**Revisión de la tendencia actual de procesos avanzados de fabricación aplicados al mantenimiento de motores aeronáuticos**

**José Manuel Sáenz de Pipaón Sáenz de Pipaón1, Eva María Rubio Alvir 1, David Blanco Gómez 1, Marta María Marín Martín1**

1 Departamento de Ingeniería Construcción y Fabricación, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), C/Juan del Rosal 12, E28040 Madrid, España. jm@saenzdepipaon.com; erubio@ind.uned.es; dblanco78@alumno.uned.es; mmarin@ind.uned.es

**Resumen**

Uno de los sectores más exigentes con los materiales utilizados en la fabricación de sus componentes es el sector aeronáutico; siendo los motores una de las partes más difíciles de fabricar y mantener. El diseño de muchas de sus partes se basa ampliamente en consideraciones aerodinámicas para lograr la máxima eficiencia. Por tanto, muchas de estas piezas presentan una gran complejidad de formas y geometrías. Este trabajo presenta una revisión de los principales procesos avanzados de fabricación utilizados en la fabricación y el mantenimiento de motores. Para lograrlo, se seleccionaron para este estudio algunos de los artículos sobre el tema más citados durante la última década y correspondientes al primer y segundo cuartil del Journal Citation Report.

**Palabras clave:** procesos de fabricación; procesos de corte; procesos de mecanizado; procesos avanzados de mecanizado; aeronáutica/aeroespacial; materiales; aeronaves; reparación; mantenimiento.

**Abstract**

One of the most demanding sectors regarding the materials used in the manufacture of its components is the aeronautical sector, being the engines one of the most difficult parts to manufacture and maintain. The design of many of its parts is largely based on aerodynamic considerations for maximum efficiency. Therefore, many of these parts display a great complexity of shapes and geometries. This paper presents a review of the main advanced manufacturing processes used in engine manufacturing and maintenance. To achieve this, some of the most cited articles on the subject during the last decade and corresponding to the first and second quartile of the Journal Citation Report were selected for this study.

**Keywords:** manufacturing processes; cutting processes; machining processes; advanced machining processes; aeronautics/aerospace; materials; aircraft; repair; maintenance.

# Introducción

Este trabajo se centra en cuáles son las últimas tendencias sobre procesos de mecanizado enfocados a la fabricación y mantenimiento de los motores empleados en el sector aeronáutico. Para ello, se realiza una revisión independiente y sistemática de los trabajos más recientes y representativos en la literatura científica con el fin de establecer unas conclusiones fiables sobre los procesos de fabricación no convencionales utilizados en el sector aeronáutico. De entre todos los productos desarrollados para los diferentes sectores industriales, los motores aeronáuticos están entre los componentes más complejos. El rápido desarrollo de la industria aeronáutica ha hecho que la demanda de motores esté en constante crecimiento, por ejemplo, Rolls Royce estima una oportunidad de negocio de 975 billones de dólares en el periodo de 2012 a 2032 [1]. En 2020 Rolls Royce entregó un total de 250 motores para aviones de fuselaje ancho (widebody en inglés) [2], centrando sus prioridades estratégicas en el sector aeronáutico civil en tres aspectos clave: en primer lugar, conseguir una mejora en la eficiencia de fabricación; en segundo lugar, trabajar con socios de mantenimiento o MRO (Maintenance, Repair and Operations) para aumentar el tiempo de servicio de los más de 5.000 motores que ya tienen operativos y; en tercer lugar, reducir las cantidades que se necesitan invertir para obtener nuevas tecnologías, buscando socios industriales para acelerar estos desarrollos y compartir los riesgos y beneficios de los procesos de fabricación [3].Un motor consta fundamentalmente de unos compresores donde se comprime el aire a unos 27 bar, una cámara de combustión donde el aire comprimido que recibe de los compresores aumenta de temperatura y se envía a unos 800-900ºC hacia las turbinas, en éstas es donde se expansiona el aire aumentado su velocidad de salida, esto proporciona el empuje necesario para la propulsión del avión [4]. En la industria aeronáutica los motores son la parte más difícil de fabricar y mantener. Por ejemplo, en alguno de los motores de última generación utilizados por la aviación comercial se alcanzan velocidades de giro de 22.000 rpm y temperaturas de trabajo de hasta 850ºC [5]. El diseño de muchas de sus partes se basa ampliamente en consideraciones aerodinámicas para lograr la máxima eficiencia. Por tanto, muchas de estas piezas presentan una gran complejidad de formas y geometrías (por ejemplo, bliscks), además, de exigir el uso de materiales con un buen comportamiento frente a la fluencia, la resistencia al calor, la tensión de tracción, la resistencia al agrietamiento por fatiga, la corrosión y la sulfuración. Dadas estas características, entre los materiales que se emplean para fabricar las diferentes piezas del motor se tienen, aleaciones ligeras de magnesio, aluminio o titanio, aceros inoxidables (ferríticos, martensíticos y austeníticos), aleaciones de níquel, aluminuros de titanio, composites de matriz polimérica, de matriz cerámica y de matriz metálica. Muchos de estos materiales tienen una baja maquinabilidad que hace que sean considerados materiales difíciles de mecanizar, por lo que supone un reto afrontar el mecanizado desde el punto de vista de satisfacer los requerimientos exigidos por los diferentes manuales (tolerancias geométricas, dimensionales y rugosidad superficial), así como desde el punto de vista productivo (optimización de parámetros de corte para un proceso eficiente), siendo necesario utilizar procesos de mecanizado avanzados tanto para la fabricación como para el mantenimiento de componentes fabricados con estos materiales. Entre los procesos avanzados de fabricación o procesos no convencionales utilizados en materiales que se emplean en la industria aeronáutica se pueden encontrar: la fabricación aditiva o AM (Additive Manufacturing), bien por fusión de lecho de polvo, como la sinterización por láser o SLS (Selective Laser Sintering), la fusión por láser o SLM (Selective Laser Melting) [6] [7] [8] y la fusión por haz de electrones o EBM (Electron Beam Melting) [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15], o por deposición directa del material o LDM (Laser Metal Deposition), también conocido como Laser Cladding, y la fabricación aditiva de arco de alambre o WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) [16]. El mecanizado electroquímico o ECM (Electro Chemical Machining) [17] [18] [19] [20] [21] [22 [23] [24] [25] [26] [27], el mecanizado por electroerosión o EDM (Electrical Discharge Machining) tanto por penetración como por hilo [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35]. El mecanizado por ultrasonidos o USM (Ultrasonic Machining) [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] o el mecanizado por chorro de agua o WJM (Water Jet Machining) [43] [44] [45] [46] [47].

# Metodología

Este trabajo presenta una revisión de los principales procesos avanzados de fabricación utilizados en la fabricación y el mantenimiento de motores aeronáuticos. Para lograrlo se seleccionaron algunos de los artículos sobre el tema más citados durante la última década (Figura 1) y correspondientes al primer y segundo cuartil del JCR (Journal Citation Report).

Figura . Número de artículos seleccionados por año de publicación.

Todos los trabajos están publicados en inglés, la búsqueda se realizó en WOS (Web of Science) mediante la siguiente ecuación booleana.

**TS**=((aeronaut\* OR aircraft OR airline OR aerosp\* OR air transport OR aviation) AND (Electric\* discharge machining OR wire Electric\* discharge machining OR Ultrasonic Machining OR Water jet machining OR Abrasive water jet machining OR Electrochemical machining OR Chemical machining OR Laser machining OR Electron Beam Machining OR wire EDM OR broaching))

La búsqueda realizada permitió obtener 277 artículos con un total de 4.556 citas y un promedio de 16,45 citas/año, seleccionando 50 artículos para su análisis entre los que tienen mayor número de citas.

# Resultados

Del análisis de los artículos seleccionados se extrae que hay cinco tecnologías que despiertan más interés entre los procesos avanzados de fabricación o no convencionales. Entre estos procesos se encuentra la fabricación aditiva (AM), el mecanizado electroquímico (ECM), la electroerosión (EDM), el mecanizado por ultrasonidos (USM) y el mecanizado por chorro de agua (WJM). En la figura 2 se muestra el porcentaje de artículos según la tecnología tratada en ellos.

Figura 2. Artículos según tecnología tratada.

La fabricación aditiva tiene un gran potencial para ser usada en la industria aeronáutica contribuyendo a reducir costes de producción y desarrollo, además de poder fabricar productos más ligeros que hagan que el consumo de combustible sea menor. Este tipo de fabricación ha recibido una atención significativa a nivel mundial que se ve reflejada en el volumen de publicaciones que muestran las posibilidades de esta tecnología en aplicaciones industriales. De los estudios seleccionados en este trabajo la fabricación aditiva representa el 38%. Thomas-Seale *et al.* [48] realizaron en 2018 un estudio para identificar los límites de este tipo de fabricación para obtener productos de uso final y entender la naturaleza de dichos límites desde una perspectiva industrial. El trabajo se centró en sectores industriales como el aeronáutico, automovilístico, defensa, maquinaria pesada y biomédico; identificando 18 barreras, de las cuales las más importantes son: educación, software, costes, materiales, propiedades mecánicas, validación y acabado.

En este sentido varios estudios están orientados a la investigación en la mejora de las propiedades mecánicas y la simulación numérica [7] [8] [12] [49] [50] [51] [52] [53] [54], al comportamiento a fatiga [6] [9] [10] [11] [14] [55], así como técnicas de acabado [13] [15].

Hossain *et al.* [12] estudian la viabilidad de fabricar componentes mediante EBM con sensores embebidos de materiales cerámicos piezoeléctricos, mostrando como piezas metálicas con sensores en su interior pueden tener una funcionalidad adicional en áreas críticas que normalmente están expuestas a altas temperaturas o presiones y donde puede ser difícil incorporar sensores del modo tradicional. Xu *et al.* [7] estudiaron el comportamiento a fluencia del Inconel 718 fabricado por SLM, el cual presenta un pobre resultado debido a la formación de poros y una microestructura desfavorable, siendo necesario un tratamiento térmico para mejorar el rendimiento a fluencia. Sin embargo, este rendimiento es un 33% menor que el mostrado en probetas mecanizadas de Inconel 718 forjado. Phan *et al.* [49] se centran en la medición de tensiones y deformaciones residuales utilizando difracción por rayos X, difracción de neutrones y método del contorno. Recomiendan, para un completo entendimiento de la tensión/deformación residual, el empleo de diferentes técnicas.

Varios trabajos se basan en la simulación numérica o utilizan algoritmos de aprendizaje automático para detección de fallos [50], análisis de porosidad [8], predicción de desviaciones geométricas [51], construcción de reglas de diseño que ayuden a entender la influencia de la fabricación aditiva en la calidad de la pieza [52], detallar los mecanismos de absorción de energía y disipación de calor [53], o evaluar el rendimiento de piezas en una aplicación determinada [54].

Uno de los mayores retos de la fabricación aditiva es la baja resistencia a la fatiga. Los factores más determinantes en el comportamiento a fatiga de las piezas fabricadas de forma aditiva son la rugosidad superficial y los defectos relacionados con la microestructura, por ejemplo, porosidad, falta de fusión y orientación en el aporte. Chern *et al.* [9] realizan una investigación sobre Ti-6Al-4V fabricado mediante EBM en la que muestran los efectos de la orientación y tratamientos cómo el mecanizado y el prensado isostático en caliente o HIP (Hot Isostatic Pressing) afectan al comportamiento a fatiga, comparándolo con titanio fabricado de forma tradicional. Las piezas mecanizadas y tratadas mediante HIP presentan un comportamiento comparable al de estructuras de titanio tradicionales, destacando que son los métodos más efectivos para incrementar la resistencia a la fatiga de piezas fabricadas de Ti-6Al-4V mediante EBM. Persenot *et al.* [10] también estudian el efecto de la orientación y su relación con la distribución de defectos y crecimiento de grietas en Ti-6Al-4V fabricado por EBM, siendo la orientación horizontal la que presenta mejores resultados. Kahlin *et al.* [11] comparan distintas técnicas de post procesado en el comportamiento a fatiga del Ti-6Al-4V fabricado por EBM y SLM. Entre las técnicas que utilizan está el vibropulido o CF (Centrifugal Finishing), el granallado o SP (Shot Peening), el pulido por láser o LP (Laser Polishing), el granallado por láser o LSP (Laser Shock Peening) y el pulido o Lin (Linishing), destacando que la resistencia a la fatiga del material obtenido por EBM y tratado por vibropulido CF o por granallado SP obtienen valores comparables al titanio forjado y mecanizado. Romano *et al.* [6] analizan el comportamiento a fatiga del acero inoxidable 17-4PH obtenido por SLM y tratado térmicamente H1025, estudiando los efectos de la porosidad y la rugosidad superficial. Balachandramurthi *et al.* [14] estudian el comportamiento a fatiga del Inconel 718 fabricado por EBM, relacionando este comportamiento con la anisotropía que presenta el módulo de elasticidad o de Young. Muhammad *et al.* [55] se centran en analizar el comportamiento a altos y muy altos ciclos de fatiga del Inconel 718 obtenido por EBM.

Otro aspecto interesante son las técnicas de post procesado. En este sentido Tian *et al.* [13] analizan el pulido por láser en componentes fabricados en Ti-6Al-4V mediante EBM, obteniendo una mejora del 75% en la rugosidad superficial (medido en escala milimétrica) utilizando esta técnica. En la zona afectada térmicamente (HAZ) se produce un aumento de la dureza, también se induce unas tensiones residuales de tracción que pueden ser relajadas realizando un tratamiento de alivio de tensiones. Pirozzi *et al.* [15] estudian los efectos del post procesado por mecanizado en el comportamiento mecánico del Ti-6Al-4V fabricado por EBM, obteniendo que la resistencia a la tracción y la curva de fatiga es comparable a la del material estándar forjado, aunque el valor de la tenacidad de fractura *KIC* es considerablemente peor que el del material estándar en estado recocido.

Otro proceso avanzado de fabricación que presenta un gran interés es el mecanizado electroquímico o ECM, representando el 22% de los estudios seleccionados. Este proceso ya se utiliza en el mantenimiento de algunos componentes de los motores, como por ejemplo en el mecanizado de estructuras de panal de abeja fabricadas de aleación de níquel, aunque su gran potencial puede estar en la fabricación de álabes y blisks. Leese e Ivanov [18] muestran una introducción al mecanizado electroquímico. En primer lugar, dan una revisión del proceso para, posteriormente, centrarse en los electrolitos, formación de la capa de pasivado y las razones para seleccionar un electrolito, en la separación del electrodo o IEG (Inter-Electrode Gap) de gran importancia en este tipo de mecanizado, en la eficiencia del material eliminado o MRR (Material Removal Rate), así como las limitaciones que presenta este tipo de mecanizado. Xu y Wang [19] presentan un estudio dónde se detallan los desarrollos, tendencias y avances tecnológicos en el mecanizado electroquímico de componentes complejos de motores aeronáuticos. Definen las principales líneas de investigación en ECM para fabricar componentes de los motores y su capacidad para fabricar álabes de compresor de baja y alta, blisk, cárteres, cámara de combustión, álabes de turbina de alta y baja, así como agujeros de refrigeración que llevan estos. El estudio concluye que este método de mecanizado presenta numerosas ventajas, tales como independencia de las propiedades mecánicas del material, no desgaste de la herramienta, una integridad superficial superior, bajos costes del mecanizado y alta eficiencia del mecanizado. Dong *et al.* [20] desarrollan experimentalmente un modelo matemático para el control de la trayectoria de la herramienta electrodo en la fabricación de blisk, los cuales combinan los álabes y el disco en una sola pieza. Las actuales tecnologías que se emplean en la fabricación de los blisks son el mecanizado electroquímico o ECM (45%), el mecanizado a alta velocidad o HSC (High Speed Machining) (45%) y la soldadura por fricción o LFW (Linear Friction Welding) (10%) [19]. Dong *et al.* [23] proponen un modelo matemático basado en una corrección iterativa de los errores del perfil predicho de un álabe. Zhu *et al.* [25] desarrollan un modelo de flujo del electrolito para proporcionar flujo uniforme alrededor de todo el perfil del álabe en la fabricación de un difusor, realizando una serie de experimentos para demostrar la eficiencia del mecanizado y la mejora en la calidad del álabe con el modelo propuesto. Zhu *et al.* [22] desarrollan una simulación e investigación experimental sobre un modelo de flujo dinámico lateral en el cual el electrolito fluye desde el borde de ataque (leading edge) del álabe al borde de salida (trailing edge), mejorando la uniformidad del flujo.

Figura 3. Agujeros de refrigeración en un álabe de turbina. Fuente: elaboración propia.

Un reto en los materiales empleados en la fabricación de álabes de turbina es el mecanizado de los agujeros de refrigeración que llevan en el perfil aerodinámico (figura 3), en este sentido Zhang *et al.* [21] realizan un estudio experimental sobre una aleación de níquel monocristal usando una técnica híbrida de taladrado por electroerosión a alta velocidad y mecanizado electroquímico, esta técnica proporciona una alta eficiencia y precisión en el mecanizado, además de eliminar la capa refundida de la electroerosión. Emplean la metodología de diseño de experimentos para optimizar los parámetros de mecanizado, concluyendo que esta técnica es muy útil para obtener agujeros con una mejorada calidad superficial eliminando la capa refundida. Zeng *et al.* [27] investiga los efectos de un flujo pulsante de electrolito en el mecanizado de agujeros profundos, concluyendo que es mejor que el flujo continuo en la mejora de la profundidad y precisión del mecanizado.

Ningsong *et al.* [17] centran su estudio en el mecanizado electrolítico por hilo en aleaciones de titanio, Zhengyang *et al.* [24] investigan la viabilidad del mecanizado electroquímico en la nueva aleación de titanio (BuRTi) Ti40 resistente a quemaduras, esta aleación se ha desarrollado para ser usada en componentes de motor. Por último, Wang *et al.* [26] realizan un estudio de la mejora del ECM de grandes áreas por enmascarado.

El mecanizado por electroerosión o EDM es otro método de mecanizado no convencional que se emplea en la fabricación y mantenimiento de componentes del motor. Representa el 16% de los estudios seleccionados, es una técnica que se emplea, por ejemplo, en la reparación de sellados con estructura de panal de abeja en la parte caliente del motor. Varios trabajos se centran en la integridad superficial y su relación con las propiedades mecánicas, mientras que otros en las propiedades del dieléctrico en la optimización del proceso. Mower [29] estudia la influencia de la electroerosión en el comportamiento a fatiga del Ti-6Al-4V, mostrando una reducción del 15-30% que es atribuida a la concentración de tensiones dentro de la capa refundida, pudiendo mejorarse con granallado para aliviar las tensiones. Holmberg *et al.* [30] analizan la integridad superficial del Inconel 718 mecanizado por electroerosión, haz láser y chorro de agua, comparándola con una superficie fresada, concluyendo que la electroerosión y el chorro de agua son alternativas viables, aunque deben post procesarse para eliminar efectos no deseados durante el mecanizado. No, así, el mecanizado por haz láser que no resulta ser una alternativa. Holmberg *et al.* [33] realizan una investigación comparando técnicas de post procesado como el mecanizado por chorro de agua, el chorreado con óxido de aluminio y el granallado con partículas de acero para recuperar la integridad superficial del Inconel 718 mecanizado mediante EDM. Para los autores, el mecanizado por chorro de agua es quien más elimina los residuos del EDM, aunque las tres técnicas generan tensiones residuales de compresión. Naik *et al.* [34] investigan experimentalmente un modelo predictivo multirrespuesta en la optimización del EDM en el mecanizado de composites de matriz metálica (Al-SiC MMC). Para ello, emplean el diseño de experimentos y la metodología de las superficies de respuesta. Ma *et al.* [35] estudian la combinación de EDM y ECM en el mecanizado de agujeros no circulares en aleación de níquel.

Tang y Du [28] realizan un estudio experimental usando agua de grifo (75%) y agua desionizada (25%) como electrolito en la optimización del mecanizado de titanio tomando como variables respuesta el desgaste del electrodo, la tasa de eliminación de material y la rugosidad superficial. Unses y Cogun [31] analizan el rendimiento del mecanizado de Ti-6Al-4V añadiendo polvo de grafito al electrolito, concluyendo que mejora tanto la tasa de eliminación de material como la rugosidad superficial (*Ra* y *Rz*), además de disminuir el desgaste del electrodo. Mohanty y Routara [32] realizan una revisión del mecanizado de composites de matriz metálica o MMC (Metal Matrix Composites) usando nanopartículas (aluminio, grafito, cobre, cromo, carburo de silicio) en el dieléctrico, consiguiendo mejorar la tasa de eliminación de material y la rugosidad superficial.

El mecanizado por ultrasonidos representa el 14% de los estudios seleccionados, Feng *et al.* [36] estudian la viabilidad de esta técnica en el mecanizado de la fibra de carbono o CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polimer), concluyendo que puede ser utilizado con una alta productividad y bajo desgaste de la herramienta. Haidong *et al.* [37], Bai *et al.* [38] y He *et al.* [41] estudian la maquinabilidad del Inconel 718 con USM, como conclusiones obtienen una mejora en la rugosidad superficial comparado con el mecanizado tradicional, generando tensiones residuales de compresión y un menor desgaste de la herramienta. Airao *et al.* [42] realizan un estudio experimental en el torneado por ultrasonidos en Nimonic 90 consiguiendo una mejora en la rugosidad (70-80%) y un menor consumo de energía (6-15%). Peng *et al.* [39] y Gao *et al.* [40] estudian la influencia del mecanizado por ultrasonidos en el Ti-6Al-4V, obteniendo más precisión y mejor acabado superficial.

Otro proceso no convencional de mecanizado, que representa el 10% de los trabajos seleccionados, es el mecanizado por chorro de agua o WJM. Hejjaji *et al.* [44] y Hussien *et al.* [47] estudian la influencia de la profundidad de pasada en el comportamiento a fatiga y del rendimiento de corte mecanizando CFRP, para los autores el mecanizado por chorro de agua puede ser una alternativa a los procesos convencionales de fresado, eliminando defectos de deformación que pueden ser un obstáculo para el control de la profundidad. Kishore *et al.* [46] realizan una investigación experimental sobre la efectividad del WJM en el control del ancho de corte del mecanizado de Inconel 825. Para ello, utiliza una matriz ortogonal L25 para analizar las variables velocidad de desplazamiento, flujo del chorro y distancia de éste; concluyendo que la velocidad de desplazamiento es el factor más significante. Liao *et al.* [45] proponen dos procesos WJM para el mecanizado de aleaciones de níquel. Un primer proceso para eliminar material y un segundo para preparar la superficie (mediante el uso de arena o perdigón de acero), esto elimina partículas embebidas en el material o arañazos mejorando el comportamiento a fatiga del Inconel. Marichamy *et al.* [43] estudian la optimización del mecanizado de agujeros en latón, utilizan el análisis de la varianza y la metodología de las superficies de respuesta para analizar la influencia de la presión, velocidad de desplazamiento y flujo másico sobre la rugosidad superficial, concluyendo que la presión de agua es el factor más determinante en la rugosidad superficial de los agujeros y en la tasa de eliminación de material.

Otros aspectos de interés a analizar sobre la selección de trabajos realizada son los materiales que mayor interés presentan y cuál es el origen de los trabajos. En la figura 4 se muestra los materiales tratados en los trabajos seleccionados. En gran medida, las aleaciones de titanio (31%) y superaleaciones de níquel (26%) son el objetivo principal de las investigaciones realizadas. La figura 5 muestra cómo China (34%), Estados Unidos (18%) y Reino Unido (16%) lideran el interés por este tipo de conocimiento.

Figura 4. Artículos según material estudiado.

Figura 5. Artículos seleccionados según origen.

# Conclusiones

El presente trabajo busca dar respuesta a la pregunta de cuáles son las tendencias más novedosas, en el ámbito científico, relacionadas con los procesos avanzados de fabricación enfocados a la fabricación y mantenimiento de motores aeronáuticos. Para ello, se ha realizado una revisión de estudios sobre el tema publicados en la última década, concluyendo que existe un gran interés por la fabricación aditiva (AM), siendo un aspecto crítico el avance en la mejora de las propiedades mecánicas en las piezas así fabricadas; en el mecanizado electroquímico (ECM), donde es necesario el desarrollo de electrolitos y el control de la separación electrodo-pieza; el mecanizado por electroerosión (EDM), siendo necesario progresar en la precisión del corte, la integridad superficial y su relación con las propiedades mecánicas; el mecanizado por ultrasonidos (USM), necesitando desarrollar procesos menos costoso; y el mecanizado por chorro de agua (WJM), donde el avance en la optimización de los parámetros de proceso mejorará el rendimiento.

# Referencias

[1] Rolls Royce. “ Rolls Royce Holding PLC Annual Report 2012” Disponible en www.rolls-royce.com.

[2] Rolls Royce. “ Rolls Royce Holding PLC H1 2020 Trading Update” Disponible en www.rolls-royce.com.

[3] Rolls Royce. “ Rolls Royce Holding PLC Half Year Results Presentation 2020” Disponible en www.rolls-royce.com.

[4] Rolls Royce. “The Jet Engine” ISBN 0902121235, 1996.

[5] Pratt & Whitney GTF Engine. Disponible en www.prattwhitney.com.

[6] S. Romano; P.D. Nezhadfar; N. Shamsaei; M. Seifi; S. Beretta. “High cycle fatigue behavior and life prediction for additively manufactured 17-4 PH stainless steel: Effect of sub-surface porosity and surface roughness”. *Theor. Appl. Mech.*. 106; 2020.

[7] Z. Xu; C.J. Hyde; C. Tuck; A.T. Clare. “Creep behaviour of inconel 718 processed by laser powder bed fusión” *J. Mat. Process. Tech.* 256; pp 13-24; 2018.

[8] R. Liu; S. Liu; X. Zhang; “A physics-informed machine learning model for porosity analysis in laser powder bed fusion additive manufacturing” Int. J. Adv. Manuf. Tech., 113, 7-8, pp 1943-1958; 2021.

[9] A.H. Chern; P. Nandwana; T. Yuan; M.M. Kirka; R.R. Dehoff; P.K. Liaw; C.E. Duty. “A review on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam melting additive manufacturing” *Int. J. Fatigue*, 119, pp 173-184; 2019.

[10] T. Persenot; A. Burr; G. Martin; J. Buffiere; R. Dendievel; E. Maire; “Effect of build orientation on the fatigue properties of as-built Electron Beam Melted Ti-6Al-4V alloy” *Int. J. Fatigue*, Elsevier, 118, pp 65-76; 2019.

[11] M. Kahlin; H. Ansell; D. Basu; A. Kerwin; L. Newton; B. Smith; J.J. Moverare. “Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing” *Int. J. Fatigue*, Elsevier, 134, 2020.

[12] M.S. Hossain; J.A. Gonzalez; R. Hernandez; M.A. Shuvo; J. Mireles; A. Choudhuri; Y. Lin; R.B. Wicker. “Fabrication of smart parts using powder bed fusion additive manufacturing technology” *Addit. Manuf.*, 10, pp 58-66; 2016.

[13] Y. Tian; W.S. Gora; A. P. Cabo; L. Parimi; D. P. Hand; S. Tammas-Williams; P. B. Prangnell. “Material interactions in laser polishing powder bed additive manufactured Ti6Al4V components” *Addit. Manuf.*, 20, pp 11-22; 2018.

[14] A.R. Balachandramurthi; J. Moverare; T. Hansson; R. Pederson. “Anisotropic fatigue properties of Alloy 718 manufactured by Electron Beam Powder Bed Fusion”. *Int. J. Fatigue*, 141, 2020,

[15] C. Pirozzi; S. Franchitti; R. Borrelli; A. Chiariello; L. Di Palma. “The Effect of Post-Processing on the Mechanical Behavior of Ti6Al4V Manufactured by Electron Beam Powder Bed Fusion for General Aviation Primary Structural Applications”. *Aerospace*. 7, 6, 2020.

[16] F. Martina; J. Mehnen; S. W.Williams;P. Colegrove; F. Wang. “Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V” *J. Mat. Process. Tech.*. 212, 6, pp 1377-1386. 2012.

[17] Q. Ningsong; F. Xiaolong; L. Wei; Z. Yongbin; Z. Di. “Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy” *Chinese J. Aeronaut.*. 26, 1, pp224-229. 2013.

[18] R.J. Leese; A. Ivanov. “Electrochemical micromachining: An introduction”. *Adv. Mech. Eng.* 8, 1, 2016.

[19] Z. Xu; Y. Wang. “Electrochemical machining of complex components of aero-engines: Developments, trends, and technological advances” *Chinese J. Aeronaut.* 34, 2, pp 28-53, 2021.

[20] Z. Dong; Z. Di; X. Zhengyang; Z. Laishui. “Trajectory control strategy of cathodes in blisk electrochemical machining” *Chinese J. Aeronaut.*. 26, 4, pp 1064-1070, 2013.

[21] Y. Zhang; Z. Xu; Y. Zhu; D. Zhu. “Machining of a film-cooling hole in a single-crystal superalloy by high-speed electrochemical discharge drilling” *Chinese J. Aeronaut.*. 29, 2, pp 560-570, 2016.

[22] D. Zhu; Z. Gu; T. Xue; A. Liu. “Simulation and experimental investigation on a dynamic lateral flow mode in trepanning electrochemical machining” *Chinese J. Aeronaut.*. 30, 4, pp 1624-1630, 2017.

[23] Z. Dong; L. Cheng; X. Zhengyang; L. Jia. “Cathode design investigation based on iterative correction of predicted profile errors in electrochemical machining of compressor blades” *Chinese J. Aeronaut.*. 29, 4, pp1111-1118, 2016.

[24] X. Zhengyang; L. Jia; Z. Dong; Q. Ningsong; W. Xiaolong; C. Xuezhen. “Electrochemical machining of burn-resistant Ti40 alloy”. *Chinese J. Aeronaut.*. 28, 4, pp 1263-1272, 2015

[25] D. Zhu; T. Xue; X. Hu; Z. Gu. “Electrochemical trepanning with uniform electrolyte flow around the entire blade profile”. *Chinese J. Aeronaut.*. 32, 7, pp 1748-1755, 2019.

[26] G. Wang; H. Li; C. Zhang; D. Zhu. “Improvement of machining consistency during through-mask electrochemical large-area machining” ”. *Chinese J. Aeronaut.*. 32, 4, pp 1051-1058, 2019.

[27] Y. Zeng; X. Fang; Y. Zhang; N. Qu. “Electrochemical Drilling of Deep Small Holes in Titanium Alloys with Pulsating Electrolyte Flow” *Adv. Mech. Eng.*. 2014.

[28] L. Tang; Y.T. Du.” Experimental study on green electrical discharge machining in tap water of Ti-6Al-4V and parameters optimization”. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*. 70, 1-4, pp 469-475, 2014.

[29] T.M. Mower. “Degradation of titanium 6A1-4V fatigue strength due to electrical discharge machining”. *Int. J. Fatigue*. 64, pp 84-96, 2014.

[30] J. Holmberg; J. Berglund; A. Wretland; T. Beno. “Evaluation of surface integrity after high energy machining with EDM, laser beam machining and abrasive water jet machining of alloy 718” *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*. 100, 5-8, pp 1575-1591, 2019.

[31] E. Unses; C. Cogun. “Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric”. *J. Mech. Eng.*. 61, 6, pp 409-418, 2015.

[32] S. Mohanty; B.C. Routara. “A review on machining of metal matrix composites using nanoparticle mixed dielectric in electro-discharge machining” *Int. J. Autom. Mech. Eng.*. 13, 2, pp 3518-3639, 2016.

[33] J. Holmberg; A. Wretland; J. Berglund; T. Beno. “Surface integrity after post processing of EDM processed Inconel 718 shaft”. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*. 95, 5-8, pp 2325-2337, 2018.

[34] S. Naik; S.R. Das; D. Dhupal. “Analysis, predictive modelling and multi-response optimization in electrical discharge machining of Al-22%SiC metal matrix composite for minimization of surface roughness and hole overcut” *Manuf. Review*. 7, 2020.

[35] N. Ma; X. Yang; M. Gao; J. Song; G. Liu; W. Xu. “A study of electrodischarge machining-pulse electrochemical machining combined machining for holes with high surface quality on superalloy”. *Adv. Mech. Eng.* 7, 11, 2015.

[36] Q. Feng; W.L. Cong; Z.J. Pei; C.Z. Ren. “Rotary ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced polymer: Feasibility study”. *Mach. Sci. Tech.*. 16, 3, pp 380-398, 2012.

[37] Z. Haidong; Z. Ping; M. Wenbin; Z. Zhongming. “A Study on Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting of Inconel 718”. *Shock and Vibration*, 2016.

[38] W. Bai; A. Bisht; A. Roy; S. Suwas; R. Sun; V.V. Silberschmidt. “Improvements of machinability of aerospace-grade Inconel alloys with ultrasonically assisted hybrid machining”. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*. 101, 5-8, pp 1143-1156, 2019.

[39] Z. Peng; D. Zhang; X. Zhang. “Chatter stability and precision during high-speed ultrasonic vibration cutting of a thin-walled titanium cylinder”. *Chinese J. Aeronaut.*. 33, 12, pp 3535-3549, 2020.

[40] G. Gao; Z. Xia; Z. Yuan; D. Xiang; B. Zhao. “Influence of longitudinal-torsional ultrasonic-assisted vibration on micro-hole drilling Ti-6Al-4V”. *Chinese J. Aeronaut.*. 34, 9, pp 247-260, 2021.

[41] Y. He; Z. Zhou; P. Zou; X. Gao; K.F. Ehmann. “Study of ultrasonic vibration-assisted thread turning of Inconel 718 superalloy” *Adv.Mech. Eng.*. 11, 10, 2019.

[42] J. Airao; N. Khanna; A Roy; H. Hegab. “Comprehensive experimental analysis and sustainability assessment of machining Nimonic 90 using ultrasonic-assisted turning facility”. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*. 109, 5-6, pp 1447-1462, 2020.

[43] S. Marichamy; M. Ravichandran; B. Stalin; B.S. Babu. “Optimization of Abrasive Water Jet Machining Parameters for alpha-beta brass using Taguchi Methodology”. *FME Trans.*. 47, 1, pp116-121, 2019.

[44] A. Hejjaji; R. Zitoune; L. Toubal; L. Crouzeix; F. Collombet. “Influence of controlled depth abrasive water jet milling on the fatigue behavior of carbon/epoxy composites”. *Comp. Part-A-Appl. Sci. Manuf.*. 121, pp 397-410, 2019.

[45] Z. Liao; I. Sanchez; D. Xu; D. Axinte; G. Augustinavicius; A. Wretland. “Dual-processing by abrasive waterjet machining-A method for machining and surface modification of nickel-based superalloy”. *J. Mat. Process. Tech.*. 285, 2020.

[46] S.J. Kishore; P.C. Teja; B. Eshwariaha; K.H. Reddy. “Experimental Control of Kerf Width Taper During Abrasive Water Jet Machining”. *FME Trans.*. 47, 3, pp 585-590, 2019.

[47] A.A. Hussien; I. Qasem; P.S. Kataraki; W. Al-Kouz; A.A. Janvekar. “Studying the Performance of Cutting Carbon Fibre-Reinforced Plastic Using an Abrasive Water Jet Technique”. *J. Mech. Eng.*. 67, 4, pp 135-141, 2021.

[48] L.E.J. Thomas-Seale; J.C. Kirkman-Brown; M.M. Attallah; D.M. Espino; D.E. Shepherd. “The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry”. *Int. J.Prod. Econ.*. 198, pp 104-118, 2018.

[49] T.Q. Phan; M. Strantza; M.R. Hill; T.H. Gnaupel-Herold; J. Heigel; C.R. D'Elia; A.T. DeWald; B. Clausen; D.C. Pagan; J.Y.P. Ko; D.W. Brown; L.E. Levine. “Elastic Residual Strain and Stress Measurements and Corresponding Part Deflections of 3D Additive Manufacturing Builds of IN625 AM-Bench Artifacts Using Neutron Diffraction, Synchrotron X-Ray Diffraction, and Contour Method”. *Integ. Mat. Manuf. Inn.*. 8, 3, pp 318-334, 2019.

[50] I.A. Okaro; S. Jayasinghe; C. Sutcliffe; K. Black; P. Paoletti; P.L. Green. “Automatic fault detection for laser powder-bed fusion using semi-supervised machine learning”. *Addit. Manuf*. 27, pp 42-53, 2019.

[51] I. Baturynska; K. Martinsen. “Prediction of geometry deviations in additive manufactured parts: comparison of linear regression with machine learning algorithms”. *J. Intell. Manuf*. 32, 1, pp 179-200, 2021.

[52] H. Ko; P. Witherell; Y. Lu; S. Kim; D.W. Rosen. “Machine learning and knowledge graph based design rule construction for additive manufacturing”. *Addit. Manuf*. 37, 2021.

[53] M. Chiumenti; X. Lin; M. Cervera; W. Lei; Y. Zheng; W. Huang. “Numerical simulation and experimental calibration of additive manufacturing by blown powder technology. Part I: thermal analysis”. *Rapid Protot. J*. 23, 2, pp 448-463, 2017.

[54] C.D. Tommila; C.R. Hartsfield; J.J. Redmond; J.R. Komives; T.E. Shelton. “Performance Impacts of Metal Additive Manufacturing of Very Small Nozzles”. *J. Aeros. Eng*. 34, 2, 2021.

[55] M. Muhammad; P. Frye; J. Simsiriwong; S. Shao; N. Shamsaei. “An investigation into the effects of cyclic strain rate on the high cycle and very high cycle fatigue behaviors of wrought and additively manufactured Inconel 718”. *Int. J. Fatigue*. 144, 2021.