



Universidad del País Vasco Euskal Herriko
Unibertsitatea

Tesis Doctoral

Desarrollo de la tecnología aditiva PAW para aleaciones aeronáuticas

Presentada por:

Dña. Teresa Artaza Orlando

en el

Departamento de Ingeniería Mecánica

perteneciente a la

Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea

Dirigida por

Prof. D. Aitzol Lamikiz Mentxaka

Dr. D. Alfredo Suárez González

Bilbao, Noviembre de 2021

A mis padres, por dárnoslo todo.

A mi marido, Iñaki, y a mis hijos Iñigo, Luisa y Ana por apoyarme siempre.

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que me han apoyado durante el desarrollo de este trabajo.

En primer lugar, quiero mencionar a mis directores de tesis, Aitzol Lamikiz y Alfredo Suárez. A Aitzol, por su ayuda, sus consejos y el apoyo que me ha dado en todo momento. A Alfredo, por su motivación continua, por la orientación y la supervisión, pero sobre todo por animarme a llevar a cabo esta Tesis Doctoral.

Especial agradecimiento a la empresa ADDILAN S.L., fabricante de máquinas aditivas basadas en tecnología WAAM, por su apuesta por las tecnologías aditivas y en concreto por la tecnología PAW sobre la que trata esta tesis, por invertir todos sus esfuerzos en que ésta encuentre su sitio en el mundo industrial. Sin su apoyo, este trabajo de tesis no habría sido posible.

Quiero mencionar también a todos mis compañeros del Área de Fabricación Avanzada de Tecnalía, que me han acompañado durante este tiempo y que han hecho que esta tarea resultara menos ardua. En especial al 'equipo' de WAAM formado por Eider Aldalur, Fernando Veiga, Ángel San Román y Gorka Puertas, por su colaboración y ayuda siempre que la he necesitado.

A todos ellos muchas gracias.

Por último, un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mi familia y amigos.

Resumen

La fabricación aditiva es una de las tecnologías con mayores perspectivas dentro del desarrollo industrial gracias al potencial que conlleva, en especial para el sector aeronáutico debido a la necesidad de reducción de tiempos y costes de este sector.

Aunque las expectativas de crecimiento del sector aeronáutico se han visto alteradas por la crisis producida por el COVID-19, se prevé que para el año 2025 pueda llegar a recuperarse el sector de la aviación y las previsiones esperadas sigan su curso. Estas previsiones apuntan a una necesidad de más de 30000 nuevos aviones, lo que conducirá a una necesidad de trabajar con materiales resistentes a altas temperaturas, que son los comúnmente utilizados en los motores de los aviones. Las superaleaciones utilizadas en la industria aeroespacial, como las de base níquel y las aleaciones de titanio, se emplean generalmente debido a su combinación única de propiedades como alta resistencia a elevadas temperaturas, resistencia a la degradación química y resistencia al desgaste. La fabricación aditiva se presenta como una alternativa muy prometedora para la fabricación de componentes de este tipo de materiales.

El objetivo del presente trabajo de tesis doctoral surge del acuerdo de colaboración entre Tecnalía R&I y ADDILAN para el desarrollo de la tecnología WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) con el objetivo de crear una máquina para la fabricación aditiva de diferentes materiales, que permita la fabricación de piezas en materiales específicos para el sector aeronáutico como los bases níquel o titanios que necesitan especificaciones concretas de máquina para poder ser depositados mediante fabricación aditiva.

El presente trabajo de tesis doctoral se divide principalmente en dos bloques temáticos, el primero centrado en la máquina (implementación de equipo WAAM, comunicación, control...) y el segundo en relación con temas más propios del proceso de fabricación aditiva WAAM, mas en concreto mediante tecnología PAW (Plasma Arc Welding).

La primera parte del proyecto se ha centrado en la implementación de diferentes equipos en una máquina tipo gantry de 5 ejes con el fin de habilitarla para la fabricación aditiva PAW. Esta máquina servirá como prototipo inicial para determinar los equipos y desarrollos que finalmente se incluirán en la máquina desarrollada por ADDILAN. Los diferentes aspectos considerados en este bloque han sido los siguientes:

- ✓ Integración equipo PAW
- ✓ Integración equipos de monitorización

- ✓ Comunicación máquina-equipo PAW-sistema de monitorización
- ✓ Estrategias de control

En el segundo bloque temático se ha llevado a cabo la puesta a punto de la tecnología para fabricar piezas en dos materiales comúnmente utilizados en el sector aeronáutico como son el Ti6Al4V y el Inconel 718. Uno de los puntos clave de este estudio es el análisis de las propiedades de estos dos materiales tras su deposición mediante PAW, para lo que se han realizado los siguientes análisis:

- ✓ Ensayos de tracción
- ✓ Microdurezas
- ✓ Metalografía

Además, teniendo en cuenta aplicaciones específicas de ambos materiales, se llevan a cabo otros estudios para cada uno. Así en el caso del Ti6Al4V se lleva a cabo un estudio de sus propiedades a fatiga tras la fabricación aditiva y en el caso del Inconel 718 se llevan a cabo ensayos a tracción en caliente y un estudio de la formación de fisuras en caliente y la formación de fases de Laves tan características de este material.

Por último, a modo de validación de todo el trabajo llevado a cabo en esta tesis doctoral, se ha fabricado en la máquina desarrollada el mismo demostrador en tres materiales: acero AISI316L, Ti6Al4V e Inconel 718.

Índice de contenidos

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	I-2
ÍNDICE DE FIGURAS	I-6
ÍNDICE DE TABLAS.....	I-15
ACRÓNIMOS	I-17
CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN	I-2
1. Contexto tecnológico e industrial.....	I-2
2. Planteamiento del Trabajo de Tesis Doctoral. Objetivos	I-6
3. Organización del Trabajo de Tesis Doctoral	I-8
CAPÍTULO II : ESTADO DEL ARTE	II-2
1. Introducción.....	II-2
2. Principales procesos de fabricación aditiva de piezas metálicas..	II-2
3. PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE WAAM.....	II-5
3.1. Equipos empleados en el proceso WAAM	II-10
3.2. Materiales habitualmente aportados mediante WAAM.....	II-14
3.2.1. Aleaciones de Titanio.....	II-14
3.2.2. Aleaciones de aluminio y acero	II-16
3.2.3. Aleaciones base níquel.....	II-17
3.2.4. Otros materiales.....	II-19
3.3. Defectología común de componentes WAAM.....	II-20
3.4. Monitorización y control.....	II-22
3.5. Postprocesados y operaciones de acabado.....	II-25
3.5.1. Tratamientos térmicos	II-26
3.5.2. Cold-rolling.....	II-27
3.5.3. Enfriamiento forzado.....	II-28
3.5.4. Granallado y tratamiento por ultrasonidos	II-28
3.5.5. Mecanizado de piezas fabricadas por WAAM	II-29

3.6. Soluciones Industriales WAAM existentes en el mercado.....	II-32
3.6.1. MAZAK	II-32
3.6.2. UNIVERSIDAD DE CRANFIELD	II-32
3.6.3. NORSK TITANIUM	II-33
3.6.4. TWI	II-34
3.6.5. EWI	II-35
3.6.6. RAMLAB	II-35
3.6.7. MX3D.....	II-36
3.6.8. AMRC	II-36
3.6.9. Wolf Robotics.....	II-37
3.6.10. ADDILAN.....	II-38
3.7. Patentes en el ámbito del WAAM.....	II-38
3.8. Comparativa con otras tecnologías DED	II-40

CAPÍTULO III : PUESTA A PUNTO DEL PROCESO PAW..... III-2

1. Introducción.....	III-2
2. Retrofitting de una máquina Gantry para fabricación aditiva.....	III-3
2.1. Estructura de la máquina Gantry.....	III-3
2.2. Comunicación	III-7
2.3. Control.....	III-9
2.3.1. Control de altura por láser	III-9
2.3.2. Control de altura por voltaje.....	III-10
2.3.3. Control de geometría	III-11
2.3.4. Estrategia rampa.....	III-11
2.3.5. Control de energía	III-12
3. Validación del sistema	III-14
4. Conclusiones	III-19

CAPÍTULO IV : DESARROLLO DEL PROCESO PAW PARA LA ALEACIÓN TI6AL4VIV-2

1. Introducción.....	IV-2
2. Materiales y metodología propuesta.....	IV-3

2.1. Desarrollo experimental del proceso PAW en Ti6Al4V	IV-3
2.2. Caracterización mecánica	IV-9
2.3. Caracterización de la microestructura	IV-10
2.4. Simulación del campo térmico	IV-10
3. Análisis del proceso PAW para el Ti6Al4V	IV-11
3.1. Análisis del proceso experimental	IV-11
3.2. Resultados de los ensayos mecánicos	IV-15
3.3. Análisis de la microestructura	IV-22
3.4. Simulación del campo térmico	IV-24
4. Postprocesados del Ti6Al4V depositado mediante PAW	IV-26
4.1. Tratamientos térmicos Ti6Al4V	IV-26
4.2. Mecanizado Ti6Al4V	IV-32
4.2.1. Materiales y métodos	IV-32
4.2.2. Análisis de la maquinabilidad	IV-37
4.2.3. Análisis de la rugosidad superficial	IV-39
4.2.4. Detección de rotura de herramienta basada en el análisis polar de los momentos flectores	IV-41
4.2.5. Análisis de taladrado	IV-43
5. Conclusiones Ti6Al4V	IV-49

CAPÍTULO V : DESARROLLO DEL PROCESO PAW PARA LA ALEACIÓN INCO718..... V-2

1. Introducción	V-2
2. Materiales y metodología propuesta.....	V-3
2.1. Desarrollo experimental del proceso PAW en INCO718	V-3
2.2. Caracterización mecánica	V-6
2.3. Caracterización de la microestructura	V-7
3. Análisis del proceso PAW para el INCO718	V-8
3.1. Análisis del proceso experimental	V-8
3.2. Resultados de los ensayos mecánicos	V-11
3.3. Análisis de la microestructura	V-14

3.4. Hot cracking y fases de Laves	V-19
4. Conclusiones INCO718	V-33
CAPÍTULO VI : VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UN DEMOSTRADOR AERONÁUTICO.....	VI-2
1. Introducción.....	VI-2
2. Selección de un demostrador para el sector aeronáutico	VI-2
3. Fabricación del demostrador en Ti6Al4V, INCO 718 y acero SS316	VI-4
4. Conclusiones	VI-11
CAPÍTULO VII : APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DEL TRABAJO.....	VII-2
1. Aportaciones.....	VII-2
2. Líneas futuras	VII-5
REFERENCIAS.....	2

Índice de figuras

Figura I-1. Número de vuelos diario y nuevos casos de COVID-19 semanales a nivel mundial [ICAO, 2021].....	I-4
Figura I-2. Previsión de recuperación de la demanda de aviación a marzo del 2021 presentando varios escenarios [BAIN & COMPANY, 2021]......	I-4
Figura I-3. Pronóstico del mercado de la fabricación aditiva metálica a corto plazo[IDTechEx, 2021]	I-5
Figura I-4. Previsión para la flota global de aviones por tipo de avión del 2020 al 2031	I-6
Figura II-1. Esquema de procesos de fabricación aditiva[Yilmaz, 2016]	II-3
Figura II-2. Clasificación de los sistemas de DED [Dass, 2019]......	II-4
Figura II-3. Proceso de deposición utilizando un método TIG [Yilmaz, 2016].	II-5
Figura II-4. Esquema de una antocha PAW	II-6
Figura II-5. Estudio económico basado en una pieza de 30kg [Stewart Williams, 2016].	II-8
Figura II-6. Esquema de un sistema WAAM.....	II-10
Figura II-7. Izq, Sistema push pull. Centro, sistema óptico escáner 3D. Dcha, posicionadores. Fuentes: SKS, Codesol	II-12
Figura II-8. Comparativa de propiedades mecánicas para el Ti6Al4V fabricado utilizando WAAM: (a)límite elástico y resistencia a rotura, (b) elongación[B. Wu, Pan, Ding, Cuiuri, Li, Xu, and Norrish, 2018]......	II-16
Figura II-9. Fases principales que ocurren en la microestructura del Inconel 625 depositado por WAAM.	II-18
Figura II-10. Diagrama esquemático del sistema de control en el proceso WAAM [Xiong, 2016].	II-23
Figura II-11. Sistema de monitorización basado en 3 cámaras.....	II-25
Figura II-12. Esquema de un proceso WAAM con cold rolling	II-28
Figura II-13. Máquina híbrida de WAAM + Mecanizado (MAZAK VARIAXIS j-600 AM).....	II-32
Figura II-14. Sistemas de cerramiento para materiales, como el Titanio, que necesitan trabajar en una atmósfera de Argón.....	II-33
Figura II-15. Sistema de alimentación de hilo, sistemas auxiliares de post-procesado (Rolling) y sistema de cerramiento desplazable de la cámara de Argón.....	II-33

Figura II-16. Máquina Merke IV para RPD	II-34
Figura II-17. Funcionamiento del RPD y propiedades de piezas fabricadas en Ti64	II-34
Figura II-18. Instalación en el TWI.....	II-35
Figura II-19. a)WAAM mediante robot de 6 ejes. b)Máquina Gantry para la Fabricación por WAAM de piezas aeronáuticas de gran tamaño. c)Cabezal de TOPTIG par ala empresa Air Liquide.	II-35
Figura II-20. Máquina RAMLAB combinando un robot de 6 ejes para la soldadura y dos brazos capaces de manipular la pieza siendo construida.....	II-36
Figura II-21. Ejemplos de aplicaciones de MX3D en el sector de la construcción.	II-36
Figura II-22. Célula de fabricación flexible de Fabricación Aditiva	II-37
Figura II-23. Sistema de AM robótico multi-material.....	II-37
Figura II-24. Máquina desarrollada por ADDILAN para fabricaión de preformas mediante tecnologías WAAM [ADDILAN, 2021].....	II-38
Figura II-25. Procesos de fabricación aditiva. Izq, SLM. Centro, LMD. Drcha, WAAM.	II-41
Figura III-1. Metodología experimental desarrollada	III-2
Figura III-2. Máquina gantry de diseño propio en la que se ha integrado el sistema WAAM	III-3
Figura III-3. Antorcha de plasma con direccionador de hilo.	III-4
Figura III-4. Cámara de atmósfera protectora para depositar materiales reactivos.	III-4
Figura III-5. Pirómetro instalado en máquina para el control de la temperatura y sus especificaciones.	III-5
Figura III-6. Cámara de soldadura instalada en robot e imagen que se obtiene de la misma.....	III-5
Figura III-7. Escaner laser instalado en máquina y perfil tipo que se obtiene de un cordón depositado	III-6
Figura III-8. Medidor de oxígeno seleccionado y especificaciones del mismo	III-6
Figura III-9. Imagen del cabezal con los sensores descritos instalados	III-8
Figura III-10. Esquema del protocolo de comunicación entre máquina y aplicación de Java.....	III-8
Figura III-11. Ventana de configuración inicial de la base de datos	III-9

Figura III-12. Señal de voltaje adquirido durante la fabricación de una pieza mediante control de voltaje.....	III-10
Figura III-13. Eje z de la máquina donde se pueden apreciar redondeos en los inicios y finales	III-11
Figura III-14. (a)Señales de intensidad de dos paredes. En azul sin la estrategia de rampa y en verde con estrategia de rampa.	III-12
Figura III-15. Imágenes del eje z de máquina en dos paredes fabricadas con y sin estrategia de rampa.....	III-12
Figura III-16. (a)Velocidad de avance; (b) intensidad y (c) voltaje.....	III-13
Figura III-17. Pieza generada utilizando control de energía	III-14
Figura III-18. Visualización de la monitorización del oxígeno durante un llenado en vacío de la cámara realizando un programa pieza.....	III-15
Figura III-19. Valores de oxígeno durante un programa pieza ajustando velocidades y posiciones de movimientos en vacío.	III-15
Figura III-20. Imagen de una pared doble fabricada en acero 316L en la máquina ATOM.....	III-16
Figura III-21. Reconstrucción 3D de la pared doble fabricada en la que se puede visualizar en color los valores de intensidad, voltaje y temperatura.	III-16
Figura III-22. Escaneado láser del primer cordón de la pared depositada para validar adquisición del escáner y su validez para medir anchura y altura. ...	III-17
Figura III-23. Demostrador en T en acero con estrategia rampa en inicio y finales.	III-17
Figura III-24. Señales de monitorización de intensidad, voltaje y temperatura durante la deposición del demostrador en T	III-18
Figura III-25. Demostrador en acero AIS 316L con estrategia de control de energía	III-18
Figura III-26. Pieza fabricada en acero para validar el control de altura.	III-19
Figura III-27. Demostrador de herraje aeronáutico en acero AISI316L	III-19
Figura IV-1. Enfoque Capítulo IV.....	IV-2
Figura IV-2. Esquema de la geometría del cordón en función de los parámetros del proceso; (b) cálculo del ángulo de mojado.	IV-4
Figura IV-3. Esquema de geometrías de cordones solapados.....	IV-5
Figura IV-4. Esquema para distintas geometrías de cordón para paredes de un único cordón.....	IV-5

Figura IV-5. Paredes fabricadas mediante PAW en Ti6Al4V para su análisis. .IV-6	IV-6
Figura IV-6. Nivel de oxígeno durante el llenado de la cámara inerte y el proceso de deposición	IV-6
Figura IV-7. Aspecto de los trozos pre-mecanizados	IV-7
Figura IV-8. a) Pared de Ti6Al4V antes del tratamiento térmico; y, b) estrategia de deposición.	IV-8
Figura IV-9. Distribución y geometría de las probetas de tracción y charpy obtenidas de las paredes de Ti6Al4V.	IV-9
Figura IV-10. Distribución de las probetas horizontales y verticales obtenidas para los ensayos de fatiga y dimensiones de las probetas.	IV-9
Figura IV-11. Temperatura del material durante la deposición y el enfriamiento del cordón 1 de la capa 40.	IV-12
Figura IV-12. Temperatura media durante la deposición de los dos cordones de una capa para todas las capas de la pared.	IV-12
Figura IV-13. Tiempos de enfriamiento para los dos cordones de una capa. ..	IV-13
Figura IV-14. Height growth for each seam in each layer.	IV-14
Figura IV-15. Análisis geométrico del corte transversal de la pared fabricada por PAW (a) macrografía de la pared en el plano YZ, (b) cálculo del EWW (anchura efectiva de la pared) en relación con la anchura total (TWW).	IV-15
Figura IV-16. Esquema de obtención de probetas de tracción en una de las paredes.	IV-16
Figura IV-17. Defectos observados en el pre-mecanizado de las probetas de tracción.	IV-16
Figura IV-18. Esquema de obtención de probetas de tracción de la segunda pared.	IV-18
Figura IV-19. Curvas tensión-deformación a diferentes altura de la pared en : (a) dirección horizontal (avance de la antorcha) y (b) dirección vertical (crecimiento de la pared).	IV-19
Figura IV-20. Ejemplo de probetas preparadas.	IV-20
Figura IV-21. Resumen de los resultados de fatiga obtenidos	IV-22
Figura IV-22. Resultados de dureza del WAAM Ti6Al4V recocido a diferentes alturas de la pared, en la ZAT y en el sustrato.	IV-23

- Figura IV-23. Macroestructura y microestructura en diferentes posiciones de la pared.....IV-24
- Figura IV-24. Historia térmica del Ti6Al4V depositado mediante PAW calculada con el módulo para soldadura de MSC-Marc para las capas 10, 30 y 50. ..IV-25
- Figura IV-25. Piezas de titanio tratadas térmicamente; (izda) al aire; (centro) en atmósfera de argón y (dcha.) en vacío.....IV-26
- Figura IV-26. Esquema del análisis de durezas y microestructura. Valores de dureza obtenidos en las 3 probetas tratadas y en ensayos anteriores tal cual fabricado.....IV-28
- Figura IV-27. Comparativa de los resultados de los ensayos de tracción: (a) resistencia a rotura; (b) límite elástico y (c) elongación antes de la rotura obtenidas en las tres secciones tratadas tanto en horizontal (HD) como en vertical (VD).....IV-29
- Figura IV-28. Microestructura de las secciones de la pared de Ti6Al4V tratadas térmicamente: en vacío (WAAM Ti6Al4V vaccum, izda.), en argón (WAAM Ti6Al4V, centro) y al aire (WAAM Ti6Al4V, derecha).IV-31
- Figura IV-29. Microestructura superficial de las secciones tratadas térmicamente: en vacío (WAAM Ti6Al4V vaccum, izda.), en argón (WAAM Ti6Al4V, centro) y al aire (WAAM Ti6Al4V, derecha).IV-31
- Figura IV-30. Set up para la experimentación de mecanizado: (a) centro de mecanizado y (b) preparación de la pared.IV-32
- Figura IV-31. Preparación de la pared fabricada mediante la tecnología Plasma Arc Welding (PAW): (a) pared en bruto tras la fabricación aditiva y (b) pared mecanizada.....IV-33
- Figura IV-32. Perfil de dureza de la pared.....IV-33
- Figura IV-33. Estrategias de trayectoria de herramienta para el fresado de las superficies (a) en concordancia, (b) en contraposición y (c) ranurado.IV-34
- Figura IV-34. (a) Montaje general del equipamiento utilizado para los ensayos de taladrado. (b) Vista frontal y lateral de la herramienta utilizada.....IV-36
- Figura IV-35. Señal del par durante el corte de la pared realizada mediante PAW ($a_p=5\text{mm}$, $a_e=0,4\text{mm}$, $V_c=60\text{m/mi}$, $f_z=0,084\text{mm/diente}$) con: (a) estrategia en concordancia y (b) estrategia en oposición.IV-37
- Figura IV-36. Comparativa del par medio para diferentes estrategias de corte y avance por diente.....IV-38

- Figura IV-37. Señal del par durante el fresado de la pared fabricada por PAW con $a_p=0.5\text{mm}$, $a_e=0.4\text{mm}$ y $f_z=0.12\text{mm/diente}$ a diferentes velocidades de corte: (a) $v_c=50\text{m/min}$ y (b) $v_c=60\text{m/min}$IV-39
- Figura IV-38. Comparativa del par en el mecanizado de la pared de PAW a diferentes posiciones de Z, desde 5mm hasta 25mm.IV-39
- Figura IV-39. Rugosidad media (R_a) para diferentes estrategias de corte y avance por diente.IV-40
- Figura IV-40. Rugosidad media (R_a) para diferentes posiciones de Z desde 5mm hasta 25mm.IV-41
- Figura IV-41. Mecanizado de ranura a través de la pared fabricada mediante PAW.IV-42
- Figura IV-42. Señales adquiridas durante el mecanizado de ranuras a través de la paredIV-42
- Figura IV-43. Gráfico polar del momento flector promedio en los experimentos de ranurado: (a) comportamiento normal del momento flector; (b) durante la rotura de los dientes.IV-43
- Figura IV-44. Efecto de la velocidad de corte y de la velocidad de avance en la morfología de la viruta en el taladrado de la probeta obtenida mediante WAAM.IV-44
- Figura IV-45. Efecto de la velocidad de corte y la velocidad de avance en el paso entre hélices (piezas obtenidas mediante WAAM).IV-44
- Figura IV-46. Análisis metalográfico de la sección transversal de la viruta de una pieza obtenida mediante WAAM.IV-45
- Figura IV-47. Efecto de los parámetros de corte en (a) ángulo de corte y (b) grado de segmento para una pieza producida por WAAM.IV-46
- Figura IV-48. Efecto de los parámetros de corte y proceso de obtención del material en el par de corte.IV-47
- Figura IV-49. Efecto de los parámetros de corte y proceso de obtención del material en la fuerza de empuje.IV-47
- Figura IV-50. Efecto de los parámetros de corte y proceso de obtención del material en el diámetro del agujero.IV-48
- Figura IV-51. Efecto de los parámetros de corte y proceso de obtención del material en la rugosidad de la superficie del agujero.IV-48
- Figura IV-52. Efecto de los parámetros de corte y proceso de obtención del material en la altura de la rebaba.IV-49

Figura V-1. Enfoque Capítulo V.....	V-2
Figura V-2. Representación gráfica de la concentración de oxígeno en la cámara y tiempo de vaciado.	V-4
Figura V-3. Esquema de la estrategia de deposición en IN718	V-4
Figura V-4. Representación gráfica de las condiciones empleadas en la deposición de piezas de doble cordón en Inconel 718.....	V-5
Figura V-5. Pared de INCO718 fabricada mediante PAW.....	V-5
Figura V-6. Tratamiento térmico que se aplica como relajación de tensiones al IN718.....	V-6
Figura V-7. Disposición de las probetas para la realización de los ensayos mecánicos de tracción.....	V-7
Figura V-8. Set up experimental y dispositivo de calentamiento	V-7
Figura V-9. Aparición de hot-cracking en la zona media de la pared triple de Inconel 718.....	V-8
Figura V-10. Temperatura durante el proceso de deposición de un cordón de Inconel 718 mediante PAW	V-9
Figura V-11. Temperatura media de cada cordón para capas (a) impares (b) pares	V-9
Figura V-12. Tiempo de enfriamiento entre cordones para las capas (a) impares y (b) pares	V-10
Figura V-13. Incremento de altura de cada cordón para las capas (a) impares y (b) pares.....	V-10
Figura V-14. Resultados de la prueba de microdureza de la muestra en diversas condiciones	V-12
Figura V-15. Curvas tensión-deformación a temperatura ambiente del IN718 a) tal cual se ha depositado y b) con tratamiento térmico.	V-13
Figura V-16. Curvas tensión deformación de 649°C de temperatura (a) del material tal cual se ha depositado y (b) con tratamiento térmico.....	V-14
Figura V-17. Microestructura del sustrato (placa base) en vista en sección transversal a) estructura de grano de transición entre la pared y la placa b) lupa Estructura de grano de la pared dendrítica c) fondo de la placa de sustrato	V-15
Figura V-18. Microestructura del sustrato (placa base) en vista en sección transversal a) estructura de grano de transición entre la pared y la placa b) lupa Estructura de grano de la pared dendrítica c) fondo de la placa de sustrato	V-16

Figura V-19. Microestructura inicial observada después del tratamiento térmico. a) región interna de la pared, b) Microestructura observada en diferentes direcciones. c, d) imagen ampliada de la grieta en diferente orientación	V-17
Figura V-20. Microestructura magnificada de la pared. a) Región interna observada en dirección XY, b) Región interna en dirección XZ, c) grieta observada en dirección XY.....	V-18
Figura V-21. Vista transversal de la pared depositada mediante PAW utilizando tres conjuntos de datos (A, B y C) y cos estrategias de enfriamiento entre capas (ICS y COS)	V-21
Figura V-22. Temperatura de la superficie durante la deposición de las 12 capas (a) A_ICS y (b) A_COS	V-22
Figura V-23. Temperatura superficial durante todo el proceso de deposición de las 12 capas mediante la estrategia (a)B_ICS, (b) B_COS, (c) C_ICS y (d) C_COS.....	V-23
Figura V-24. Media y desviación estándar de la corriente y el voltaje para las diferentes condiciones de deposición.....	V-24
Figura V-25. Crecimiento por capa para cada condición de deposición.....	V-25
Figura V-26. Imágenes de la microestructura obtenidas con el microscopio óptico del sustrato en la sección transversal y estructura de grano de transición en la pared de IN718 para los parámetros y estrategias ICS y COS.	V-25
Figura V-27. Micrografía de la estructura dendrítica para las muestras ICS y COS	V-26
Figura V-28. (a) Microestructura y (b) patrón XRD de la pared de IN718	V-27
Figura V-29. Gráficos SEM de las fases precipitadas observadas en la microestructura de las probetas ICS y COS.....	V-28
Figura V-30. Imágenes BSE que representan la matriz y la zona intermetálica blanca que se constituye cerca de la grieta en la microestructura	V-29
Figura V-31. Comparativa de la matriz y en las diferentes estrategias de deposición (Mapa EDS)	V-30
Figura V-32. Comparativa de las fases de Laves con las diferentes estrategias de deposición (Punto 1 EDS)	V-31
Figura VI-1. Enfoque capítulo VI	VI-2
Figura VI-2. Secuencia de fabricación del demostrador mediante PAW	VI-3
Figura VI-3. Rediseño del herraje aeronáutico para la fabricación aditiva WAAM.	VI-3

Figura VI-4. Herraje aeronáutico fabricado mediante PAW en diferentes materiales.....	VI-5
Figura VI-5. Proceso de aporte de la parte inferior (a) y superior (b) del demostrador. Capas pares números naranjas, impares números verdes.	VI-6
Figura VI-6. Gráfico de la energía aplicada en cada punto de la deposición del demostrador de Ti6Al4V.....	VI-7
Figura VI-7. Representación de la energía y la posición de la antorcha y la energía en función del tiempo durante dos capas consecutivas del demostrador en Ti6Al4V.....	VI-8
Figura VI-8. Nivel de oxígeno en el entorno de trabajo durante la deposición del demostrador de Ti6Al4V.....	VI-9
Figura VI-9. Fabricación matricial del demostrador en acero SS316 mediante PAW.....	VI-10
Figura VI-10. Resumen de los tiempos de fabricación mediante PAW	VI-11

Índice de tablas

Tabla II-1. Procesos de aporte por arco eléctrico.....	II-7
Tabla II-2. Resumen de las carencias de los componentes de fabricación aditiva por arco	II-13
Tabla II-3. Propiedades mecánicas del Ti6Al4V fabricados mediante diferentes tecnologías WAAM.....	II-15
Tabla II-4. Propiedades a tracción de la aleación de aluminio (2xxx) fabricada por WAAM	II-17
Tabla II-5. Propiedades mecánicas de las aleaciones base níquel obtenidas por distintas tecnologías WAAM.....	II-19
Tabla II-6. Propiedades mecánicas de otros materiales depositados por distintos procesos WAAM.....	II-20
Tabla II-7. Resumen de los principales defectos para varios materiales depositados por distintas técnicas WAAM.	II-21
Tabla II-8. Métodos de monitorización de diferentes defectos	II-22
Tabla II-9. Análisis de patentes	II-39
Tabla II-10. Comparativa de los procesos de fabricación aditiva [Thijs, 2010; Yadroitsev, 2011]	II-42
Tabla IV-1. Composición química del Ti6Al4V en porcentaje en peso	IV-3
Tabla IV-2. Parámetros de proceso para la deposición PAW de Ti6Al4V.	IV-7
Tabla IV-3. Resultados mecánicos obtenidos de los ensayos de tracción. Se indican las probetas con defecto superficial inicial y el valor medio excluye esos resultados.....	IV-17
Tabla IV-4. Resultados de tracción obtenidos en una de las paredes fabricadas.	IV-18
Tabla IV-5. Experimentación de ciclos de fatiga a rotura de probetas verticales obtenidas en pared con 2 cordones solapados y a diferentes cargas de tensión de rotura.....	IV-20
Tabla IV-6. Experimentación de ciclos de fatiga a rotura de probetas horizontales obtenidas en pared con 2 cordones solapados y a diferentes cargas de tensión de rotura.....	IV-21
Tabla IV-7. Contenido de nitrógeno, oxígeno e hidrógeno en el hilo de partida y en la pared fabricada mediante WAAM y recocida.....	IV-22

Tabla IV-8. Resultados del análisis químico de cada una de las secciones.	IV-27
Tabla IV-9. Resumen de los resultados de los ensayos mecánicos.....	IV-30
Tabla IV-10. Condiciones de corte en los ensayos de estrategias de fresado y velocidad de avance.....	IV-34
Tabla IV-11. Condiciones de corte en el análisis de la influencia de la profundidad (posición Z de la herramienta).....	IV-34
Tabla IV-12. Condiciones de corte en los ensayos de velocidad de corte. ..	IV-35
Tabla IV-13. Condiciones de corte para los ensayos de taladrado.	IV-36
Tabla V-1. Composición química del hilo de IN718 (wt%).....	V-3
Tabla V-2. Parámetros de proceso durante la deposición de IN7188	V-6
Tabla V-3. Tiempos de fabricación de una de las paredes de INCO.....	V-11
Tabla V-4. Comparativa de las propiedades de tracción en INCO depositado mediante PAW.	V-12
Tabla V-5. Parámetros de proceso para la fabricación del IN718 mediante PAW	V-20
Tabla VI-1. Resumen de los parámetros principales para la deposición de los 3 materiales.....	VI-5
Tabla VI-2. Tiempos de fabricación de cada uno de los demostradores en los diferentes materiales	VI-6
Tabla VI-3. Tiempos de fabricación de los 3 demostradores utilizando una estrategia matricial	VI-10
Tabla VI-4. Tiempos de fabricación de los distintos demostradores de forma unitaria y su estimación de forma matricial.....	VI-11

Acrónimos

WAAM	Fabricación aditiva mediante arco e hilo (Wire arc additive manufacturing)
CAD	Diseño asistido por ordenador (<i>Computer Aided-Design</i>)
CAM	Fabricación asistada por ordenador (Computer Aided-Manufacturing)
ASTM	Asociación Americana de Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
DED	Deposición directa de energía (Direct energy deposition)
FA	Fabricación Aditiva
SMD	Deposición de metal conformado (Shaped metal deposition)
EBM	Fusión por haz de electrones (Electron Beam Melting)
TIG	Tungsten inert gas
GMAW	Soldadura mediante arco metálico con gas (Gas Metal arc welding)
GTAW	Soldadura mediante arco de tungsteno con gas (Gas Tungsten arc welding)
PAW	Plasma arc welding
CW	Hilo frío (Cold Wire)
CMT	Transferencia de metal en frío (Cold Metal Transfer)
DC	Corriente continua (Direct Current)
AC	Corriente alterna (Alternating current)
HW	Hilo caliente (Hot Wire)
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
FCAW	Soldadura por arco con núcleo fundente (Flux Core Arc Welding)
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
YS	Límite elástico (Yield Strength)
UTS	Tensión a rotura (Ultimate tensile strength)
PPAM	Fabricación aditiva mediante plasma pulsado (Pulsed plasma additive manufacturing)

PPAW	Soldadura mediante arco de plasma pulsado (Pulsed plasma arc welding)
PAM	Fabricación aditiva plasma (Plasma additive manufacturing)
NDT	Ensayos no destructivos (Non-destructive testing)
CT	Tomografía computerizada (Computed Tomography)
SLM	Fusión selectiva láser (Selective Laser Melting)
LMD	Deposición láser de metal (Laser Metal Deposition)
HIP	Prensado isostático en caliente (Hot isostatic pressing)
UIT	Tratamiento de impacto ultrasónico (Ultrasonic impact treatment)
LAM	Fabricación aditiva Láser (Laser Additive Manufacturing)
RPD	Deposición plasma rápida (Rapid Plasma Deposition)
PBF	Fusión en cama de polvo (Powder Bed Fusion)
WFS	Velocidad de avance de hilo (Wire Feed Speed)
EWV	Anchura efectiva de la pared (Effective wall width)
TWW	Anchura total de la pared (Total wall width)
ZAT	Zona afectada térmicamente
WFS	Velocidad de hilo (Wire feed speed)

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1. Contexto tecnológico e industrial

El sector industrial se encuentra en un proceso continuo de evolución en materia de eficiencia, calidad y precisión acompañado a su vez de la adaptación del proceso de producción a un producto cada vez más personalizado y adaptado al cliente. De esta forma, se está observando una tendencia (ya implantada en la industria actual en algunos casos) en la que se busca un producto de mayor valor añadido, adaptado a las necesidades de un cliente concreto, pero con los requisitos de calidad, costes y eficiencia de un proceso seriado.

Así, una de las tecnologías que más interés está captando para poder alcanzar estos retos es la fabricación aditiva, ya que aporta una capacidad de flexibilidad muy superior a la alcanzada con métodos de fabricación tradicionales, alcanzando niveles de integridad estructural y resolución geométrica similares a otros procesos. La fabricación aditiva (FA) está incluida en la lista de las diez tecnologías más disruptivas y con mayor capacidad de transformación del tejido productivo del siglo XXI, según la investigación en negocios y economía realizada por McKinsey Global Institute; también ha sido calificada por The Economist, como la tecnología de fabricación que va a cambiar el mundo. El impacto de esta tecnología ya se ha hecho patente en sectores como el diseño creativo o la fabricación de modelos, pero en el sector industrial es todavía una tecnología que se puede considerar emergente y pendiente de explotar en toda su magnitud.

El sector aeronáutico es uno de los que tradicionalmente ha mostrado más interés en adoptar la fabricación aditiva, ya que esta tecnología podría hacer frente a varios de los retos del sector. Los materiales empleados en el sector aeronáutico, como el Ti6Al4V y super aleaciones resistentes al calor como el Inconel 718, son materiales caros y difíciles de mecanizar por medios convencionales y se genera un gran desperdicio de material con ratios 'buy to fly' (relación entre el material comprado y final) que pueden superar tasas de 20:1. En este sentido mediante la FA se reduce considerablemente este ratio, ya que se fabrican de forma directa preformas muy cercanas a la forma final depositando únicamente el material necesario. Permite también la fabricación bajo demanda e in situ y con gran flexibilidad de diseño. De esta forma permitiría al sector aeronáutico una considerable reducción de costes asociados a componentes de alto valor añadido, y de aquí, el gran interés del sector por esta tecnología.

Tradicionalmente, el polvo ha sido la materia prima más utilizada para la fabricación aditiva de metales, sin embargo, en los últimos años los procesos aditivos que utilizan el material en forma de hilo y un arco eléctrico para fundirlo (WAAM) están ganando terreno en el mercado ya que solucionan varias de las barreras de la utilización del polvo, como son la tasa de deposición, su coste y factores como la seguridad y la reutilización del material. Así, la materia prima en forma de hilo es una opción atractiva que se expande desde la industria de la soldadura. En general, las ventajas clave de este tipo de tecnologías WAAM (MIG-MAG, TIG y Plasma) son la posibilidad de fabricar piezas de gran tamaño, con una alta tasa de deposición asegurando la seguridad del operario. El principal problema es que se requiere un mecanizado final de las piezas obtenidas debido a la falta de precisión de estos procesos de deposición. A pesar de esto, las ventajas sobrepasan este inconveniente que puede tener el WAAM, algo que queda patente en el creciente interés en el sector industrial por este tipo de tecnologías [IDTechEx, 2021].

El WAAM presenta actualmente interés en diversos sectores entre los que destaca el aeroespacial, siendo de especial interés las aplicaciones con materiales de alto valor añadido en las que el 'buy-to fly' es muy elevado. En esos casos es posible conseguir reducciones en el consumo de material del 70-90%, lo que justifica su uso como tecnología alternativa a procesos de fabricación convencionales como el fresado o torneado. Además, las tecnologías WAAM permiten obtener altas tasas de deposición debido a la posibilidad de aplicación de altos valores de energía durante el proceso pudiendo así depositar grandes cantidades de material en tiempos reducidos, llegando a ratios de deposición de 5-6 kg/h [Taberner, 2018]. Y, por tanto, estas tecnologías son adecuadas para la fabricación de piezas de gran tamaño realizadas en materiales costosos con geometrías de complejidad media que requieren el mecanizado de grandes volúmenes en su fabricación por medios convencionales, como son las requeridas para el sector aeronáutico.

En cuanto al sector aeronáutico, para el que las tecnologías WAAM podrían suponer un gran ahorro en costes y tiempo cabe destacar que el tráfico aéreo comercial mundial se desplomó en el primer trimestre del 2020 debido a la pandemia por COVID-19 afectando a todas estas previsiones de crecimiento. Como se puede observar en la Figura I-1, en la actualidad, el número de vuelos diarios es de poco más de 8000, este valor se ha recuperado un poco tras el desplome que sufrió hace un año cuando comenzó la situación de pandemia, así en Marzo de 2020 los vuelos pasaron de un número medio diario de 30000 vuelos a poco más de 2000 según la Organización internacional de la aviación civil [ICAO, 2021].

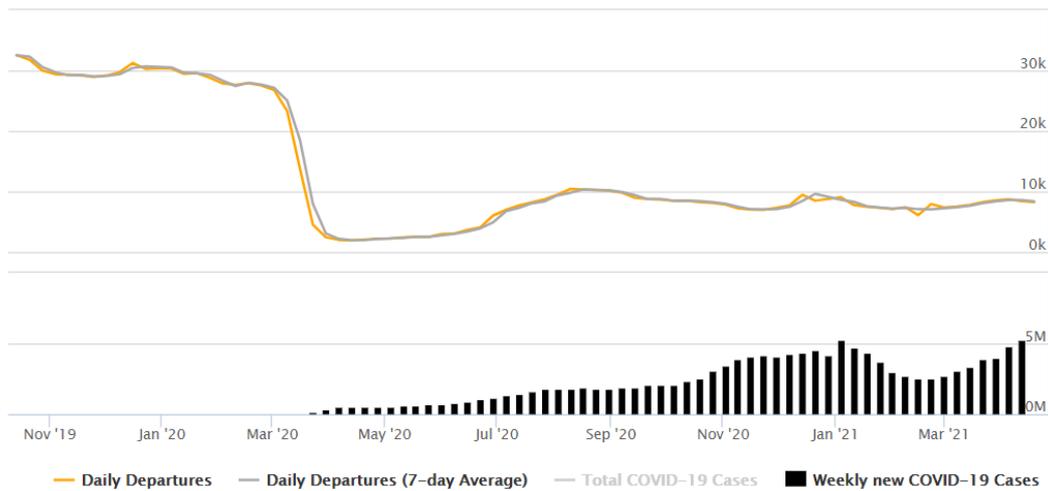


Figura I-1. Número de vuelos diario y nuevos casos de COVID-19 semanales a nivel mundial [ICAO, 2021]

Se han comenzado a realizar pronósticos de cuánto tardará en recuperarse la demanda de aviación. La consultora BAIN & COMPANY [BAIN & COMPANY, 2021] plantea varios escenarios de recuperación en función del ritmo de vacunación y las restricciones establecidas por los diferentes países. Así, según BAIN (Figura I-2), en el mejor de los casos con un ritmo de vacunación acelerada no se llegará a las estimaciones realizadas previas a la crisis, pero nos encontraremos en valores de demanda de aviación ligeramente por encima a los de antes de la crisis para el tercer trimestre de 2023. En el resto de los escenarios, se producirá una recuperación, pero los valores de demanda aún llegando casi a los valores previos a la crisis, no los superarán como estaba esperado.

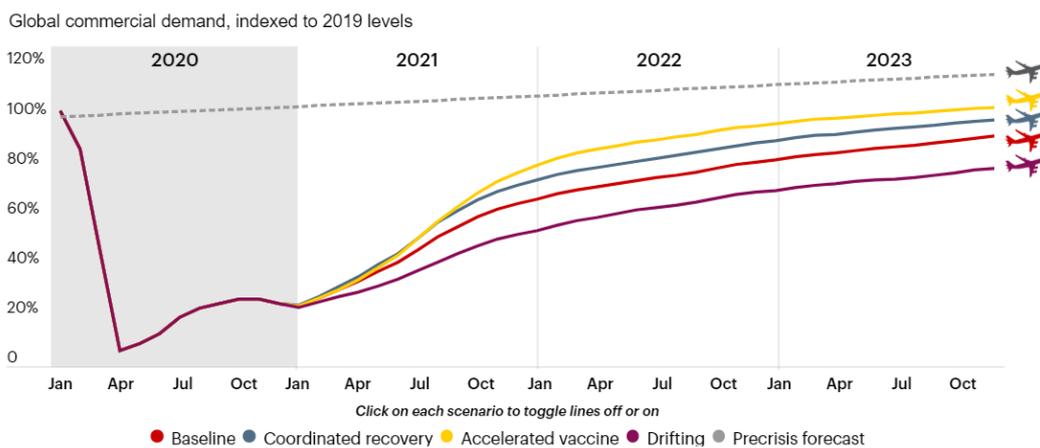


Figura I-2. Previsión de recuperación de la demanda de aviación a marzo del 2021 presentando varios escenarios [BAIN & COMPANY, 2021].

Centrando el análisis en el mercado de la fabricación aditiva, aunque hay previsiones optimistas de recuperación en el año 2021 en el mercado de la

fabricación aditiva metálica, la mayoría prevén varios años de crecimiento hasta alcanzar una recuperación total. A largo plazo se prevé un aumento del mercado a partir del 2025 y un incremento notable para el 2030 según el informe de IDTechEx [IDTechEx, 2021].

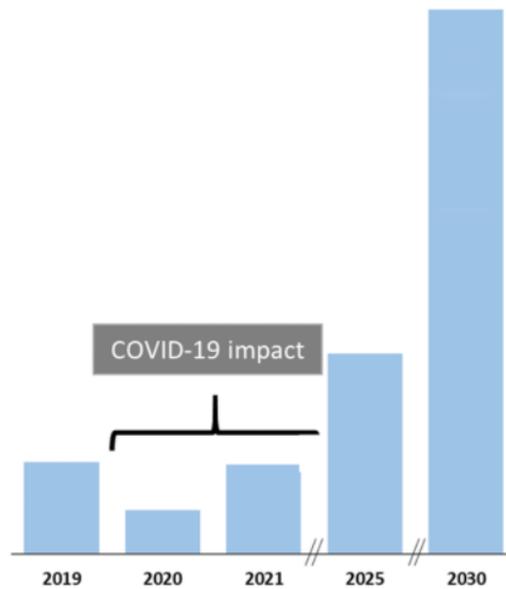


Figura I-3. Pronóstico del mercado de la fabricación aditiva metálica a corto plazo [IDTechEx, 2021]

Por tanto, es de esperar un periodo de varios años de contracción del mercado hasta volver a cifras previas al Covid-19, tras lo cual se mantienen las previsiones de crecimiento con el retraso lógico de los años de pandemia.

En su punto más bajo, la flota mundial de aviones tenía sólo alrededor de 13000 aviones en servicio, menos de la mitad del número de aviones que volaban en enero del 2020 antes de que se declarara la pandemia. A día de hoy, la flota del 2021 cuenta con más de 23700 aviones. Para el 2031, según los pronósticos realizados por Olyver Wyman [Olyver Wyman, 2021], se prevé que la flota conste de más de 36500 aviones, estando todavía esta cifra bastante lejana a las poyecciones anteriores al COVID-19, que situaban la flota global del 2021 en 28800 aviones y la flota del 2030 en 39000 aeronaves según el “GMF 2019 Airbus” [Airbus, 2017].

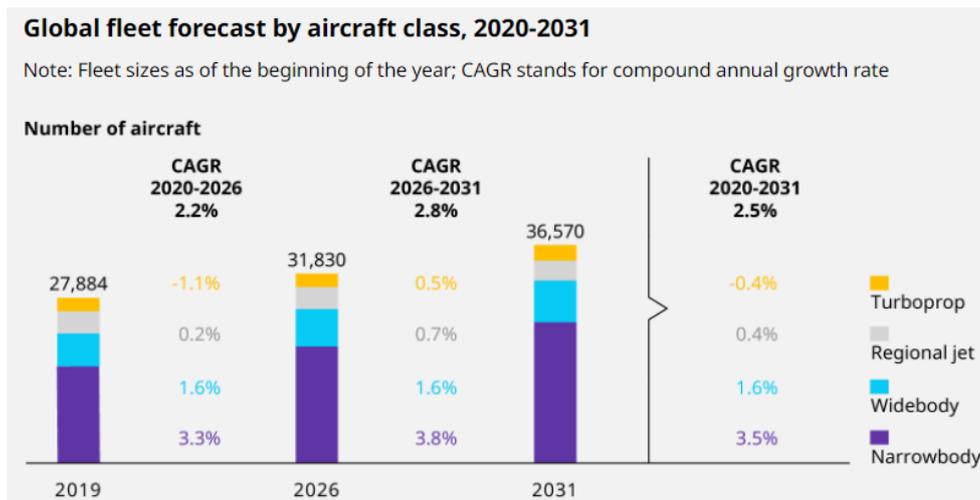


Figura I-4. Previsión para la flota global de aviones por tipo de avión del 2020 al 2031

Se prevé que la recuperación durante los primeros años sea lenta y que a partir de la segunda mitad del 2022 finalmente se recupere el nivel anterior al COVID-19. Aún así, no se espera que las proyecciones anteriores al COVID-19 se recuperen en los 10 años que abarca el pronóstico realizado por Olyver Wyman.

En este contexto industrial, independientemente de las consecuencias de la pandemia, el mercado real que la fabricación aditiva de componentes para el sector aeronáutico puede abordar dependerá de su grado de madurez. Así, un aspecto fundamental es profundizar en las tecnologías de fabricación aditiva para su consolidación, ya que actualmente existe una falta de madurez y estandarización de la tecnología [Lloyd's Register, 2021; Strataysys, 2020], de forma que se logre también un mayor conocimiento de las propiedades de las piezas obtenidas mediante la FA con el objetivo de poder dar respuesta al sector una vez comience su recuperación.

2. Planteamiento del Trabajo de Tesis Doctoral. Objetivos

A pesar del gran interés mostrado por la industria en la fabricación aditiva metálica con una alta tasa de aporte, existen pocos equipos especialmente diseñados para este fin mediante tecnologías que aporten una alta tasa de deposición para fabricar piezas de complejidad media de gran tamaño como son las tecnologías WAAM. Concretamente, dentro de las tecnologías basadas en arco e hilo, la tecnología PAW (plasma arc welding) es la más adecuada para su aplicación en materiales super aleados como el Ti6Al4V y el Inconel, ya que se trata de una tecnología que aporta una alta densidad de energía necesaria para aportar este tipo de materiales consiguiendo unas propiedades de éstos adecuadas. Es por tanto necesario desarrollar equipos adaptados para esta

tecnología con equipos de control especialmente diseñados para el proceso. Debido a la poca madurez de la tecnología para su uso en la fabricación aditiva, es necesaria la realización de experimentos para entender y optimizar el proceso conociendo las propiedades tanto mecánicas como metalúrgicas de los materiales depositados mediante esta técnica.

El objetivo general del presente trabajo de investigación ha sido desarrollar un sistema de soldadura al arco plasmático e hilo basado en PAW que integre un sistema de monitorización y control específico para este proceso y optimizar el proceso para dos materiales comúnmente utilizados en el sector aeronáutico: el Ti6AL4V y el Inconel 718.

Para alcanzar este objetivo general, los objetivos concretos que ha perseguido este trabajo son:

1. Diseñar, desarrollar e integrar un sistema de monitorización específico para el proceso de fabricación aditiva mediante PAW en una máquina industrial, basado en señales internas de la propia máquina y en las señales de sensores externos adecuados para esta tecnología, que permitan monitorizar la altura de capa y la geometría del material aportado.
2. Implementar en máquina reglas de control, que, basadas en el sistema de monitorización desarrollado en este trabajo, permitan adecuar los parámetros de proceso in-line para obtener un crecimiento estable del material aportado, y, por lo tanto, permitan tener un proceso robusto.
3. Optimizar los parámetros de proceso y las estrategias de aporte de la tecnología PAW en base a criterios de productividad y calidad de la pieza para los materiales Ti6Al4V e Inconel 718.
4. Obtener las propiedades mecánicas y metalográficas de los materiales Ti6Al4V e Inconel 718 procesados mediante la tecnología PAW, y establecer los post-procesos necesarios (tratamientos térmicos y mecanizado) para alcanzar los requisitos establecidos en el sector aeronáutico.
5. Validar el sistema de monitorización y control desarrollado, así como la optimización del proceso PAW, mediante la fabricación de una pieza demostradora para el sector aeronáutico en 3 materiales: el Ti6Al4V, el Inconel 718 y el acero AISI316L.

3. Organización del Trabajo de Tesis Doctoral

Con el fin de abordar de una manera estructurada los objetivos tecnológicos que se han presentado en el apartado anterior, el presente trabajo de Tesis Doctoral se ha estructurado de la siguiente manera:

1. En el primer capítulo se ha presentado el contexto tecnológico e industrial asociado a la fabricación aditiva en general y más enfocado hacia el sector aeronáutico.
2. En el segundo capítulo, en primer lugar, se realiza una introducción a la fabricación aditiva para luego centrar la atención en las tecnologías de fabricación aditiva basadas en arco e hilo, similares a la abordada en este trabajo, haciendo una revisión de los equipos necesarios para estas tecnologías, los sistemas de monitorización y control que se han encontrado en bibliografía, los postprocesados necesarios en las piezas realizadas mediante WAAM y las soluciones industriales y patentes en el mercado. Por último, se ha llevado a cabo una revisión de las características y propiedades de las aleaciones aeronáuticas más comunes y su aplicación en la fabricación aditiva.
3. En el tercer capítulo se detalla el trabajo realizado para la puesta a punto de una máquina para la fabricación aditiva mediante PAW. En primer lugar, se ha realizado la integración del hardware necesario y posteriormente se han llevado a cabo las tareas de comunicación y control para poder llevar a cabo el proceso desde el control de la máquina, pudiendo actuar sobre las variables del proceso e introducir reglas de control que permitan llevar a cabo el proceso con mejoras que solucionen problemas propios del mismo. Se ha desarrollado también una herramienta de monitorización que recoge todos los datos del equipo de soldadura, de la máquina y de los sensores externos de manera sincronizada.
4. En el cuarto capítulo se estudia el proceso de aporte mediante PAW del Ti6Al4V. Se realiza un estudio de las propiedades de este material tras su deposición mediante PAW teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas de tracción e impacto Charpy y sus propiedades a fatiga. Se realiza también un estudio de la microestructura del material.
5. En el quinto capítulo, se presenta un estudio similar al del capítulo anterior, pero en Inconel 718, en este caso centrado en las propiedades a tracción del material tanto a temperatura ambiente como a alta temperatura y en un estudio de las grietas y las fases de Laves tan características de la metalografía de este material.

6. En el quinto y último capítulo se presentan las principales aportaciones que realiza este trabajo de investigación sobre el estado del arte, así como las líneas de investigación que se abren con el mismo de cara al futuro.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

1. Introducción

En este capítulo se presenta el estado del arte relacionado con la fabricación aditiva en general y más en concreto de la fabricación aditiva mediante arco e hilo (WAAM) centrada en materiales superaleados como son el Titanio o el Inconel. En primer lugar, se realiza una introducción a la fabricación aditiva para luego centrar la atención en las tecnologías de fabricación aditiva basadas en arco e hilo, haciendo una revisión de los equipos necesarios para estas tecnologías, los sistemas de monitorización y control que se han encontrado en bibliografía, los postprocesados necesarios en las piezas realizadas mediante WAAM y las soluciones industriales y patentes en el mercado. Por último, se ha llevado a cabo una revisión de las aleaciones aeronáuticas más comunes y su uso como material de partida en la fabricación aditiva.

2. Principales procesos de fabricación aditiva de piezas metálicas

La fabricación aditiva, previamente conocida como prototipado rápido o fabricación por capas [Najatul, 2017; Zhou, 1999], permite la fabricación de estructuras mediante un proceso de generación por capas y está revolucionando la industria de la fabricación debido a la posibilidad de obtener piezas cuasi finales (Near net shape) en un corto periodo de tiempo y prácticamente sin pérdida de material [Oliveira, 2020] a partir de un archivo CAD [Meghvanshi, 2012]. Tradicionalmente se ha utilizado la fabricación sustractiva debido a la imposibilidad de emplear otro tipo de técnicas, en este caso, se parte del material en bruto con una geometría mayor que la de la geometría final y se retira el material no deseado hasta que se obtiene la pieza final. Por otro lado, la fabricación aditiva aporta el beneficio de disminuir el coste de fabricación debido a que se aporta únicamente el material necesario para generar una preforma con geometría cercana a la de la pieza final, de esta forma se pueden fabricar piezas de geometría más compleja que mediante los métodos tradicionales [Nazan, 2016].

Una característica fundamental de los procesos de fabricación aditiva, basada en la fusión y solidificación, es el uso de conocimientos fundamentales generados durante décadas de investigación en metalurgia, de las tecnologías de soldadura basadas en un arco eléctrico y en haces de alta intensidad de

energía (láser y haz de electrones). Esta experiencia en soldadura sirve como apoyo para comprender mejor el proceso de fabricación aditiva y sus implicaciones sobre las características microestructurales de las piezas producidas mediante este nuevo proceso. Sin embargo, se trata de procesos muy distintos siendo la fabricación aditiva además, un proceso nuevo sobre el que hay poco conocimiento concreto, por lo que requiere más investigación.

En términos generales, dentro de la fabricación aditiva para materiales metálicos, dependiendo de la clase y forma del material se pueden clasificar los procesos en diferentes grupos en función de la fuente de energía que utilizan. De esta forma, en 2010, la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM, American Association for Testing and Materials) definió una serie de normas que dividen la fabricación aditiva en 7 grupos [ASTM International, 2012] como puede verse en la Figura II-1.

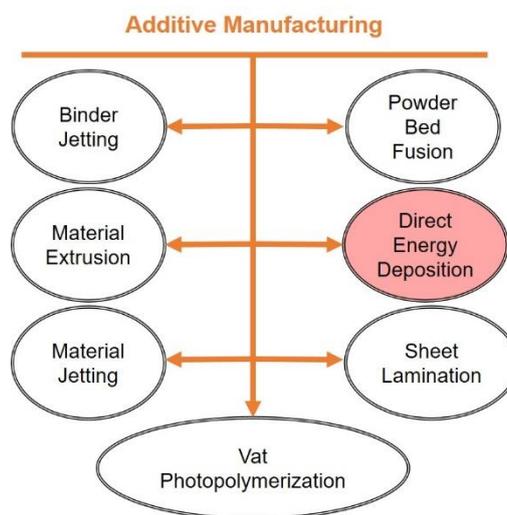


Figura II-1. Esquema de procesos de fabricación aditiva[Yilmaz, 2016]

El presente trabajo de tesis doctoral se centrará en tecnologías de deposición directa de material, a las que se les está prestando especial atención en los últimos años debido a su habilidad para depositar una gran variedad de materiales. Los sistemas DED (deposición directa de energía) se basan en una fuente de energía concentrada, en un sustrato y en un flujo de material que intersectan en un punto focal común, generalmente en presencia de un gas protector inerte. La energía focalizada funde el material del sustrato formándose así el baño fundido. Así, el material aportado se inyecta en este baño fundido, generando así la pieza. El proceso de aporte directo de energía se puede considerar como un proceso emergente, el cual está en fase de desarrollo e industrialización desde hace poco más de 15 años. La principal ventaja de este

tipo de procesos es su aproximación directa a la fabricación de componentes, ya que se reduce en gran medida la cantidad de material que se debe mecanizar debido a que se obtiene una preforma muy cercana a la geometría final de la pieza. Además, se parte directamente de la geometría 3D de la pieza, realizándose el aporte partiendo directamente desde material metálico en polvo o en forma de hilo, el cual es fundido y depositado sobre un material base, generando la geometría por capas. Ya en algunos casos recientes, se ha demostrado que se podrían lograr unos ahorros superiores al 70% en el material, el coste y el consumo de energía, y que los plazos de entrega podrían ser reducidos de manera muy significativa en comparación con la fabricación convencional.

Existen distintas tecnologías DED en función de la forma del material de partida y de la fuente de energía utilizada, como puede verse en la Figura II-2. Se marcan en rojo las tecnologías objeto de este estudio.

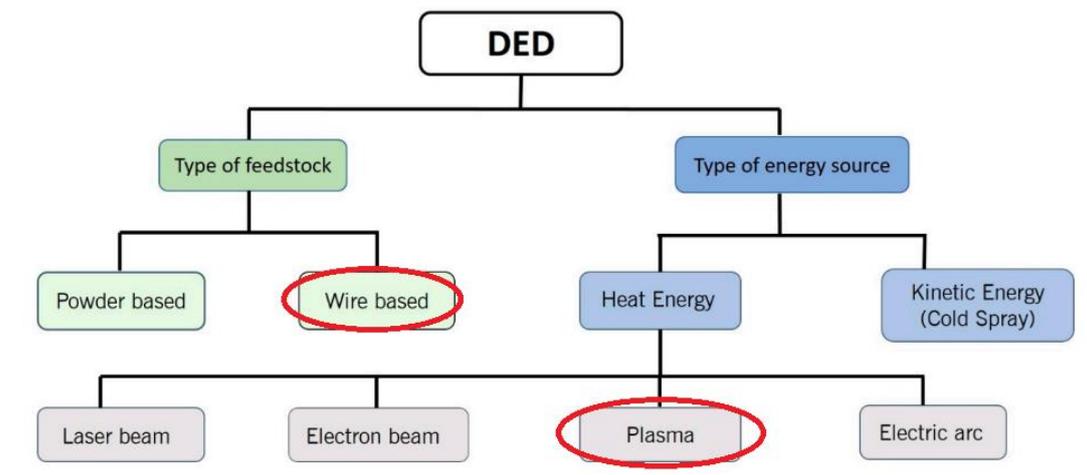


Figura II-2. Clasificación de los sistemas de DED [Dass, 2019].

En función del tipo de material utilizado existen los sistemas basados en material en forma de polvo o de hilo. En función del tipo de energía, nos encontramos sistemas basados en la fusión del material por medio de la aplicación de energía térmica y otros basados en la energía cinética, los cuales se emplean fundamentalmente en recubrimientos y son de naturaleza muy diferentes a los métodos térmicos. Dentro del grupo de los basados en energía térmica existen varias opciones: los que emplean un haz laser, un haz de electrones, un arco plasmático o un arco eléctrico.

En este trabajo de tesis doctoral el estudio llevado a cabo se centrará en tecnologías mediante aporte de hilo mediante arco plasmático (PAW), por tanto, el análisis del estado del arte se centrará fundamentalmente en sistemas de fabricación aditiva por arco e hilo, concretando para el caso del arco plasmático,

que son sistemas relativamente nuevos y usados generalmente para fabricar piezas de aleaciones de Titanio [Höfer, 2017].

3. PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE WAAM

El origen de la tecnología WAAM data del año 1925, cuando Baker [Baker, 1925] propuso usar un arco eléctrico como fuente de calor para fundir material en forma de hilo para fabricar artículos decorativos. Desde entonces la tecnología ha evolucionado, sobre todo en los últimos quince años, hasta ser lo que hoy conocemos como WAAM [Derekar, 2018]. Durante estos años se han llevado a cabo numerosos estudios para poder llegar al estado actual de la tecnología, así se ha investigado la posibilidad del WAAM como tecnología para el recubrimiento con el fin de poder alargar la vida útil de componentes sometidos a desgaste abrasivo [Shockey, 1930], se ha utilizado la tecnología de arco+hilo como método para reparar superficies desgastadas de grandes rodillos de presión metálicos y se ha utilizado esta tecnología para fabricar componentes refrigerantes de un reactor de hasta 10.5m de longitud y 5.8m de diámetro demostrando las capacidades y aplicaciones exitosas del WAAM [Schmidt, 1990].

El proceso WAAM consiste fundamentalmente en una fuente de potencia, un sistema automático de alimentación de hilo, un sistema robótico controlado mediante ordenador o máquina controlada por CNC y algunos accesorios, como el sistema del gas de protección [Pan, 2018].

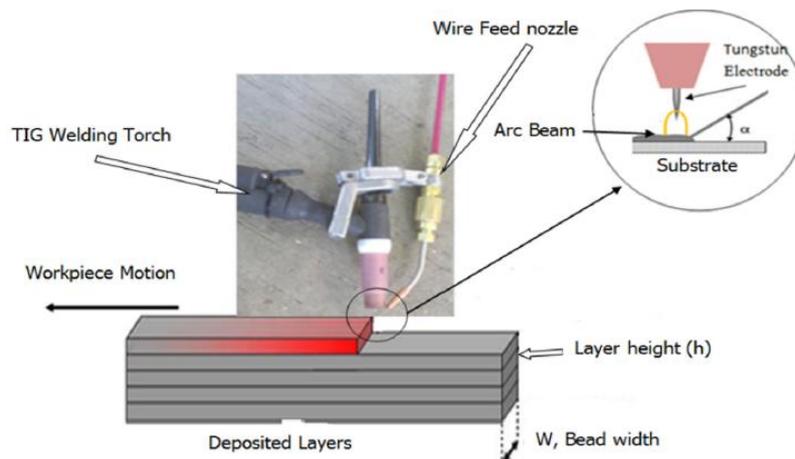


Figura II-3. Proceso de deposición utilizando un método TIG [Yilmaz, 2016].

Básicamente, en este proceso la fuente de potencia funde el hilo mediante un arco eléctrico y lo va depositando encima del sustrato. Durante el proceso, para evitar contaminación a causa de los gases de la atmosfera y no aparezcan ni óxidos ni nitratos ni poros, se protege la zona fundida con gas de protección con

un caudal adecuado, ya que si el caudal de gas es demasiado alto también puede aparecer porosidad y poca penetración a causa de las turbulencias creadas. También, la composición de este gas es importante ya que influye en la transferencia de calor [Cunningham, 2018].

Existen diversas técnicas de aporte de material por arco eléctrico, que se diferencian por el tipo de fuente de calor utilizado para fundir el material aportado: basado en Gas Metal Arc Welding (GMAW), basado en Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) y el basado en Plasma Arc Welding (PAW) [Rios, 2018; Szost, 2016]. El proceso GMAW tiene un electrodo consumible que es el propio hilo de aporte, en cambio, los GTAW y el PAW emplean un electrodo no consumible de tungsteno y un sistema de alimentación de hilo y uno de posicionamiento.

El proceso PAW en concreto es una forma extendida de la soldadura TIG, ya que el arco se forma entre un electrodo de tungsteno y el sustrato. En el caso del plasma se coloca el electrodo en el interior de la antorcha y así se puede separar el arco del gas protector, como se ve en la Figura II-4. Se fuerza el gas a través de una boquilla de calibre fino, generando así el arco plasmático.

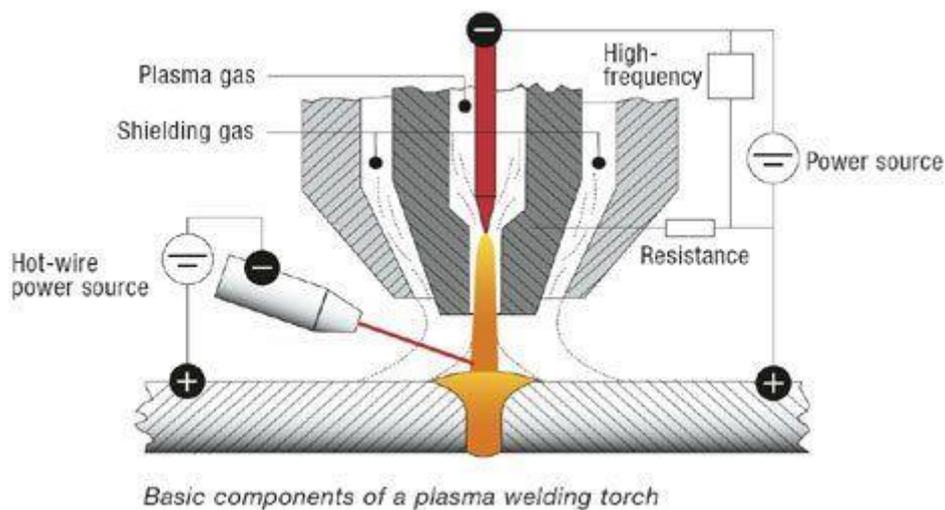


Figura II-4. Esquema de una antorcha PAW [Boulos, 2017]

El ratio de deposición del proceso WAAM basado en GMAW es 2-3 veces más alto que los basados en GTAW y PAW. Sin embargo, el proceso GMAW es menos estable y crea más humo de soldadura y más salpicaduras ya que la corriente eléctrica actúa directamente en la materia prima [Wu, 2018a]. Además, dentro de cada una de las fuentes de potencia también hay diferentes modos de trabajo y las características de cada una se resumen en la Tabla II-1:

Tabla II-1. Procesos de aporte por arco eléctrico.

WAAM	Proceso	Características	Tasa de deposición
Basado en GMAW	GMAW-CW (Gas Metal Arc Welding – Cold Wire) [Pan, 2018]	-Electrodo de hilo consumible -Estabilidad de arco baja, salpicaduras -Varios modos de transferencia del material: spray, globular, corto circuito...	3-4 kg/h
	Tandem GMAW [Chen, 2015; Chen, 2017; Fang, 2012; Lee, 2013; Martina, 2018; Yao, 2016]	-Dos electrodos de hilo consumibles que alimentan el mismo baño fundido - Reducción de defectos, aumento de la productividad y aumento de la calidad de cordón comparado con el GMAW tradicional	8-10 kg/h
	CMT (Cold Metal Transfer) [Pan, 2018]	- Electrodo de hilo consumible -Proceso de bajo aporte de calor y calidad media (cero salpicaduras)	2-3 kg/h
	GMAW-HW (Hot Wire) [Günther, 2018a, 2018b]	-Se añade un hilo caliente adicional al electrodo GMAW -Aumento de la productividad	10-12 kg/h
Basado en GTAW	GTAW-DC y pulsado (alta y baja frecuencia)- CW (Cold Wire)	-Electrodo no consumible -Alimentación de hilo independiente -Necesaria rotación entre hilo y antorcha -Proceso de alta calidad	1-3 kg/h
	GTAW-HW (Hot Wire) [Dinesh, 2018; Santangelo, 2016]	-Aumenta el ratio de deposición y por ello la productividad comparado con CW.	2-4 kg/h
	Doble wire-GTAW [Shen, 2015a]	-Dos hilos de alimentación -Aumenta el ratio de deposición -Muy útil para piezas multimaterial	Mayor que GTAW convencional
	TOP TIG	-Variante del GTAW que permite el desplazamiento de la antorcha sin tener que orientar el hilo	1-3 kg/h
	Force Tig	-Mayor energía y velocidades -Antorcha de alta potencia	-

Basado en PAW	PAW Plasma- DC y pulsado-CW (Cold Wire) (alta y baja frecuencia)[Tabernero, Paskual, Álvarez, and Suárez, 2018]	-Electrodo no consumible -Proceso de alta estabilidad -Alimentación independiente de hilo	2-5 kg/h
	PAW-HW (Hot Wire)	-Aumento del ratio de deposición	Mayor que PAW convencional

La elección del tipo de proceso de aporte depende del material y geometría a fabricar, siendo el plasma la opción más adecuada para fabricar piezas de aleaciones de titanio debido al reducido riesgo de contaminación. Por otro lado, para que esta tecnología sea rentable es necesario obtener los ratios de deposición más altos posibles. En este aspecto en Tecnia Research & Innovation se intenta maximizar este parámetro mediante la alimentación de un nuevo hilo caliente tanto en las tecnología PAW como en la tecnología MAG además de con otras variantes del proceso TIG [Tabernero, 2018].

El gran avance de la FA vendrá por la sustitución o la combinación con los métodos de fabricación establecidos y que ya se utilizan ampliamente en la industria manufacturera, como el mecanizado, la forja, la fundición y la soldadura. En este caso, el impacto de la FA de metal será mucho mayor ya que hay margen para una amplia adopción en segmentos de mercado más amplios.

Este avance sólo será posible si los sistemas comerciales de FA tienen un costo mucho menor de fabricación de los componentes, tasas de deposición más altas y volúmenes de fabricación más grandes. El coste de fabricación depende principalmente de dos factores, la productividad o la tasa de aporte y el ratio “buy to fly” que indica la cantidad de material a eliminar después del proceso aditivo. Un estudio realizado por la universidad de Cranfield (Figura II-5) muestra la relación entre estos dos factores. Al incrementar la tasa de deposición se reduce el ratio “buy to fly” [Williams, 2016].

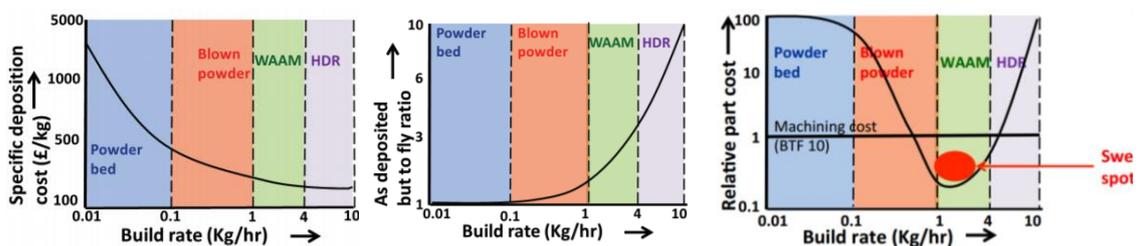


Figura II-5. Estudio económico basado en una pieza de 30kg [Stewart Williams, 2016].

El método más viable para alcanzar el equilibrio es la tecnología WAAM, o Shaped Metal deposition (SMD) [Szost, Terzi, Martina, Boisselier, Prytuliak, Pirling, Hofmann, and Jarvis, 2016], porque ha demostrado tasas de aporte de hasta dos órdenes de magnitud mayores que los sistemas láser en polvo (típicamente hasta 1 kg/h) y porque los costes de los equipos son mucho menores. En contraposición, es típico obtener tensiones residuales elevadas y distorsiones en las piezas fabricadas por WAAM. Sin embargo, el aporte mediante arco tiene ventajas reseñables, las cuales son:

- Integridad muy alta del material depositado, sin defectos y con buenas propiedades de los materiales.
- Relativamente bajo coste de materia prima y alta calidad de ésta, con propiedades certificadas y con una amplia disponibilidad de materiales. En concreto, el precio por kilogramo de material en forma de hilo en materiales de ingeniería como el titanio, acero y aleaciones de níquel es más bajo que en forma de polvo [Cunningham, Flynn, Shokrani, Dhokia, and Newman, 2018]
- Bajo coste de mantenimiento, debido a que el equipamiento no incluye componentes sensibles como las ópticas de los láseres.
- No genera un gran impacto en el medioambiente debido a una mínima generación de residuos y el empleo de hilo en lugar de polvo [Wu, 2018b].
- Con altos ratios de deposición el tiempo de producción es corto [Pan, Ding, Wu, Cuiuri, Li, and Norrish, 2018]. Comparado con técnicas sustractivas tradicionales estos sistemas pueden reducir el tiempo de producción en un 40-60% y el tiempo de postprocesado en un 15-20% dependiendo del tamaño de la pieza [Wu, 2018b]. Esto la hace una alternativa muy atractiva para el sector aerospacial o de defensa [Almeida, 2010; Skiba, 2009].
- Utilización efectiva del material por encima del 90% y por encima del 75% si se incluye el mecanizado de acabado. Por ejemplo, recientemente se han fabricado los ensamblajes de un tren de aterrizaje de una aeronave mediante WAAM reduciendo la cantidad de materia prima utilizada en un 78% comparado con técnicas sustractivas tradicionales [Williams, 2015].
- No requiere una cámara o un entorno de vacío como en el caso del EBM, con excepción de la deposición de materiales sensibles al oxígeno [Gong, 2014; Terrazas, 2014].

- Es adecuada para la automatización completa [Bonaccorso, 2009a, 2011; Hartmann, 1994; HERALIC, 2012a; Muscato, 2008; Zhang, 2002]

Por todo ello, en los últimos años, la tecnología WAAM ha ido generando cada vez más interés en el sector de la fabricación industrial gracias a la posibilidad de fabricar piezas metálicas de gran tamaño y complejidad geométrica media con un coste reducido [Cunningham, Flynn, Shokrani, Dhokia, and Newman, 2018].

3.1. Equipos empleados en el proceso WAAM

Actualmente, los equipos y componentes empleados para la FA por arco (WAAM) son básicamente los mismos que los equipos utilizados para los sistemas automatizados de soldadura al arco.

El equipamiento necesario para un sistema de fabricación aditiva consiste básicamente en un equipo de soldadura al arco con suministro de hilo y gas, una antorcha de soldadura y un sistema robótico o máquina para moverla. Se pueden añadir equipos adicionales, como equipos para poder monitorizar el proceso o sistemas adicionales de hot wire, para introducir un hilo caliente en el proceso y aumentar la eficiencia de este.

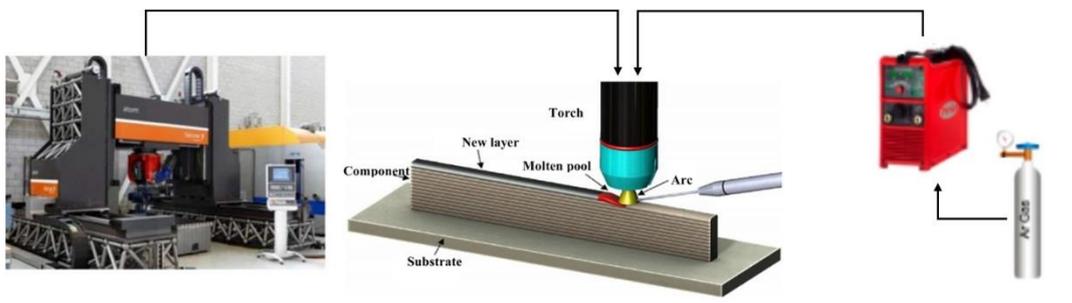


Figura II-6. Esquema de un sistema WAAM

Existen principalmente tres tipos de empresas suministradoras de equipos de soldadura.

Grandes suministradores de equipos de soldadura: Son multinacionales que suministran todo tipo de equipamiento relacionado con todo tipo de procesos de soldadura al arco (TIG, MIG, MAG, CMT, PAW, FCAW, SMAW, SAW, etc). Además de equipamientos, suministran también gases, material de aporte, fungibles, etc. Algunas de estas empresas desarrollan equipamiento propio y otros suministran equipos desarrollados por terceros. Suministran sistemas de alimentación de hilo, antorchas de diferentes tipos, interfaces de comunicación con robot o máquina, software de control de equipos, fuentes de energía e incluso sistemas de supervisión de los procesos. Este grupo de grandes

suministradores está formado por empresas como, Fronius, Lincoln Electric, Esab, Miller, Nippon Gases, Kemppi, Air Liquide, EWM, SBI etc.

Suministradores de componentes específicos: Son empresas que suministran componentes y equipos específicos para necesidades concretas relacionadas con soldadura al arco. La oferta de productos es amplia y se pueden destacar los siguientes equipos y periféricos.

- Antorchas: Existen diferentes tipos según el tipo de proceso, rango de parámetros y accesibilidad requerida por la aplicación.
- Movimientos y manipulación: Existen diversos productos para el desplazamiento de antorchas de soldadura y movimientos de piezas. Los principales fabricantes de robots tienen una gama de robots diseñados específicamente para soldadura (Kuka, Fanuc, etc). Además, existen vibradores, posicionadores, osciladores, etc.
- Amarres y utillajes: Son mesas de trabajo y sistemas de amarre de piezas.
- Sistemas anticolidión: Dispositivos que se integran entre la máquina o robot y la antorcha. Si existe una colisión, el sistema percibe el desplazamiento que sufre la antorcha respecto al robot y activa una señal de alarma.
- Sistemas de limpieza: En algunos procesos se producen proyecciones, este sistema limpia el interior de la tobera de gas (antorcha). Reduce el número de intervenciones manuales, alarga la vida de los consumibles y acorta los tiempos muertos del robot. Sin embargo, en fabricación aditiva se optimizan los procesos para que las proyecciones sean mínimas por lo que este tipo de sistemas son menos críticos que en procesos de soldadura.
- Intercambiador de herramientas: Es un sistema totalmente automático para el cambio de herramienta. Este sistema es óptimo cuando es necesario utilizar distintos métodos de soldadura (MIG/MAG, TIG, Plasma) durante el proceso de trabajo.
- Alimentadores de hilo: Existen alimentadores de diferente tipo, los alimentadores de hilo frío arrastran hilo metálico y los alimentadores de hilo caliente además de arrastrar hilo están equipados para que circule corriente eléctrica por el hilo. Además, existen sistemas “push-pull” que integran el sistema de arrastre de hilo en la antorcha de soldadura.

- Gas: Existen diversos equipos relacionados con los gases de soldadura. Sistemas de protección de gas localizados o “traillings” para materiales altamente reactivos, cámaras de gas que permiten introducir la pieza y el robot dentro de una atmósfera protegida, regulador electrónico para optimizar el consumo de gas y medidores de cantidad de oxígeno.
- Sensores: En procesos de soldadura se emplea una amplia gama de sensores. Sensores de contacto para seguimiento de junta, sensores IR y termopares para medida de temperatura, sensores ópticos para seguimiento de junta y supervisión de proceso.
- Sistemas de monitorización: Existen sistemas de supervisión del proceso de soldadura al arco basado en la monitorización de señales eléctricas del arco y monitorización del proceso mediante sensores externos como medidas de temperatura o medida de velocidad de hilo. Estos sistemas tienen un software que analiza las señales y determina si el proceso se está ejecutando de forma adecuada.
- Sistemas de protección. Pantallas para el operador, cortinas de protección, extractor de humos, etc.



Figura II-7. Izq, Sistema push pull. Centro, sistema óptico escáner 3D. Dcha, posicionadores.
Fuentes: SKS, Codesol

Algunas de las empresas que suministran este tipo de equipamiento son, Binzel, HKS, Fanuc, Kuka, Codesol, Servo-Robot, Optris, Metronic, etc

Integradores: Son empresas que ofrecen servicio de selección e integración de equipamiento a empresas fabricantes de piezas. Habitualmente, diseñan y montan células automáticas de soldadura adaptadas al tipo de piezas o productos a fabricar. Aunque algunos fabricantes de robots o los grandes suministradores ofrecen soluciones llave en mano, existen empresas dedicadas a dar este tipo servicios como Motifil, Martec, etc.

Todos los equipos, periféricos y sensores mencionados en este apartado pueden ser utilizados para la fabricación aditiva por arco. Sin embargo, todos los componentes están diseñados para procesos de soldadura y no para fabricación aditiva. Por ello, existen carencias relacionadas con las necesidades que impone la fabricación aditiva. En la Tabla II-2 se recoge un resumen de los componentes y las carencias relacionadas con la fabricación aditiva.

Tabla II-2. Resumen de las carencias de los componentes de fabricación aditiva por arco

Componentes	Carencias para procesos de FA
Fuente de energía	La mayoría de las máquinas actuales no están diseñadas para trabajar de forma continua, por ello, es necesario sobredimensionar el equipo. (Equipos de gran potencia)
Alimentadores de hilo	La mayoría de los sistemas están diseñados para integrarse en robot, los cuales tienen muchos grados de libertad. Sin embargo, para la integración en máquinas existe la necesidad de tener un alimentador con eje motorizado para posicionamiento de hilo. Principalmente para procesos TIG y PAW que deban integrarse en máquina de tres ejes.
Gas	Los sistemas de protección local ("trailling") actuales no funcionan correctamente para fabricación aditiva. Las cámaras de gas flexibles comerciales son muy costosas y no son adecuadas para integrarlas en máquinas.
Sensores	Los sistemas ópticos como escáneres de geometría están diseñados para interpretar geometrías típicas de soldadura. El hardware necesario para escanear piezas durante la fabricación aditiva es el mismo que en los procesos de soldadura. Sin embargo, es necesario desarrollar software que permita interpretar las geometrías que se producen en fabricación aditiva.
Software	Los softwares comerciales que comparan las señales del proceso son específicos para procesos de soldadura. Es necesario desarrollar sistemas de monitorización para fabricación aditiva.
Monitorización	La fabricación aditiva requiere un número de cordones muy superior al número de cordones habituales en procesos de soldadura. Por ello, cualquier desviación mínima puede resultar fatal por un efecto acumulativo. Debido a este fenómeno, es necesario desarrollar sistemas de control adaptativo que compensen pequeñas desviaciones que puedan ocurrir durante la fabricación aditiva.
Utillajes	Existen utillajes, mesas y sistemas de amarre para soldadura. Sin embargo, en fabricación aditiva si el espesor del sustrato no es excesivamente alto (10mm-20mm) es necesario diseñar utillajes con alta rigidez que permitan soportar las tensiones residuales. Además, algunas piezas pueden requerir utillajes que permitan aportar material por ambas caras.

3.2. Materiales habitualmente aportados mediante WAAM

Los sistemas WAAM utilizan comúnmente materiales disponibles en forma de hilo que se producen normalmente para la industria de la soldadura disponibles en bobinas de gran variedad de materiales y aleaciones. En este apartado se revisan los materiales que se utilizan comúnmente en la fabricación aditiva WAAM con particular énfasis en la microestructura y las propiedades mecánicas.

3.2.1. Aleaciones de Titanio

Las aleaciones de titanio se han venido estudiando para su aplicación en la fabricación aditiva en componentes aeronáuticos debido a su alto ratio resistencia-peso y a los gastos inherentes al material. Existe una demanda creciente de procesos alternativos a los convencionales con mayor eficiencia y costes mas bajos, ya que los procesos actuales tienen unos ratios 'buy-to-fly' muy bajos para la mayoría de los componentes. Dado que las aleaciones de Ti son de un coste elevado, la reducción de este ratio implica ahorros de coste significativos y por tanto, existen muchas oportunidades de negocio para el WAAM, particularmente para piezas de titanio de gran tamaño con estructuras complejas [Williams, 2015].

La microestructura del producto depende de la historia térmica durante el proceso de fabricación. El ciclo térmico del WAAM, que supone calentamientos y enfriamientos repetidos [Baufeld, 2009; Thijs, 2010], produce microestructuras metaestables y composiciones no homogéneas en la pieza fabricada [Herzog, 2016]. Baufeld et al. [Baufeld, 2009] investigaron la microestructura de la aleación Ti6Al4V depositada mediante un sistema WAAM basado en GTAW, encontrando dos regiones distintivas en la pared obtenida. En la región inferior, en la que aparecen bandas alternas perpendiculares a la dirección de fabricación, esta presente una estructura de Widmanstätten con una fase α laminar, mientras que, en la parte superior, en la que no aparecen bandas, la estructura principal son precipitados en forma de aguja. Microestructuras similares han sido reportadas en estudios referentes al PAW. Lin et al. [Lin, 2017, 2016] reportaron una microestructura con tamaños de grano finos y gruesos debido a las diferencias en la aplicación de energías, y por tanto, de calor, en las distintas capa, además, identificaron una estructura martensítica α' , estructura Widmanstätten y una estructura trenzada desde la parte inferior hasta la superior de la pared fabricada. En los componentes de titanio fabricados mediante fabricación aditiva es muy común observar un crecimiento epitaxial de granos β direccionados [Hirata, 2003].

La Tabla II-3 resume los datos de la microestructura y propiedades mecánicas (límite elástico, resistencia a rotura y elongación) de piezas WAAM fabricadas por diferentes tecnologías [Baufeld, 2011; Baufeld, 2009; Brandl, 2010; Brandl, 2012a, 2012; Lin, 2017; Szost, 2016; Wang, 2011; Zhang, 2016].

Tabla II-3. Propiedades mecánicas del Ti6Al4V fabricados mediante diferentes tecnologías WAAM.

Proceso	Condición	Microestructura	YS [MPa]	UTS [MPa]	EL [%]	Referencia
Fundido	/	/	758 (min)	860 (min)	>8	[ASTM F1108 - 14, 2014]
Laminado	/	/	860 (min)	930 (min)	>10	[ASTM F1472, 2020]
GTAW	AB	Granos β columnares + Widmanstätten α/β	/	929 \pm 41 ^a	9 \pm 1.2 ^a	[Baufeld, 2010]
			/	965 \pm 39 ^b	9 \pm 1 ^b	
	AB	Fase α laminar Estructura trenzada	/	939 \pm 24 ^a	16 \pm 3 ^a	[Baufeld, 2011]
			/	1033 \pm 32 ^b	7.8 \pm 23.3 ^b	
	HT(600°C/ 4h/FC)	Estructura laminar	/	972 \pm 41 ^a	12.5 \pm 2.5 ^a	
			/	977 \pm 14 ^b	6 \pm 3 ^b	
	HT(834°C/ 2h/FC)	Estructura laminar	/	931 \pm 19 ^a	21 \pm 2 ^a	
			/	971 \pm 28 ^b	14 \pm 2 ^b	
	AB	Widmanstätten α + α laminar gruesa en bandas	803 \pm 15 ^a	918 \pm 17 ^a	14.8 ^a	[Wang, 2012a]
			950 \pm 21 ^b	1033 \pm 19 ^b	11.7 ^b	
AB	/	861 \pm 14 ^a	937 \pm 21 ^a	16.5 \pm 2.7 ^a	[Brandl, 2010]	
		892 \pm 31 ^b	963 \pm 22 ^b	7.8 \pm 2 ^b		
HT(600°C/ 2h/FC)	/	891 \pm 16 ^a	976 \pm 35 ^a	11.6 \pm 2.4 ^a		
		915 \pm 14 ^b	987 \pm 8 ^b	6.6 \pm 2.6 ^b		
AN(834°C/ 2h/FC)	/	856 \pm 21 ^a	931 \pm 17 ^a	20.4 \pm 1.8 ^a		
		893 \pm 24 ^b	962 \pm 29 ^b	13.5 \pm 2 ^b		
Plasma	AB 600°C/840°C	Widmanstätten α/β + granos columnares β	/	/	/	[Martina, 2012]
Pulsed PAM	AB	B columnar + α' martensita	909 \pm 13.6 ^b	988 \pm 19.2 ^b	7 \pm 0.5 ^b	[Lin, 2016]
PAM	AB	B columnar + α' martensite + estructura trenzada fina	877 \pm 18.5 ^b	968 \pm 12.6 ^b	11.5 \pm 0.5 ^b	[Lin, 2017]

AF: as built; HT: heat treated; AN: Annealed

^a In build direction

^b Orthogonal to build direction

Como se muestra en la Figura II-8, las propiedades a tracción del material tal cual está fabricado o 'as built' son cercanas a las del material laminado y supera las del material fabricado por fundición tal y como especifica la norma ASTM. Además, las probetas WAAM muestran propiedades anisótropas con menor resistencia y mayores alargamientos en la dirección de fabricación (Z, vertical) comparadas con la dirección de deposición (X, horizontal), lo que se atribuye

básicamente al tamaño de grano α laminar y a la orientación de los granos β elongados.

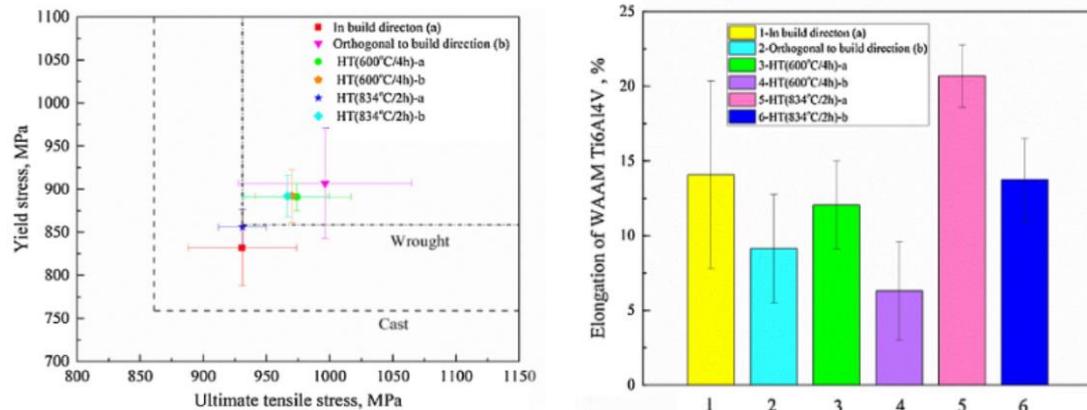


Figura II-8. Comparativa de propiedades mecánicas para el Ti6Al4V fabricado utilizando WAAM: (a) límite elástico y resistencia a rotura, (b) elongación [Wu, 2018]

3.2.2. Aleaciones de aluminio y acero

Aunque se han llevado a cabo multitud de investigaciones en diferentes aleaciones de aluminio, entre ellas en Al-Cu(2xxx) [Gu, 2016a], Al-Si(4xxx) [Wang, 2017], y Al-Mg(5xxx) [Geng, 2017], su valor comercial es justificado para estructuras grandes, complicadas y de pared fina, ya que el coste de fabricación de piezas pequeñas y simples de aluminio es bajo [Brice, 2015]. El uso del WAAM para fabricar acero no es muy popular debido a la misma razón, aunque es el material más utilizado en ingeniería [Agrawal, 2007]. Otra de las razones del poco uso del aluminio en tecnologías WAAM es que algunas aleaciones de aluminio, como el Al7xxx y 6xxx, son difíciles de depositar debido a las turbulencias en el baño fundido y los defectos que ocurren durante el proceso de deposición.

En general, las aleaciones de aluminio depositadas mediante WAAM tienen propiedades mecánicas inferiores a las fabricadas partiendo de material laminado. Para poder obtener mejores límites elásticos, la mayor de las piezas obtenidas de aluminio tiene que someterse a tratamientos térmicos para refinar la microestructura. La Tabla II-4 presenta el límite elástico (YS), resistencia a rotura (UTS) y elongación de piezas de aluminio fabricadas por WAAM. Debido a la distribución uniforme de partículas grandes con forma de diamante en la microestructura, y por eso, las muestras tienen un menor YS y UTS que las del material laminado especificado por las ASTM. Sin embargo, después del tratamiento térmico, se obtienen mejoras significativas sobre los valores definidos por la norma ASTM tanto en la resistencia como en el alargamiento como consecuencia del refinamiento de los granos.

Tabla II-4. Propiedades a tracción de la aleación de aluminio (2xxx) fabricada por WAAM

Material	Process	Condition	Microstructure	YS [MPa]	UTS [MPa]	EL [%]	Reported by
Al6.3Cu	Laminado (2219)	T851	/	267	390	>4	[ASTM B.221, 2005]
	CMT	AB	Dendritas finas + granos equiaxiales	128±2 ^a	262±4 ^a	15.8±0.3 ^a	[Gu, 2016b]
				133±5 ^b	264±2 ^b	18.6±1.5 ^b	
	HT(T6)	Precipitados homogéneamente dispersos	θ	305±6 ^a	458±3 ^a	13.6±0.9 ^a	
				333±6 ^b	466±3 ^b	14 ^b	

AB: as built; HT: heat treated; AN: Annealed

^a In build direction

^b Orthogonal to build direction

3.2.3. Aleaciones base níquel

Los materiales base níquel son los segundos más populares en la investigación sobre la fabricación aditiva, después de las aleaciones de titanio, debido básicamente a su alta resistencia a altas temperaturas y por su el coste elevado de su fabricación mediante métodos tradicionales. Este tipo de materiales se aplican en el sector aeroespacial, aeronáutico, petroquímico, químico y marino debido a su destacable resistencia a temperaturas por encima de 550°C y su resistencia a la oxidación. En la actualidad, varias aleaciones base níquel como son el Inconel 718 y el Inconel 625 han sido estudiadas para su fabricación mediante fabricación aditiva.

La microestructura de las piezas fabricadas por WAAM de Inconel 718 consisten generalmente en grandes granos columnares con límites dendríticos delimitados por pequeños precipitados de fase de Laves y carburos MC [Baufeld, 2012]. Xu et al. [Xu, 2013] reportaron que las estructuras con dendritas columnares con una gran cantidad de fase de Laves, carburos MC y Ni₃Nb están también presentes en las piezas fabricadas mediante WAAM de Inconel 625, como se muestra en la Figura II-9. La microestructura se puede refinar obteniendo menores espaciados entre dendritas, menor segregación de niobio y fases de Laves discontinuas en las regiones interdendríticas utilizando tratamientos térmicos, que son beneficiosos para las propiedades mecánicas.

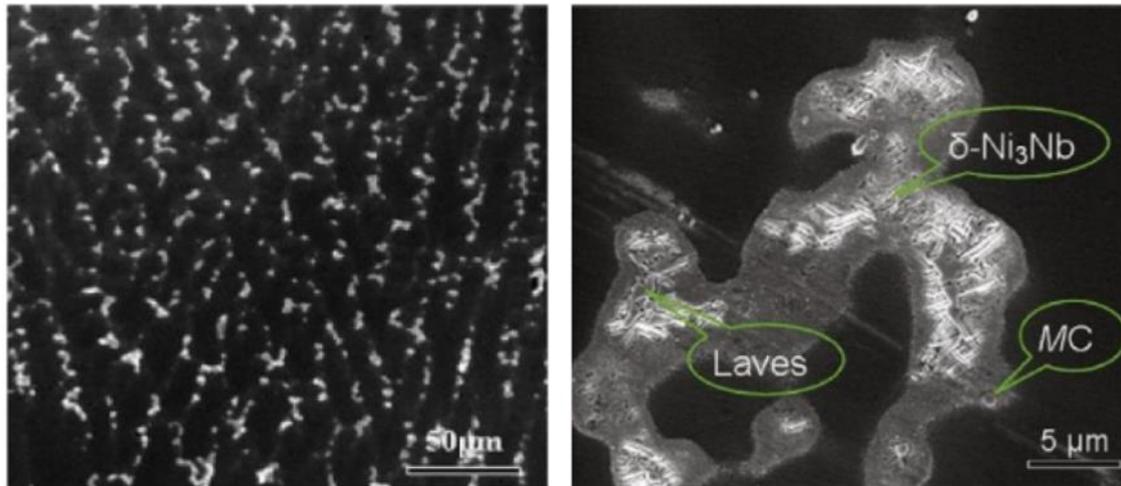


Figura II-9. Fases principales que ocurren en la microestructura del Inconel 625 depositado por WAAM [Xu, 2013].

En la Tabla II-5 se recogen las propiedades mecánicas de distintas aleaciones base níquel fabricadas mediante WAAM. Para el Inconel 718 fabricado por GMAW, el límite elástico y la resistencia a rotura son 473 ± 6 MPa y 828 ± 8 MPa respectivamente. Estos valores se encuentran en los mínimos valores especificados por la norma ASTM para el material laminado y obtenido por fundición, sin embargo, la elongación es mucho menor que la establecida por la norma. Para el Inconel 625 obtenido por WAAM se cumple con los valores de resistencia a rotura y límite elástico definidos en la norma tanto para el material forjado como laminado.

Tabla II-5. Propiedades mecánicas de las aleaciones base níquel obtenidas por distintas tecnologías WAAM.

Material	Proceso	Condiciones	Microestructura	YS [MPa]	UTS [MPa]	EL [%]	Ref.
IN718	GMAW	AB	Precipitados de Nb + estructura dendrítica	473±6	828±8	28±2	[Baufeld, 2012]
IN625	Fundido	/	/	350	710	48	[Bauccio, 1993]
	Laminado	/	/	490	855	50	[Bauccio, 1993]
	PPAM	AB	Fase de Laves + estructura dendrítica columnar	438±38 ^a	721±32 ^a	48.6 ^a	[Xu, 2013]
				423±22 ^b	718±19 ^b	49.2 ^b	
	PPAW	AB	Fase de Laves + Carburos MC + δ-Ni ₃ Nb	449	726	43	[Xu, 2013]
	PPAW	AB	Fase de Laves + carburos NbC	480	771	50	[Xu, 2013]
	GTAW	HT (980°C/STA)	Partículas de Laves mas gruesas + precipitados de Nb	469	802	42	[Wang, 2016]
	CMT	AB	Precipitados de Nb, Mo + estructura dendrítica	/	684±23 ^a	40.13±3.7 ^a	[Ding, 2016]
					722±17 ^b	42.27±2.4 ^b	

AF: as built; HT: heat treated; AN: Annealed

^a In build direction

^b Orthogonal to build direction

3.2.4. Otros materiales

Se encuentran en bibliografía estudios en otros materiales para su fabricación mediante fabricación aditiva, como la aleación de magnesio AZ31 para aplicaciones en automoción [Guo, 2016], compuestos intermetálicos Fe/Al [Shen, 2016, 2015b] y compuestos Al/Ti [Ma, 2014, 2015] así como bimetálicos [Abe, 2016] y bronce/acero [L. Liu, 2013] para el sector aeronáutico y espacial. Las propiedades mecánicas de estos materiales se detallan en la Tabla II-6. La mayor parte de estas investigaciones se han centrado en el estudio de las propiedades mecánicas y microestructurales de paredes rectas, en lugar de desarrollar un proceso para fabricar piezas funcionales. La fabricación de materiales intermetálicos con prediseños precisos es todavía un gran reto para la fabricación aditiva WAAM.

Tabla II-6. Propiedades mecánicas de otros materiales depositados por distintos procesos WAAM.

Material	Proceso	Condiciones	Microestructura	YS [MPa]	UTS [MPa]	EL [%]	Ref.
Ti/Al	GTAW	AB	Estructuras interdendríticas γ + colonias completamente laminares	424±30 ^a	488±50 ^a	0.35 ^a	[Ma, 2016]
				474±14 ^b	549±23 ^b	0.5 ^b	
		HT(1200°C/24h)	Estructura completa	γ 425±15 ^a	412±11 ^a	1.1 ^a	
				471±14 ^b	472±11 ^b	1.1 ^b	
		HT(1060°C/24h)	Estructura laminar completa	487±14	569±12	0.30	
				486±12	590±4	0.41	
Cu/Al	GTAW	AB	Maclaje de cobre	63±2.1 ^a	231±2.5 ^a	63±4 ^a	[Dong, 2017]
Fe/Al	GTAW	AB	Granos columnares Fe ₃ Al	847±2 ^b	944±19 ^b	3.2±0.1 ^b	[Shen,2015a]
Fe/Ni	GMAW	AB	Austenita, ferrita δ en la parte baja y dendrítica en la parte alta	/	565±15 ^a	/	[Abe, 2016]
Fe/Cu	GMAW	AB	Mezcla de α -Fe y ϵ -cobre	/	305 ^a	48.5	[Liu, 2013]

AF: as built; HT: heat treated; AN: Annealed

^a In build direction

^b Orthogonal to build direction

3.3. Defectología común de componentes WAAM

Existen algunos defectos que se producen durante el propio proceso WAAM que hay que tener en cuenta para la fabricación de piezas críticas y que será necesario investigar para poder desarrollar sistemas de monitorización y control que ayuden a minimizarlos o eliminarlos. Estos errores son tales como: porosidad, valores de tensiones residuales altos y la aparición de fisuras. Los defectos en WAAM pueden ocurrir por diversas razones, como una estrategia de fabricación errónea, una dinámica inestable del baño fundido por una configuración deficiente de los parámetros de proceso, deformaciones térmicas debidas a acumulaciones de calor [Wu, 2017], influencia del ambiente (contaminación del gas) y otros errores de funcionamiento de máquina. En las aleaciones de titanio por ejemplo es común que ocurra oxidación, porosidad en aluminio, rugosidad superficial en el acero y deformación y fisuras en los componentes bimetálicos. La Tabla II-7 resume los errores más comunes que suelen ocurrir en cada material utilizando técnicas WAAM.

Tabla II-7. Resumen de los principales defectos para varios materiales depositados por distintas técnicas WAAM.

Material	Proceso	P	F	D	O	AS	CS	Ref.
Ti6Al4V	TIG	No	No	No	Ligera	Buena	Suave	[Baufeld, 2010]
	Plasma	No	No	No	No	Buena	Suave	[Martina, 2012]
	CMT	No	No	No	Ligera	Buena	Suave	[Almeida, 2010]
	DCEP-GMAW	No	No	No	Ligera	Media	Pobre	[Almeida, 2010]
Acero H08Mn2Si	DE-GMAW	Baja	No	No	No	Buena	Ondulacion	[Yang, 2016]
Acero recubierto de cobre	GMAW	No	No	No	Ligera	Buena	Medio rugoso	[Xiong, 2015]
Aleación ER4043	Al CMT	Alta	No	No	Ligera	Buena	Suave	[Wang, 2017]
	VP-GTAW	No	No	No	No	Buena	Medio rugosa	[Wang, 2004]
Aleación AA2319	Al CMT	Alta	No	No	No	Buena	Suave	[Cong, 2015]
	CMT-PADV	No	No	No	No	Buena	Suave	[Cong, 2015]
Aleación 5356	Al VP-GTAW	No	Si	No	No	Buena	Suave	[Wang, 2020]
Inconel 352	PPAD	Alta	Si	No	No	Buena	Suave	[Xu, 2013]
	GTAW	No	No	No	No	Buena	Suave	[Tian, 2017]
Inconel 718	GMAW	Media	Si	Si	No	Buena	Suave	[Clark, 2008]
Aleación AZ31	Mg PMIG	No	No	No	Ligera	Media	Medio rugosa	[Guo, 2016]
Niquel-Al-Cu	CMT	No	No	No	No	Buena	Suave	[Ding, 2016]
Bimetal Acero-Bronce	GMAW	No	No	No	No	Buena	Suave	[Liu, 2013]
Bimetal Acero-niquel	GMAW	No	No	No	No	Buena	Medio rugosa	[Abe, 2016]
Fe/Al intermetalico	GTAW	Alta	Si	No	Seria	Media	Medio-deficiente	[Shen, 2016]
Al/Tu intermetálico	GTAW	Baja	Si	No	No	Buena	Rugosa	[Ma, 2016]
Al/Cu intermetálico	GTAW	No	No	Si	Ligera	Pobre	Rugosa	[Dong, 2017]

P:Porosidad

F: Fisuras

D: Delaminacion

O: Oxidación

AS: Adherencia al sustrato

CS: Calidad superficial

3.4. Monitorización y control

Existe una falta de desarrollos de monitorización y control específicos para tecnologías WAAM comparadas con tecnologías de fabricación aditiva por laser. Con el objetivo de extender el uso del WAAM en la industria, es necesario mejorar estos campos para así mejorar la automatización del proceso. Para esto es necesario un proceso de monitorización que incluya señales visuales, señales eléctricas, etc. Además, es necesario un sistema de control y un algoritmo de toma de decisiones basado en las señales del sistema de monitorización para optimizar el control del proceso. Debido a que los procesos que surgen durante la fabricación aditiva WAAM son similares a los que ocurren durante la soldadura mediante las diferentes tecnologías de arco e hilo, actualmente se utilizan sistemas y procesos similares a los utilizados en la inspección de procesos de soldadura convencionales, con adaptaciones para la inspección de tecnologías WAAM.

Para mejorar el proceso WAAM se deben monitorizar distintos datos durante el proceso, con especial atención en las variables que afectan a la calidad del material depositado. Como se puede ver en la Tabla II-8 se están llevando a cabo varios estudios para relacionar los datos de proceso con la calidad del material obtenido.

Tabla II-8. Métodos de monitorización de diferentes defectos

Objetivos	Visión	Espectro	Acústico	Eléctrico	Térmico
Porosidad y vacío	[Sreedhar, 2012]	[Huang, 2016; Huang, 2017; Yu, 2015]	[Rieder, 2014; Slotwinski, 2014; Yusof, 2017]	[Suresh, 2018; Thekkuden, 2018; Wei, 2001]	[Mireles, 2015; Sreedhar, 2012]
Fisuras	[Boateng, 2016; Broberg, 2013; García de la Yedra, 2019]	[Droubi, 2017; Strantza, 2017]	[Droubi, 2017; García de la Yedra, 2019; Karlsson, 2010; Strantza, 2017]	[Yusa, 2006]	[Broberg, 2013; Khanzadeh, 2019]
Defectos superficiales	[Tang, 2017]	[Mirapeix, 2006, 2007; Zhang, 2013]		[Zhang, 2014]	[Khanzadeh, 2019]
Dinámica del baño fundido	[Aendenro omer, 1998; Hu, 2003]	[Aendenro omer, 1998]	[Carlson, 1988; Pal, 2011]	[XIAO, 1993; Yoo, 1993]	[Bicknell, 1994; Criales, 2017]

- **Sistemas de control visual:** Es el método de monitorización más directo, muy útil para monitorizar la dinámica del baño fundido y la morfología de la superficie depositada. Además, a través de la monitorización mediante un sensor de visión, se puede obtener información para su uso en un control, como puede ser la anchura del baño fundido, altura y morfología, que se pueden obtener en tiempo real. Los objetos monitorizados en

WAAM son el baño fundido, la posición del hilo, longitud del arco y superficie del cordón depositado.

En diversos estudios se ha visto que para reducir los defectos en las piezas lo más importante es controlar la anchura y la altura de la pared y para ello la monitorización on-line del baño fundido es una parte esencial del control. En estos casos, los sistemas de control visual se usan para esta aplicación y hay dos tipos mayoritariamente: los sistemas de visión activos y los sistemas de visión pasivos [Pan, 2018].

Los sistemas de visión activos usan un láser o una luz estructurada para iluminar el área de fundida mientras se está depositando. En estos casos, el reto suele ser diferenciar la luz que emana el arco eléctrico del reflejado proveniente del láser. Para ello, se pone una cámara de video equipada con un sensor CCD y se obtiene la imagen de la piscina de fusión [Zhang, 2006].

Por otro lado, los sistemas de visión pasivos utilizan la radiación del cuerpo oscuro que emana del metal líquido y el arco de soldadura. Este tipo de sistemas suelen estar formados por una cámara CCD y filtros para capturar la información del baño fundido [Pan, 2018]. Por ejemplo, cómo se puede ver en la Figura II-10 en un estudio se usa una cámara CCD para el control de la anchura de cada capa y otro para la altura [Xiong, 2016]. En cambio, en el Instituto Harbin, usan una única cámara para controlar la anchura del cordón y optimizar el proceso [Xiong, 2013].

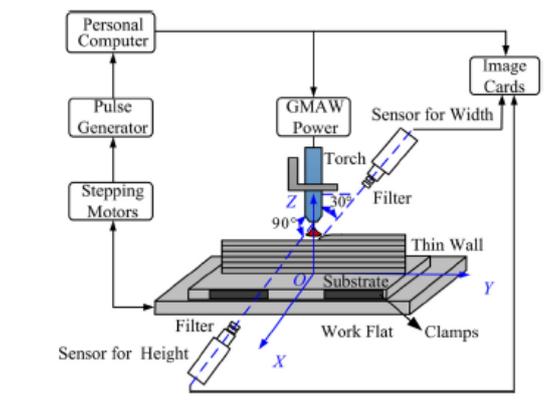


Figura II-10. Diagrama esquemático del sistema de control en el proceso WAAM [Xiong, 2016].

Además, en un estudio reciente en la universidad de Cranfield han utilizado un sistema visual para observar el método de transferencia de metal y han podido determinar los métodos de transferencia usando estas imágenes conjuntamente con las señales de voltaje [Xiong, 2016].

- **Láser geométrico:** Otra de las estrategias de control de los procesos WAAM suele ser el escaneo de cada capa después de depositarlo mediante un láser geométrico. Gracias a ello, se obtiene información en tres dimensiones de los cordones de soldadura depositados en forma de nube de puntos y se puede controlar la desviación en la altura y anchura de cada capa pudiendo ajustar los parámetros de la siguiente para compensarlo [Heralic, 2012].
- **Medidores de nivel de oxígeno:** En materiales que necesitan para su deposición un espacio cerrado con atmósfera controlada se usan medidores de nivel de oxígeno para asegurar la calidad de la atmósfera de fabricación.
- **Temperatura:** El principio de la termografía está basado en la diferencia entre el comportamiento térmico de la estructura interna y de sus imperfecciones. Las variaciones locales del perfil térmico o diferencia en el comportamiento a lo largo del tiempo presentan un reto de procesamiento del material porque pueden causar diferentes fases y microestructuras en el material depositado, que conllevan propiedades del material no homogéneas. La termografía es un método rápido comparado con otras técnicas NDT, como los ultrasonidos, para examinar piezas en las que el acceso a las superficies es complicado. Es fácil monitorizar la temperatura durante el proceso y obtener resultados rápidos. Mireles et al. [Mireles, 2015] desarrollaron un sistema de termografía infrarroja para monitorizar la fabricación aditiva. Los resultados de la termografía por capa se comparan con los resultados obtenidos utilizando técnicas de escaneo de tomografía computerizada (CT) y se concluye que la termografía proporciona una buena detección de defectos. Kraus et al. [Kraus, 2012] implementaron el uso de una cámara infrarroja para seguir el proceso de solidificación y la calidad de la capa de polvo en un proceso SLM. Con este enfoque, se detectaron durante la fabricación variaciones en el espesor de la capa de polvo y una serie de defectos. Sreedhar et al. [Sreedhar, 2012] desarrollaron un sistema de monitorización para GTAW basado en imágenes térmicas. Encontraron que las imágenes térmicas obtenidas de piezas sin defectos y otras con defectos muestran características distintas para un procesamiento básico.
- **Detección espectral:** la espectroscopía óptica es una herramienta efectiva para el análisis de la composición ya que la información elemental se encuentra embebida en las señales espectrales, que se han utilizado para comprender mejor los mecanismos y monitorizar las condiciones

durante el proceso. El espectro producido durante la soldadura al arco contiene una amplia gama de información, incluyendo vapores de metales, gases de protección y gases para el arco. Por tanto, se puede vincular intrínsecamente con defectos en el proceso WAAM. Esto hace que sea un método muy prometedor para la detección de defectos online. Zhang et al. [Zhang, 2013] encontraron que las perturbaciones en la soldadura y los defectos durante el proceso GMAW se pueden diagnosticar por este método. Huang et al. [Huang, 2017] utilizaron un espectrómetro portátil para obtener señales espectrales de aleaciones de aluminio depositado por GTAW.

Como ejemplo, en la Universidad de Chalmers están trabajando en la tecnología WAAM mediante robot y una mesa con un giro adicional para la tecnología LMD. Lo más característico de su sistema es que se centra en una exhaustiva monitorización del proceso, disponiendo de hasta 3 cámaras en el cabezal, como se puede observar en la figura inferior [Heralic, 2012b]. Además, en la última versión del sistema se ha incorporado un escáner láser dispuesto sobre una carcasa de protección.

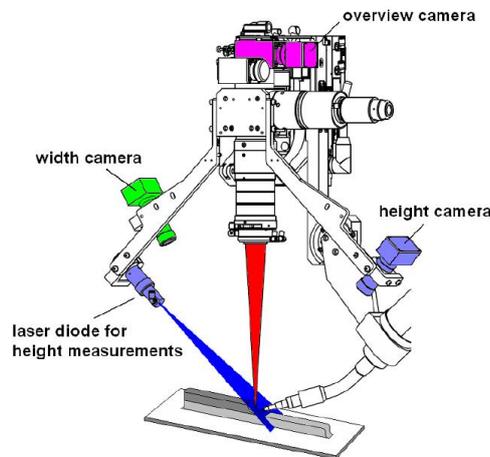


Figura II-11. Sistema de monitorización basado en 3 cámaras [Heralic, 2012b]

3.5. Postprocesados y operaciones de acabado

Generalmente, las piezas obtenidas por WAAM requieren tratamientos de postprocesado para mejorar las propiedades del material, reducir la rugosidad superficial, eliminar las tensiones residuales y obtener las tolerancias necesarias. Mediante una apropiada aplicación de algunos postprocesos, la mayor parte de las cuestiones que influyen en la calidad del material depositado pueden ser mitigados o eliminados. Estos postprocesos incluyen operaciones de tratamiento térmico, mecanizado o mejora de la rugosidad.

3.5.1. Tratamientos térmicos

La anisotropía del material obtenida tras la deposición mediante tecnologías WAAM es una característica intrínseca de los mismos y uno de los mayores problemas asociados a este tipo de tecnologías. Por tanto, los tratamientos térmicos específicos para cada material son una etapa crítica para mejorar la anisotropía de los materiales derivada de los procesos WAAM, conllevan además beneficios sustanciales para las propiedades de los materiales [Li, 2021].

Debido a que los tratamientos térmicos aplicados han de ser específicos para cada material, en este apartado se detalla la bibliografía sobre estudios llevados a cabo tanto en Ti6Al4V e Inconel718 depositados por WAAM.

En general existen cuatro microestructuras típicas de las aleaciones de titanio, que incluyen la estructura bimodal, la equiaxial, la lamelar y la estructura entrelazada [Lutjering, 2007]. El tipo de microestructura de este y, por tanto, sus propiedades se deciden en base a el procesado y post tratamiento que sufra el material. Existen varios trabajos sobre el tratamiento térmico del Ti6Al4V depositado mediante laser o haz de electrones [Brandl , 2012a; Brandl, 2011; Galarraga, 2017; Sabban, 2019; Zhao, 2018], pero existe poca literatura relacionada con los tratamientos térmicos del titanio depositado mediante WAAM. Baufeld et al. [Baufeld, 2009] investigaron el efecto del tratamiento térmico sobre el TiAl4V depositado mediante WAAM a diferentes temperaturas de recocido seguido de enfriamiento en horno (FC). Los resultados mostraron que el tratamiento a 600°C/4h/FC aumentó la fuerza, un tratamiento a 843°C/2h/FC aumentó significativamente la ductilidad, a 900°C/2h/FC no se produjeron cambios en las propiedades a tracción, mientras que mediante un tratamiento a 1040°C/2h produjo un incremento de la tensión a rotura y una disminución de la elongación. Bermingham et al. [Bermingham, 2018] encontraron que el Ti6Al4V después de la fabricación aditiva tiene una tensión última (~6-7%) significativamente baja así como límite elástico (~33%) comparado con la relajación de tensiones (480°C/2h) equivalente, el tratamiento de solución y envejecido (967°C/1h/WQ+595°C/1h/AC) refinó el tamaño de grano α y aumentó el UTS alrededor de un 12% pero redujo el alargamiento más de un 30%.

Comparadas con las piezas obtenidas tras la fabricación aditiva láser o por haz de electrones, las piezas tras el WAAM tienen una macro/microestructura gruesa como resultado de los bajos ratios de enfriamiento del baño fundido y las bajas velocidades de aporte[Bermingham, Nicastro, Kent, Chen, and Dargusch, 2018], lo que produce piezas normalmente menos resistentes que las obtenidas por

laser o haz de electrones. Por lo tanto, los tratamientos térmicos que se deben aplicar a las piezas obtenidas por WAAM deben ser diferentes a aquellos aplicados a otras piezas obtenidas por otros métodos de fabricación aditiva. Generalmente, un tratamiento por encima de la temperatura de transus del titanio obtenido por fabricación aditiva, genera macro/microestructuras más gruesas, lo que disminuye considerablemente no solo la resistencia, sino también la elongación [Brandl, 2011; Dinda, 2008; Yan, 2018]. Por el contrario, los tratamientos con una temperatura por debajo de la temperatura de transus del titanio pueden ayudar a mejorar moderadamente la ductilidad mientras mantienen la resistencia en un nivel alto.

No existen en bibliografía trabajos específicos sobre el tratamiento térmico del Inconel 718 obtenido mediante WAAM, sin embargo, al igual que ocurría con el titanio, existen algunos trabajos sobre la influencia en la microestructura y las propiedades mecánicas del Inconel 718 obtenido mediante procesos de fabricación aditiva láser y por haz de electrones. Qi et al. [Qi, 2009] estudiaron la microestructura del Inco718 tras la deposición y tras tres tratamientos diferentes: envejecido directo, solubilizado y envejecido (STA) y homogeneización completa seguida de STA. Los ensayos a tracción mostraron que el envejecido directo produce las mayores resistencias a tracción en comparación con el material en bruto, seguido del material envejecido y el homogeneizado, mientras que la ductilidad mostró la tendencia contraria. Kirka et al. [Kirka, 2017] llevaron a cabo un estudio similar, pero tras la deposición mediante EBM del Inconel 718 y su comparación con el tratamiento de solubilizado y envejecido demostrando que tras el tratamiento, mejoran beneficiosamente las propiedades a tracción del material comparado con el material depositado.

Existe, por tanto, un campo muy amplio de investigación en esta materia. Partiendo de los trabajos que se encuentran en bibliografía se deberán llevar a cabo estudios específicos para cada tecnología y material.

3.5.2. Cold-rolling

Se ha demostrado en varios estudios que el cold rolling, o la compactación con rodillo en frío, del cordón depositado entre capas reduce las tensiones residuales y distorsiones durante procesos de fabricación mediante WAAM [Colegrove, 2017]. El cold rolling entre pasadas no solo reduce las tensiones residuales, sino que además ayuda a que las propiedades del material sean más homogéneas. En el proceso WAAM, el gradiente térmico producido por la deposición de las capas sucesivas y los ciclos de calentamiento-enfriamiento del proceso hacen que la pieza obtenida tenga unas propiedades mecánicas y una evolución

microestructural anisótropas. La compactación reduce significativamente la anisotropía microestructural deformando plásticamente el material depositado. La Figura II-12 muestra un sistema de cold rolling desarrollado por la Universidad de Cranfield.

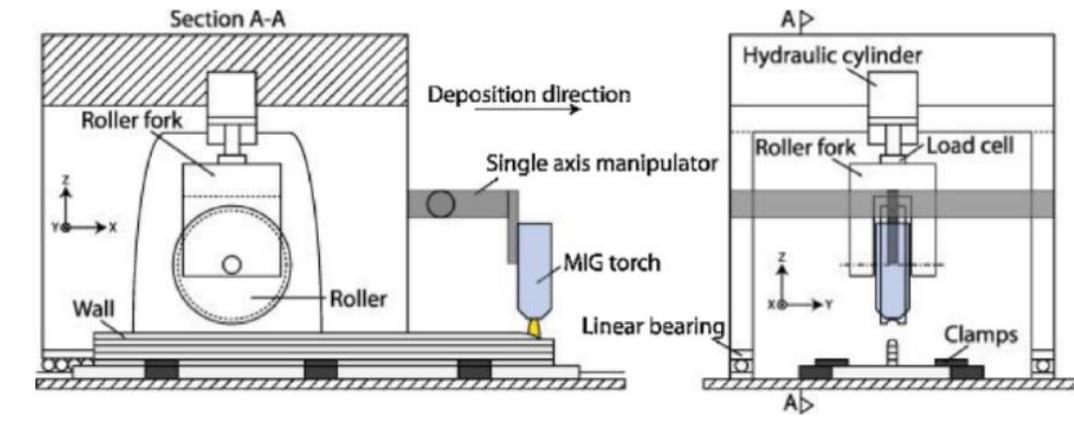


Figura II-12. Esquema de un proceso WAAM con cold rolling [Wu, 2018b]

3.5.3. Enfriamiento forzado

Recientemente, se ha desarrollado y evaluado por la universidad de Wollongong un sistema de deposición WAAM con enfriamiento entre pasadas. Se introduce en el sistema una boquilla para suministrar refrigeración forzada o activa en la pieza fabricada justo después de cada capa. Utilizando este método de enfriamiento rápido, la temperatura de cada capa y el ciclo de calentamiento se pueden controlar dentro de un rango para obtener la microestructura y propiedades mecánicas deseadas. Este método además tiene potencial para reducir las tensiones residuales y distorsiones, aunque este aspecto no ha sido investigado.

Se ha llevado a cabo un estudio de viabilidad que ha mostrado resultados prometedores en la utilización de enfriamiento forzado entre capas mediante la aplicación de CO₂ comprimido para fabricar paredes finas de Ti6Al4V [Wu, 2018b]. Se ha demostrado que el enfriamiento entre pasadas produce menor oxidación superficial, una microestructura refinada, dureza mejorada y una mayor resistencia. Además, se mejora la eficiencia del proceso WAAM debido a la reducción de los tiempos inactivos entre capas.

3.5.4. Granallado y tratamiento por ultrasonidos

El granallado y los tratamientos de impacto ultrasónico (UIT) se han utilizado comúnmente en soldadura para reducir tensiones residuales locales y mejorar las propiedades mecánicas de la soldadura. Ambas técnicas son

técnicas en frío que impactan en la superficie soldada por medio de una alta energía para liberar las tensiones imponiendo tensiones compresivas en la superficie tratada. Normalmente, el proceso de granallado mecánico produce tensiones compresivas en un espesor limitado debajo de la superficie del componente, alrededor de 1-2mm en aceros al carbono, por ejemplo [Cheng, 2003]. El tratamiento por impacto ultrasónico produce refinamiento de granos y distribuye la orientación, contribuyendo a la mejora de la resistencia mecánica. Se declara en la bibliografía que tras el tratamiento por impacto ultrasónico, las tensiones residuales superficiales de una pieza de Ti6Al4V fabricada por WAAM se puede reducir en un 58% y la microdureza se puede incrementar en un 28% comparada con la pieza tal cual ha sido fabricada. El impacto ultrasónico está limitado al espesor de penetración, que es de unas 60 μ m por debajo de la superficie. Por lo que, aunque ambas técnicas presentan ventajas, tienen efectos perjudiciales en las tensiones residuales internas de grandes piezas fabricadas mediante WAAM.

3.5.5. Mecanizado de piezas fabricadas por WAAM

Una de las mayores desventajas del WAAM comparado con otros procesos de fabricación aditiva, es su reducida precisión dimensional y un acabado superficial deficiente [Ding, 2015b; Tabernero, 2018]. Por lo tanto, se necesita una operación de mecanizado para lograr los requisitos funcionales de las piezas. Los principales procesos utilizados para este mecanizado son el torneado [Bertolini, 2019; Brožek, 2005], el fresado [Böß, 2016; Wang, 2016], taladrado [Alonso, 2020; Dang, 2019] y rectificado [Liu, 2019]. Por ejemplo, en el ensamblaje del fuselaje del avión, se mecanizan multitud de orificios y el control de la operación de taladrado es crucial. Es por esto que en ocasiones se combinan el mecanizado y la fabricación aditiva en sistemas híbridos para obtener los acabados finales requeridos de las piezas [Chong, 2018; Flynn, 2016; Merklein, 2016].

En este trabajo de tesis doctoral se llevará a cabo un estudio sobre el mecanizado de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva WAAM, por lo que se ha enfocado el estado del arte aquí presentado sobre mecanizado de piezas obtenidas mediante fabricación aditiva en el mecanizado de titanio.

Así, en el caso del Titanio, se ha reportado que las aleaciones de titanio son difíciles de mecanizar debido a sus propiedades físicas particulares [Le Coz, 2012; Sharif, 2012; Xu, 2016]. Por un lado, su baja conductividad térmica (alrededor de 15W/mK frente a 270W/mK para el acero CRS1018 a 700°C) [Nouari, 2014] genera altas temperaturas en la zona de corte. Sin embargo,

mantiene su alta resistencia mecánica y abrasividad a tales temperaturas, lo que genera fuerzas de corte elevadas y un rápido desgaste de herramienta. Por otro lado, la afinidad química con el material de la herramienta conduce a una rápida adhesión del titanio a la herramienta de corte. El filo acumulado resultante (BUE) o el astillado de los filos de corte a menudo suponen un acabado superficial deficiente de la superficie interna del orificio (y, en el peor escenario, a un fallo prematuro de la herramienta de corte) [Xu, 2016].

La selección de los parámetros de corte más adecuados es de gran importancia para el éxito del proceso. Estudios anteriores han analizado a fondo el efecto de la variación de los parámetros de corte en las fuerzas de corte y la calidad del agujero resultante. Sharif et al. [Sharif, 2012], por ejemplo, evaluaron el rendimiento de brocas de carburo de tungsteno recubiertas y sin recubrimiento a varias velocidades de corte. Observaron que el valor de rugosidad superficial promedio (R_a) disminuyó aproximadamente un 20% al duplicar la velocidad de corte. También informaron de que las brocas sin recubrimiento no son adecuadas para velocidades de corte superiores a 25 m/min debido a su rápido desgaste. En otro estudio, Le Coz et al. [Le Coz, 2012] llevaron a cabo un estudio integral para probar el efecto de la variación tanto del avance como de la velocidad de corte en las fuerzas de corte. Observaron un aumento de un 60% en el par de corte cuando el avance por revolución se incrementó en la misma medida. Este aumento de las fuerzas de corte se puede explicar por la relación directa entre el avance y el área de la sección transversal de la viruta no deformada. La evolución de las fuerzas de corte también se investigó en el trabajo de Sharif et al. [Sharif, 2012]. En este caso, se observaron valores de par más bajos al aumentar la velocidad de corte; este resultado se atribuyó a la reducción de la dureza del material a medida que aumenta la temperatura.

La calidad general del orificio mecanizado también es de gran importancia para el correcto comportamiento de la junta mecánica. La formación de rebabas y la mala calidad geométrica, por ejemplo, pueden resultar en una reducción de la vida útil a fatiga. Se necesitan operaciones adicionales de rebarbado o escariado para la corrección de tales defectos, y generalmente implican un alto coste [Abdelhafeez, 2015]. La formación de rebabas depende de varios aspectos, como la geometría y el material de la herramienta, las propiedades del material de la pieza de trabajo y los parámetros de mecanizado seleccionados (entre otros) [Dornfeld, 1999]. Aparte de este defecto, la imperfección geométrica (como el diámetro irregular del orificio) también es un problema crítico. Al perforar aleaciones de Ti, los orificios mecanizados pueden contraerse o expandirse según el entorno de corte. Los agujeros de gran tamaño se obtienen a menudo en el corte en seco debido a la expansión térmica resultante de las altas

temperaturas de corte. Las influencias del avance y la variación de la velocidad de corte en el diámetro del orificio son complicadas de estudiar debido a sus efectos interactivos [Zhaoju, 2017]. La recuperación elástica de la deformación por compresión producida por la fuerza de empuje puede reducir el tamaño del orificio; sin embargo, la expansión del material a altas temperaturas puede provocar un orificio más grande de lo esperado.

A pesar de que existe un extenso trabajo de investigación en perforación de Ti, son pocos los trabajos que han estudiado el mecanizado de piezas producidas por fabricación aditiva. Priarone et al. [Priarone, 2013] investigaron la maquinabilidad de un aluminuro de titanio gamma obtenido mediante el proceso de fusión por haz de electrones (EBM). En este trabajo, se mide el rendimiento de la perforación en términos de la rugosidad superficial, errores dimensionales y desgaste de herramienta. Los resultados experimentales mostraron una reducción de la rugosidad superficial al reducir la velocidad de avance, así como al incrementar la velocidad de corte. La calidad de los orificios es dependiente también de los parámetros de corte y del nivel de desgaste de la herramienta.

Existen también algunos estudios de mecanizado en diferentes materiales base níquel y aceros de alta resistencia depositados por diferentes procesos de fabricación aditiva en los que se analizan los efectos de los parámetros de corte y las microdurezas en la morfología de la viruta y las características del fresado de las capas de acero KMN depositado por laser cladding basándose en la señal de frecuencia temporal de la fuerza de corte y la vibración del mecanizado [Y. Zhao, 2014]. En otros se estudia la influencia de los parámetros de corte en la fuerza de corte y en la rugosidad superficial en el fresado y torneado del Inconel 718 depositado por LAM [Calleja, 2018]. Se han llevado también a cabo investigaciones sobre las características de corte en operaciones de recubrimientos con aleaciones base hierro centradas en la fuerza de corte, la rugosidad superficial, la morfología de la viruta y el desgaste de herramienta [Wang, 2012a, 2012b]. Existe una investigación sobre las propiedades mecánicas y la maquinabilidad de aceros inoxidables mediante LAM en la que se analizan los efectos de la velocidad de corte en la rugosidad superficial y en el desgaste de la herramienta [Guo, 2017]. Se ha llegado a fabricar un contenedor hueco de metal con rugosidad superficial y precisión dimensional controladas utilizando un proceso híbrido de plasma y fresado mediante la optimización de los parámetros [Xiong, 2009].

Aunque existen algunos trabajos, como ya se ha visto, sobre el mecanizado de materiales previamente depositados mediante técnicas de fabricación aditiva, la

bibliografía no es extensa en este campo y, por tanto, es necesario estudiar los parámetros óptimos para cada material y tecnología en cada caso.

3.6. Soluciones Industriales WAAM existentes en el mercado

A continuación, se procede a presentar los distintos desarrollos de máquinas herramienta o robots en los que se está trabajando en el mundo de universidades, centros de investigación, empresas, etc. En concreto, se presentan algunos sistemas que se entran disponibles en el mercado.

3.6.1. MAZAK

El “gigante” japonés de Máquina-Herramienta, consciente de las limitaciones que presentan las tecnologías láser (principalmente la productividad, y como consecuencia también el tamaño de las piezas fabricables), presentó al mercado un nuevo modelo de máquina híbrida a finales de 2016. Se trata de una máquina diferente a su modelo INTEGREGEX i-400AM, llamado VARIAXIS j-600 AM , en el que se sustituye la tecnología LMD por la de WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing).



Figura II-13. Máquina híbrida de WAAM + Mecanizado (MAZAK VARIAXIS j-600 AM)[Mazak, 2021]

La máquina incorpora un electromandrino de 12.000 rpm, un eje B basculante y un eje C de giro en la mesa. Está especialmente diseñada para la producción de piezas de aeronáutica, moldes y matrices y otras piezas en las que sea muy importante que se mantenga sus propiedades de durabilidad y resistencia al desgaste.

3.6.2. UNIVERSIDAD DE CRANFIELD

La Universidad de Cranfield es una de las principales referencias mundiales en Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Desde su programa WAAMMat, ha realizado desde hace más de una década multitud de proyectos de investigación y desarrollo en la tecnología WAAM trabajando en distintos materiales (Aluminio, diferentes aleaciones de Acero, Titanio, Níquel, etc.), abriendo camino en temas de inspección, monitorización y post-procesos avanzados. Desde el punto de

vista de máquina, ha realizado proyectos con 2 enfoques diferentes: tanto con robot como con máquina CNC.

En la Figura II-14 y Figura II-15 se puede observar un sistema que incorpora una cámara cerrada de Argón en aplicaciones robóticas de una manera económica.



Figura II-14. Sistemas de cerramiento para materiales, como el Titanio, que necesitan trabajar en una atmósfera de Argón [Cranfield, 2021].

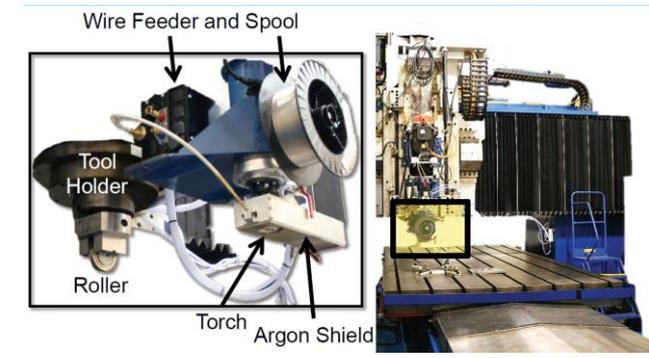


Figura II-15. Sistema de alimentación de hilo, sistemas auxiliares de post-procesado (Rolling) y sistema de cerramiento desplazable de la cámara de Argón [McAndrew, 2018].

3.6.3. NORSK TITANIUM

Norsk Titanium es el proveedor mundial pionero de piezas estructurales de Titanio para el sector Aeronáutico fabricadas mediante WAAM. La compañía se distingue en la industria aeronáutica por su tecnología patentada de Rapid Plasma Deposition (RPD), proceso que transforma hilo de Titanio en componentes complejos válidos para aplicaciones estructurales y críticas desde el punto de vista de la seguridad.

En la Figura II-16 se puede distinguir el último modelo de máquinas de Norsk Titanium, Merke IV.



Figura II-16. Máquina Merke IV para RPD [Norsk Titanium, 2021]

Norsk Titanium ha anunciado recientemente la firma de un acuerdo a largo plazo con una de las empresas líderes mundiales proveedoras de los OEMs del sector aeronáutico: la empresa francesa Mechachrome, a la que suministrará componentes estructurales de Titanio totalmente terminados. Del mismo modo, ha llegado a un acuerdo con la empresa Alcoa, líder mundial en el suministro de materiales ligeros, normalmente aleaciones de Aluminio, que desde hace años está diversificando su negocio hacia otros materiales como el Titanio.

En la Figura II-17 se puede observar el esquema del proceso y una imagen de la máquina en funcionamiento.

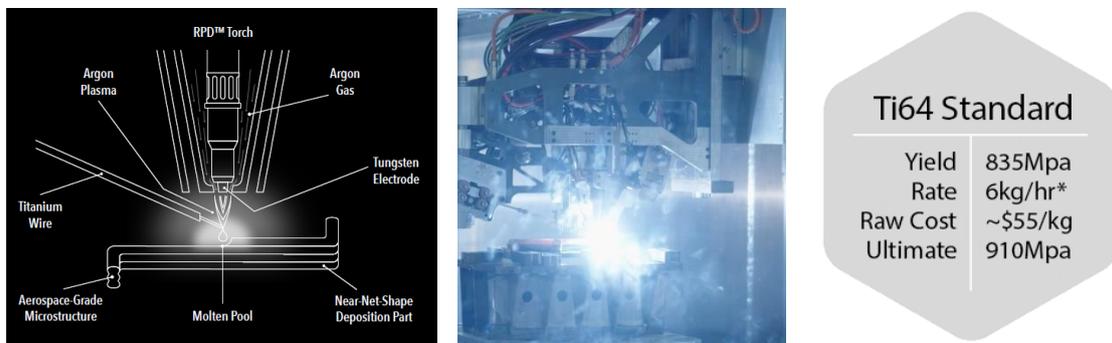


Figura II-17. Funcionamiento del RPD y propiedades de piezas fabricadas en Ti64 [Norsk Titanium, 2021]

Norsk Titanium afirma que el proceso de deposición del material de hilo es monitorizado 2000 veces por segundo para asegurar la calidad necesaria, y que las piezas fabricadas con sus máquinas (piezas estructurales aeronáuticas) se producen en un 75% menos tiempo y costes que las mismas piezas fabricadas mediante forja.

3.6.4. TWI

El centro tecnológico TWI (Cambridge, UK) es una de las más prestigiosas instituciones mundiales en el ámbito de los procesos de soldadura. Por ello,

desde finales de los años 90 trabajan en utilizar la tecnología de soldadura como método de fabricación aditiva. Las máquinas que utilizan, principalmente, son robots de 6 ejes.

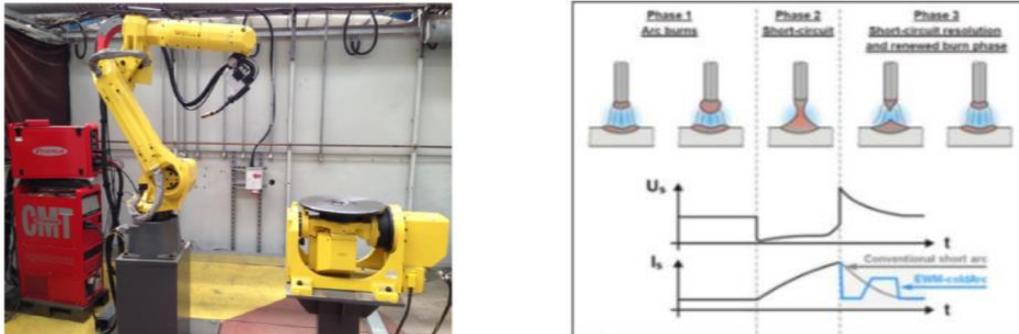


Figura II-18. Instalación en el TWI [TWI, 2021]

3.6.5. EWI

EWI es el centro tecnológico líder en Estados Unidos en tecnologías de soldadura y tecnologías de fabricación en general. Respecto a la Fabricación Aditiva, trabaja con todas las tecnologías de generación de arco: GMAW-P, RWF-GMAW, PAW (Cold Wire), PTA (Powder), GTAW (Hot Wire) y CMT (Cold Metal Transfer).

En la Figura II-19 se puede observar equipamiento desarrollado y utilizado por el EWI.

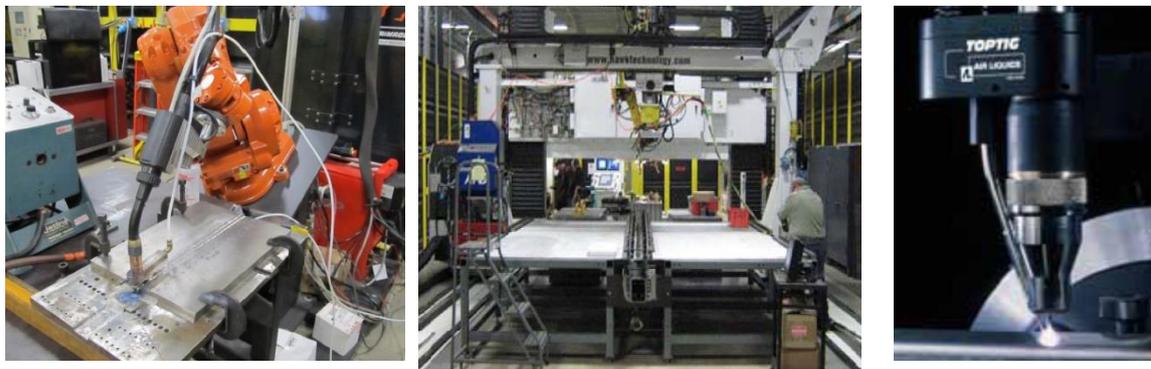


Figura II-19. a)WAAM mediante robot de 6 ejes [EWI, 2021]. b)Máquina Gantry para la Fabricación por WAAM de piezas aeronáuticas de gran tamaño. c)Cabezal de TOPTIG para la empresa Air Liquide[TOPTIG, 2021].

3.6.6. RAMLAB

El grupo de empresas holandesas RAMLAB ha desarrollado un sistema de WAAM basado en robot de 6 ejes para fabricar piezas de acero de hasta 2x2x2 metros de tamaño.

La gran impresora metálica, utiliza dos grandes brazos capaces de manipular un objeto mientras es soldado, al mismo tiempo que el proceso de soldadura es realizado por un robot. Esta configuración y modo de operación es único en el mundo. Los mercados objetivo de la empresa RAMLAB son principalmente el sector aeroespacial y el naval.

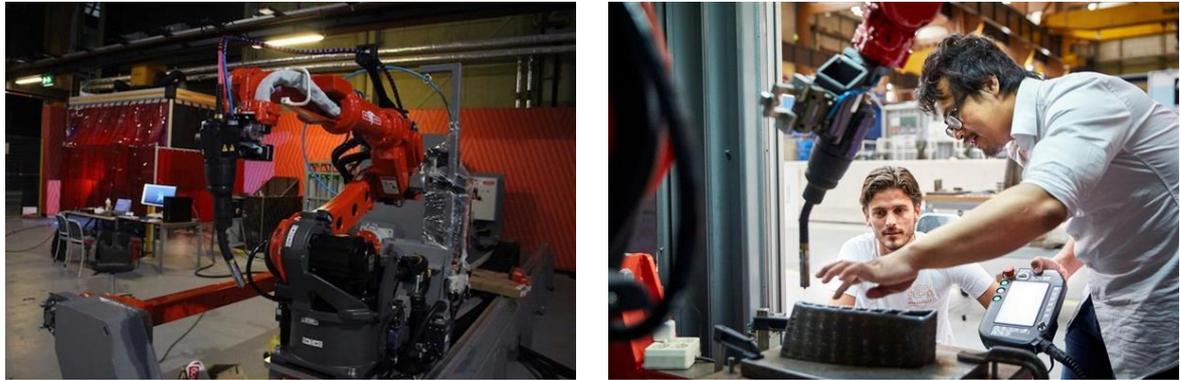


Figura II-20. Máquina RAMLAB combinando un robot de 6 ejes para la soldadura y dos brazos capaces de manipular la pieza siendo construida [Ramlab, 2021].

3.6.7. MX3D

La empresa MX3D lleva varios años colaborando con importantes empresas del sector de la Ingeniería y construcción para implementar soluciones robóticas on-site totalmente para fabricación autónoma. Su principal interés está en los materiales metálicos. La empresa se ha especializado en la tecnología WAAM, porque usa hilo de soldadura standard y es más productiva, económica y fácil de utilizar que las otras tecnologías de fabricación aditiva.

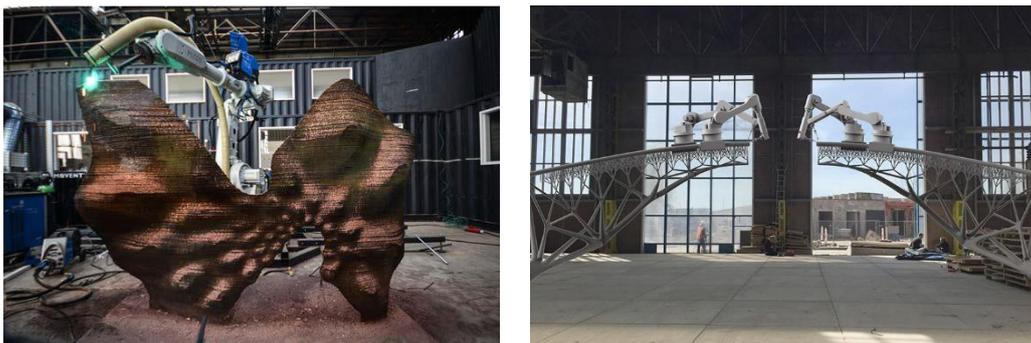


Figura II-21. Ejemplos de aplicaciones de MX3D en el sector de la construcción [MX3D, 2021].

3.6.8. AMRC

El centro de I+D británico Nuclear AMRC ofrece actualmente capacidades en fabricación aditiva, con una célula automatizada valorada en 1.3 millones de euros, desarrollada por Kuka Robotics. La célula puede construir grandes piezas desde cero o añadir operaciones adicionales a piezas grandes de forja como

recipientes a presión. Esta nueva instalación ha sido financiada por el proyecto europeo Catapult.

La célula, de dimensiones 10x 5 m, incluye un robot de 6 ejes Kuka, ensamblado sobre un gantry de 3 ejes y 9 metros de longitud, además de un manipulador de 2 ejes con una mesa de diámetro 3.5 m. El robot integra un sistema de soldadura TopTig, que incluye la alimentación de hilo en la antorcha de soldadura, y ha sido desarrollado por Air Liquide específicamente para aplicaciones robóticas de soldadura.

El robot es capaz de ser utilizado con distintos end-effectors, permitiendo investigar distintas tecnologías, e inspeccionar y mecanizar las piezas en una sola atada.



Figura II-22. Célula de fabricación flexible de Fabricación Aditiva [AMRC, 2021]

3.6.9. Wolf Robotics

Wolf Robotics, una empresa del grupo Lincoln Electric, es una de las empresas que está marcando el camino para avanzar en “Robotic Big Area Manufacturing” (R-BAAM). Motivada por un proyecto industrial, Wolf ha desarrollado un sistema escalable, multi-alimentador de hilo, y multi-material. Es el primer sistema en ofrecer de manera integrada la tecnología láser y la de WAAM.



Figura II-23. Sistema de AM robótico multi-material [Wolf Robotics, 2021]

3.6.10. ADDILAN

Primer fabricante mundial que ofrece máquinas para desarrollo de preformas metálicas de alta deposición mediante tecnología WAAM. Esta solución de máquina permite fabricar piezas metálicas en diferentes materiales (Titanio, Acero) con unas dimensiones máximas de 1300x900x500mm y un peso de 300kg. Permite trabajar en atmósferas inertes y tiene varias patentes relacionados con la carga y descarga automática de piezas. Es el primer fabricante que ofrece máquina de fabricación aditiva metálica con control propio para fabricación aditiva mediante WAAM.

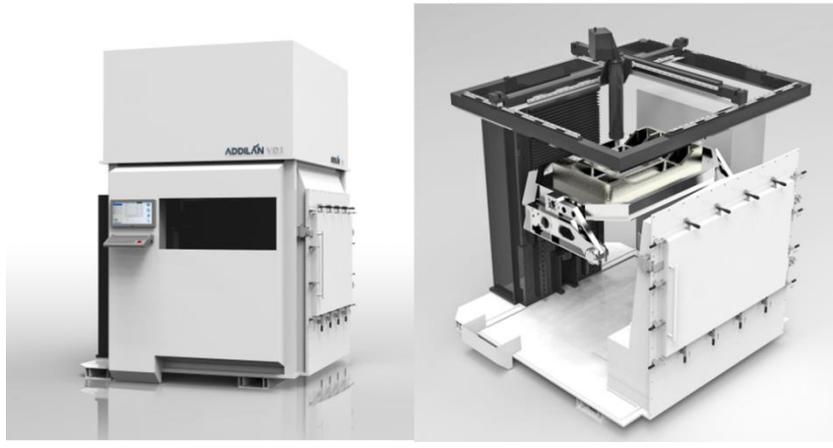


Figura II-24. Máquina desarrollada por ADDILAN para fabricación de preformas mediante tecnologías WAAM [ADDILAN, 2021].

3.7. Patentes en el ámbito del WAAM

La patente principal que protege el proceso WAAM es muy antigua. En 1926 Baker presentó una patente para fabricar piezas en tres dimensiones superponiendo capas y fundiendo el metal con arco eléctrico [Baker, 1925]. La tecnología no fue absorbida por la industria debido a la falta de equipos y de tecnología. Actualmente, con el desarrollo de tecnologías que permiten automatizar el proceso, el concepto propuesto por Baker vuelve a tener interés para la industria.

Muchas de las patentes que se encuentran pertenecen a la empresa Norsk Titanium, cuyo objetivo desde su creación, ha sido el desarrollo y la comercialización de componentes de titanio para el sector aeronáutico de bajo coste. Así, han hecho multitud de desarrollos entorno a la fabricación aditiva WAAM. No solo Norsk Titanium ha llevado a cabo desarrollos en este campo, y por tanto, existen multitud de patentes entorno a la fabricación aditiva. Sin embargo, no son tantas las que hacen referencia a sistemas de fabricación aditiva mediante arco e hilo para materiales normalmente utilizados en el sector

aeronaútico. En la Tabla II-9 se muestran las principales patentes relacionadas con WAAM, que van desde sistemas generales para la deposición directa de material mediante material en forma de hilo, hasta procesos o sistemas para la mejora de las propiedades de los materiales obtenidos mediante fabricación aditiva, pasando por la monitorización y el control.

Tabla II-9. Análisis de patentes

Patente	Descripción
EP 1 281 467 A2 Rolls Royce [William, 2003]	Mejora de estructura cristalina mediante la excitación del baño fundido con campos magnéticos.
EP 2 511 037 A1 BAE Systems [Veldsman, 2012b]	Proponen un método para fabricación de forma libre partiendo de un modelo digital, combinando dos procesos para llegar a obtener la pieza final.
US6925346 [Mazumder, 2005]	Sistema de control cerrado para la fabricación por capas de componentes tridimensionales, en el que se controlan varios parámetros para optimizar la deposición directa de material.
US 2007/0122562 A1 Honeywell International [Cooling, 2007]	Refrigeración de la pieza para reducir la oxidación y el crecimiento de grano. Se enfría el sustrato con un intercambiador de calor o con un ventilador. Propone medir la temperatura durante el proceso.
US 7,777,155 B2 United Technologies Corporation [Twelves, 2010]	Célula de fabricación aditiva que combina con procesos de fabricación convencionales. Menciona: tratamientos, acabado superficial, inspección, etc.
US7326377B2 Honeywell International [Adams, 2000]	Proceso de fabricación aditiva con un proceso de enfriamiento forzado para optimizar las propiedades del material.
WO 2011/019287 A2 [Date, 2011]	Especificaciones de cámara para WAAM: Ángulos abiertos, juntas, 50 ppm, etc.
EP 2 511 037 A1 Linde [Veldsman, 2012a]	Enfriamiento criogénico de la zona opuesta al aporte en el material base. Se enfría el sustrato durante la soldadura para reducir la dilución. Indicado para recargues de acero inoxidable y aleaciones de níquel.
US 2014/0061165 A1 Norsk Titanium [Fabrication, 2014]	Configuración con dos antorchas plasma. La primera precalienta el material y la segunda funde el hilo y calienta el material base.
US 2015/0219444 A1 MTU [Application, 2015]	Detección de las deformaciones en zonas cercanas para determinar tensiones. Utiliza la proyección de patrones de luz. Es posible que no funcione con procesos de arco.
US7741578B2 Honeywell International [Bruce, 2010]	Sistema de protección para proteger las piezas obtenidas mediante fabricación aditiva durante el proceso de la oxidación.
US9346116B3 [Norsk Titanium AS, 2016]	Patente muy general sobre el método y el medio para producir objetos de forma libre, especialmente objetos de titanio y de aleaciones de titanio.

US10549375B2 [AS, 2020]	Método y sistema para el suministro de hilo para la fabricación aditiva de objetos hechos mediante hilo de titanio y aleaciones de titanio.
US10738378B2 [Norsk Titanium AS, 2020]	Sistema para la fabricación libre de objetos de titanio y aleaciones de titanio basado en varias cámaras que hagan del proceso un proceso mas eficiente y efectivo. Habla de sistemas de carga y descarga de sustratos para no modificar la atmosfera.
US2015/0219444A1 [MTU Aero Engines AG, 2015]	Método para determinar las tensiones residuales de un componente aeronáutico obtenido mediante fabricación aditiva.
US2019/0001573A1 [Norsk Titanium AS, 2019a]	Arquitecturas de proceso para el control de los sistemas de fabricación.
US2019/0014652A1 [Norsk Titanium AS, 2019b]	Antorcha de plasma con sistema de refrigeración que permite el aumento del ratio de deposición para la fabricación de objetos de titanio y de aleaciones de titanio.
US2021/0001424A1 [Norsk Titanium AS, 2021]	Sistema de monitorización y control de la altura de la antorcha a la pieza o standoff.

En general todas las patentes son bastante generales y hablan sobre sistemas con una fuente de energía sin especificar en los que se aporta un material para crear un objeto. Algunas especifican sobre la fuente, o la forma y el tipo de material, pero en la mayoría de los casos son generales para poder abarcar un mayor número de sistemas. Además, existen también algunas patentes centradas en sistemas para la mejora del propio proceso de fabricación aditiva mediante métodos de monitorización y control online, como de sistemas para la mejora de las propiedades de las piezas obtenidas. Estas dos cuestiones son cruciales para que la fabricación aditiva llegue a ser un proceso de fabricación fiable y que proporcione piezas viables para el sector aeronáutico que cumplan con los requerimientos tan exigentes que pide el sector.

3.8. Comparativa con otras tecnologías DED

El grupo de procesos DED incluye a su vez dos tipos de procesos principales muy diferentes: Laser Metal Deposition (LMD) y Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) [Tofail, 2018]. En este tipo de tecnologías la energía se direcciona a una región concreta para calentar el sustrato y fundir el material que hay que depositar. La resolución del proceso depende de qué tipo de fuente de energía se use (laser, haz de electrones o arco eléctrico) [Lee, 2017], en cambio, la velocidad de fabricación está relacionada con el ratio de deposición (LMD 2-5 kg/h; WAAM más de 10 kg/h). Además, la eficiencia energética que tiene el láser es muy reducida (de hasta el 30% en el mejor de los casos), el del haz de electrones es un poco mayor (15-20%) pero nada comparable con el del arco eléctrico que en algunas circunstancias puede llegar al 90% [Ding, 2015a]. En relación, en comparación con las técnicas que usan el láser, el arco eléctrico es

una fuente de energía más eficiente para fundir el material, sobre todo en aleaciones metálicas reflectantes, como el aluminio, el cobre y el magnesio [Cunningham, 2018].

En concreto, el proceso LMD se basa en el aporte directo de material en una zona localizada utilizando una boquilla de aporte de material en polvo o un alimentador de hilo y se funde este material de aporte sobre un sustrato mediante un láser. La variante más empleada en la industria es la fabricación aditiva mediante inyección directa de polvo, debido principalmente a la calidad de los cordones obtenidos y a la gran versatilidad de este proceso. El tamaño de las partículas de polvo puede variar entre las 10 μm y 200 μm en función del tipo de aporte y el material depositado. Con estas técnicas, en función del tipo de boquilla y del tamaño de spot del láser es posible realizar desde grandes recargas de incluso más de 10 mm de anchura hasta aportes de detalle de pocas décimas de milímetro.

En cambio, el proceso WAAM consiste en alimentar material normalmente en forma de hilo y fundirlo mediante un arco eléctrico. Al igual que en los procesos de soldadura, existen varios tipos de procesos WAAM (CMT, PAW, GTAW, GMAW, etc). Estos métodos, como ya se ha dicho, tienen la capacidad de aporte masivo de material, pudiendo llegar a tasas de deposición de más de 10 kg/h, lo que es mucho mayor que las tasa típicas de deposición de los sistemas láser en polvo (típicamente hasta 1 kg/h) siendo el coste de equipo un orden de magnitud menor [Ng, 2009]. Por ello, aunque la resolución geométrica es considerablemente inferior que para el láser, los procesos de aporte por arco son uno de los métodos más económicos para depositar metal en grandes volúmenes. A causa de ello, la tecnología WAAM es especialmente adecuada para piezas de tamaño grande con complejidad media.

Por último, en este tipo de técnicas (LMD y WAAM), al contrario que las anteriores de cama de polvo, no suelen ser soluciones cerradas, sino que se trata de tecnologías que pueden ser instaladas en máquinas o robots comerciales, constituyendo soluciones mucho más abiertas (Figura II-25).



Figura II-25. Procesos de fabricación aditiva. Izq, SLM. Centro, LMD. Dcha, WAAM.

En la Tabla II-10 se recoge una comparativa de las principales características de cada tecnología:

Tabla II-10. Comparativa de los procesos de fabricación aditiva [Thijs, 2010; Yadroitsev, 2011]

	Lecho de polvo (EBM, SLM)	Aporte directo por LMD	Aporte directo por WAAM
Precisión	Alta (Aprox $\pm 20\mu\text{m}$)	Media (Aprox $\pm 0,2\text{mm}$)	Media (Aprox $\pm 0,2\text{mm}$)
Rugosidad	$>2.5\mu\text{mRa}$	$>10\mu\text{mRa}$	$>10\mu\text{mRa}$
Integridad estructural	Alta: Cámara vacío/atmósfera protegida	Alta: Atmósfera protegida	Alta: Atmósfera protegida
Productividad	Baja. $\sim 0,2\text{kg/h}$	Alta. En acero: $\sim 0,5\text{kg/h}$	Alta. En acero: $\sim 10\text{kg/h}$
Tamaño de pieza	Limitado por el espacio de trabajo del equipo. (max 400x400x400mm)	Grande, limitado únicamente por el alcance de la máquina.	Grande, limitado únicamente por el alcance de la máquina.
Complejidad geométrica	Alta. Ej: Diseños biónicos	Media.	Baja
Aplicación industrial	Fabricación directa de piezas	Reparación de piezas Recubrimiento. Fabricación de estructuras complejas sobre piezas	Reparación de piezas Recubrimientos Fabricación de estructuras semi-complejas sobre sustratos
Reparación y fabricación combinada	No es adecuado para depositar material sobre piezas previamente fabricadas	Es posible fabricar partes en piezas dañadas o fabricadas por otros procesos.	Es posible fabricar partes en piezas dañadas o fabricadas por otros procesos.
Coste materia prima	Muy Alto	Alto	Bajo

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III: PUESTA A PUNTO DEL PROCESO PAW

1. Introducción

Este capítulo se centra en la integración y puesta a punto del equipo de soldadura PAW en una máquina gantry. Se ha llevado a cabo la integración de los equipos hardware necesarios y se han realizado las modificaciones de control oportunas para asegurar el correcto funcionamiento del proceso. Una vez validada la integración se ha realizado el estudio en una aleación de titanio y otra base níquel, tal y como se muestra en la Figura III-1.

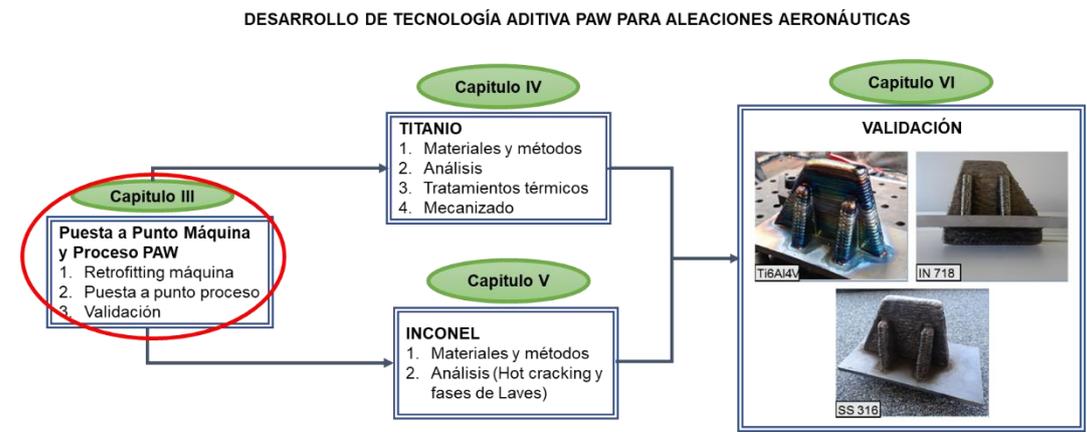


Figura III-1. Metodología experimental desarrollada

En este capítulo se detalla la integración del equipo plasma EWM Tetrix 400 en una máquina Gantry de diseño y fabricación propias de Tecnalía, desde la fase de diseño hasta la validación de esta. La fabricación aditiva WAAM no requiere de sistemas de máquina con una precisión muy alta y por tanto, un robot por ejemplo podría valer, sin embargo, para este Desarrollo inicial se ha optado por una estructura de máquina más robusta porque nos permite tener un mayor control sobre la cinemática del proceso y así poder realizar un estudio más fiable.

Uno de los mayores desafíos de los sistemas WAAM son los algoritmos de control necesarios para asegurar que la geometría depositada se ajuste a la geometría requerida con la integridad estructural esperada. Por esto, se necesitan sistemas de monitorización específicos para controlar tanto los parámetros del proceso como la geometría depositada con el fin de evitar defectos. La solución descrita en este capítulo engloba la máquina y equipo de soldadura PAW, así como el control de máquina introduciendo posibilidades especialmente desarrolladas para la fabricación aditiva mediante arco e hilo y sistemas de monitorización para obtener una trazabilidad completa de las piezas fabricadas y asegurar así que han sido depositadas sin errores. Además, los sistemas de monitorización ayudan a mejorar la eficiencia del proceso pudiendo

ajustar mejor los parámetros y tiempos de éste, algo que también se detallará en este trabajo.

Se presenta en este capítulo también la validación del sistema desarrollado.

Cabe destacar que, aunque se ha demostrado la viabilidad de fabricar piezas de alto valor añadido mediante fabricación aditiva, esta tecnología aún no se ha industrializado totalmente debido a la falta de fabricantes de máquinas que ofrezcan una solución completa.

2. Retrofitting de una máquina Gantry para fabricación aditiva

Se ha llevado a cabo la integración de un sistema de arco plásmico e hilo en una máquina gantry para la fabricación aditiva, para lo que se han diseñado varios componentes, protocolos específicos y se han implementado sistemas de monitorización y control online. Además, para la validación de la integración se han fabricado una serie de demostradores.

2.1. Estructura de la máquina Gantry

El equipo hardware puede dividirse en dos grupos: por un lado, la máquina seleccionada y todos sus componentes y, por otro lado, el equipo de soldadura que engloba no solo el propio equipo, sino también la antorcha, el suministrador de hilo, etc.

Se ha utilizado una máquina de 5 ejes de diseño y fabricación propias de Tecnia (Figura III-2) con un control Siemens 840D.

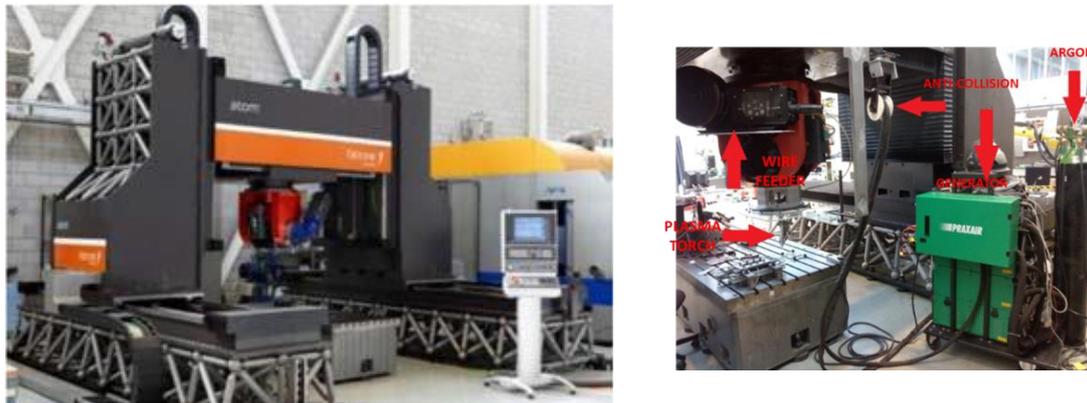


Figura III-2. Máquina gantry de diseño propio en la que se ha integrado el sistema WAAM

Los equipos que componen un sistema de soldadura por arco e hilo son los siguientes:

- Generador plasma: se utiliza un generador de plasma EWM Tetrax 400 para la generación del arco plasmático. Este equipo plasma se comunica con la máquina mediante una placa controladores RintX11.
- Antorcha plasma: Este dispositivo genera un flujo directo de plasma, se ha utilizado una antorcha Abiplas Weld 250 MT con un direccionador de hilo tal y como se muestra en la Figura III-3. Esta antorcha permite la utilización de diferentes boquillas, en el presente estudio se utiliza una boquilla de 4mm con un electrodo de tungsteno al 1% de lantano de 4x130mm.

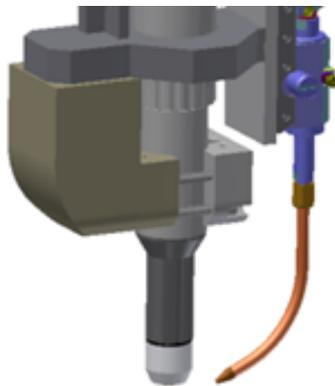


Figura III-3. Antorcha de plasma con direccionador de hilo.

- Alimentador de hilo: dispositivo que suministra el hilo a la antorcha mediante rodillos mecánicos.
- Cámara de atmósfera protectora (Figura III-4): diseñada y fabricada por Tecnalía, se trata de un depósito en el que se fabricarán las piezas de materiales sensibles a la presencia de oxígeno.

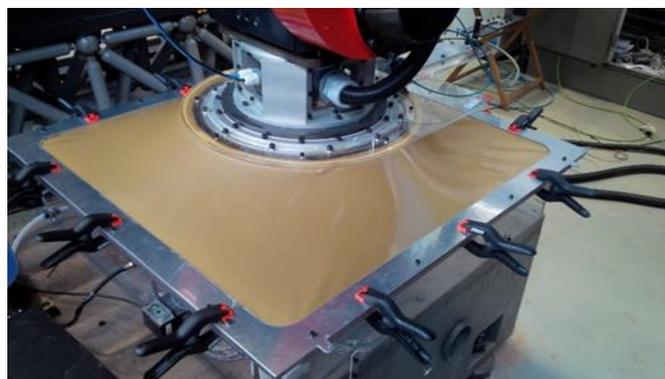


Figura III-4. Cámara de atmósfera protectora para depositar materiales reactivos.

Se lleva a cabo además la integración en máquina de los sensores externos al proceso para poder llevar a cabo la monitorización completa del proceso.

Se ha seleccionado e implementado en máquina un pirómetro OPTRIS 3MH3 (Figura III-5) con una modificación que en lugar de tener un rango inferior de 350°C y un límite superior de 1800°C como tiene el pirómetro comercial, tiene un límite inferior de 250° y el superior es igual.



Figura III-5. Pirómetro instalado en máquina para el control de la temperatura y sus especificaciones.

Se ha incorporado también en la máquina una cámara de visión de soldadura MC500S (Figura III-6) para visualizar el proceso WAAM en tiempo real. Además, se dispone de un dispositivo para poder grabar las imágenes mostradas por pantalla.

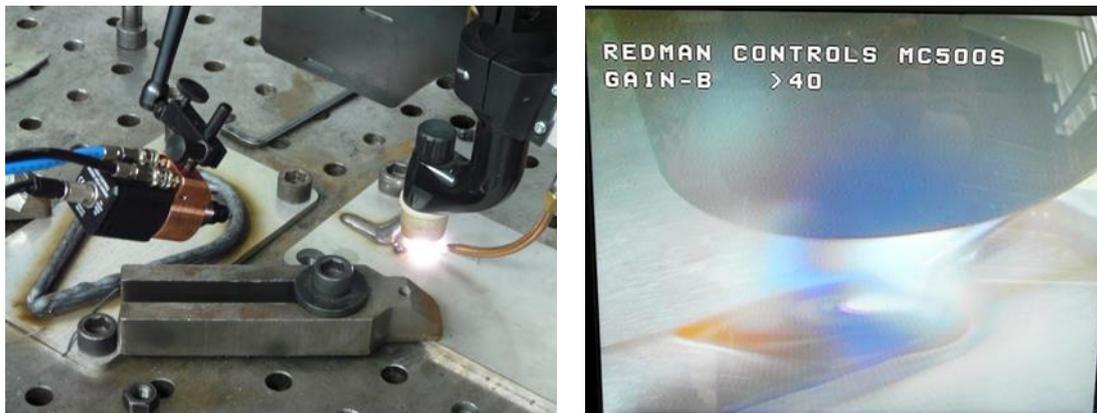


Figura III-6. Cámara de soldadura instalada en robot e imagen que se obtiene de la misma

Se selecciona también para su instalación en máquina un láser escáner Q4-80 con láser azul de 405nm de Queltech (Figura III-7) para el escaneado de la geometría del cordón depositado en cada pasada, lo que permite un control adaptativo tanto para la altura como para los solapes.



Figura III-7. Escaner laser instalado en máquina y perfil tipo que se obtiene de un cordón depositado

El escáner laser se encuentra instalado en el cabezal de la máquina, lo que permite realizar una pasada de escaneo tras la pasada de aporte, midiendo la geometría depositada y permitiendo la realización de correcciones para la siguiente pasada.

El láser requiere de un sistema de enfriamiento para que no se produzca un sobrecalentamiento que pueda conllevar la rotura de este.

Durante la producción de piezas de materiales reactivos es muy importante controlar que el nivel de oxígeno en la atmósfera de argón generada se encuentre en niveles mínimos. Por tanto, es muy importante la presencia de un medidor de oxígeno en el sistema.

Se ha optado por un medidor de oxígeno Rapidox 2100 Oxygen Analyser XV12 con las siguientes características que se muestran en la Figura III-8.



O ₂ Zirconia Sensor	10E-20ppm to 100%
H ₂ O Sensor	-100°C to +20°C dp. Supplied on a 2m cable with sample chamber
Pressure Sensor	0-5 and 0-10 bar gauge standard. Supplied on a 2m cable. Other ranges available
Thermocouple	Type K, range 0-1250°C, ±1°C
Sensor connections	Front or rear connections available
Gas connections	4mm ID / 6mm OD nipple type Other connections available
Warm-up time	3-5 minutes at 20°C
Housing temperature	150°C to 200°C
Sensor Cable	2m high temperature, PVC sheathed cable Fully shielded with a quick release plug Other lengths are available
Voltage outputs	0-5V linear, user programmable
Digital outputs	RS232 (RS485 option available): data streamed on demand
Current outputs	4-20mA linear, user programmable
Max gas temperature	600°C
Max gas inlet pressure	10 Bar gauge (200 bar burst pressure)
Min working pressure	Vacuum tight down 10E-4 Torr in helium
Operating temperature	5°C to 35°C
Display	16 x 2 character (9mm) back-lit LCD
Voltage	90-260VAC, 50/60Hz
Analyser dimensions	Bench: 150mm(H) x 263mm(W) x 250mm(D) Panel: 300 x 4µ (177mm(H) x 300mm(W)) Wall: 260mm(H) x 314mm(W) x 129mm(D)
Weight	4kg (Including sensor)

Figura III-8. Medidor de oxígeno seleccionado y especificaciones del mismo

2.2. Comunicación

Una vez instalado el hardware es necesario implementar el lenguaje necesario para poder llevar a cabo el proceso de soldadura desde el CNC y la monitorización tanto de los sensores externos como de las señales de máquina y del equipo de soldadura.

Para poder controlar el equipo PAW desde el CNC es necesario programar unos bloques en AWL (Anweisungs-Liste, lenguaje de lista de instrucciones), de Step 7, que es el utilizado para programar en los controles Siemens. Se generan dos bloques, uno para la comunicación entre el PLC y el CNC y poder así leer variables y otro para manejar directamente el módulo de plasma.

Mediante el segundo bloque programado se podrán controlar las siguientes funciones del módulo de plasma:

- Iniciar / finalizar soldadura: M50 / M60
- Activar / desactivar rinx11: M51 / M61
- Activar / desactivar selección de tarea: M56 / M66
- Elegir tarea: tarea= 0 => 256
- Elegir programa: programa = 0 => 256
- Modo de soldadura: Estándar, M67; a pulsos, M57
- Activar / desactivar avance hilo: M54 / M64
- Activar / desactivar retroceso hilo: M55 / M65

La monitorización del proceso se lleva a cabo mediante un sistema de control de lazo abierto. Para ello se han instalado varios sensores externos: pirómetro, cámara de soldadura, láser escáner y medidor de oxígeno (Figura III-9). Asimismo, se ha implementado una aplicación de Java para gestionar los dispositivos. Además, se recogen otras señales internas de la máquina: intensidad, voltaje, posiciones de los ejes de la máquina (tanto relativos como absolutos) y velocidad de avance.

Las correcciones de altura se utilizan, para asegurar la misma distancia teórica establecida entre la pieza y la antorcha. Para ello, la aplicación manda correcciones al eje z de la máquina utilizando las mediciones sobre la anterior capa obtenidas por el láser escáner.

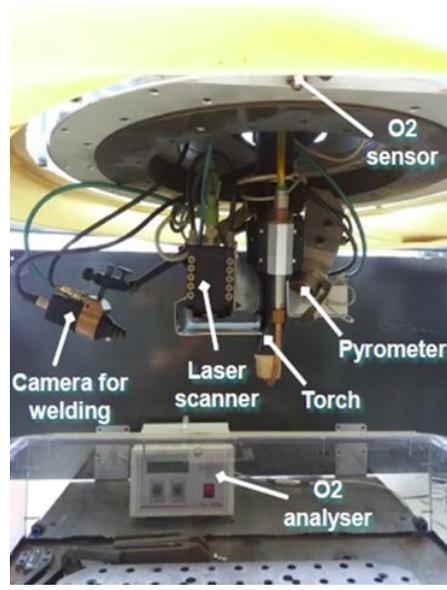


Figura III-9. Imagen del cabezal con los sensores descritos instalados

Protocolo de comunicación

Para que la máquina Atom y la aplicación de monitorización puedan comunicarse, se ha establecido un protocolo de comunicación entre ambos sistemas (Figura III-10). La máquina Atom antes de hacer cualquier operación, pide permiso a la aplicación de monitorización y queda a la espera de que ésta se lo dé. Cuando la aplicación le da el visto bueno la máquina comienza la operación.

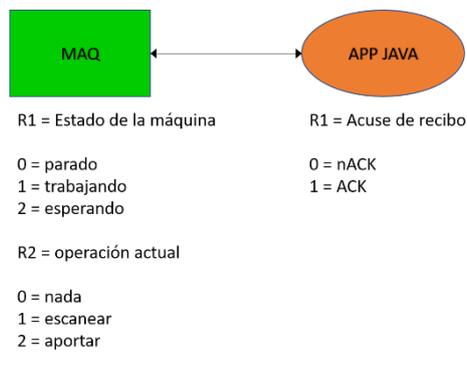


Figura III-10. Esquema del protocolo de comunicación entre máquina y aplicación de Java

También existen otros protocolos de comunicación entre los siguientes dispositivos:

- Aplicación y láser: mediante esta comunicación la aplicación controla el láser y proporciona mediciones al ordenador.
- Láser y máquina: se garantiza la correspondencia entre las mediciones del láser y ejes de la máquina.

- Máquina y plasma: sirve para controlar la antorcha y para leer las señales que le devuelve el plasma y mandarlas al ordenador.

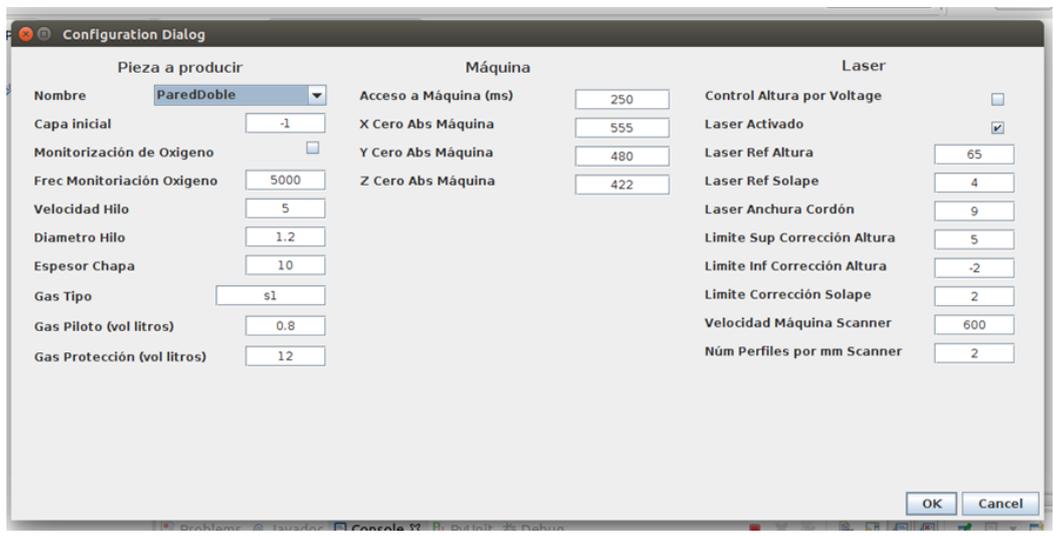


Figura III-11. Ventana de configuración inicial de la base de datos

La Figura III-11 muestra la imagen de configuración donde se definen los parámetros del proceso de fabricación. Como se puede apreciar, hay varias secciones: la “pieza a producir” donde se define la pieza, si la monitorización del oxígeno está activada o no y distintos parámetros (velocidad y diámetro del hilo, tipo del gas, etc.); “máquina” donde se definen la frecuencia de acceso a la máquina y los ceros relativos en valores absolutos; “laser” donde se definen los parámetros de medición por laser a emplear durante el proceso como si se usará el láser o voltaje para corregir la altura, los valores de referencia para las correcciones, los límites de las correcciones que se enviarán a la máquina, etc.

2.3. Control

La máquina gestiona dos tipos de control de altura, utilizando un sensor externo (láser) y el voltaje. El objetivo de ambos sistemas es corregir la altura (eje z de la máquina) en cada deposición. De esta manera, la altura se va ajustando para cada capa y cordón manteniendo una distancia constante de 7 mm entre la antorcha y la pieza. Además, se han implementado otros tipos de control, como el control de la geometría por medio del láser y la estrategia rampa, así como el control de energía que se explican a continuación.

2.3.1. Control de altura por láser

Este sistema de control se basa en las mediciones realizadas por el láser. Antes de depositar el material, se realiza el escaneado y con esa nube de puntos, el PC realiza los cálculos para que en la siguiente capa la distancia de trabajo se

mantenga constante. Esto hace que el PC pase las correcciones a la máquina y el eje z se vaya modificando en vez de mantenerse toda la capa en una cota fija. Este sistema se puede utilizar bien para trabajar en modo digital (con los parámetros proporcionados por la empresa suministradora del equipo de plasma) y para trabajar en modo analógico. Este sistema se suele utilizar para caracterizar la pieza, por toda la información geométrica que devuelve el láser. De todas formas, se podría fabricar una pieza entera con este sistema.

2.3.2. Control de altura por voltaje

El objetivo de este sistema de control es el mismo que el anterior, pero en este caso no existe ningún dispositivo externo que realice las mediciones. Las modificaciones en la altura respecto a la cota fija de la capa se realizan utilizando un valor de voltaje comandado. La máquina va corrigiendo la altura en z para que el voltaje en cada instante sea igual o muy parecido al valor predefinido. Para definir dicho valor se utiliza el voltaje resultante de esa capa que se ha obtenido de la caracterización de la pieza.

Este sistema se utiliza para trabajar en modo analógico, es decir, los diferentes parámetros llegan a la máquina desde el PC utilizando un histórico de valores, aunque se podría utilizar en modo digital. En la Figura III-12 (b), se muestran señales adquiridas de voltaje durante la fabricación de una pieza utilizando el control de voltaje y se observa que los valores son muy cercanos a los valores comandados para los cordones 0, 1 y 2 han sido respectivamente: 23.4 V, 23.7 V y 23.45 V.

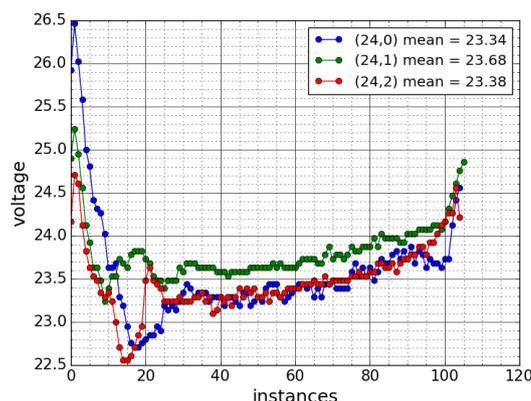


Figura III-12. Señal de voltaje adquirido durante la fabricación de una pieza mediante control de voltaje.

2.3.3. Control de geometría

Este sistema de control se utiliza para caracterizar el material y asegurar que se obtiene la geometría deseada. Durante el proceso de la caracterización de la pieza, se miden la anchura y la altura del cordón para calcular el ángulo de mojado. Para el cálculo de la altura y anchura se utilizan las mediciones realizadas por el láser.

Estos valores se utilizan como criterios metodológicos: mantener la anchura del cordón en las capas consecutivas y que el ángulo de mojado sea en torno a 30° .

Además, este sistema permite mejorar la geometría del cordón en los inicios y finales para evitar caídas del material. De esta manera, se reduce la curvatura en los extremos de los cordones reduciendo la diferencia de altura respecto de la zona central y se evita tener que depositar más material. La geometría de los extremos se controlará con la estrategia rampa.

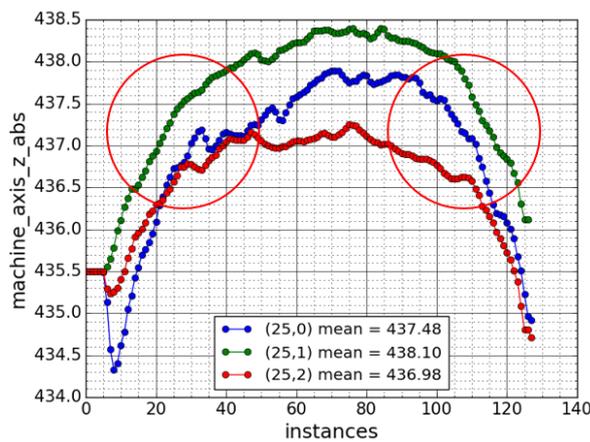


Figura III-13. Eje z de la máquina donde se pueden apreciar redondeos en los inicios y finales

2.3.4. Estrategia rampa

Esta estrategia se utiliza para emplear menos energía en los extremos del cordón. Así se evitan los excesos y faltas de material que se dan en los inicios y finales. Se utiliza un porcentaje de la intensidad comandada al inicio y se incrementa hasta llegar al valor nominal como se observa en la Figura III-14 (a). Para utilizar este sistema es necesario trabajar en modo analógico. El voltaje se controla en ese intervalo utilizando un modelo lineal en función de la intensidad para cada material. En la Figura III-15, se observa la diferencia de altura entre los inicios y finales respecto a la zona central en dos pruebas realizadas sin y con estrategia de rampa respectivamente. En la figura de la izquierda la curvatura es mayor que en la derecha y, además, para la misma capa la altura que ha alcanzado la pared de la derecha es mucho mayor que la de la izquierda.

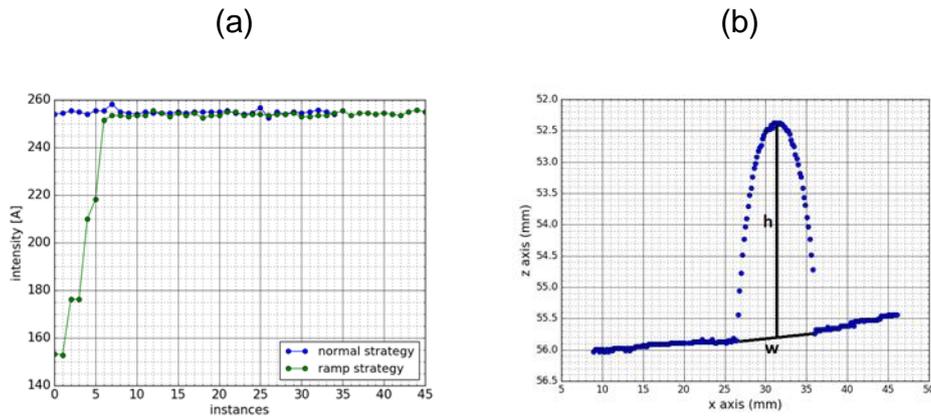


Figura III-14. (a) Señales de intensidad de dos paredes. En azul sin la estrategia de rampa y en verde con estrategia de rampa.

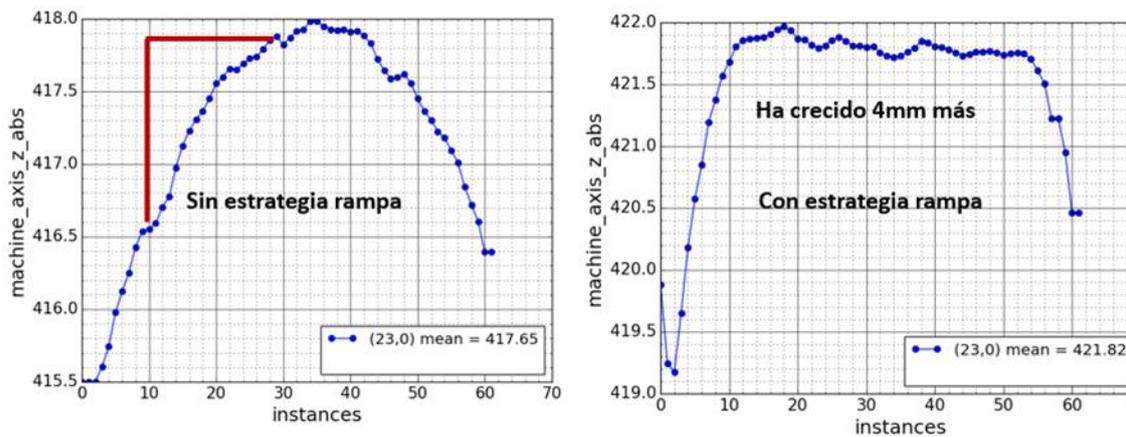


Figura III-15. Imágenes del eje z de máquina en dos paredes fabricadas con y sin estrategia de rampa.

2.3.5. Control de energía

El control de energía se utiliza para mantener constante la energía cuando hay cambios en la velocidad de avance. Estos cambios ocurren cuando hay curvaturas en la geometría (en el caso de Atom cuando el radio de la curva es menor de 15 mm, pero dependerá de la cinemática de cada máquina). La energía se mantendrá cambiando la intensidad respecto a la velocidad de avance real y energía que se quiera mantener.

La energía se calcula utilizando las variables que recibe la máquina del histórico siguiendo la Ecuación 1:

$$E = \frac{V \times I}{V_f} \quad (1)$$

Donde E es la energía (J/mm), V el voltaje (V), I la intensidad (A) y V_f la velocidad de avance (mm/s).

La intensidad actual se va a calcular utilizando la Ecuación 2 donde la relación de voltaje intensidad es la siguiente: $V_{actual} = a + b I$

$$I = \frac{V_f_{actual} \times E}{V_{actual}} \quad (2)$$

Reemplazando la relación de voltaje actual e intensidad en la Ecuación 2 y despejando la intensidad I , se obtiene lo siguiente:

$$I = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4b \times V_f \times E}}{2b}$$

Para mantener la velocidad de hilo constante, se utiliza la siguiente fórmula:

$$hilo_{actual} = \frac{hilo}{V_f} \times V_f_{actual}$$

En la Figura III-16, se observa como bajan los valores de velocidad de avance, intensidad y voltaje en una prueba realizada utilizando el control de energía.

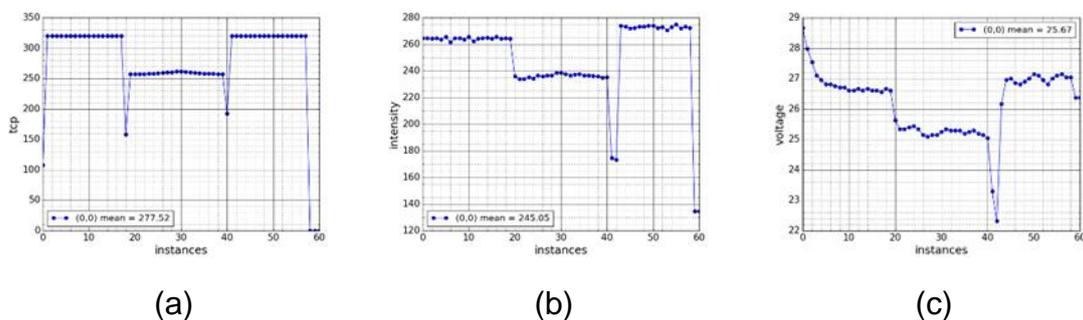


Figura III-16. (a) Velocidad de avance; (b) intensidad y (c) voltaje.

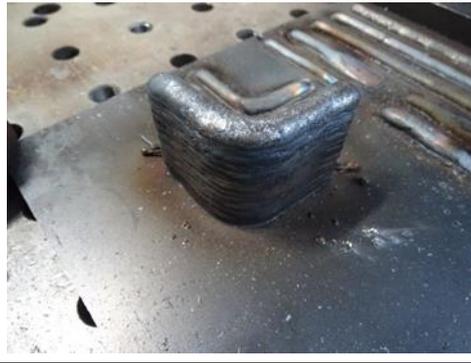


Figura III-17. Pieza generada utilizando control de energía

Las constantes a y b se ajustan para cada material teniendo en cuenta experimentaciones de ajuste de parámetros y medición de anchura y altura del material depositado. Los valores se escribirán en el CNC antes de fabricar la pieza en las variables de usuario R_{19} y R_{20} respectivamente.

3. Validación del sistema

Se lleva a cabo la validación del sistema de aporte PAW desarrollado mediante la realización de diferentes geometrías en distintas aleaciones metálicas, que permiten determinar que la integración en máquina del equipo, los equipos de monitorización y de las estrategias de control se ha completado y permite llevar a cabo la fabricación aditiva de piezas metálicas de una forma fiable y con una trazabilidad de éstas.

En primer lugar, se comprueba el funcionamiento de la cámara para generar atmósferas inertes. Se realizan llenados en vacío de la misma para comprobar que no hay fugas y se simula la fabricación de piezas para comprobar que los movimientos de máquina no afectan a la atmósfera generada. Así se comprueba que los movimientos rápidos y bruscos aumentan la cantidad de oxígeno en la cámara debido a la brusca modificación del volumen de la cámara (Figura III-18), por tanto, hay que tener esto en cuenta durante la fabricación de piezas que requieran atmósfera protegida y las posiciones de retirada de herramienta y los movimientos en vacío deberán realizarse a menores distancias y con menor velocidad. Si se actúa de esta forma, se comprueba que el nivel de oxígeno permanece por debajo de 100ppm durante todo el proceso (Figura III-19).

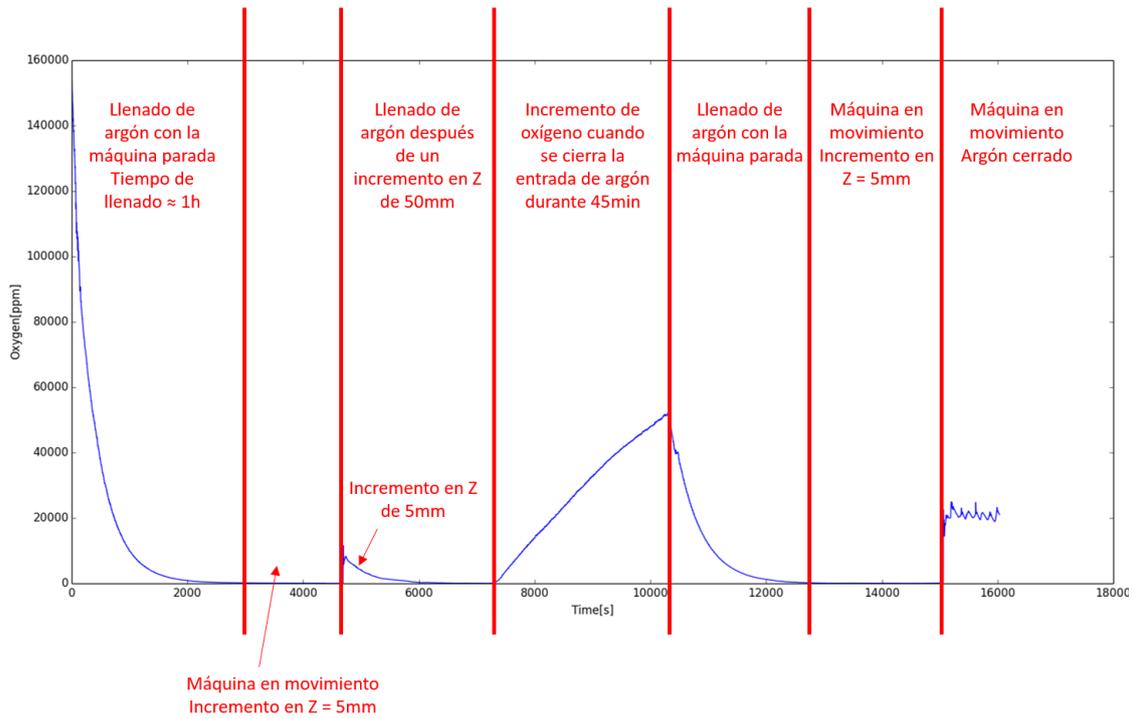


Figura III-18. Visualización de la monitorización del oxígeno durante un llenado en vacío de la cámara realizando un programa pieza

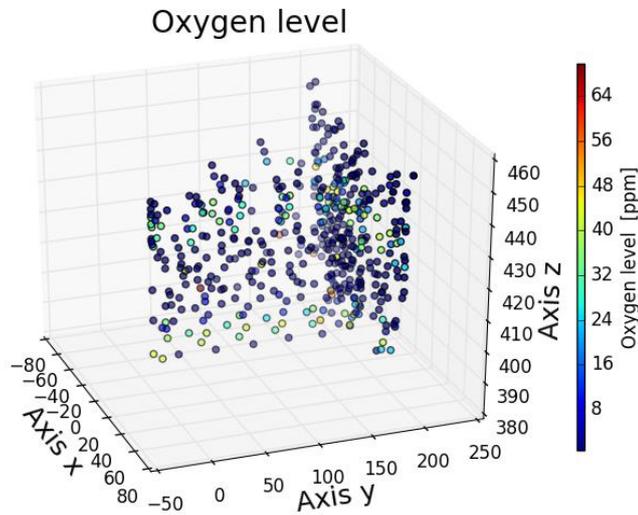


Figura III-19. Valores de oxígeno durante un programa pieza ajustando velocidades y posiciones de movimientos en vacío.

Se realiza una pared simple para comprobar que el sistema de monitorización funciona (Figura III-20). Se comprueban las señales del equipo de soldadura como son la intensidad, y el voltaje que se encuentran sincronizados con las señales de máquina y por esto, se pueden obtener gráficos 3D de las geometrías realizadas en los que se visualiza el valor en cada instante de los parámetros reales de soldadura (Figura III-21 (a) y (b)). También se encuentran

sincronizados con los datos de la máquina y del equipo de soldadura, las señales recogidas de los equipos de monitorización externos, pudiendo graficar mediante la señal del pirómetro la temperatura del material justo tras su deposición en cada instante (Figura III-21 (c)).

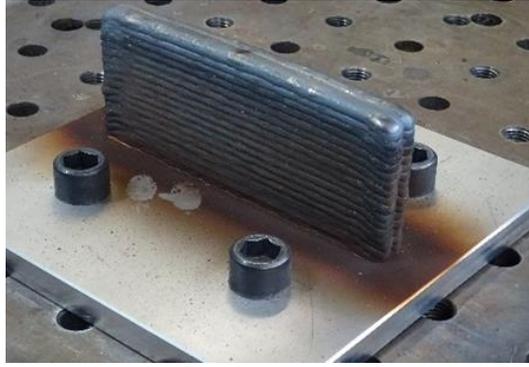


Figura III-20. Imagen de una pared doble fabricada en acero 316L en la máquina ATOM

En la Figura III-21 se muestran los datos recogidos durante la deposición de una pared de acero AISI316L.

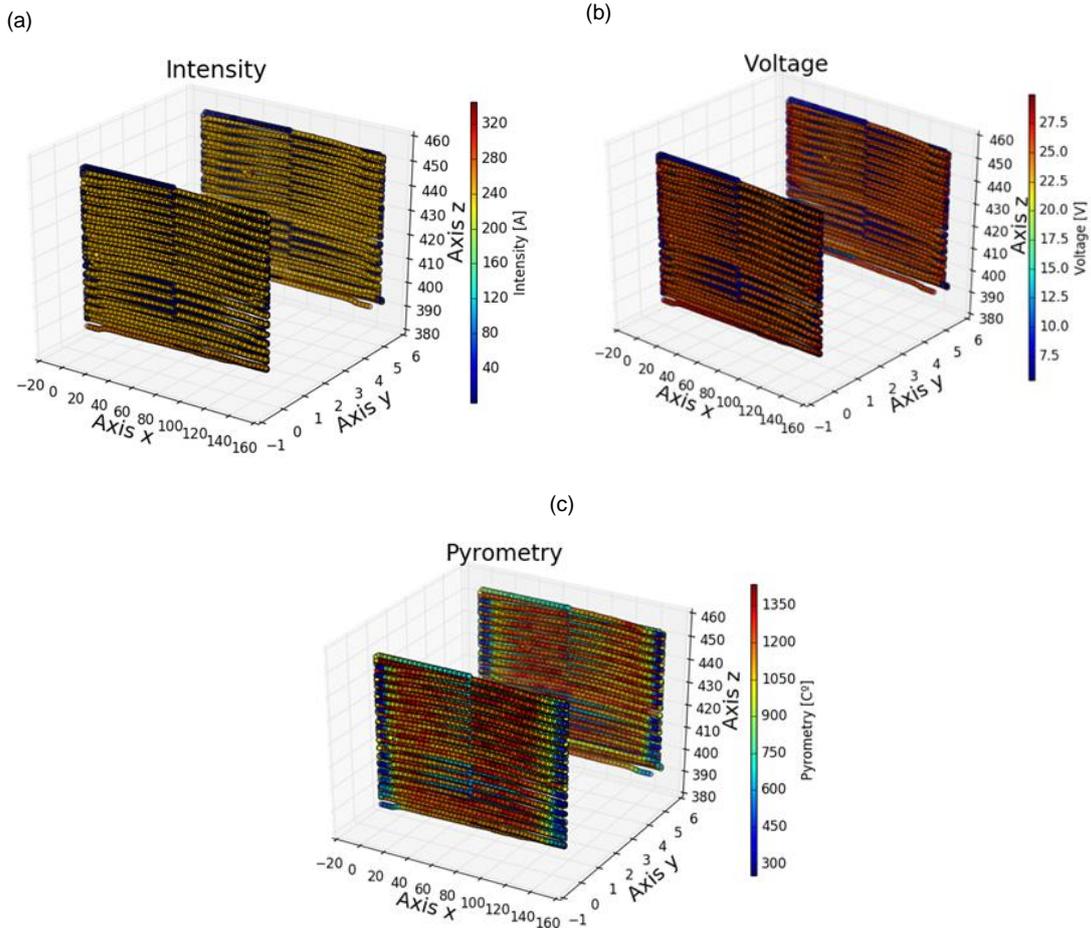


Figura III-21. Reconstrucción 3D de la pared doble fabricada en la que se puede visualizar en color los valores de intensidad, voltaje y temperatura.

Además, durante la deposición de la pared se llevan a cabo escaneos láser tras la deposición de cada cordón para comprobar la adquisición y el tratamiento de las señales recogidas. En la Figura III-22 se muestran los escaneos de algunos de los perfiles del primer cordón y las mediciones correspondientes de altura y anchura de éstos.

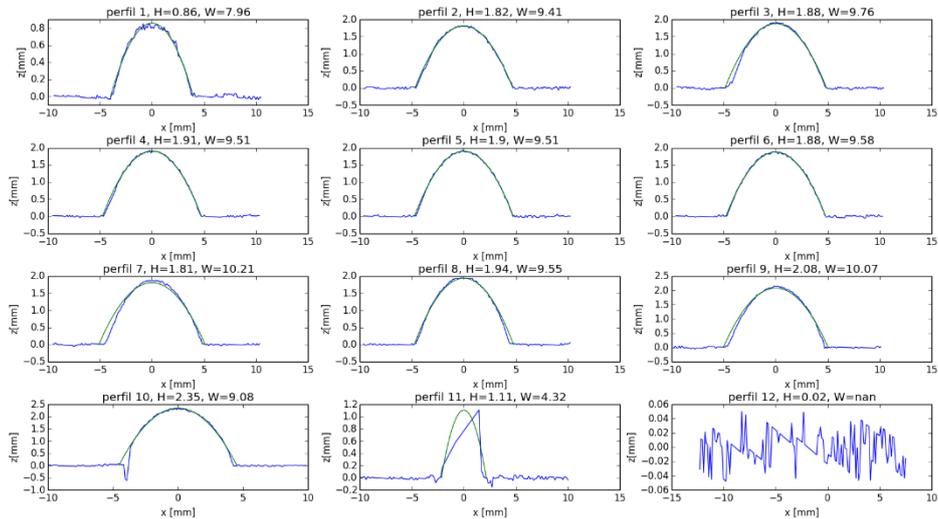


Figura III-22. Escaneado láser del primer cordón de la pared depositada para validar adquisición del escáner y su validez para medir anchura y altura.

En la Figura III-23 se muestra un demostrador en T compuesto por 2 cordones, realizado en acero AISI 316L utilizando la estrategia en rampa.



Figura III-23. Demostrador en T en acero con estrategia rampa en inicio y finales.

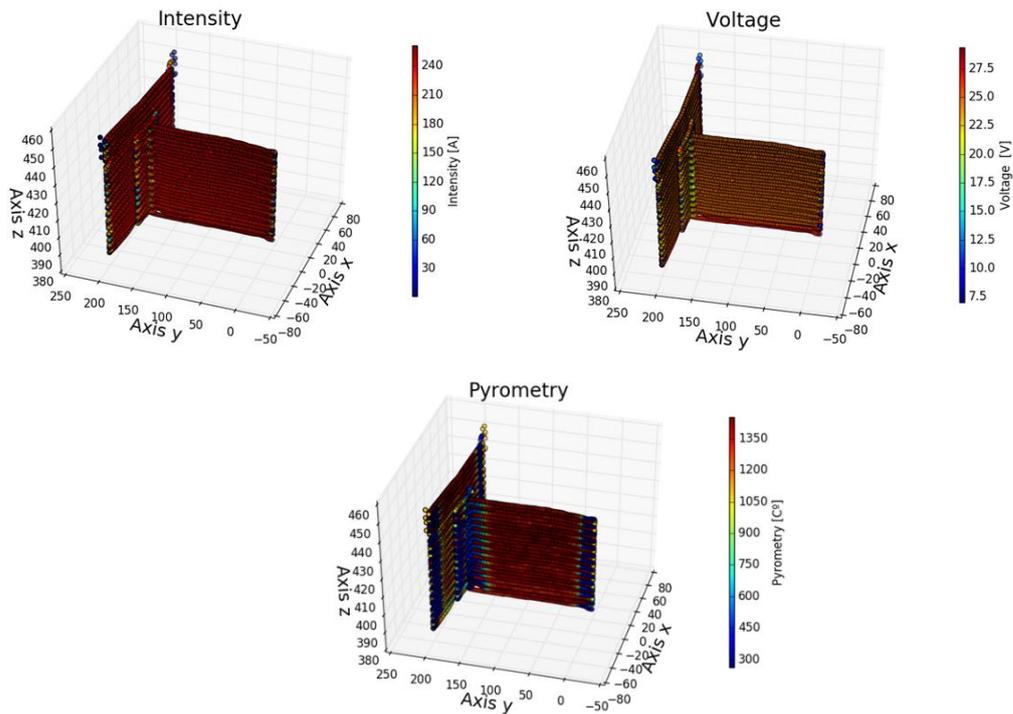


Figura III-24. Señales de monitorización de intensidad, voltaje y temperatura durante la deposición del demostrador en T

En la Figura III-25 se muestran las imágenes de un demostrador en esquina realizado con la estrategia de control de energía y además, cuya geometría incluye una pared inclinada.

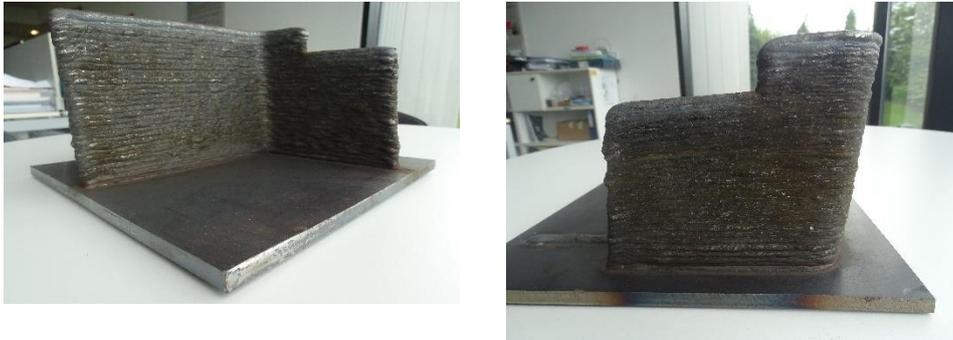


Figura III-25. Demostrador en acero AISI 316L con estrategia de control de energía

En la Figura III-26 se muestra una pieza realizada para validar el control de altura. En las imágenes de puede observar la geometría obtenida, en la que se observa que se mantiene una geometría constante en toda la pieza.



Figura III-26. Pieza fabricada en acero para validar el control de altura.

En la Figura III-27 se muestra un demostrador realizado en acero 316L de un herraje aeronáutico que posteriormente, con la puesta a punto del Ti6Al4V y del Inconel 718 se llevará a cabo en los tres materiales.

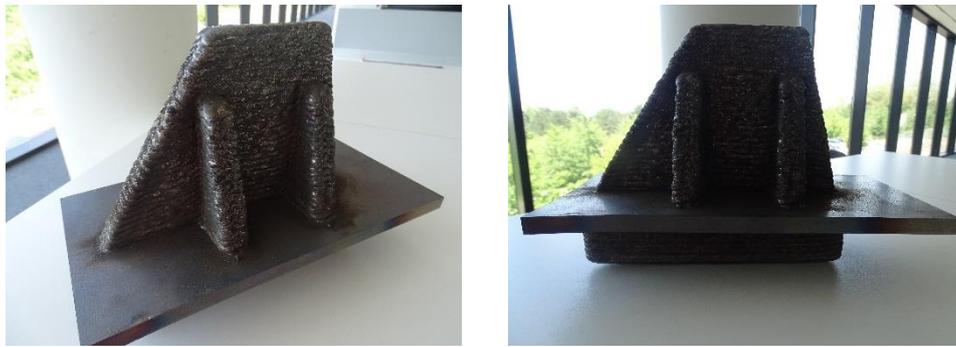


Figura III-27. Demostrador de herraje aeronáutico en acero AISI316L

4. Conclusiones

Las siguientes conclusiones pueden extraerse del trabajo realizado:

1. Se ha llevado a cabo la integración del equipo de soldadura PAW en una máquina gantry de 5 ejes con todo lo que conlleva (hardware, comunicación, control...) obteniendo así un sistema fiable para la deposición mediante plasma e hilo de piezas de cualquier material.
2. Se han implementado en máquina un conjunto de sensores, sistemas de monitorización y recogida de datos y elementos de control en base a estos sensores que permiten la deposición fiable y trazable de piezas de una manera semiautomática.
3. Se ha llevado a cabo la implementación de estrategias de control que permiten solventar problemas de la propia tecnología de plasma e hilo para la fabricación aditiva como son el control mediante rampas y el control de energías, así como el control de altura.

4. Se ha llevado a cabo la validación de toda la implementación en piezas de distintas geometrías en distintas aleaciones metálicas.

Todos estos resultados han sido publicados en el siguiente artículo: [Artaza, 2017].

CAPÍTULO IV

Capítulo sujeto a confidencialidad por la autora

CAPÍTULO V

El capítulo está sujeto a confidencialidad por la autora

CAPÍTULO VI

CAPÍTULO VI: VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UN DEMOSTRADOR AERONÁUTICO

1. Introducción

En este capítulo se fabrica un herraje aeronáutico para demostrar la viabilidad del desarrollo realizado a modo de validación de la metodología propuesta. Se obtendrá una pieza con geometría cuasi final que precisará un mecanizado para conseguir los requisitos de acabado superficial y tolerancias.

DESARROLLO DE TECNOLOGÍA ADITIVA PAW PARA ALEACIONES AERONÁUTICAS

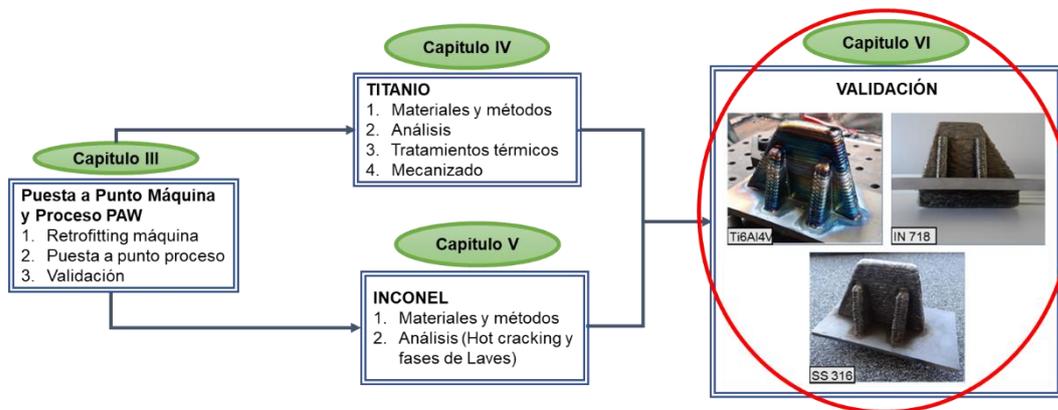


Figura VI-1. Enfoque capítulo VI

Para esto, se ha seleccionado un demostrador, consistente en un herraje aeronáutico y se fabricará mediante tecnología PAW en 3 materiales, acero AISI316L, Ti6Al4V e Inconel 718. El objetivo es validar la tecnología, además, se presentan resultados de tiempos de fabricación de la deposición matricial de varias piezas comparados con la deposición única de pieza, lo que aporta una optimización del tiempo empleado importante.

2. Selección de un demostrador para el sector aeronáutico

Se ha seleccionado un demostrador con una geometría similar a un herraje aeronáutico. En la Figura VI-2 se muestran los pasos seguidos desde el CAD inicial hasta obtener la pieza final. En primer lugar, se ha llevado a cabo un rediseño para abordar las características dimensionales clave. Posteriormente se fabrican los demostradores mediante la tecnología WAAM, concretamente PAW, en la máquina desarrollada, en diferentes materiales, utilizando parámetros previamente testeados. Finalmente, se fresa la pieza para conseguir las dimensiones finales del herraje.



Figura VI-2. Secuencia de fabricación del demostrador mediante PAW

En la Figura VI-3 se muestra el rediseño llevado a cabo enfocado a la fabricación aditiva plasma del herraje aeronáutico propuesto. Se aprecia el diseño original en la parte izquierda de la imagen. La dimensión clave es la marcada en azul en la Figura VI-3, que es donde se localizan los agujeros y donde se ha integrado el sustrato como parte final de la pieza. Se representa en la parte izquierda de la Figura VI-3 el CAD de la pieza con el material extra necesario para el acabado de la pieza fabricada por WAAM. El volumen cúbico total de la geometría fabricada mediante WAAM es de 440cm^3 .

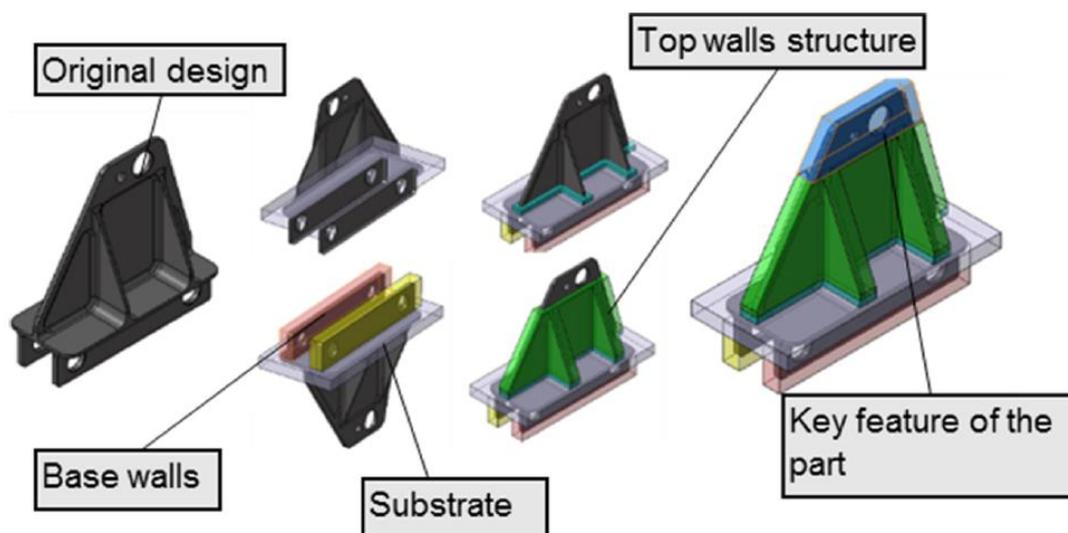


Figura VI-3. Rediseño del herraje aeronáutico para la fabricación aditiva WAAM.

La geometría de este herraje aeronáutico es un ejemplo de los componentes de tamaño medio que se utilizan en el sector aeronáutico. Los tres materiales presentados en este trabajo son viables en función de la criticidad de la pieza y las propiedades mecánicas requeridas.

3. Fabricación del demostrador en Ti6Al4V, INCO 718 y acero SS316

Una vez el diseño CAD de la pieza original se ha modificado y está preparado para la fabricación aditiva, se lleva a cabo la programación CAM. La generación de la trayectoria de la herramienta para los procesos de fabricación aditiva es un tema ampliamente revisado en la literatura [Murua, 2020]. Se utiliza lenguaje ISO para la programación y los parámetros del proceso se introducen desde el CNC para cada uno de los materiales. Para el cambio de material, únicamente se cambia el hilo y se utiliza el mismo programa utilizando los parámetros adecuados para cada material. La máquina procesa la información introducida y ajusta los parámetros de máquina como la velocidad de alimentación, el crecimiento de capa y la distancia de superposición, así como los parámetros de soldadura como la intensidad y la velocidad de hilo.

En la Figura VI-4 se muestran las piezas que se obtienen de la fabricación aditiva mediante arco plasmático e hilo en Ti6Al4V, Inconel 718 y acero AISI316L.

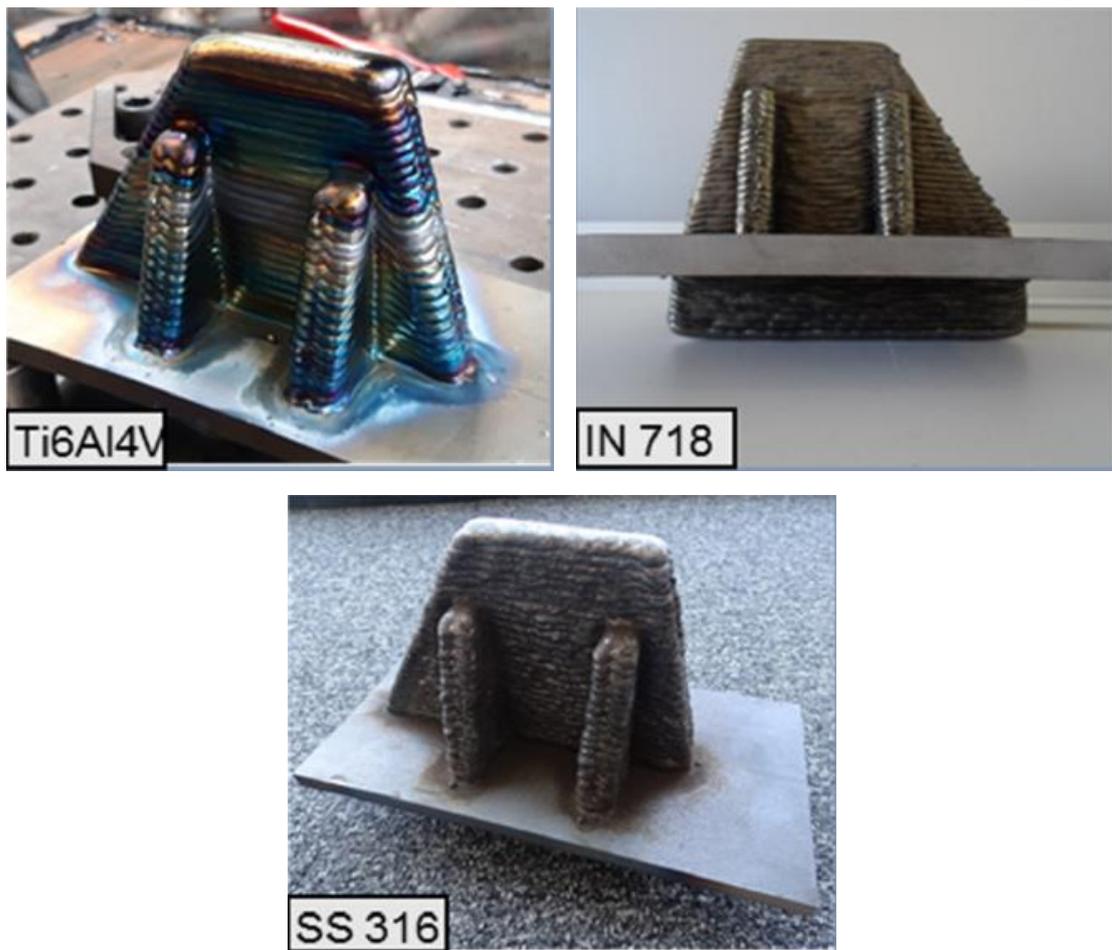


Figura VI-4. Herraje aeronáutico fabricado mediante PAW en diferentes materiales.

En la Tabla VI-1 se muestran los parámetros principales utilizados para la fabricación de los demostradores en los distintos materiales empleados.

Tabla VI-1. Resumen de los parámetros principales para la deposición de los 3 materiales

Material	Wire ref.	Wire Speed [m/min]	Energy [J/mm]
Ti6Al4V	AWS A5.16-13 ERTi-5	7.2	988
Inconel 718	AMS5662	6	1253
Steel SS316	AWS A5.9/A5.9M:2017 ER 316 L Si	5.3	1088

En la Figura VI-5 se puede apreciar el proceso de aporte para la fabricación del demostrador mediante la tecnología PAW. Como se puede observar en la Figura VI-5 (a), en la parte inferior del demostrador se han fabricado las dos paredes simultáneamente. En la primera capa, se ha empezado en el punto 1 y se ha seguido el orden de los números de color naranja. En la segunda capa, en cambio, se ha aportado en dirección opuesta (color verde) para compensar

geométricamente la forma de los cordones. Este proceso se ha repetido hasta completar las dos paredes.

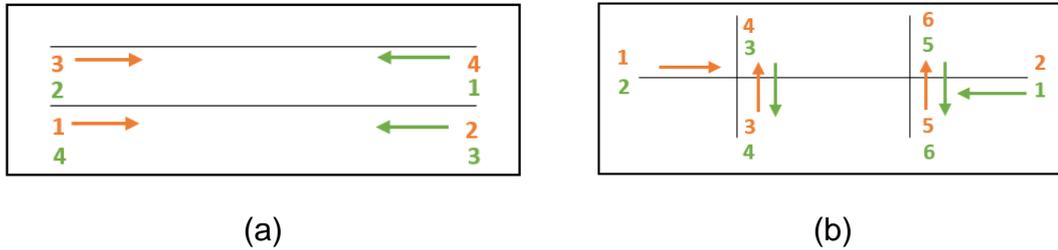


Figura VI-5. Proceso de aporte de la parte inferior (a) y superior (b) del demostrador. Capas pares números naranjas, impares números verdes.

Por otro lado, en la parte superior del demostrador, se han fabricado simultáneamente tanto la pared central como los dos nervios. Para ello, en la primera capa, como se puede observar en la Figura VI-5 (b) se ha seguido el recorrido representado por los números naranjas. En la segunda capa, en cambio, se ha hecho lo mismo, pero en la dirección opuesta siguiendo los números verdes. Este proceso se ha repetido, capa a capa, aportando las capas pares en una dirección y las impares en la opuesta.

En la Tabla VI-2 se presenta un resumen de los tiempos de fabricación de los demostradores en los distintos materiales dividido en tiempo de fabricación aditiva en el que el generador ha estado activo y se ha estado depositando material, tiempo de enfriamiento o tiempo en el que la antorcha no ha estado operativa esperando a que la temperatura del material alcance el valor objetivo para garantizar el correcto crecimiento de la pared en la siguiente capa y el tiempo de posicionamiento que es la suma del tiempo consumido en el movimiento entre diferentes posiciones de inicio. Estos tiempos se han obtenido a partir de las señales internas de la máquina monitorizando el inicio del arco.

Tabla VI-2. Tiempos de fabricación de cada uno de los demostradores en los diferentes materiales

Material	Additive time	Cooling time	Positioning time
Ti6Al4V	1h 17min	1h 5min	0h 28min
Inconel 718	1h 35min	1h 2min	0h 31min
Steel SS316	0h 40min	0h 46min	0h 19min

El ratio de deposición, considerando únicamente el material añadido (additive time), eliminando los tiempos de enfriamiento y de posicionamiento, varía dependiendo del material. El Inconel 718 resulta el material con mayor ratio de deposición (3.33Kg/h), seguido por el SS316 (2.82Kg/h) y por último el titanio (2.16Kg/h). Las diferencias observadas en el tiempo de posicionamiento son debidas a las diferencias en el crecimiento por capa de cada material, ya que en algunos casos se ha requerido un número mayor de capas, como, por ejemplo, en el caso del Inconel 718, para completar la geometría objetivo.

Las condiciones durante la deposición de los demostradores se han monitorizado en todo momento para obtener información de las piezas y detectar errores. Para minimizar los problemas durante la deposición, el control de altura en lazo cerrado está activo y mantendrá la distancia entre la antorcha y la última capa depositada constante. Los datos recogidos consisten en datos de la posición instantánea de máquina (coordenadas X, Y y Z de la antorcha en mm), voltaje (V), corriente (A), velocidad de avance (mm/min), temperatura (°C) y energía (J/mm). Esta recogida de datos permite una trazabilidad completa de la fabricación de cada pieza.

La Figura VI-6 muestra a modo de ejemplo una imagen tridimensional del demostrador con la energía aplicada en cada punto de la deposición del demostrador en Ti6Al4V.

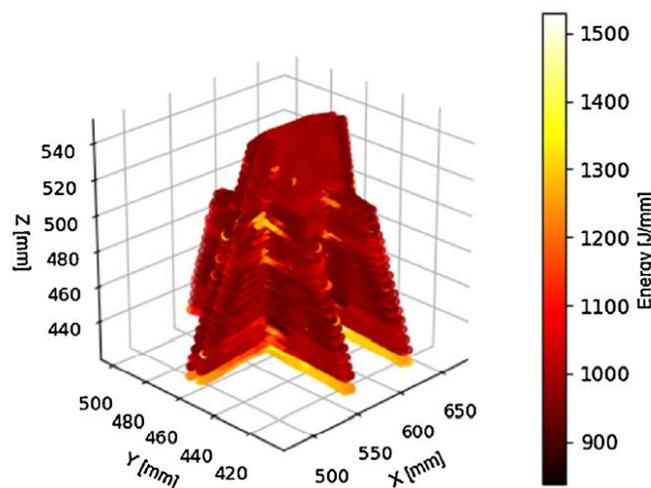


Figura VI-6. Gráfico de la energía aplicada en cada punto de la deposición del demostrador de Ti6Al4V.

Si se selecciona una de las capas del demostrador se puede representar la trayectoria de la antorcha en cada momento tanto para las capas pares como impares.

En la Figura VI-7 se representa la trayectoria de la antorcha y la energía, así como la energía del proceso en función del tiempo para dos capas consecutivas de la deposición del demostrador en Ti6Al4V.

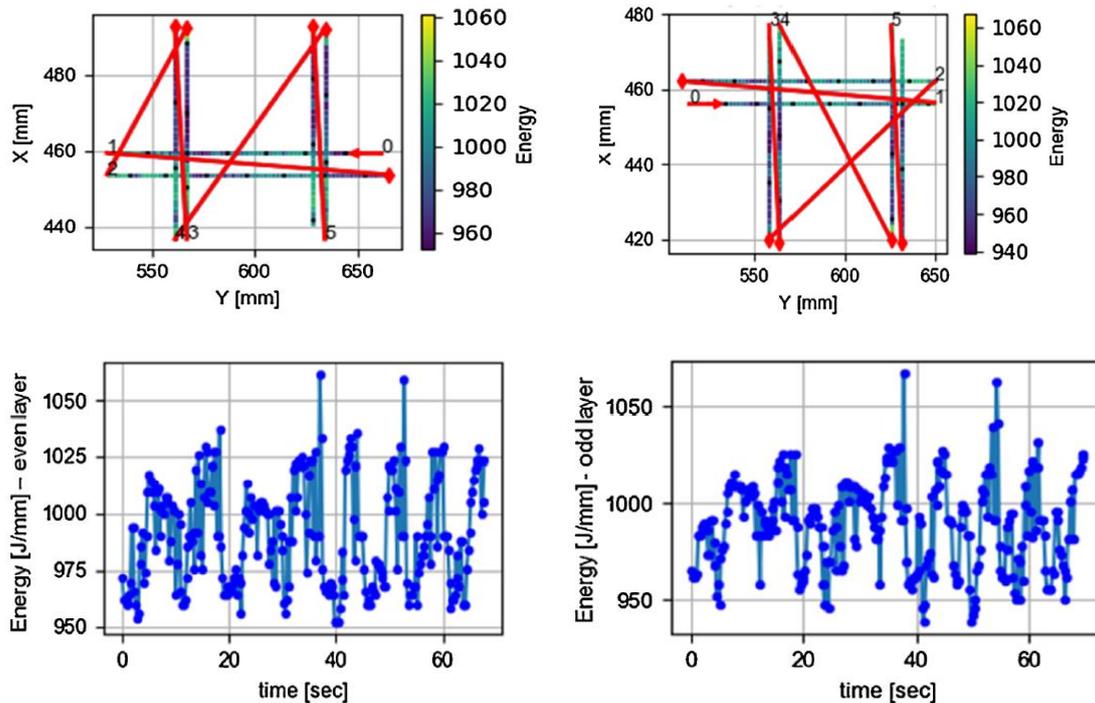


Figura VI-7. Representación de la energía y la posición de la antorcha y la energía en función del tiempo durante dos capas consecutivas del demostrador en Ti6Al4V.

Además, se ha monitorizado la evolución de la cantidad de oxígeno en la cámara. En la Figura VI-8 se muestra el valor temporal de oxígeno presente en la cámara, se asegura que el valor de oxígeno se encuentra por debajo de los 100ppm durante toda la fabricación del demostrador de Ti6Al4V. Este es un punto clave para asegurar la integridad de la pieza. El tiempo de llenado de la atmósfera es de aproximadamente 30 min.

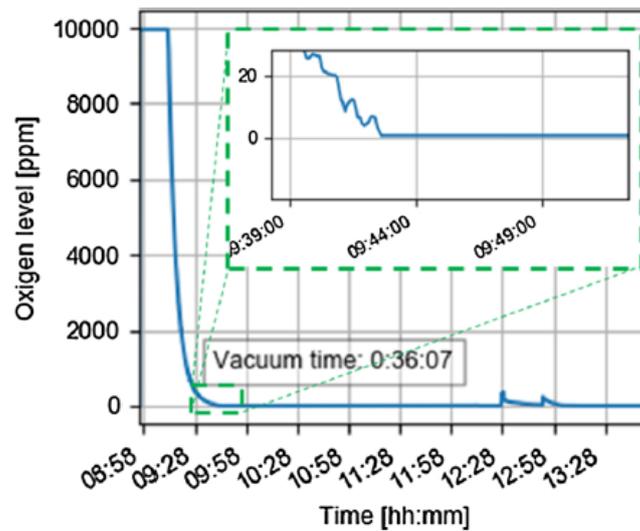


Figura VI-8. Nivel de oxígeno en el entorno de trabajo durante la deposición del demostrador de Ti6Al4V.

Una de las formas de optimizar el proceso de fabricación aditiva, es mediante la deposición de varias piezas en un mismo sustrato simultáneamente, o lo que se llama fabricación matricial. De esta forma el proceso de aporte es casi continuo, eliminando prácticamente los tiempos de enfriamiento, reduciendo así el tiempo de fabricación lo máximo posible. Además, en el caso de piezas que requieran de una atmosfera concreta únicamente necesitarán un llenado, con el consecuente ahorro de energía, gas y tiempo.

La Figura VI-9 muestra la fabricación matricial de 3 herrajes en acero. Estas tres piezas se han fabricado simultáneamente realizando cada capa los 3 demostradores a la vez, reduciendo así el consumo de recursos e incrementando la productividad.

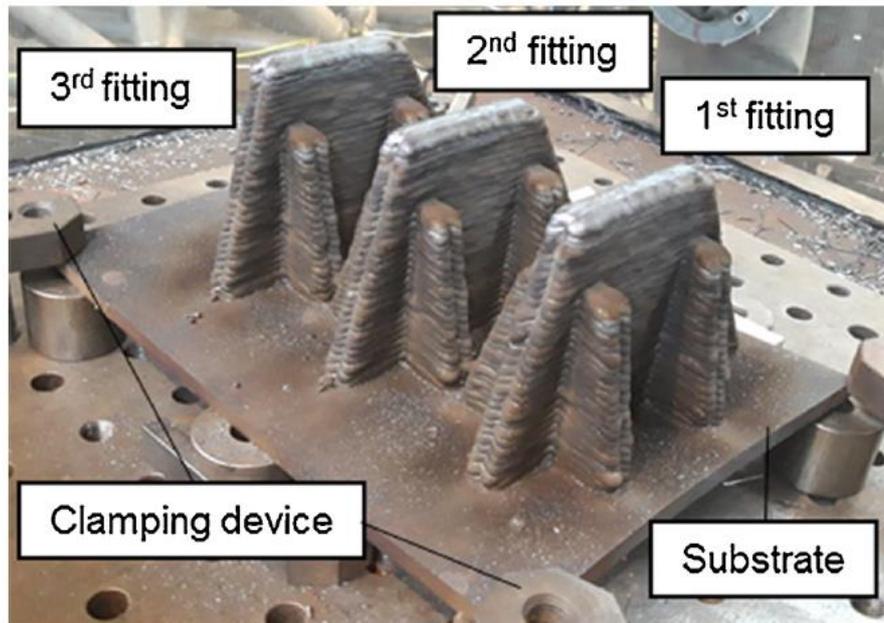


Figura VI-9. Fabricación matricial del demostrador en acero SS316 mediante PAW.

En la Tabla VI-3 se muestran los tiempos de fabricación de los tres demostradores de forma matricial.

Tabla VI-3. Tiempos de fabricación de los 3 demostradores utilizando una estrategia matricial

	Additive Time	Cooling Time	Positioning Time
Matrix manufac.	4h 43min	0 min	2h 33min

En la Figura VI-10 se puede ver un resumen de los tiempos de fabricación en la que se aprecia la considerable reducción de tiempo en la deposición matricial, ya que el tiempo de enfriamiento se reduce al mínimo. No se incluye en el gráfico el tiempo de llenado de la cámara, si este tiempo se tiene en cuenta, el ahorro de tiempo mediante la estrategia matricial sería todavía mayor.

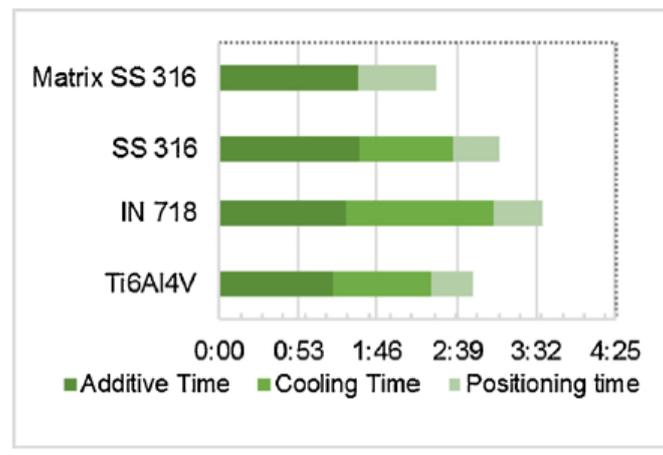


Figura VI-10. Resumen de los tiempos de fabricación mediante PAW

En la Tabla VI-4 se presenta una comparativa de los tiempos de fabricación que se obtendrían mediante la fabricación matricial y por pieza unitaria.

Tabla VI-4. Tiempos de fabricación de los distintos demostradores de forma unitaria y su estimación de forma matricial

	Additive Time	Idle Time	Total Time	Reduction
Ti6Al4V	1h 17min	1h 33min	2h 50min	
Matrix Ti6Al4V	1h 17min	0h 47min*	2h 04min	27%
SS316	1h 35min	1h 33min	3h 08min	
Matrix SS316	1h 35min	0h 51min*	2h 26min	22%
Inconel 718	1h 25min	2h 12min	3h 37min	
Matriz Inconel 718	1h 25min	0h 56min*	2h 21min	35%

*Valores extrapolados

La reducción de tiempo es considerable llevando a cabo la deposición de forma matricial y se sitúa entorno al 22% para el acero, al 27% para el Ti6Al4V y al 35% para el Inconel 718. Estos tiempos pueden variar en función del número de piezas que se fabriquen en cada lote.

4. Conclusiones

Mediante la fabricación de los demostradores aeronáuticos en este capítulo del trabajo de tesis doctoral, queda validado el trabajo de implementación en máquina de un sistema de fabricación aditiva PAW así como la puesta a punto del acero SS316, el Inconel 718 y el Ti6Al4V.

A raíz de la fabricación unitaria de los demostradores y de la fabricación matricial de los mismos en acero, pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se han definido los parámetros de posición adecuados para los tres materiales depositados, los tres de muy diversa naturaleza.

- Los parámetros se han aplicado para la fabricación de una preforma de un herraje aeronáutico en acero, titanio e Inconel de manera satisfactoria.
- El sistema de monitorización desarrollado permite obtener una trazabilidad de la pieza completa, pudiendo así evitar la propagación de defectos en fases finales de la fabricación y también establecer correlaciones con la pieza en uso.
- Por último, la fabricación matricial propuesta es una opción más eficiente para la fabricación de piezas mediante FA. Esta estrategia incrementa la productividad aproximadamente en un 25%, reduciendo los tiempos de inactividad, el uso de recursos, amarres de sustrato y las fases de llenado de la cámara.

Todos estos resultados han sido publicados en el siguiente artículo [Suárez, 2021]

CAPÍTULO VII

CAPÍTULO VII: APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DEL TRABAJO

1. Aportaciones

El presente trabajo de Tesis Doctoral ha presentado en primer lugar una revisión del estado del arte de la fabricación aditiva mediante tecnologías de arco e hilo y más concretamente de la tecnología mediante arco plasmático, así como de los materiales aeronáuticos más utilizados para su deposición mediante esta tecnología. A continuación, se ha realizado la puesta a punto no solo a nivel hardware, sino también en lo que a comunicación y control se refiere de la tecnología PAW en una máquina Gantry de 5 ejes. Con la integración realizada, se ha procedido a su validación en acero con el fin de comprobar todas las funcionalidades de la máquina. En el capítulo IV se han estudiado las condiciones de proceso para el Ti6Al4V y las características a nivel mecánico, tanto estático como dinámico, y metalográfico del titanio depositado mediante PAW. Por último, en el Capítulo V se ha llevado a cabo el mismo estudio en Inconel 718, pero en este caso haciendo especial énfasis en las propiedades de este a alta temperatura y en sus características metalográficas analizando la formación de fisuras en caliente y de las fases de Laves. Finalmente, en el Capítulo VI se ha validado la metodología mediante la fabricación de un demostrador en 3 materiales diferentes: acero 316L, Ti6Al4V e INCO718.

De este modo las principales aportaciones del presente trabajo de investigación pueden ser resumidas en los siguientes puntos:

1. Se ha realizado la integración de un equipo de soldadura PAW en una máquina Gantry de 5 ejes con todo lo que ello conlleva a nivel de control.
2. Se ha desarrollado un sistema de monitorización para el control del proceso de soldadura plasma útil para cualquier tipo de material y una aplicación que recoge los datos de la máquina, los sensores externos y el equipo de soldadura de manera sincronizada.
3. Se ha demostrado que mediante estrategias de control se pueden solventar problemas de la propia tecnología de plasma e hilo para la fabricación aditiva como son el control mediante rampas y el control de energías, así como el control de altura.
4. Se ha desarrollado una metodología de trabajo que permite la fabricación casi automática de piezas mediante PAW en varios materiales.

5. Se ha estudiado el proceso PAW en 2 materiales (Ti6Al4V e Inconel 718) llegando a fabricar piezas sencillas y de mediana complejidad de forma semi automática.
6. Se ha demostrado que las propiedades mecánicas a tracción del Ti6Al4V depositado por PAW cumplen con las normas aeronáuticas. El límite elástico, la resistencia a la tracción y el alargamiento en los valores de fractura están por encima de los proporcionados por la norma.
7. Se ha demostrado que el Ti6Al4V depositado mediante PAW presenta un comportamiento a fatiga superior al esperado como material fundido e incluso que el fundido tras proceso de tratamiento isostático. Por sus prestaciones a fatiga se podría acercar al grupo de Ti6Al4V conformado en caliente.
8. Se ha demostrado que es posible realizar los tratamientos térmicos del Ti6Al4V sin necesidad de realizarlos en una cámara de vacío, ya que no afecta sus propiedades. La única desventaja es la generación de una capa de óxido de unas pocas micras que se puede eliminar fácilmente mediante el mecanizado necesario para conseguir el acabado final de las piezas.
9. Se ha demostrado que el fresado en concordancia y el fresado en oposición muestran un par de torsión similar en promedio en el mecanizado de Ti6Al4V depositado mediante PAW.
10. Se ha demostrado que en la deposición de Inconel 718 mediante PAW se consigue crecimiento de pieza de uniforme, siendo las temperaturas alcanzadas para su fusión altas lo que requiere de alta energía de fusión. Esto, y la incidencia de precipitados, hace que se formen grietas en caliente (hot-cracking) debido a su estructura dendrítica.
11. Se ha demostrado que el problema de la formación de grietas en caliente en el Inconel 718 persiste, aunque se realice un tratamiento térmico estándar ya que las fases de Laves no se disuelven por completo en la solución sólida; en cambio, hay una formación de fases δ precipitadas, lo que reduce significativamente el alargamiento de la muestra en comparación con el material de partida.
12. Se ha demostrado que las propiedades mecánicas Inconel 718 muestran valores inferiores a los esperados para este material y una alta dispersión debida a la existencia de grietas, sobre todo en valores de elongación antes de la fractura.
13. Se ha demostrado que la formación de grietas en el Inconel 718 es altamente dependiente de los parámetros de proceso utilizados que mediante el ajuste de los mismos se puede controlar su aparición.

14. Se ha realizado un estudio del input térmico y su impacto en la microestructura y la formación de grietas en el Inconel 718 depositado mediante PAW y se concluye que controlando éste mediante diferentes estrategias se pueden disminuir la formación de las fases de Laves y las grietas.

Con el resultado de este trabajo de investigación, se han realizado las siguientes publicaciones en diferentes revistas científicas:

- ✓ Artaza, T., Suárez, A., Murua, M., García, J. C., Tabernero, I., and Lamikiz, A., *Wire arc additive manufacturing of Mn4Ni2CrMo steel: Comparison of mechanical and metallographic properties of PAW and GMAW*, *Procedia Manufacturing* (2019), 41, 1071–1078
- ✓ Artaza, T., Suárez, A., Veiga, F., Braceras, I., Tabernero, I., Larrañaga, O., and Lamikiz, A., *Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres*, *Journal of Materials Research and Technology* (2020), 9(6), 15454–15466
- ✓ Artaza, T., Alberdi, A., Murua, M., Gorrotxategi, J., Frías, J., Puertas, G., Melchor, M. A., Mugica, D., and Suárez, A., *Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine*, *Procedia Manufacturing* (2017), 13, 778–785
- ✓ Artaza, T., Bhujangrao, T., Suárez, A., Veiga, F., and Lamikiz, A., *Influence of heat input on the formation of laves phases and hot cracking in plasma arc welding (PAW) additive manufacturing of inconel 718*, *Metals* (2020), 10(6), 1–17
- ✓ Suárez, A., Aldalur, E., Veiga, F., Artaza, T., Tabernero, I., and Lamikiz, A., *Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part*, *Journal of Manufacturing Processes* (2021), 64(November 2020), 188–197
- ✓ Alonso, U., Veiga, F., Suárez, A., and Artaza, T., *Experimental investigation of the influence of wire arc additive manufacturing on the machinability of titanium parts*, *Metals* (2020), 10(1)
- ✓ Vallejo, H., Seco, M., Suárez, A., Artaza, T., and Puertas, G., *Thermo-mechanical modelling of the Wire and Arc Additive Manufacturing process of and aeronautic part of Ti6Al4V alloy*, In *NAFEMS* (2016)

2. Líneas futuras

La presente investigación abre nuevas líneas de interés para futuros trabajos de investigación entre los cuales destacan:

1. Migración de la implementación del equipo de soldadura, estrategias de control y sistema de monitorización desarrollados a la máquina disponible en Tecnia de ADDILAN.
2. Continuar con la puesta a punto de otros materiales en la tecnología PAW.
3. Estudio de las propiedades mecánicas y metalográficas de otros materiales depositados mediante PAW
4. Estudio de identificación de defectos y variables en etapas tempranas a través de los datos recogidos on-line del proceso, a través de técnicas de análisis de inteligencia artificial, con el fin de evitar la propagación de los fallos.
5. Explorar diferentes estrategias de deposición de material, como es la deposición en zig-zag que puede ayudar a reducir tiempos de fabricación, ya que se depositan cordones de una anchura efectiva mayor de una sola pasada.
6. Estudio del mecanizado de otros materiales depositados mediante WAAM.
7. Continuar explorando estrategias para optimizar el proceso, reduciendo los tiempos inactivos y optimizando parámetros y estrategias.
8. Continuar explorando otras tecnologías y posibilidades dentro del WAAM.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [Abdelhafeez, 2015] Abdelhafeez, A. M., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Dowson, A., and Arnold, D., *Burr Formation and Hole Quality when Drilling Titanium and Aluminium Alloys*, *Procedia CIRP* (2015), 37, 230–235
- [Abe, 2016] Abe, T., and Sasahara, H., *Dissimilar metal deposition with a stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing*, *Precision Engineering* (2016), 45, 387–395
- [Adams, 2000] Adams, R. J., *US 7,326,377 B2* (2000), 2(12)
- [ADDILAN, 2021] ADDILAN, *Addilan webpage* (2021) Retrieved from <http://www.addilan.com/>
- [Aendenrooier, 1998] Aendenrooier, A. J. R., and den Ouden, G., *Weld pool oscillation as a tool for penetration sensing during pulsed GTA welding*, *Welding Journal* (1998), 77(5), 181
- [Agrawal, 2007] Agrawal, B. K., *Introduction to engineering materials* (2007). New Delhi: Tata: McGraw-Hill
- [Airbus, 2017] Airbus, *Cities, Airports & Aircraft(2019-2038*, *BMC Public Health* (2017), 5(1), 1–8 Retrieved from <https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298><http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf><http://dx.doi.org/10.1016/j.jana.2015.10.005><http://www.biomedcentral.com/1471-2458/12/58><http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&P>
- [Almeida, 2010] Almeida, P., and Williams, S., *Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)*, *21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010* (2010)
- [Alonso, 2020] Alonso, U., Veiga, F., Suárez, A., and Artaza, T., *Experimental Investigation of the Influence of Wire Arc Additive Manufacturing on the Machinability of Titanium Parts*, *Metals* (2020)
- [AMRC, 2021] AMRC, <https://namrc.co.uk/centre/new-bulk-additive/> (2021)
- [AMS 4928, 1957] AMS 4928, *Titanium alloy bars, wire, forgings, and rings 6Al - 4V annealed - AMS 4928* (1957)
- [Antonsson, 2005] Antonsson, T., and Fredriksson, H., *The effect of cooling rate on the solidification of INCONEL 718*, *Metallurgical and Materials Transactions B* (2005), 36, 85–96
- [Arrazola, 2009] Arrazola, P.-J., Garay, A., Iriarte, L.-M., Armendia, M., Marya, S., and Le Maître, F., *Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3)*, *Journal of Materials Processing Technology* (2009), 209(5), 2223–2230

- [Artaza, 2017] Artaza, T., Alberdi, A., Murua, M., Gorrotxategi, J., Frías, J., Puertas, G., Melchor, M. A., Mugica, D., and Suárez, A., *Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine*, *Procedia Manufacturing* (2017), 13, 778–785
- [Artaza, 2020a] Artaza, T., Bhujangrao, T., Suárez, A., Veiga, F., and Lamikiz, A., *Influence of heat input on the formation of laves phases and hot cracking in plasma arc welding (PAW) additive manufacturing of inconel 718*, *Metals* (2020), 10(6), 1–17
- [Artaza, 2020b] Artaza, T., Suárez, A., Veiga, F., Braceras, I., Tabernero, I., Larrañaga, O., and Lamikiz, A., *Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres*, *Journal of Materials Research and Technology* (2020), 9(6), 15454–15466
- [AS, 2020] AS, N. T., US 10,549,375 B2, New York (2020), 2(19), 1–29 Retrieved from <https://patentimages.storage.googleapis.com/30/f4/62/e9b75605352fb0/US10679987.pdf>
- [ASTM B.221, 2005] ASTM B.221, *Standard Specification for aluminum and aluminum alloy extruded bar, rods, wire, profiles and tubes* (2005)
- [ASTM F1108-14, 2014] ASTM F1108 -14, *Standard Specification for Ti6Al4V alloy castings for surgical implants (UNS R56406)* (2014)
- [ASTM F1472, 2020] ASTM F1472, *Standard Specification for Wrought Ti6Al4V alloy for surgical implant applications (UNS R56400)* (2020)
- [ASTM International, 2012] ASTM International, *ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, West Conshohocken, PA (2012)
- [BAIN & COMPANY, 2021] BAIN & COMPANY, <https://www.bain.com/insights/air-travel-forecast-when-will-airlines-recover-from-covid-19-interactive/> (2021)
- [Baker, 1925]↓ Baker, R., *Method of making decorative articles*, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* (1925)
- [Bauccio, 1993] Bauccio, M., *ASM metals reference book* (1993). ASM International

- [Baufeld, 2012] Baufeld, B., *Mechanical Properties of INCONEL 718 Parts Manufactured by Shaped Metal Deposition (SMD)*, Journal of Materials Engineering and Performance (2012), 21(7), 1416–1421
- [Baufeld, 2010] Baufeld, B., Biest, O. Van der, and Gault, R., *Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties*, Materials & Design (2010), 31, S106–S111
- [Baufeld, 2011] Baufeld, B., Brandl, E., and van der Biest, O., *Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition*, Journal of Materials Processing Technology (2011), 211(6), 1146–1158
- [Baufeld, 2009] Baufeld, B., Van der Biest, O., and Gault, R., *Microstructure of Ti6Al4V specimens produced by shaped metal deposition*, International Journal of Materials Research - INT J MATER RES (2009), 100, 1536–1542
- [Baumers, 2016] Baumers, M., Holweg, M., and Rowley, J., *The economics of 3D printing: A total cost perspective*; The Enabling Role of 3D Printing in Redistributed Manufacturing: A Total Cost Model (2016), 1–15 Retrieved from www.digits2widgets.comD2W
- [Birmingham, 2018] Birmingham, M. J., Nicastro, L., Kent, D., Chen, Y., and Dargusch, M. S., *Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments*, Journal of Alloys and Compounds (2018), 753, 247–255
- [Bertolini, 2019] Bertolini, R., Lizzul, L., Pezzato, L., Ghiotti, A., and Bruschi, S., *Improving surface integrity and corrosion resistance of additive manufactured Ti6Al4V alloy by cryogenic machining*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2019), 104
- [Bicknell, 1994] Bicknell, A., Smith, J. S., and Lucas, J., *Infrared sensor for top face monitoring of weld pools*, Measurement Science and Technology (1994), 5(4), 371–378
- [Boateng, 2016] Boateng, F. T., Ewert, U., Kannengiesser, T., Zscherpel, U., Griesche, A., Kromm, A., Hohendorf, S., and Redmer, B., *Real-time radiography for observation of crack growth during GTA welding*, Welding in the World (2016), 60(5), 931–937

- [Bonaccorso, 2009a] Bonaccorso, F, Bruno, C., Cantelli, L., Longo, D., and Muscato, G., *A modular software interface for the control system of an arc welding robot*, In 2009 2nd Conference on Human System Interactions (2009) (pp. 450–455)
- [Bonaccorso, 2009b] Bonaccorso, Filippo, Bruno, C., Cantelli, L., Longo, D., and Muscato, G., *CONTROL OF A SHAPED METAL DEPOSITION PROCESS* (2009)
- [Bonaccorso, 2011] Bonaccorso, Filippo, Cantelli, L., and Muscato, G., *An Arc Welding Robot Control for a Shaped Metal Deposition Plant: Modular Software Interface and Sensors*, *Industrial Electronics, IEEE Transactions On* (2011), 58, 3126–3132
- [Boulos, 2017] Boulos, M. I., Fauchais, P., and Pfender, E., *Plasma Torches for Cutting, Welding and PTA Coating BT - Handbook of Thermal Plasmas*, In M. I. Boulos, P. L. Fauchais, & E. Pfender (Eds.) (2017) (pp. 1–83). Cham: Springer International Publishing
- [Böß, 2016] Böß, V., Denkena, B., Wesling, V., Kaielerle, S., Rust, F., Nesper, D., and Rottwinkel, B., *Repairing parts from nickel base material alloy by laser cladding and ball end milling*, *Production Engineering* (2016)
- [Bourell, 2017] Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., and Clare, A., *Materials for additive manufacturing*, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2017), 66(2), 659–681
- [Brandl, 2010] Brandl, E, Baufeld, B., Leyens, C., and Gault, R., *Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications*, *Physics Procedia* (2010), 5, 595–606
- [Brandl, 2011] Brandl, Erhard, Palm, F., Michailov, V., Viehweger, B., and Leyens, C., *Mechanical properties of additive manufactured titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by a solid-state laser and wire*, *Materials & Design* (2011), 32(10), 4665–4675
- [Brandl, 2012a] Brandl, Erhard, and Greitemeier, D., *Microstructure of additive layer manufactured Ti-6Al-4V after exceptional post heat treatments*, *Materials Letters* (2012), 81, 84–87
- [Brandl, 2012b] Brandl, Erhard, Schoberth, A., and Leyens, C., *Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM)*, *Materials Science and Engineering: A* (2012), 532, 295–307

- [Brice, 2015] Brice, C., Shenoy, R., Kral, M., and Buchannan, K., *Precipitation behavior of aluminum alloy 2139 fabricated using additive manufacturing*, *Materials Science and Engineering: A* (2015), 648, 9–14
- [Broberg, 2013] Broberg, P., *Surface crack detection in welds using thermography*, *NDT & E International* (2013), 57, 69–73
- [Brožek, 2005] Brožek, M., *Cutting conditions optimization when turning overlays*, *Journal of Materials Processing Technology* (2005), 168(3), 488–495
- [Bruce, 2010] Bruce, M. W., Us, A. Z., Erion, T., and Us, A. Z., *US 7,741,578 B2* (2010), 2(12)
- [Calleja, 2018] Calleja, A., Urbikain, G., Gonzalez, H., Cerrillo, I., Polvorosa, R., and Lamikiz, A., *Inconel®718 superalloy machinability evaluation after laser cladding additive manufacturing process*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018), 97
- [Carson, 1988] Carlson, N. M., and Johnson Idaho Falls, ID (US)], J. A. [Idaho N. L., *Ultrasonic sensing of weld pool penetration* (1988) Retrieved from <https://www.osti.gov/biblio/6965976>
- [Chen, 2015] Chen, D., Chen, M., and Wu, C., *Effects of phase difference on the behavior of arc and weld pool in tandem P-GMAW*, *Journal of Materials Processing Technology* (2015), 225, 45–55
- [Chen, 2017] Chen, J., Ran, Z., Wu, C. S., Padhy, G., and Hu, Q., *Influence of low current auxiliary TIG arc on high speed TIG-MIG hybrid welding*, *Journal of Materials Processing Technology* (2017), 243, 131–142
- [Cheng, 2003] Cheng, X., Fisher, J. W., Prask, H. J., Gnäupel-Herold, T., Yen, B. T., and Roy, S., *Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures*, *International Journal of Fatigue* (2003), 25(9), 1259–1269
- [Chong, 2018] Chong, L., Ramakrishna, S., and Singh, S., *A review of digital manufacturing-based hybrid additive manufacturing processes*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018), 95
- [Clark, 2008] Clark, D., Bache, M. R., and Whittaker, M. T., *Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications*, *Journal of Materials Processing Technology* (2008), 203(1), 439–448

- [Colegrove, 2017] Colegrove, P. A., Donoghue, J., Martina, F., Gu, J., Prangnell, P., and Hönnige, J., *Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components*, *Scripta Materialia* (2017), 135, 111–118
- [Cong, 2015] Cong, B., Ding, J., and Williams, S., *Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2015), 76(9), 1593–1606
- [Cooling, 2007] Cooling, N. W., *US 2007 / 0122562 A1* (2007), 1(19)
- [Cotteleer, 2014] Cotteleer, M., and Joyce, J., *3D Opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth*, *Deloitte Review* (2014)
- [Cranfield, 2021] Cranfield, https://www.huntingdonfusion.com/index.php/en_gb/white-papers/2757-wp-197-additive-layer-manufacturing (2021)
- [Criales, 2017] Criales, L. E., Arisoy, Y. M., Lane, B., Moylan, S., Donmez, A., and Özel, T., *Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: Experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (2017), 121, 22–36
- [Coykendall, 2014] Coykendall, J., Cotteleer, M., Holdowsky, L., and Mahto, M., *3D opportunity in Aerospace and Defense*, *Deloitte University Press* (2014), 1–28
- [Criales, 2017] Criales, L. E., Arisoy, Y. M., Lane, B., Moylan, S., Donmez, A., and Özel, T., *Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: Experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (2017), 121, 22–36
- [Cunningham, 2018] Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., and Newman, S. T., *Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing*, *Additive Manufacturing* (2018), 22, 672–686
- [Dang, 2019] Dang, J., Cai, X., Yu, D., An, Q., Ming, W., and Chen, M., *Effect of material microstructure on tool wear behavior during machining additive manufactured Ti6Al4V*, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* (2019), 20

- [Dass, 2019] Dass, A., and Moridi, A., *State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design*, Coatings (2019), 9, 418
- [Daymi, 2009] Daymi, A., Boujelbene, M., Salem, S. Ben, Hadj Sassi, B., Torbaty, S., and Sassi, B. H., Effect of the cutting speed on the chip morphology and the cutting forces MANUFACTURING AND PROCESSING OF ENGINEERING MATERIALS 78 (2009), 1(2), 77–83
- [Deng, 2018] Deng, D., Additively Manufactured Inconel 718: Microstructures and Mechanical Properties (2018)
- [Derekar, 2018] Derekar, K., *A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium*, Materials Science and Technology (2018), 34
- [Dinda, 2008] Dinda, G. P., Song, L., and Mazumder, J., Fabrication of Ti-6Al-4V Scaffolds by Direct Metal Deposition, Metallurgical and Materials Transactions A (2008), 39(12), 2914–2922
- [Dinesh, 2018] Dinesh, K., Anandavel, B., and Devakumaran, K., *Visualization of Hot Wire Gas Tungsten Arc Welding Process* (2018), 2512–2517
- [Ding, 2015a] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., and Li, H., *A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (2015a), 31, 101–110
- [Ding, 2015b] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., and Li, H., *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2015b), 81(1), 465–481
- [Ding, 2016] Ding, D., Pan, Z., Duin, S., Li, H., and Shen, C., *Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing*, Materials (2016), 9, 652
- [Dong, 2017] Dong, B., Pan, Z., Shen, C., Ma, Y., and Li, H., *Fabrication of Copper-Rich Cu-Al Alloy Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process*, Metallurgical and Materials Transactions B (2017), 48(6), 3143–3151
- [Dornfeld, 1999] Dornfeld, D. A., Kim, J. S., Dechow, H., Hewson, J., and Chen, L. J., *Drilling Burr Formation in Titanium Alloy, Ti-6Al-4V*, CIRP Annals (1999), 48(1), 73–76

- [Droubi, 2017] Droubi, M. G., Faisal, N. H., Orr, F., Steel, J. A., and El-Shaib, M., *Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints*, *Journal of Constructional Steel Research* (2017), 134, 28–37
- [EWI,2021] EWI, <https://ewi.org/capabilities/additive-manufacturing/> (2021)
- [Fang, 2012] Fang, C. fu, Meng, X. hui, Hu, Q. xian, Wang, F. jiang, Ren, H., Wang, H. song, Guo, Y., and Mao, M., *TANDEM and GMAW Twin Wire Welding of Q690 Steel Used in Hydraulic Support*, *Journal of Iron and Steel Research International* (2012), 19(5), 79–85
- [Flynn, 2016] Flynn, J. M., Shokrani, A., Newman, S. T., and Dhokia, V., *Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (2016), 101, 79–101
- [Galarraga, 2017] Galarraga, H., Warren, R. J., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., and Nandwana, P., *Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM)*, *Materials Science and Engineering: A* (2017), 685, 417–428
- [García de la Yedra, 2019] García de la Yedra, A., Pflieger, M., Aramendi, B., Cabeza, M., Zubiri, F., Mitter, T., Reitingner, B., and Scherleitner, E., *Online cracking detection by means of optical techniques in laser-cladding process*, *Structural Control and Health Monitoring* (2019), 26(3), e2291
- [Geddes, 2010] Geddes, B., Leon, H., and Huang, X., *Superalloys: Alloying and Performance*, (ASM International, Ed.) (2010)
- [Geng, 2017] Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., and Zhang, F., *Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing*, *Journal of Materials Processing Technology* (2017), 243, 40–47
- [Gloria, 2019] Gloria, A., Montanari, R., Richetta, M., and Varone, A., *Alloys for Aeronautic Applications: State of the Art and Perspectives*, *Metals* (2019), 9, 662
- [Goldak, 1984] Goldak, J., Chakravarti, J., and Bibby, M., *A new finite element model for welding heat sources*, *Metallurgical Transactions B* (1984), 15, 299–305
- [Gong, 2014] Gong, X., Anderson, T., and Chou, K., *Int. Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology*, *Manufacturing Review* (2014)

- [Gu, 2016a] Gu, J., Ding, J., Williams, S. W., Gu, H., Bai, J., Zhai, Y., and Ma, P., *The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy*, *Materials Science and Engineering: A* (2016), 651, 18–26
- [Gu, 2016b] Gu, J., Ding, J., Williams, S. W., Gu, H., Ma, P., and Zhai, Y., *The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys*, *Journal of Materials Processing Technology* (2016), 230, 26–34
- [Günther, 2018a] Günther, K., Bergmann, J. P., and Suchodoll, D., *Hot wire-assisted gas metal arc welding of hypereutectic FeCrC hardfacing alloys: Microstructure and wear properties*, *Surface and Coatings Technology* (2018), 334, 420–428
- [Günther, 2018b] Günther, K., Bergmann, J., Zhang, C., Rosenberger, M., and Notni, G., *Hot Wire-Assisted Gas Metal Arc Welding of Ni-Based Hardfacing /The degradation behavior and distribution of fused tungsten carbides were influence by applying an additional hot wire*, *Welding Journal* (2018), April
- [Guo, 2016] Guo, J., Zhou, Y., Liu, C., Wu, Q., Chen, X., and Lu, J., *Wire Arc Additive Manufacturing of AZ31 Magnesium Alloy: Grain Refinement by Adjusting Pulse Frequency*, *Materials* (2016)
- [Guo, 2017] Guo, P., Zou, B., Huang, C., and Gao, H., *Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition*, *Journal of Materials Processing Technology* (2017), 240
- [Hartmann, 1994] Hartmann, K., Ramaswami, K., Merz, R., Neplotnik, G., Prinz, F. B., Schultz, L., Terk, M., and Weiss, L. E., *Robot-assisted shape deposition manufacturing* (1994)
- [Heralic, 2012a] Heralic, A., *Monitoring and Control of Robotized Laser Metal-Wire Deposition* (2012)
- [Heralic, 2012b] HERALIC, A., *Monitoring and Control of Robotized Laser Metal-Wire Deposition* (2012) https://doi.org/LMD_Thesis
- [Heralic, 2012c] Heralić, A., Christiansson, A.-K., and Lennartson, B., *Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning*, *Optics and Lasers in Engineering* (2012), 50(9), 1230–1241

- [Herzog, 2016] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., and Emmelmann, C., *Additive manufacturing of metals*, *Acta Materialia* (2016), 117, 371–392
- [Hirata, 2003] Hirata, Y., *Pulsed arc welding*, *Welding International* (2003), 17, 98–115
- [Höfer, 2017] Höfer, K., Hälsig, A., and Mayr, P., *Arc-based additive manufacturing of steel components—comparison of wire- and powder-based variants*, *Welding in the World* (2017), 62
- [Hu, 2003] Hu, D., and Kovacevic, R., *Modelling and measuring the thermal behaviour of the molten pool in closed-loop controlled laser-based additive manufacturing*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (2003), 217(4), 441–452
- [Huang, 2016] Huang, N., Liu, Y., Chen, S., and Zhang, Y., *Interval model control of human welder's movement in machine-assisted manual GTAW torch operation*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2016), 86
- [Huang, 2017] Huang, Y., Wu, D., Zhang, Z., Chen, H., and Chen, S., *EMD-based pulsed TIG welding process porosity defect detection and defect diagnosis using GA-SVM*, *Journal of Materials Processing Technology* (2017), 239, 92–102
- [ICAO, 2021] ICAO, I. C. A. O., <https://www.icao.int/safety/Pages/COVID-19-Airport-Status.aspx> (2021)
- [IDTechEx, 2021] IDTechEx, <https://www.idtechex.com/en/research-report/metal-additive-manufacturing-2020-2030/762> (2021)
- [ISO 148-1:2017, 2017] ISO 148-1:2017, *Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy. Parte 1: Metodo de ensayo (ISO 148-1:2016)* (2016)
- [Jia, 2014] Jia, Q., and Gu, D., *Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties*, *Journal of Alloys and Compounds* (2014), 585, 713–721
- [Karlsson, 2010] Karlsson, L., *Crack Detection in Welding Process using Acoustic Emission* (2010). School of Innovation, Design and Engineering, Mälardalen University Retrieved from <http://mdh.diva-portal.org/smash/get/diva2:310692/FULLTEXT01.pdf>

- [Kellner, 2017] Kellner, T., *The Blade Runners: This Factory is 3D Printing Turbine Parts For the World's Largest Jet Engine* (2017) Retrieved from <https://www.ge.com/news/reports/future-manufacturing-take-look-inside-factory-3d-printing-jet-engine-parts> (accessed on March 2021)
- [Kanzadeh, 2019] Khanzadeh, M., Chowdhury, S., Tschopp, M. A., Doude, H. R., Marufuzzaman, M., and Bian, L., *In-situ monitoring of melt pool images for porosity prediction in directed energy deposition processes*, IJSE Transactions (2019), 51(5), 437–455
- [Kirka, 2017] Kirka, M. M., Medina, F., Dehoff, R., and Okello, A., *Mechanical behavior of post-processed Inconel 718 manufactured through the electron beam melting process*, Materials Science and Engineering: A (2017), 680, 338–346
- [Krauss, 2012] Krauss, H., Eschey, C., and Zaeh, M. F., *Thermography for Monitoring the SLM Process*, 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2012 (2012), 66, 999–1014
- [Kumar, 2017] Kumar, L. J., and Krishnadas Nair, C. G., *Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry BT - Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, In D. I. Wimpenny, P. M. Pandey, & L. J. Kumar (Eds.) (2017) (pp. 39–54). Singapore: Springer Singapore
- [Le Coz, 2012] Le Coz, G., Marinescu, M., Devillez, A., Dudzinski, D., and Velnom, L., *Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys*, Applied Thermal Engineering (2012), 36, 434–441
- [Lee, 2017] Lee, J. Y., An, J., and Chua, C. K., *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*, Applied Materials Today (2017), 7, 120–133
- [Lee, 2013] Lee, K.-B., Kim, C., and Kim, D.-S., *High deposition rate pulse gas metal arc welding for Al 5083 thick plate*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture (2013), 227, 848–854
- [Li, 2021] Li, K., Klecka, M. A., Chen, S., and Xiong, W., *Wire-arc additive manufacturing and post-heat treatment optimization on microstructure and mechanical properties of Grade 91 steel*, Additive Manufacturing (2021), 37(June 2020), 101734

- [Lin, 2016] Lin, J., Lv, Y. H., Liu, Y. X., Xu, B. S., Sun, Z., Li, Z., and Wu, Y. X., *Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing*, *Materials & Design* (2016), 102
- [Lin, 2017] Lin, J., Lv, Y., Liu, Y., Sun, Z., Wang, K., Li, Z., Wu, Y., and Xu, B., *Microstructural evolution and mechanical property of Ti-6Al-4V wall deposited by continuous plasma arc additive manufacturing without post heat treatment*, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* (2017), 69, 19–29
- [Ling, 2015] Ling, L., Han, Y., Zhou, W., Gao, H., Shu, D., Wang, J., Kang, M., and Sun, B., *Study of Microsegregation and Laves Phase in INCONEL718 Superalloy Regarding Cooling Rate During Solidification*, *Metallurgical and Materials Transactions A* (2015), 46
- [Liu, 2013] Liu, L., Zhuang, Z., Liu, F., and Zhu, M., *Additive manufacturing of steel–bronze bimetal by shaped metal deposition: interface characteristics and tensile properties*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2013), 69(9), 2131–2137
- [Liu, 2014] Liu, Q., Sharp, P. K., Brandt, M., Matthews, N., Sun, S., and Djugum, R., *Repair of aircraft components by laser cladding process*, *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (2014), 2014(1), 308–313
- [Liu, 2019] Liu, Z., Li, X., Wang, X., Tian, C., and Wang, L., *Comparative investigation on grindability of Inconel 718 made by selective laser melting (SLM) and casting*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2019), 100, 3155–3166
- [Lutjering, 2017] Lutjering, G., and Williams, J. C., *Titanium*, (Springer, Ed.) (2007). Berlin
- [Ma, 2014] Ma, Y., Cuiuri, D., Hoyer, N., Li, H., and Pan, Z., *Characterization of In-Situ Alloyed and Additively Manufactured Titanium Aluminides*, *Metallurgical and Materials Transactions B* (2014), 45(6), 2299–2303
- [Ma, 2016] Ma, Y., Cuiuri, D., Li, H., Pan, Z., and Shen, C., *The effect of postproduction heat treatment on γ -TiAl alloys produced by the GTAW-based additive manufacturing process*, *Materials Science and Engineering: A* (2016), 657, 86–95

- [Ma, 2015] Ma, Y., Cuiuri, D., Shen, C., Li, H., and Pan, Z., *Effect of interpass temperature on in-situ alloying and additive manufacturing of titanium aluminides using gas tungsten arc welding*, *Additive Manufacturing* (2015), 8, 71–77
- [Manikandan, 2012] Manikandan, D. S., Sivakumar, D., Kalvala, P., and Kamaraj, M., *Laves Phase Control in Inconel 718 Weldments*, *Materials Science Forum* (2012), 710, 614–619
- [Martina, 2012] Martina, F, Mehnen, J., Williams, S. W., Colegrove, P., and Wang, F., *Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V*, *Journal of Materials Processing Technology* (2012), 212(6), 1377–1386
- [Martina, 2018] Martina, Filomeno, Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G., and Quintino, L., *Tandem Metal Inert Gas process for high productivity Wire Arc Additive Manufacturing in stainless steel*, *Additive Manufacturing* (2018)
- [Mazak, 2021] Mazak, <https://www.mazakusa.com/es/news-events/press-releases/new-variaxis-j-600am-grows-the-mazak-additive-series/> (2021)
- [Mazumber, 2005] Mazumber, J., and Kelly, J. K., US 6,925,346 B1 (2005), 1(12), 14 Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US6925346B1/en?q=US6925346>
- [McAndrew, 2018] McAndrew, A. R., Alvarez Rosales, M., Colegrove, P. A., Hönnige, J. R., Ho, A., Fayolle, R., Eytayo, K., Stan, I., Sukrongpang, P., Crochemore, A., and Pinter, Z., *Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement*, *Additive Manufacturing* (2018), 21, 340–349
- [Meghvanshi, 2012] Meghvanshi, M., and Nimawat, D., *Using Rapid Prototyping Technology In Mechanical Scale Models* (2012)
- [Merklein, 2016] Merklein, M., Junker, D., Schaub, A., and Neubauer, F., *Hybrid Additive Manufacturing Technologies – An Analysis Regarding Potentials and Applications*, *Physics Procedia* (2016), 83, 549–559
- [Mirapeix, 2006] Mirapeix, J., Cobo, A., Conde, O. M., Jaúregui, C., and López-Higuera, J. M., *Real-time arc welding defect detection technique by means of plasma spectrum optical analysis*, *NDT & E International* (2006), 39(5), 356–360

- [Mirapeix, 2007] Mirapeix, J., García-Allende, P. B., Cobo, A., Conde, O. M., and López-Higuera, J. M., *Real-time arc-welding defect detection and classification with principal component analysis and artificial neural networks*, *NDT & E International* (2007), 40(4), 315–323
- [Mireles, 2015] Mireles, J., Ridwan, S., Morton, P. A., Hinojos, A., and Wicker, R. B., *Analysis and correction of defects within parts fabricated using powder bed fusion technology*, *Surface Topography: Metrology and Properties* (2015), 3(3)
- [MCS-Marc, 2021] *MSC-Marc* (2021) Retrieved July 22, 2020, from <http://www.mscsoftware.com/product/marc>
- [MTU Aero Engines, 2015] MTU Aero Engines, *Titanium aluminide - MTU Aero Engines develops new turbine blade material* (2015) Retrieved from <https://www.mtu.de/newsroom/press/press-archive/press-archive-detail/titanium-aluminide-mtu-aero-engines-develops-new-turbine-blade-material/#:~:text=Munich%2C%20March%2023%2C%202015%2C,turbine%20blades%20that%20combines%20the>
- [Murr, 2010] Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ceylan, A., Martinez, E., Martinez, J. L., Hernandez, D. H., Machado, B. I., Ramirez, D. A., Medina, F., Collins, S., and Wicker, R. B., *Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting*, *Acta Materialia* (2010), 58(5), 1887–1894
- [Murua, 2020] Murua, M., Suarez, A., Galar, D., and Santana, R., *Tool-Path Problem in Direct Energy Deposition Metal-Additive Manufacturing: Sequence Strategy Generation*, *IEEE Access* (2020), 8, 91574–91585
- [Muscato, 2008] Muscato, G., Spampinato, G., and Cantelli, L., *A Closed Loop Welding Controller for a Rapid Manufacturing Process*, *lop Conference Series: Materials Science and Engineering* (2008) (Vol. 26)
- [MX3D, 2021] MX3D, <https://mx3d.com/> (2021)
- [Najatul, 2017] Najatul, S., Majid, A., Alkahari, M. R., Faiz, A., Ramli, R., S, M., Tan, C. F., Mohd, F., and Sudin, M. N., *Influence of Integrated Pressing during Fused Filament Fabrication on Tensile Strength and Porosity* (2017), SI 3
- [Nandwana, 2017] Nandwana, P., Elliott, A. M., Siddel, D., Merriman, A., Peter, W. H., and Babu, S. S., *Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challenges*☆, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* (2017), 21(4), 207–218

- [Nazan, 2016] Nazan, M., Ramli, F., Alkahari, M. R., and Abdullah, M., Optimization of warping deformation in open source 3d printer using response surface method (2016)
- [Norks Titanium AS, 2016] Norsk Titanium AS, *US 9,346,116 B2* (2016), 2(12)
- [Norks Titanium AS, 2019a] Norsk Titanium AS, *US 2019 / 0001573 A1* (2019a) (Vol. 1)
- [Norks Titanium AS, 2019b] Norsk Titanium AS, *US 2019 / 0014652 A1* (2019b), 2019
- [Norks Titanium AS, 2020] Norsk Titanium AS, *US 10,738,378 B2* (2020), 2
- [Norks Titanium AS, 2021] Norsk Titanium AS, *US 2021/0001424 A1* (2021), 2021
- [Norsk Titanium, 2021] Norsk Titanium, <https://enelaire.mx/norsk-titanium-entregara-los-primeros-componentes-estructurales-hechos-por-impresora-3d/> (2021)
- [Nourai, 2014] Nouari, M., and Makich, H., *On the Physics of Machining Titanium Alloys: Interactions between Cutting Parameters, Microstructure and Tool Wear*, *Metals* (2014), 4, 335–358
- [Oliveria, 2020] Oliveira, J. P., Santos, T. G., and Miranda, R. M., *Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice*, *Progress in Materials Science* (2020), 107, 100590
- [Olyver Wyman, 2019] Olyver Wyman, *Global fleet & MRO market forecast commentary 2019-2029* (2019) Retrieved from <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2019/jan/global-fleet-mro-market-forecast-commentary-2019-2029.html>
- [Pal, 2011] Pal, K., and Pal, S. K., *Monitoring of Weld Penetration Using Arc Acoustics*, *Materials and Manufacturing Processes* (2011), 26(5), 684–693
- [Pan, 2018] Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., and Norrish, J., *Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review*, *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing* (2018)
- [Priarone, 2013] Priarone, P., Rizzuti, S., Ruffa, S., and Settineri, L., *Drilling experiments on a gamma titanium aluminide obtained via electron beam melting*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2013), 69

- [Qi, 2009] Qi, H., Azer, M., and Ritter, A., Studies of Standard Heat Treatment Effects on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Net Shape Manufactured INCONEL 718, *Metallurgical and Materials Transactions A* (2009), 40(10), 2410–2422
- [Ralph, 1925] Ralph B, *Method of making decorative articles*, in. *Google Patents 1925*. (1925)
- [Ram, 2005] Ram, G., Reddy, A., Kalvala, P., and Reddy, G., *Improvement in stress rupture properties of inconel 718 gas tungsten arc welds using current pulsing*, *Journal of Materials Science* (2005), 40, 1497–1500
- [Ramlab, 2021] Ramlab, <https://www.ramlab.com/maxq/> (2021)
- [Rawal, 2013] Rawal, S., Brantley, J., and Karabudak, N., *Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy components for spacecraft applications*, *RAST 2013 - Proceedings of 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies* (2013), (January), 5–11
- [Reddy, 2009] Reddy, G., Murthy, C., Rao, K., and Kalvala, P., *Improvement of mechanical properties of Inconel 718 electron beam welds—influence of welding techniques and postweld heat treatment*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2009), 43, 671–680
- [Rieder, 2014] Rieder, H., Dillhöfer, A., Spies, M., Bamberg, J., and Hess, T., *Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Using Ultrasound 2 . Additive Manufacturing and Quality Assurance Considerations 3 . Ultrasonic Process Monitoring*, *Proceedings of the 11th European Conference on Non-Destructive Testing* (2014), 1(Ecndt), 2194–2201
- [Rios, 2018] Rios, S., Colegrove, P., Martina, F., and Williams, S., *Analytical Process Model for Wire + Arc Additive Manufacture*, *Additive Manufacturing* (2018), 21
- [Romero, 2018] Romero, C., Yang, F., and Bolzoni, L., *Fatigue and fracture properties of Ti alloys from powder-based processes – A review*, *International Journal of Fatigue* (2018), 117, 407–419
- [Sabban, 2019] Sabban, R., Bahl, S., Chatterjee, K., and Suwas, S., *Globularization using heat treatment in additively manufactured Ti-6Al-4V for high strength and toughness*, *Acta Materialia* (2019), 162, 239–254

- [Santangelo, 2016] Santangelo, M., Silwal, B., and Purdy, A., *Vibration Assisted Robotic Hot-Wire Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) for Additive Manufacturing of Large Metallic Parts* (2016), 1548–1556
- [Schmidt, 1990] Schmidt, J., Dorner, H., and Tenckhoff, E., *Manufacture of complex parts by shape welding*, *Journal of Nuclear Materials* (1990), 171(1), 120–127
- [Seow, 2019] Seow, C. E., Coules, H., Wu, G., Khan, R., Xiangfang, X., and Williams, S., *Wire + Arc Additively Manufactured Inconel 718: Effect of post-deposition heat treatments on microstructure and tensile properties*, *Materials & Design* (2019), 183, 108157
- [Sharif, 2012] Sharif, S., Rahim, E., and Sasahara, H., *Machinability of Titanium Alloys in Drilling* (2012)
- [Shen, 2016] Shen, C., Pan, Z., Cuiuri, D., Dong, B., and Li, H., *In-depth study of the mechanical properties for Fe3Al based iron aluminide fabricated using the wire-arc additive manufacturing process*, *Materials Science and Engineering: A* (2016), 669, 118–126
- [Shen, 2015a] Shen, C., Pan, Z., Ma, Y., Cuiuri, D., and Li, H., *Fabrication of iron-rich Fe-Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process*, *Additive Manufacturing* (2015a)
- [Shen, 2015b] Shen, C., Pan, Z., Ma, Y., Cuiuri, D., and Li, H., *Fabrication of iron-rich Fe-Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process*, *Additive Manufacturing* (2015b), 7, 20–26
- [Shockey, 1930] Shockey, H. K., *Machine for reclaiming worn brake drum*, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* (1930), 28(2), 131–134
- [Skiba, 2009] Skiba, T., Baufeld, B., and Van der Biest, O., *Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel Component Manufactured by Shaped Metal Deposition*, *Isij International - ISIJ INT* (2009), 49, 1588–1591
- [Slotwinski, 2014] Slotwinski, J. A., and Garboczi, E. J., *Porosity of additive manufacturing parts for process monitoring*, *AIP Conference Proceedings* (2014), 1581(1), 1197–1204
- [Sreedhar, 2012] Sreedhar, U., Krishnamurthy, C. V., Balasubramaniam, K., Raghupathy, V. D., and Ravisankar, S., *Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring*, *Journal of Materials Processing Technology* (2012), 212(7), 1557–1566

- [Stefanescu, 1988] Stefanescu, D. M., Davis, J. R., and Destefani, J. D., *Metals Handbook*, Vol.15 -- Casting (1988). ASM International
- [Strantza, 2017] Strantza, M., Van Hemelrijck, D., Guillaume, P., and Aggelis, D. G., *Acoustic emission monitoring of crack propagation in additively manufactured and conventional titanium components*, *Mechanics Research Communications* (2017), 84, 8–13
- [Stratasys, 2020] Stratasys, *Certified Additive Manufacturing for Aircraft Interiors* (2020)
- [Suárez, 2021] Suárez, A., Aldalur, E., Veiga, F., Artaza, T., Tabernero, I., and Lamikiz, A., *Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part*, *Journal of Manufacturing Processes* (2021), 64(November 2020), 188–197
- [Sumesh, 2018] Sumesh, A., Nair, B. B., Rameshkumar, K., Santhakumari, A., Raja, A., and Mohandas, K., *Decision tree based weld defect classification using current and voltage signatures in GMAW process*, *Materials Today: Proceedings* (2018), 5(2, Part 2), 8354–8363
- [Szost, 2016] Szost, B. A., Terzi, S., Martina, F., Boisselier, D., Prytuliak, A., Pirling, T., Hofmann, M., and Jarvis, D. J., *A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components*, *Materials & Design* (2016), 89, 559–567
- [Tabernero, 2018] Tabernero, I., Paskual, A., Álvarez, P., and Suárez, A., *Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing*, *Procedia CIRP* (2018), 68, 358–362
- [Tang, 2017] Tang, S., Wang, G., Zhang, H., and Wang, R., *An online surface defects detection system for AWAM based on deep learning* (2017)
- [Terrazas, 2014] Terrazas, C., Gaytan, S., Rodriguez, E., Espalin, D., Murr, L., Medina, F., and Wicker, R., *Multi-material metallic structure fabrication using electron beam melting*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2014), 71
- [Thekkuden, 2018] Thekkuden, D. T., Santhakumari, A., Sumesh, A., Mourad, A.-H. I., and Rameshkumar, K., *Instant detection of porosity in gas metal arc welding by using probability density distribution and control chart*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018), 95(9), 4583–4606

- [Thijs, 2010] Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van, and Kruth, J.-P., *A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V*, *Acta Materialia* (2010), 58(9), 3303–3312
- [Tian, 2017] Tian, Y., Ouyang, B., Gontcharov, A., Gauvin, R., Lowden, P., and Brochu, M., *Microstructure evolution of Inconel 625 with 0.4 wt% boron modification during gas tungsten arc deposition*, *Journal of Alloys and Compounds* (2017), 694, 429–438
- [Tofail, 2018] Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., and Charitidis, C., *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*, *Materials Today* (2018), 21(1), 22–37
- [TOPTIG, 2021] OPTIG, https://promarchive.ru/en/catalog/industrial_machines_and_equipment/welding_and_assembly/welding_torches/automated_welding_torch_robotic_-_toptig/ (2021)
- [Twelves, 2010] Twelves, W., *US 7,777,155 B2* (2010), 2(12)
- [TWI, 2021] TWI, <https://3dprint.com/239976/lasimm-hybrid-wire-arc-3d-printing-and-milling-robot-to-make-6-meter-by-2-meter-steel-3d-printed-parts/> (2021)
- [UNE-EN ISO 6507-1:2018, 2018] UNE-EN ISO 6507-1:2018, *Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo (ISO 6507-1:2018)* (2018)
- [UNE-EN ISO 6892-1:2020, 2020] UNE-EN ISO 6892-1:2020, *Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente (ISO 6892-1:2019)* (2020)
- [Vallejo, 2016] Vallejo, H., Seco, M., Suárez, A., Artaza, T., and Puertas, G., *Thermo-mechanical modelling of the Wire and Arc Additive Manufacturing process of and aeronautic part of Ti6Al4V alloy*, *In NAFEMS* (2016)
- [Veiga, 2020] Veiga, F., Suarez, A., Alonso, U., and Gil Del Val, A., *Analysis of the Machining Process of Titanium Ti6Al-4V Parts Manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)*, *Materials* (2020), 13, 766
- [Veldsman, 2012a] Veldsman, W. M., *A method of weld cladding with simultaneous deposition of weld on a side and cryogenic cooling on the opposite side ; Apparatus for performing such method* (2012a), 1(19), 1–14 Retrieved from <https://patents.google.com/patent/EP2511037B1>
- [Veldsman, 2012b] Veldsman, W. M., *EP 2 511 037 A1* (2012b), 1(19), 1–14 Retrieved from <https://patents.google.com/patent/EP2511037B1>

- [Verma, 2010] Verma, A., Paul, B., Singh, J., Ramaswamy, K., Nalawade, S., and Mahadevan, S., *Evolution of Delta Phase Microstructure in Alloy 718* (2010)
- [Vilaro, 2011] Vilaro, T., Colin, C., and Bartout, J., *As-Fabricated and Heat-Treated Microstructures of the Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting*, *Metallurgical and Materials Transactions A* (2011), 42, 3190–3199
- [Wang, 2016a] Wang, C., Ming, W., and Chen, M., *Milling tool's flank wear prediction by temperature dependent wear mechanism determination when machining Inconel 182 overlays*, *Tribology International* (2016), 104
- [Wang, 2012a] Wang, F., Williams, S., Colegrove, P., and Antonysamy, A., *Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V*, *Metallurgical and Materials Transactions A* (2012), 44
- [Wang, 2011] Wang, F., Williams, S., and Rush, M., *Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology - INT J ADV MANUF TECHNOL* (2011), 57
- [Wang, 2020] Wang, H., and Kovacevic, R., *Variable polarity GTAW in rapid prototyping of aluminum parts*, *Proceedings of the 11th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium* (2020)
- [Wang, 2004] Wang, Huijun, Jiang, W., Ouyang, J., and Kovacevic, R., *Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW*, *Journal of Materials Processing Technology* (2004), 148(1), 93–102
- [Wang, 2016b] Wang, J. F., Sun, Q. J., Wang, H., Liu, J. P., and Feng, J. C., *Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding*, *Materials Science and Engineering: A* (2016), 676, 395–405
- [Wang, 2012b] Wang, M., Xu, B., Dong, S., Zhang, J., and Wei, S., *Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces in turning of Fe-based amorphous overlay for remanufacture*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2012), 65
- [Wang, 2012c] Wang, M., Xu, B., Zhang, J., Dong, S., and Wei, S., *Experimental observations on surface roughness, chip morphology, and tool wear behavior in machining Fe-based amorphous alloy overlay for remanufacture*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2012), 67

- [Wang, 2017] Wang, P., Hu, S., Shen, J., and Liang, Y., *Characterization the contribution and limitation of the characteristic processing parameters in cold metal transfer deposition of an Al alloy*, Journal of Materials Processing Technology (2017), 245, 122–133
- [Wei, 2001] Wei, E., Farson, D., Richardson, R., and Ludewig, H., *Detection of Weld Surface Porosity by Statistical Analysis of Arc Current in Gas Metal Arc Welding*, Journal of Manufacturing Processes (2001), 3(1), 50–59
- [William, 2003] William, I., Abbey, D., Gb, D. D. E., Alan, S., and Gb, D. D. E.,* EP001281467A2 * Designated Extension States : (2003), (19)
- [Williams, 2015] Williams, S, Martina, F., Addison, A., Ding, J., Pardal, G., and Colegrove, P., *Wire+Arc Additive Manufacturing*, Materials Science and Technology (2015), 1743284715Y.000
- [Williams, 2016] Williams, Stewart, *WAAM - Current and Future Developments*, In Defence and Space Conference 29 (2016). London
- [Wolf Robotics, 2021] Wolf Robotics, <https://www.gasworld.com/wolf-robotics-to-advance-robotic-metal-additive-manufacturing/2010907.article> (2021)
- [Wu, 2017] Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., Han, J., and Fei, Z., *Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V*, Journal of Materials Processing Technology (2017), 250, 304–312
- [Wu, 2018a] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., and Fei, Z., *The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy*, Journal of Materials Processing Technology (2018), 258, 97–105
- [Wu, 2018b] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., and Norrish, J., *A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement*, Journal of Manufacturing Processes (2018), 35, 127–139
- [Wu, 2014] Wu, H., and Zhang, S., *Effects of cutting conditions on the milling process of titanium alloy Ti6Al4V*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2014), 77
- [Wu, 2004] Wu, X., Liang, J., Mei, J., Mitchell, C., Goodwin, P. S., and Voice, W., *Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V*, Materials & Design (2004), 25(2), 137–144

- [XIAO, 1993] XIAO, Y., and DEN OUDEN, G., *Weld pool oscillation during GTA welding of mild steel*, *Welding Journal* (1993), 72(8), 428
- [Xiong, 2016] Xiong, J., Yin, Z., and Zhang, W., *Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing*, *Journal of Materials Processing Technology* (2016), 233, 100–106
- [Xiong, 2013] Xiong, J., Zhang, G., Qiu, Z., and Li, Y., *Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing*, *Journal of Cleaner Production* (2013), 41, 82–88
- [Xiong, 2015] Xiong, J., Zhang, G., and Zhang, W., *Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2015), 80(9), 1767–1776
- [Xiong, 2009] Xiong, X., Zhang, H., and Wang, G., *Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling*, *Journal of Materials Processing Technology* (2009), 209(1), 124–130
- [Xu, 2013] Xu, F. J., Lv, Y. H., Xu, B. S., Liu, Y. X., Shu, F. Y., and He, P., *Effect of deposition strategy on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by pulsed plasma arc deposition*, *Materials & Design* (2013), 45, 446–455
- [Xu, 2013] Xu, F., Lv, Y., Liu, Y., Shu, F., He, P., and Xu, B., *Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Inconel 625 Alloy during Pulsed Plasma Arc Deposition Process*, *Journal of Materials Science & Technology* (2013), 29, 480–488
- [Xu, 2016] Xu, J., Mkaddem, A., and El Mansori, M., *Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review*, *Composite Structures* (2016), 135, 316–338
- [Yadroitsev, 2011] Yadroitsev, I., and Smurov, I., *Surface Morphology in Selective Laser Melting of Metal Powders*, *Physics Procedia* (2011), 12, 264–270
- [Yan, 2018] Yan, X., Yin, S., Chen, C., Huang, C., Bolot, R., Lupoi, R., Kuang, M., Ma, W., Coddet, C., Liao, H., and Liu, M., *Effect of heat treatment on the phase transformation and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting*, *Journal of Alloys and Compounds* (2018), 764, 1056–1071

- [Yang, 2016] Yang, D., He, C., and Zhang, G., *Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing*, *Journal of Materials Processing Technology* (2016), 227, 153–160
- [Yao, 2016] Yao, P., Xue, J., Zhou, K., Wang, X., and Zhu, Q., *Symmetrical transition waveform control on double-wire MIG welding*, *Journal of Materials Processing Technology* (2016), 229, 111–120
- [Ye, 2015] Ye, X., Hua, X., Wang, M., and Lou, S., *Controlling hot cracking in Ni-based Inconel-718 superalloy cast sheets during tungsten inert gas welding*, *Journal of Materials Processing Technology* (2015), 222
- [Yilmaz, 2016] Yilmaz, O., and Uglan, Adnan, *Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (2016), 230
- [Yoo, 1993] Yoo, C. D., and Richardson, R. W., *Experimental Study on Sensitivity and Signal Characteristics of Weld Pool Oscillation*, *Transactions of the Japan Welding Society* (1993), 24(2), 54–62 Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0027679193&partnerID=40&md5=465a76083d4c936b5b2a5527c49c9e18>
- [Yu, 2015] Yu, H., Xu, Y., Song, J., Pu, J., Zhao, X., and Yao, G., *On-line monitor of hydrogen porosity based on arc spectral information in Al–Mg alloy pulsed gas tungsten arc welding*, *Optics & Laser Technology* (2015), 70, 30–38
- [Yusa, 2006] Yusa, N., Janousek, L., Rebican, M., Chen, Z., Miya, K., Chigusa, N., and Ito, H., *Detection of embedded fatigue cracks in Inconel weld overlay and the evaluation of the minimum thickness of the weld overlay using eddy current testing*, *Nuclear Engineering and Design* (2006), 236(18), 1852–1859
- [Yusof, 2017] Yusof, M. F. M., Kamaruzaman, M. A., Ishak, M., and Ghazali, M. F., *Porosity detection by analyzing arc sound signal acquired during the welding process of gas pipeline steel*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2017), 89(9–12), 3661–3670
- [Zhang, 2016] Zhang, J., Zhang, X., Wang, X., Ding, J., Traoré, Y., Paddea, S., and Williams, S., *Crack path selection at the interface of wrought and wire+arc additive manufactured Ti–6Al–4V*, *Materials & Design* (2016), 104, 365–375

- [Zhang, 2018a] Zhang, X., Chen, Y., and Hu, J., *Recent advances in the development of aerospace materials*, *Progress in Aerospace Sciences* (2018), 97, 22–34
- [Zhang, 2018b] Zhang, Y. M., Song, H. S., and Saeed, G., *Observation of a dynamic specular weld pool surface*, *Measurement Science and Technology* (2006), 17(6)
- [Zhang, 2018c] Zhang, Yu Ming, Li, P., Chen, Y., and Male, A. T., *Automated system for welding-based rapid prototyping*, *Mechatronics* (2002), 12(1), 37–53
- [Zhang, 2014] Zhang, Z., Chen, X., Chen, H., Zhong, J., and Chen, S., *Online welding quality monitoring based on feature extraction of arc voltage signal*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2014), 70(9), 1661–1671
- [Zhang, 2013] Zhang, Z., Yu, H., Lv, N., and Chen, S., *Real-time defect detection in pulsed GTAW of Al alloys through on-line spectroscopy*, *Journal of Materials Processing Technology* (2013), 213(7), 1146–1156
- [Zhao, 2014] Zhao, Y., Sun, J., and Li, J., *Study on chip morphology and milling characteristics of laser cladding layer*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2014), 77, 783–796
- [Zhao, 2018] Zhao, Z., Chen, J., Tan, H., Zhang, G., Lin, X., and Huang, W., *Achieving superior ductility for laser solid formed extra low interstitial Ti-6Al-4V titanium alloy through equiaxial alpha microstructure*, *Scripta Materialia* (2018), 146, 187–191
- [Zhaoju, 2017] Zhaoju, Z., Sui, S., Sun, J., Li, J., and Li, Y., *Investigation on performance characteristics in drilling of Ti6Al4V alloy*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2017), 93, 1–10
- [Zhou, 1999] Zhou, J. G., and He, Z., *A new rapid tooling technique and its special binder study*, *Rapid Prototyping Journal* (1999), 5(2), 82–88
- [Zhou, 2020] Zhou, Y., Qin, G., Li, L., Lu, X., Jing, R., Xing, X., and Yang, Q., *Formability, microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V deposited by wire and arc additive manufacturing with different deposition paths*, *Materials Science and Engineering: A* (2020), 772, 138654
- [Zhu, 2018] Zhu, Z., Guo, K., Sun, J., Li, J., Liu, Y., Chen, L., and Zheng, Y., *Evolution of 3D chip morphology and phase transformation in dry drilling Ti6Al4V alloys*, *Journal of Manufacturing Processes* (2018), 34, 531–539