implementación de sistemas de control basados en la adaptación de parámetros. En este caso, el control de las condiciones térmicas a partir de la adaptación de los tiempos de espera, se considera un método eficaz para obtener las características geométricas requeridas del espesor.

3.2. TIEMPOS DE ESPERA VARIABLES

De cara a validar el sistema de control propuesto, se realiza una segunda serie experimental, compuesta por la fabricación de 3 paredes (T1-T3). La adaptación de los tiempos de espera posibilita que todos los cordones de cada pared se depositen sobre unas condiciones térmicas similares. Se han escogido los valores 400 °C, 500 °C y 600 °C respectivas a T1, T2 y T3 para que, en

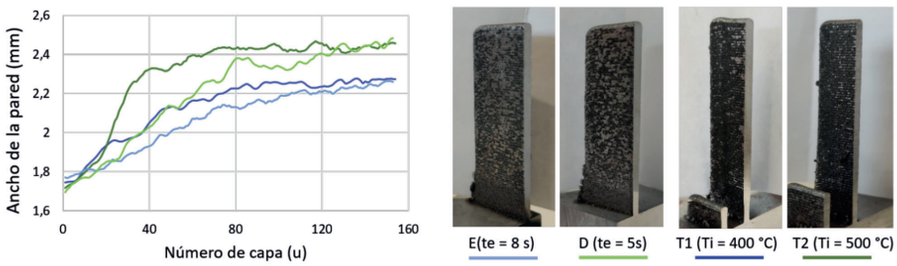


Fig. 6: Comparación de los resultados de ambas series experimentales a partir de las pruebas consideradas térmicamente equivalentes. Gráfico de la evolución del espesor (izquierda) e imágenes de las paredes cortadas (derecha)

cada prueba, sea este el valor al que tiene que descender la temperatura de la pared para iniciar la deposición de cada cordón.

El gráfico A de la figura 5, recoge los tiempos de espera entre la finalización de la deposición de una capa y el inicio de la siguiente, donde se muestra el aumento de los tiempos de espera a medida que avanza la fabricación. Esto es debido a la reducción de la capacidad de disipación de calor. Del mismo modo, son necesarios mayores tiempos de espera, es decir, mayor tiempo de disipación de calor, cuanto menor es la temperatura en la que comienzan las deposiciones.

En las primeras capas de las paredes, el tiempo de espera se mantiene en 1,2 segundos, que es el tiempo mínimo necesario para realizar el apagado y el encendido del láser. Por este motivo, en esta etapa la temperatura en el inicio de las deposiciones es inferior a la definida, pero va aumentando durante las primeras 20 capas aproximadamente hasta que el sistema de control se activa. Esto provoca menores espesores con tendencia ascendente en las primeras capas, como se puede ver en el gráfico B (figura 5). En el momento en que el sistema de control empieza a actuar adaptando los tiempos de espera, la evolución del espesor adquiere una mayor estabilidad.

3.3. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Las ventajas obtenidas con el sistema de control propuesto se demuestran a partir de la comparación entre las paredes fabricadas con tiempos de espera constantes y las paredes con tiempos variables. Por un lado, las pruebas E y D, en las que la temperatura se acaba estabilizando en 400°C y 500°C respectivamente (figura 4, gráfico B). Por otro lado, las paredes en las que se implementa el control de tiempos y las temperaturas de inicio se mantienen en 400°C (T1) y 500°C (T2).

El gráfico de la figura 6 demuestra que la relación entre la temperatura y el espesor se mantiene en las zonas más estables de las paredes en las que la temperatura coincide, la mitad superior de la E y la T1, y de la D y la T2. Sin embargo, al controlar las condiciones térmicas en las paredes donde se implementa el control, el espesor alcanza niveles estables en capas inferiores.

Para validar la estabilidad geométrica, se realiza el cálculo de las desviaciones estándar relativas (DER). Considerando la mitad superior de las paredes para descartar las irregularidades iniciales, los valores de DER para las pruebas *T1* y *T2* son 0,67% y 0,57% respectivamente, mientras que en las paredes *E* y *D* son 1,55% y 1,85%. Esto significa una menor variación del espesor de la pared cuando se aplica la adaptación de los tiempos de espera en el proceso de fabricación. La mayor homogeneidad geométrica obtenida demuestra la validez del sistema de control planteado.

Además de mantener las condiciones térmicas constantes, comenzar cada deposición en el instante oportuno evita el desperdicio de tiempo útil. Llegando a reducir la duración del proceso completo en la fabricación de las geometrías planteadas entre un 4% y un 8%.

4. CONCLUSIONES

La realización de este estudio, por una parte, demuestra que en la fabricación de componentes 3D mediante LMD, mantener constantes los parámetros del proceso no es suficiente para lograr características estables en la deposición. Debido a la variación de las condiciones térmicas de la pieza durante el proceso, se producen irregularidades geométricas en los cordones. Por otra parte, valida un nuevo sistema de control basado en la adaptación de los tiempos de espera a partir de la temperatura monitorizada off-axialmente con una cámara infrarroja. Con el que, además de aumentar la homogeneidad geométrica de las paredes, optimiza el tiempo necesario para su fabricación.

Este estudio forma parte de un desarrollo más amplio sobre la monitorización y control en LMD, y se toma como un proceso experimental para demostrar la funcionalidad de la monitorización off-axial térmica. Un control más avanzado podría incluir la metodología propuesta como complemento a la monitorización coaxial del baño fundido y adaptación de la potencia. Mientras que la monitorización coaxial actúa durante la deposición, la off-axial lo haría entre la deposición de una capa y la siguiente, evitando que la temperatura del componente alcance valores excesivos. De esta forma, aumentar las capacidades de la tecnología LMD en cuanto a la fabricación de componentes funcionales de medio y gran tamaño para sectores como el automovilístico, el energético o el aeronáutico.

Además, se seguirá desarrollando el uso de la cámara térmica de forma off-axial mediante la monitorización de la superficie superior en lugar de la lateral, es decir, la última capa depositada. Con el objetivo de extender su funcionalidad a la fabricación de componentes tridimensionales de cualquier geometría, donde podría actuar tanto en el tiempo de espera como en la trayectoria de deposición.

REFERENCIAS

1. Hitzler L, Merkel M, Hall W, Ochsner A (2018) A Review of Metal Fabricated with Laser- and Powder-Bed Based Additive Manufacturing Techniques : Process, Nomenclature, Materials, Achievable Properties, and its Utilization in the Medical Sector. 1700658:1–28. https://doi.org/10.1002/adem.201700658
2. Hu D, Kovacevic R (2003) Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. Int J Mach Tools Manuf 43:51–60. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00163-3
3. Garmendia I, Pujana J, Lamikiz A, et al (2019) Development of an Intra - Layer Adaptive Toolpath Generation Control Procedure in the Laser Metal Wire Deposition Process. https://doi.org/10.3390/ma12030352
4. Liu WW, Tang ZJ, Liu XY, et al (2017) A Review on In-situ Monitoring and Adaptive Control Technology for Laser Cladding Remanufacturing. Procedia CIRP 61:235–240. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.217
5. Chua ZY, Ahn IH, Moon SK (2017) Process monitoring and inspection systems in metal additive manufacturing: Status and applications. Int J Precis Eng Manuf - Green Technol 4:235–245. https://doi.org/10.1007/s40684-017-0029-7
6. Salehi D, Brandt M (2015) Melt pool temperature control using LabVIEW in Nd : YAG laser blown powder cladding process Melt pool temperature control using LabVIEW in Nd : YAG laser blown powder cladding process. https://doi.org/10.1007/s00170-005-2514-3
7. Arias JL, Montealegre M a., Vidal F, et al (2014) Real-time laser cladding control with variable spot size. SPIE Photonics West 2014-LASE Lasers Sources 8970:89700Q. https://doi.org/10.1117/12.2040058
8. Panadeiro V, Rodriguez J, García A, Vergara G (2018) Medium Wavelength Infrared (MWIR) Imaging for High Speed Control of Laser Metal Deposition (LMD). 39:67–75
9. Hassler U, Gruber D, Hentschel O, et al (2016) In-situ monitoring and defect detection for laser metal deposition by using infrared thermography. Phys Procedia 83:1244–1252. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.131
10. Yang D, Wang G, Zhang G (2017) Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. J Mater Process Technol 244:215–224. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido desarrollado al amparo del proyecto Addisend bajo el programa de financiación Elkartek 2018 del Gobierno Vasco y el proyecto ASSALA H2020-CS2-CFP08-2018-01 (Grant agreement ID: 831857) que se enmarca en el programa europeo CleanSky.