Cod. 9378 | Tecnología industrial | 3310.03 Procesos industriales

Estudio comparativo del proceso de aporte por láser (LMD) de hilo y polvo coaxial en la fabricación de estructuras de Ti-6Al-4V

Comparative study of laser metal deposition (LMD) of coaxial wire and powder in the manufacture of Ti-6Al-4V structures

Mikel Madarieta-Churruca, Josu Leunda-Arrizabalaga, Iker Garmendia Sáez de Heredia y Carlos Soriano

Fundación Tekniker (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9378

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación aditiva de componentes aeronáuticos de titanio de gran tamaño, normalmente de más de 400 mm de longitud, es un ámbito de trabajo donde las tecnologías de aporte directo de energía (*Direct Energy Deposition*, DED) adquieren ventaja sobre las tecnologías de cama de polvo (*Powder Bed Fusion*, PBF). Principalmente debido al mayor volumen de trabajo de celdas y máquinas de fabricación y a las tasas de aporte superiores de las tecnologías DED [1]

Entre las técnicas DED más empleadas en la industria destacan el aporte por haz de electrones (*Electron Beam Additive Manufacturing* EBAM), el aporte por arco (*Wire Arc Additive Manufacturing*, WAAM), y el aporte por láser (*Laser Metal Deposition,* LMD) [2,3,4].

La técnica LMD, destaca respecto al resto por la posibilidad de trabajar tanto con material en forma de polvo como de hilo, mínima afectación térmica, mayor precisión y control del proceso, así como la opción de deposición multidireccional [5]. Como consecuencia, los acabados que se consiguen son de buena calidad, las tensiones residuales reducidas y consecuentemente las distorsiones menores que las otras técnicas mencionadas. Entre las contrapartidas de la técnica LMD se encuentran un precio mayor que los equipos WAAM y unas tasas de aporte para fabricación aditiva que rondan aproximadamente los 4-6 kg/h como máximo en la actualidad [6].

Como se ha mencionado previamente dentro de las diferentes variantes del proceso LMD es posible aportar material tanto en forma de polvo como de hilo, en ambos casos de forma coaxial.

La principal ventaja del hilo es la mayor eficiencia en cuanto a material depositado que ofrece el LMD de hilo frente al aporte por polvo. No todo el polvo queda atrapado en el baño de fusión, lo que reduce la eficiencia de deposición del proceso, alcanzando valores típicamente cercanos al 70%, en algunos casos superiores al 80% dependiendo de las condiciones del proceso y del tipo de boquilla [7,8]. El hilo en cambio no supone prácticamente ninguna perdida durante el aporte, ya que se deposita todo el material.

Como principal desventaja que se observa en el aporte de hilo es la baja estabilidad del proceso asociada a unas exigencias de ajuste del foco más estrechas. Además, existen limitaciones geométricas, que difícilmente pueden ser abordadas con este método, tales como paredes delgadas o estructuras sobresalientes o huecas.

La microestructura resultante tanto para el hilo como para el polvo es bastante parecida [9]. En resumen, el titanio adquiere la macroestructura de granos β previos de forma columnar, creciendo epitaxialmente a través de diferentes capas en dirección opuesta al flujo de calor [10]. El borde de los granos β previos está formado por la fase α y la microestructura intragranular varía en cierta medida de grano a grano. Consiste en una fina estructura laminar α+β, que se encuentra principalmente en una estructura llamada *basketweave*[11], aunque también es muy frecuente la estructura de colonias α, agrupaciones paralelas de láminas α. [12,13,14].

A velocidades de enfriamiento más altas que las necesarias para la formación de la estructura *basketweave*, aparece otra fase llamada martensita α'. Esta suele ser muy frecuente en las primeras capas depositadas, donde el enfriamiento es repentino por el propio substrato [15,16].

En el presente artículo se realiza una comparativa de las dos variantes coaxiales de la tecnología LMD, el aporte en forma de polvo y de hilo. El objetivo principal del estudio es verificar que el aporte por hilo es un método que puede conseguir unas tasas de deposición más altas con una eficiencia mayor y a la vez mantenga o mejore otros aspectos fundamentales como son la complejidad geométrica de los componentes y la microestructura.

El artículo se compone de un apartado sobre equipamientos y metodología. A continuación, se detallan los resultados obtenidos y por último se exponen las conclusiones generales del estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el aporte de las geometrías a estudiar se han utilizado dos celdas, una dedicada al aporte de polvo y otra al aporte de hilo. Los aportes producidos con el material en forma de polvo se han llevado a cabo utilizando un láser de Nd:YAG de onda continua de 2.2 kW. El polvo se ha aportado al baño fundido a través de una boquilla coaxial discreta de tres orificios. El movimiento del cabezal láser es proporcionado por un robot de 6 ejes (Fig. 1a).

En el caso de hilo se ha hecho uso de un generador láser de fibra (Iterbio), con una potencia máxima de 4 kW. El haz láser es guiado a la zona de trabajo a través de una fibra óptica de 600 µm de diámetro, acoplada a un cabezal coaxial de tres haces alimentado por un sistema devanador de hilo caliente. El cabezal está sujeto a un robot de 6 ejes de movimiento y un posicionador de 2 ejes (Fig. 1b).

Con el fin de evitar la oxidación durante el proceso de aporte de Ti-6Al-4V se ha empleado una especie de globo o bolsa (Fig. 1b) donde se introduce tanto el cabezal de aporte como la pieza sobre la que se va a aportar. Esta cámara, una vez llena de argón desplaza el oxígeno evitando la oxidación.

El análisis de tasa de deposición, eficiencia y microestructura se ha realizado mediante la fabricación de paredes de 50x30x10mm. El análisis geométrico se ha realizado con paredes verticales e inclinadas a diferentes ángulos.

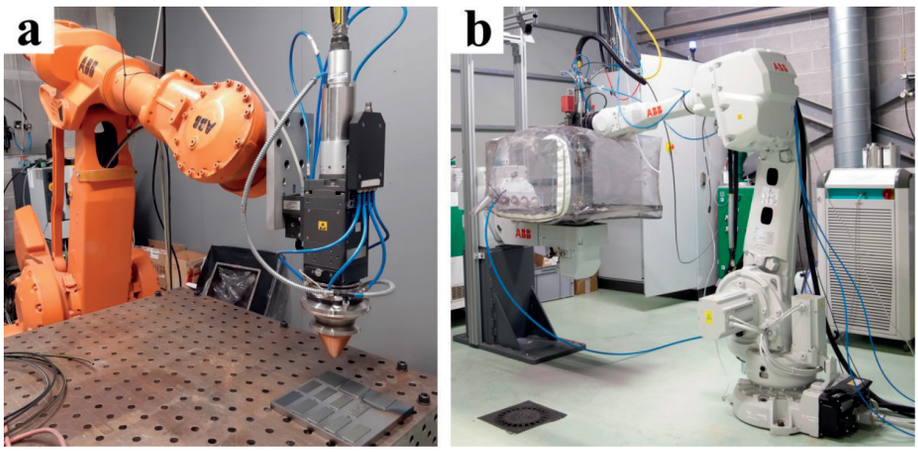


Fig. 1: Equipamientos utilizados para la realización de los aportes. Celda de polvo (a) y celda de hilo (b)

Formato de aporte	Potencia (W)	Velocidad de avance (mm/s)	Caudal de alimentación (kg/h)	Tasa de deposición real (kg/h)	Ratio energía-masa (MJ/kg)
Polvo	2200	20	0.96	0.73	10.85
Hilo	2700	25	0.93	0.93	10.45

Tabla 1: Parámetros de proceso utilizados para la fabricación de las paredes

Los parámetros de proceso utilizados durante la experimentación (Tabla 1) han sido elegidos de acuerdo con las tasas de deposición más altas obtenidas en una búsqueda paramétrica en la que se han analizado la porosidad resultante de paredes fabricadas por diferentes conjuntos de parámetros.

3. RESULTADOS

En este apartado se resumen los resultados obtenidos durante la experimentación realizada. Dichos resultados se han dividido en los diferentes aspectos que se han comparado: tasa de deposición y eficiencia, calidad geométrica y análisis microestructural.

3.1. TASA DE DEPOSICIÓN Y EFICIENCIA

El cálculo de la eficiencia de material aportado se ha realizado mediante una comparativa entre el material aportado y el peso final de las piezas depositadas. Primero se han pesado las paredes y se le ha restado el peso del substrato. La ecuación 1 muestra el cálculo de la masa depositada.

$$M_{depositada} = 819.36\,\text{g} - 473.13\,\text{g} = 346.23\,\text{g} \quad (1)$$

Por otro lado, se ha calculado el tiempo de aporte de las 5 paredes. El tiempo necesario para realizar cada capa es de 15s y son cinco paredes de 23 capas, por lo que el tiempo total de deposición has sido de 28minutos y 45 s. Se han calculado tanto la masa de polvo utilizada y la eficiencia en la ecuación 2 y la ecuación 3 respectivamente.

$$M_{alimentada} = 28.75\,\text{min} \cdot 16\,\text{g/min} = 460\,\text{g} \quad (2)$$

$$Eficiencia = \frac{346.23\,\text{g}}{460\,\text{g}} \cdot 100 = 75.3\% \quad (3)$$

Con una eficiencia del 75.3% la tasa de deposición real para el polvo es de 0.72kg/h.

En cuanto al hilo se ha considerado la eficiencia del 100% o muy cercana, ya que, al tratarse de un aporte de material continuo todo el material se funde y se deposita en las paredes. La velocidad de aporte más alta utilizada ha sido de 7 mm/min con un hilo de ø 0.8mm, la tasa de deposición resultante es de 0.93 kg/h.

3.2. CALIDAD GEOMÉTRICA

En cuanto a paredes verticales se refiere, el polvo no ha supuesto ningún problema, y no existe ningun limite en cuanto a medidas más alla que las del alcance del robot utilizado para la operación. En la Fig. 2a se observa una pared prototipo de 180x80x10 mm. Se observa una pared muy homegenea y con un crecimiento muy estable durante todas la capas, lo cual permite el crecimiento sin uso de sistemas de control de altura.

Ha de decirse que el substrato ha sufrido una ligera distorsion debido a la deposicion de la pared, en futuras investigaciones se espera corregir este fallo con el precalentamiento del substrato.

Las Fig. 2b y c muestran varias paredes por aporte de polvo con una inclinacion de 75º. Las estrategias utilizadas para fabricar las paredes han sido diferentes, en las paredes de Fig. 2b el movimiento del cabezal ha sido en todo momento perpendicular al substrato, y la eficiencia se ha reducido notablemente.

Las paredes de la Fig. 2c, sin embargo, se han fabricado con el cabezal inclinado en la direccion de crecimiento de la pared. Esta estrategia ha permitido depositar una pared inclinada en las mismas condiciones que las paredes verticales y así igualar eficiencia, acabado y estabilidad.

Estos resultados combinados con un previo estudio [17] sobre complejidad geométrica con acero nos permite concluir que se pueden fabricar paredes con un angulo de hasta 55 º con Ti-6Al-4V.

El aporte de hilo ha supuesto mayores dificultades para conseguir la geometrías deseadas. Durante la deposición se producen inestabilidades que complican el crecimiento debido al reducido rango de trabajo del cabezal y se producen defectos irreparables. Ejemplos de dichas inestabilidades se pueden observar en la Fig. 3ª. La altura de cada pared esta limitada por el momento en el que las inestabilidades son demasiado grandes y se produce un fallo en la deposición. La altura maxima conseguida se observa en la Fig. 3b y c que ha sido de 30mm.

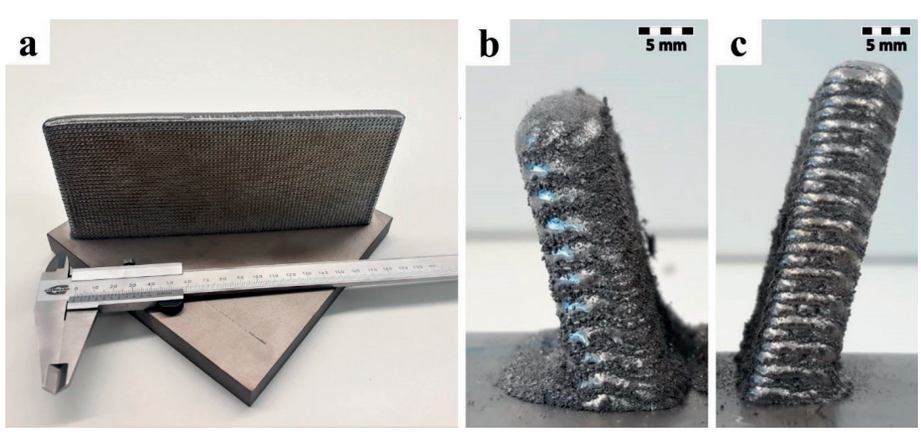


Fig. 2: Paredes de Ti-6Al-4V por aporte de polvo. Prototipo de pared vertical de dimensiones 180 x 80 x 10 mm (a). Paredes inclinadas aportadas con el cabezal perpendicular al substrato (b) y con el cabezal paralelo al crecimiento de la pared (c)

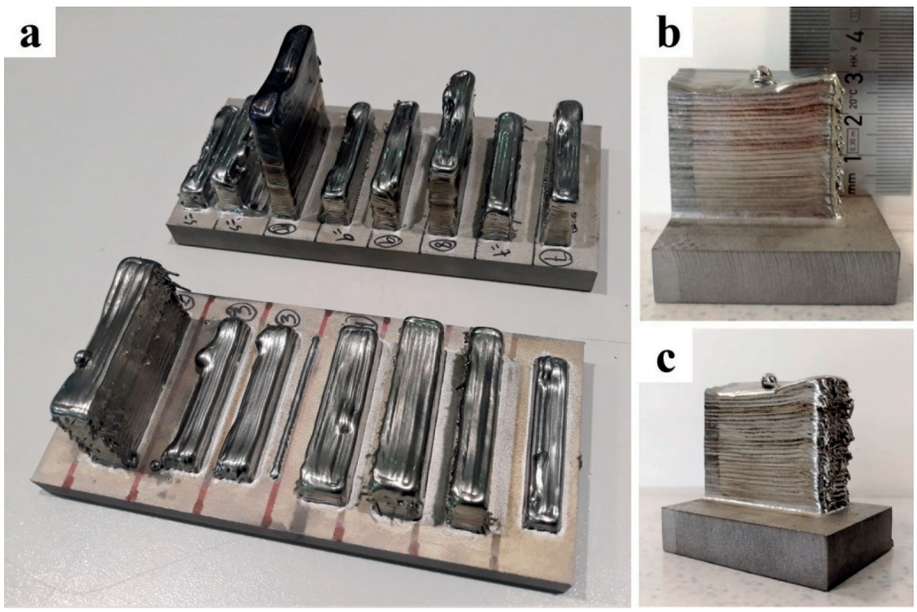


Fig. 3: Paredes de Ti-6Al-4V por aporte de hilo. Ensayos de paredes mediante aporte de hilo (a) pared de mayor altura: 30mm (b,c)

3.3. ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL

La estructura que adquiere el titanio normalmente se diferencia en dos rangos de escala, la macroestructura o estructura intergranular, y la microestructura o estructura intragranular.

3.3.1. Macroestructura

En el estudio de la macroestructura que queda mostrado en la Fig. 4a, se observa la sección de dos paredes de Ti-6Al-4V fabricadas con porte de polvo (a) y aporte por hilo (b) preparadas metalográficamente.

Para el caso de polvo se distinguen dos principales macroestructuras en cada pared. En la parte inferior se pueden observar la frontera de las capas depositadas, estas se distinguen debido a que en esta zona existen altas tensiones que impiden el ataque químico de las probetas [18]. Los granos β previos adquieren formas columnares y no sobrepasan 1mm de espesor. Sin embargo, en las capas superiores no hay diferenciación de capas y paulatinamente los granos aumentan de tamaño y tienden a cambiar la forma de columnar a equiaxial.

Estas diferencias en la macroestructura se deben al historial térmico. En las primeras deposiciones el substrato se encuentra a temperatura ambiente por lo que se produce un flujo de calor muy rápido en dirección vertical, de ahí las formas columnares en la dirección del flujo de calor [19]. Sin embargo, a medida que se añaden más capas, tanto el substrato como las capas previas van adquiriendo temperatura por lo que no se da este flujo tan repentino y los granos adquieren formas más equiaxiales. Aun así, el flujo por la pared es mayor y por ello se observa que los granos son ligeramente columnares. La generación de tensiones mayores en las capas más bajas es el causante de la formación de granos más pequeños, debido a que, estas tensiones son puntos de nucleación y crecimiento de granos [14,20].

En cuanto a las piezas fabricadas con aporte por hilo la dinámica de formación macroestructural es la misma, sin embargo, se han dado diferencias por las diferentes estrategias y parámetros de deposición. En la Fig. 4b se observa el corte seccional de una pared por aporte de hilo de Ti-6Al-4V, al contrario del caso anterior, no se diferencia la zona superior e inferior. Esta se compone en toda su totalidad por granos columnares, aunque se observa un gran aumento en el tamaño de los granos de la primera capa al resto de la pared. Se entiende que el flujo de calor es mucho mayor y la aparición de tensiones es superior en la primera capa respecto a las otras, de ahí la creación de granos más pequeños en la zona inferior.

3.3.2. Microestructura

La estructura intragranular obtenida es la habitual en paredes de Ti-6Al-4V fabricadas mediante fabricación aditiva. Se ha dado la misma microestructura para el aporte polvo e hilo. Ésta, tal y como la macroestructura, también varía entre la parte inferior y superior de la pared.

En la parte superior, la estructura principal esta formada por la fase α primaria laminar en una matriz de fase β. Dependiendo del grano las láminas α forman colonias o estructura *basketweave* o *Widmanstatten* (ver Fig. 5a y c). Estas son estructuras formada por nucleación y difusión, a medida que desciende la temperatura la fase α se forma en las juntas de grano β y a continuación, las láminas comienzan a crecer al interior del grano formando colonias de láminas en la misma dirección. Sin embargo, si la velocidad de crecimiento es lo suficientemente alta se inician nuevas laminas a partir de la propias laminas en crecimiento produciéndose la estructura *basquetweave.* La anchura media de las láminas *Widmanstatten* es de ~1.2 µm para el caso de aporte por polvo y algo inferior para el caso del hilo, alrededor de 1 µm.

En la zona baja, sin embargo, se observa una fase martensítica α' acicular, tal y como se observa en la Fig. 5b y d donde

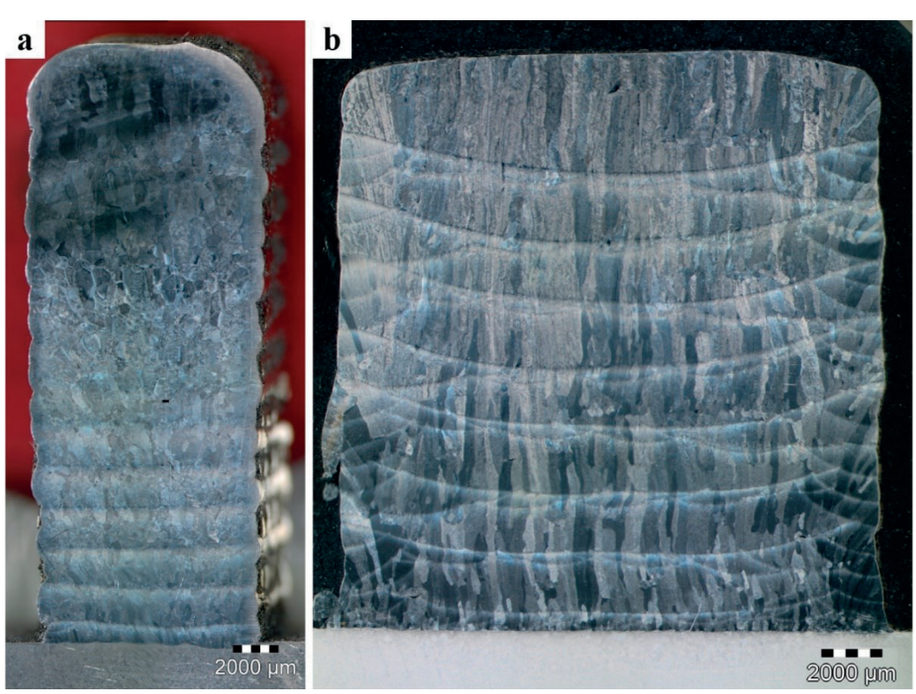


Fig. 4: Vista seccional de dos paredes fabricadas por aporte de polvo (a) e hilo (b)

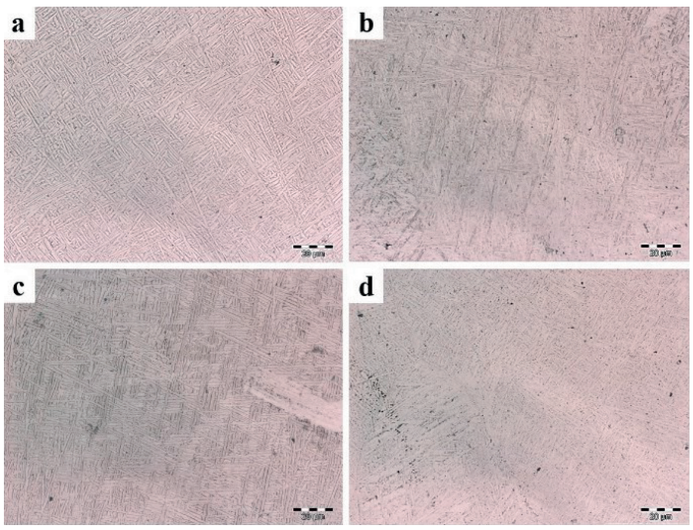


Fig. 5: Microestructura obtenida en la parte superior de probetas tanto de hilo(a) como de polvo (c): Estructura laminar α+β en forma de "basketwave". Aparicion de martensita α' en zonas de la parte inferior cercana al substrato en el caso del hilo (b) y del polvo (d) debido a un enfriamiento más rapido.

se aprecian láminas más dentadas y grisáceas. La aparición de esta fase martensítica α' se debe a un enfriamiento muy rápido por encima de la temperatura de formación martensítica por lo que es imposible una transformación por difusión. [12,21,22].

4. CONCLUSIONES

El trabajo ha mostrado una comparativa del proceso LMD por aporte de polvo e hilo, desde un punto de vista de tasa de deposición, eficiencia, geométrica y microestructural. Se ha observado que el hilo concéntrico es una alternativa real al aporte de polvo para la construcción de geometrías tridimensionales, aunque se observan ciertas carencias que requieren una continua investigación.

De los tres aspectos analizados el que se refiere a tasas de deposición y eficiencia es el más desarrollado en el aporte por hilo. La tasa máxima de deposición se aumenta considerablemente, de una tasa de 0.73kg/h en el aporte por polvo a los 0.93kg/h conseguidos mediante el aporte por hilo. Además, el uso del hilo no supone ningún tipo de perdida de material, debido a su eficiencia del 100% una ventaja muy grande respecto al 75% conseguido en el polvo.

En cuanto a la macroestructura, se observa que la obtenida en el proceso por hilo es algo peor debido a que no se han conseguido granos β previos equiaxiales como en el polvo. Sin embargo, se espera, con un aporte continuo y el precalentamiento del substrato, solucionar el problema presente. La microestructura obtenida, sin embargo, es muy parecida al polvo obteniéndose una estructura mixta de *basketweave* y colonias α. La estructura *basketweave* es la ideal debido a que el entrelazado de las láminas α supone una longitud efectiva del deslizamiento mínima. Sin embargo, la aparición de la colonia α aumenta la longitud de deslizamiento al tamaño de la colonia, por lo que hay que enfrentar este problema reduciendo el tamaño o convirtiendo las colonias en una estructura *basketweave*.

Por último, se ha estudiado el aspecto geométrico de la tecnología. Los resultados obtenidos en el aporte por hilo están muy por debajo del aporte por polvo principalmente debido a las inestabilidades que evitan un crecimiento correcto de las paredes o piezas. Se espera corregir este error con el uso de un control de altura de la superficie superior del material aportado que permita posicionar el cabezal y el plano del foco en el lugar correcto. Es también importante hacer frente a las distorsiones que aparecen durante el proceso, tanto en polvo como en hilo. Aunque la tecnología LMD aventaja en este aspecto a otras tecnologías, la reducción de estas distorsiones es muy importante principalmente en la construcción de componentes por encima de los 400 mm de longitud.

Para terminar, cabe destacar que es necesaria la realización de ensayos mecánicos, relacionarlos con la microestructura y garantizar las características que exige cada aplicación.

REFERENCIAS

[1] ABDULRAHMAN, Kamardeen O.; AKINLABI, Esther T.; MAHAMOOD, Rasheedat M. Laser metal deposition technique: Sustainability and environmental impact. Procedia Manufacturing, 2018, vol. 21, p. 109-116. DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.100
[2] SAMES, William J., et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. International Materials Reviews, 2016, vol. 61, no 5, p. 315-360. DOI: https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649
[3] ABDULRAHMAN, Kamardeen O., et al. Laser metal deposition of titanium aluminide composites: A review. Materials Today: Proceedings, 2018, vol. 5, no 9, p. 19738-19746.
[4] RUMMAN, R., et al. Laser Metal Deposition and Wire Arc Additive Manufacturing of Materials: An Overview. Archives of Metallurgy and Materials, 2019, vol. 64.
[5] KELBASSA, Jana, et al. Equipment and process windows for laser metal deposition with coaxial wire feeding. Journal of Laser Applications, 2019, vol. 31, no 2, p. 022320.
[6] BRANDL, E., et al. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and are beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications. Phys. Procedia, 2010, vol. 5, p. 595-606. DOI: https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.087.
[7] J. TUOMINEN, J., et all. "Innovations & network: Laser cladding to high-quality high-productive process – Highest deposition rate in the world", 6th Annual Seminar of FIMECC, 2013.
[8] GASSER, Andres, et al. Laser Additive Manufacturing: Laser Metal Deposition (LMD) and Selective Laser Melting (SLM) in Turbo-Engine Applications. Laser Technik Journal, 2010, vol. 7, no 2, p. 58-63.
[9] BRANDL, Erhard; LEYENS, Christoph; PALM, Frank. Mechanical properties of additive manufactured Ti-6Al-4V using wire and powder-based processes. En IOP conference series: materials science and engineering. IOP Publishing, 2011. p. 012004. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/26/1/012004
[10] RAJI, Sadiq Abiola, et al. Laser Based Additive Manufacturing Technology for Fabrication of Titanium Aluminide-Based Composites in Aerospace Component Applications. En Environmental Impact of Aviation and Sustainable Solutions. IntechOpen, 2019.
[11] KISTLER, Nathan A., et al. Effect of processing conditions on the microstructure, porosity, and mechanical properties of Ti-6Al-4V repair fabricated by directed energy deposition. Journal of Materials Processing Technology, 2019, vol. 264, p. 172-181.
[12] BRANDL, Erhard; GREITEMEIER, Daniel. Microstructure of additive layer manufactured Ti–6Al–4V after exceptional post heat treatments. Materials Letters, 2012, vol. 81, p. 84-87. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.04.116
[13] ÅKERFELDT, Pia; ANTTI, Marta-Lena; PEDERSON, Robert. Influence of microstructure on mechanical properties of laser metal wire-deposited Ti-6Al-4V. Materials Science and Engineering: A, 2016, vol. 674, p. 428-437. DOI: https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.038
[14] AZARNIYA, Abolfazl, et al. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties. Journal of Alloys and Compounds, 2019.
[15] DAVIS, Joseph R., et al. (ed.). Metals handbook: properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. ASM International, 1990.
[16] TITANIUM, R. M. I. Facts about the metallography of titanium. Niles (USA): RMI Titanium, 1981.
[17] ARREGUI, Laura, et al. Study of the geometrical limitations associated to the Metallic Part Manufacturing by the LMD process. Procedia CIRP, 2018, vol. 68, p. 363-368. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.096
[18] KLOCKE, Fritz, et al. Wire-based laser metal deposition for additive manufacturing of Ti6Al4V: Basic investigations of microstructure and mechanical properties from build-up parts. En Laser 3D Manufacturing IV. International Society for Optics and Photonics, 2017. p. 100950U. DOI: https://doi.org/10.1117/12.2251336
[19] CHANDRAMOHAN, P., et al. A review of additive manufacturing of α-β Ti alloy components through selective laser melting and laser metal deposition. Journal of Engineering Science and Technology, 2018, vol. 13, no 3, p. 790-812.
[20] SABOORI, Abdollah, et al. An overview of additive manufacturing of titanium components by directed energy deposition: microstructure and mechanical properties. Applied Sciences, 2017, vol. 7, no 9, p. 883.
[21] LÜTJERING, Gerd; WILLIAMS, James C. Titanium. Springer Science & Business Media, 2007.
[22] CHOI, Yi Rye, et al. Influence of deposition strategy on the microstructure and fatigue properties of laser metal deposited Ti-6Al-4V powder on Ti-6Al-4V substrate. International Journal of Fatigue, 2020, vol. 130, p. 105236.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se ha desarrollado en el marco de dos proyectos: ADDIECO: Desarrollo de una metodología de fabricación ecológica de componentes aeronáuticos mediante tecnología aditiva y sustractiva, financiado por Ihobe, la empresa pública de gestión medioambiental del Gobierno Vasco y el programa de financiación Emaitek Plus 2017 del Gobierno Vasco. ASSALLA: Advanced Simulation Solutions Applied to Quality Control of Laser Deposited Metals, que ha recibido financiación del Programa de Investigación e Innovación Horizon 2020 de la Unión Europea, bajo el acuerdo de subvención nº 831857.