

LA MANUFACTURA ADITIVA COMO ELEMENTO IMPRESCINDIBLE DE LA INDUSTRIA 4.0 EN BENEFICIO DE LA INGENIERÍA: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

MARCO ANTONIO DÍAZ-MARTÍNEZ

<https://orcid.org/0000-0003-1054-7088>

Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas A. C., Campus DESAD,
Tampico, Tamaulipas, México

REINA VERÓNICA ROMÁN-SALINAS*

<https://orcid.org/0000-0001-9287-4298>

Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas A. C., Campus DESAD,
Tampico, Tamaulipas, México

SANTOS RUÍZ-HERNÁNDEZ

<https://orcid.org/0000-0002-4300-8526>

Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas A. C., Campus DESAD,
Tampico, Tamaulipas, México

NICOLÁS ALBERTO HERNÁNDEZ-CORTÉS

<https://orcid.org/0009-0008-3688-3059>

Universidad Veracruzana, Campus Veracruz, Veracruz, México

VANIA IRAÍS GONZÁLEZ-RUBÍN

<https://orcid.org/0009-0005-3983-9625>

Instituto de Ciencias y Estudios Superiores de Tamaulipas A. C., Campus DESAD,
Tampico, Tamaulipas, México

Recibido: 28 de mayo del 2024 / Aceptado: 15 de julio del 2024

Publicado: 12 de diciembre del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n47.7153>

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

* Autora corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: marco_diaz.ed@icest.mx; reina_roman.ed@icest.mx; santos_ruiz.ed@icest.mx; nialheco@hotmail.com; direccion.desad@icest.edu.mx

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

RESUMEN. La manufactura aditiva, fundamental en la industria 4.0, transforma la producción creando objetos tridimensionales mediante capas sucesivas. Esta tecnología ofrece flexibilidad de diseño y eficiencia en el uso de materiales, pero enfrenta retos en la optimización de procesos para asegurar calidad y precisión. Su integración con la industria 4.0 plantea desafíos como la interoperabilidad de sistemas CAD, la gestión de datos y la ciberseguridad. A pesar de estos desafíos, permite crear geometrías complejas, reducir el consumo de materias primas y mejorar las propiedades de los productos finales. La investigación en materiales y procesos acelera su adopción, promoviendo modelos de negocio personalizados, sostenibles y descentralizados. Este enfoque está revolucionando la producción industrial y doméstica, y remodelará los modelos de negocio y diseño de productos. En la investigación, se revisaron 257 documentos, excluyéndose 172, y se examinaron 85 textos con el *software* MAXQDA v.2020 para el análisis bibliométrico.

PALABRAS CLAVE: manufactura aditiva / industria 4.0 / ingeniería industrial / procesos de manufactura / bibliometría

ADDITIVE MANUFACTURING AS AN ESSENTIAL ELEMENT OF INDUSTRY 4.0 FOR THE BENEFIT OF ENGINEERING: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

ABSTRACT. Additive manufacturing, fundamental in industry 4.0, transforms production by creating three-dimensional objects through successive layers. This technology offers design flexibility and material efficiency but faces challenges in optimizing processes to ensure quality and precision. Its integration with industry 4.0 presents issues such as CAD system interoperability, data management, and cybersecurity. Despite these challenges, it enables the creation of complex geometries, reduces raw material consumption, and improves the final product properties. Research into materials and processes is accelerating its adoption, fostering personalized, sustainable, and decentralized business models. This approach is revolutionizing industrial and domestic production and will reshape business models and product design. In the research, 257 documents were reviewed, 172 were excluded, and 85 texts were analyzed using MAXQDA v.2020 for bibliometric analysis.

KEYWORDS: additive manufacturing / industry 4.0 / industrial engineering / manufacturing processes / bibliometrics

INTRODUCCIÓN

En el contexto de la evolución hacia la industria 4.0, la manufactura aditiva ha emergido como una tecnología disruptiva con el potencial de transformar los procesos de producción industrial. A pesar de sus ventajas evidentes en términos de flexibilidad de diseño y eficiencia de material, existen desafíos significativos que limitan su adopción plena y efectiva en entornos industriales. La optimización de los procesos de impresión 3D sigue siendo uno de los principales problemas identificados para asegurar la calidad y la precisión de los productos manufacturados.

La integración efectiva de la manufactura aditiva en el panorama más amplio de la industria 4.0 plantea interrogantes sobre la interoperabilidad de los sistemas CAD, la gestión de datos y la ciberseguridad en los entornos de producción avanzados. Por lo tanto, es crucial abordar estos desafíos para maximizar el potencial de la manufactura aditiva en la creación de valor añadido y la competitividad industrial en la era digital. Por ello, este trabajo de investigación bibliométrica describe el impacto de la manufactura aditiva en los procesos relacionados con la ingeniería industrial, así como su relación con las nuevas tecnologías aditivas y la industria 4.0.

Si bien los sistemas de producción actuales siguen basándose en la creación de piezas mediante operaciones de remoción de material, cuyo proceso se inicia con la introducción de materia prima y continúa con operaciones como el arranque de viruta, perforación, modelado, troquelado y doblado de materiales; estos métodos requieren la intervención de herramientas y mano de obra (Elhazmiri et al., 2022). En contraste, la nueva Revolución Industrial 4.0 responde a la necesidad de adoptar tecnologías innovadoras para mantener la competitividad en el mercado industrial global (Öberg & Shams, 2019; Savolainen & Collan, 2020).

La manufactura aditiva (MA) se presenta como una alternativa significativa, pues permite la construcción de geometrías complejas que son difíciles de lograr con máquinas y herramientas tradicionales como el torno, la fresadora y la rectificadora. Esta tecnología no solo reduce el consumo de materias primas, sino que también mejora las propiedades del producto final, tales como su peso y funcionalidad (Ford & Despeisse, 2016).

Para Gao et al. (2015) y Matsumoto et al. (2016), la manufactura aditiva no presenta problemas en términos de costos, mecanizado, fundición de materiales, moldeado o herramientas asociadas a los procesos convencionales. Esto se debe a que posee características muy específicas en cuanto a la selección de materiales, precisión en el proceso de impresión, control de velocidad y acabados.

Los cambios impulsados por la industria 4.0, como el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), la generación de minería de datos utilizando *big data* y la intervención de tecnologías de manufactura aditiva (MA),

han contribuido positivamente a la planificación de los sistemas de producción y modelado (Majstorovic et al., 2018). Las tecnologías MA ofrecen nuevas oportunidades de mejora en la producción de formas geométricas con múltiples niveles de complejidad, reduciendo los residuos de producción y favoreciendo la disminución de los costos de producción (Bikas et al., 2016; Patalas-Maliszewska et al., 2020).

En la manufactura aditiva, un elemento se modela utilizando un *software* de diseño asistido por computadora (CAD). El modelo desarrollado debe contener una cantidad específica de vectores representados como una superficie cerrada. Se lo guarda en un formato con extensión STL, el cual tiene la capacidad de almacenar y proporcionar las propiedades geométricas del modelo en términos triangulares, que una impresora 3D puede interpretar para su posterior impresión. Durante la impresión, el modelo se corta en diferentes secciones transversales, solidificando los materiales y generando como resultado un objeto tridimensional. Es importante destacar que el formato STL representa el modelo que se va a imprimir mediante triángulos. Sin embargo, no es el único formato aceptado por los *softwares* de impresión, ya que existen impresoras que aceptan otros formatos de archivo (Kumar et al., 2015; Nayak et al., 2019).

La disponibilidad de tecnología innovadora que permite convertir modelos complejos desarrollados en sistemas CAD, junto con la tecnología aditiva capaz de transformarlos en objetos reales en muy poco tiempo con alta exactitud y resistencia del material, ofrece ventajas significativas. Estas ventajas ayudan a las organizaciones a optimizar sus procesos y sistemas de producción, reduciendo costos y errores.

La adopción de tecnologías de manufactura aditiva está impulsando investigaciones avanzadas en materiales y procesos de impresión. Estas implicaciones científicas incluyen el desarrollo de nuevos materiales compuestos y métodos de impresión que mejoran las propiedades mecánicas y funcionales de los productos fabricados. Además, la optimización de los procesos de diseño asistido por computadora (CAD) para la manufactura aditiva está siendo investigada para mejorar la precisión y eficiencia del diseño de productos complejos. Por otro lado, en el ámbito social, la manufactura aditiva está impactando la manera en que se diseñan, producen y consumen productos. Esto podría tener efectos significativos en la economía global al alterar cadenas de suministro tradicionales y fomentar modelos de negocio más personalizados y sostenibles. Además, la adopción de estas tecnologías podría promover la descentralización de la producción industrial, permitiendo que más comunidades y regiones participen en la fabricación localizada y personalizada (Kumar et al., 2023).

REVISIÓN DE LA LITERATURA

La manufactura aditiva en las organizaciones

En el contexto de la industria 4.0, existen muchas tecnologías relacionadas con la transformación, tales como la computación, internet, tecnología en la nube, automatización, digitalización, robótica, manufactura y organizaciones inteligentes. Sin embargo, una de las más destacadas en la operación de fabricación es la manufactura aditiva (MA), que permite la creación de objetos tridimensionales mediante un proceso de adición capa por capa (Butt, 2020).

Muchas organizaciones están implementando actualmente la industria 4.0, creando un nuevo camino tecnológico en beneficio de la ingeniería y su relación con la manufactura. Los tipos de manufactura aditiva (MA) han aumentado significativamente, utilizando materiales metálicos, cerámicos, termoplásticos y vidrio (Bar-Cohen, 2018). A pesar de la disposición de las organizaciones para adoptar esta tecnología, se han encontrado con barreras significativas al implementarlas, como la falta de experiencia y la necesidad de capacitación especializada constante (Stavropoulos et al., 2023).

Como parte de los procesos industriales y la integración de la manufactura aditiva, las organizaciones están generando procesos de producción sin herramientas y con bajos requisitos de infraestructura, de manera que logran una producción distribuida y una reducción de la huella ecológica (Schmidt et al., 2023). Las industrias se están adaptando gradualmente a los nuevos desafíos que implica la manufactura aditiva, avanzando hacia una fabricación continua y óptima (Sundarkumar et al., 2022).

Fusión por lecho de polvo

La fusión por lecho de polvo es una técnica de fabricación aditiva que utiliza polvo y fusión selectiva de capas sucesivas para crear objetos tridimensionales. Es conocida por su versatilidad en términos de materiales, alta precisión y aplicabilidad en una variedad de industrias. Este proceso necesita un precalentamiento donde el lecho está sujeto a un proceso de envejecimiento, lo que disminuye la reutilización del polvo.

Para abordar el problema del envejecimiento del polvo y su reciclaje, se han desarrollado mecanismos que minimizan los efectos secundarios mediante la intervención de resina epóxica (A. Guo et al., 2023). El monitoreo del proceso de fusión por lecho de polvo puede lograrse eficazmente mediante el uso de la emisión acústica, un método prometedor que exhibe una factibilidad adecuada. Este método permite un filtrado de paso alto con una frecuencia de corte de 22,4 Hz, lo que resulta en la eliminación de la mayoría de las oscilaciones de presión acústica (Chen et al., 2023).

Se han llevado a cabo diversos estudios sobre microestructuras y propiedades mecánicas con el fin de realizar tratamientos térmicos posteriores al procesamiento de componentes en muestras de aleación de aluminio, como la fusión de lecho de polvo por láser (LPBF, por sus siglas en inglés). Este tipo de procesamiento presenta características tales como baja densidad, alta resistencia, resistencia a la corrosión, reciclabilidad, soldabilidad y una alta relación entre resistencia y peso (Medrano et al., 2023).

Otro proceso de fusión utilizado en la fabricación de piezas en acero inoxidable es la fusión de lecho de polvo de haz de electrones (E-PBF), la cual se lleva a cabo mediante microscopía electrónica de barrido. Los resultados de este proceso, que involucra pruebas de tracción y análisis de difracción de rayos X, muestran una alta resistencia y resistencia a la corrosión (Roos et al., 2023).

La fusión por lecho de polvo de haz de electrones se utiliza en la fabricación de andamios graduados mediante pruebas de fatiga por compresión, determinando la resistencia a la fatiga con estados gradientes vertical (VG) y en paralelo (PG). A través de estas pruebas, se ha observado que el componente PG exhibe la mejor resistencia, con una tensión de daño por fatiga muy baja. Este proceso permite retardar la propagación de grietas por fatiga al redistribuir adecuadamente las tensiones en la estructura del material y ofrecer una alta resistencia a la fatiga por compresión (Y. Guo et al., 2023).

Se han desarrollado compuestos de partículas de cerámica mediante el proceso de fusión de lecho de polvo láser, optimizando la microestructura con una distribución uniforme. Estos materiales se utilizan para fabricar elementos resistentes a la compresión, como componentes electrónicos, herramientas de corte metalmecánicas e implantes biomédicos (Azami et al., 2023). Sin embargo, algunos materiales forjados por LPBF pueden ser propensos a presentar grietas, por lo que es necesario agregar refinadores de grano para disminuir este tipo de desgaste y mejorar la resistencia al fortalecimiento de la dispersión del material (Yang et al., 2023).

En el estudio realizado por Gokcekaya et al. (2023), desarrollaron una aleación de alta entropía (HEA) mediante el método de fusión de lecho de polvo láser en un supersólido no equiatómico. Lograron una notable supresión de la segregación elemental y una textura cristalina, activando un crecimiento epitaxial capa a capa, lo que resultó en un endurecimiento efectivo y una buena biocompatibilidad. Es importante tener precaución al llevar a cabo el proceso de LPBF, ya que la aplicación de parámetros inapropiados puede ocasionar defectos en los materiales (Zhang et al., 2023).

Si bien la fusión de lecho por láser es un proceso popular para la fabricación de componentes de última generación, aún persisten desafíos al tratar de fabricar aleaciones de cobre debido a sus propiedades térmicas y su capacidad de reflexión de los rayos láser. Para mejorar su rendimiento, es necesario aplicar un tratamiento

térmico posterior a las aleaciones, como el uso de rayo láser verde y láser infrarrojo convencional (Xie et al., 2023).

Además, la influencia del pulido láser y el granallado asistido por chorro de agua se manifiesta en la calidad superficial del material, su microestructura y sus propiedades electroquímicas. Esto puede conducir a una reducción del potencial de picaduras y a la formación de capas pasivas, aunque pueda incluir más defectos cristalinos (Behjat et al., 2023).

La implementación de la tecnología PBF en el desarrollo tecnológico para la producción de productos de alto valor es viable en comparación con los procesos tradicionales, lo que genera oportunidades comerciales significativas y optimiza los procesos para las aleaciones de ingeniería reconocidas (Leary, 2020).

Manufactura aditiva: inyección de aglutinante (BJ, *binder jetting*)

La inyección de aglutinante se emplea en aplicaciones que requieren la impresión de objetos utilizando una variedad de materiales, tales como polímeros, cerámica o metales. Este proceso resulta especialmente útil cuando se trabaja con materiales que no se pueden fundir fácilmente, como algunas cerámicas, o cuando se necesita alcanzar una alta resolución en la impresión.

Asimismo, es una técnica versátil que se aplica en diversas industrias, como la automotriz, la aeroespacial, la médica y la de bienes de consumo. El propósito de este proceso es unir material en polvo mediante la adición de aglutinante líquido en forma de gotas con diámetros inferiores a 100 μm , las cuales son depositadas sobre el lecho de polvo. Luego, la superficie del lecho de polvo se expone al calor de manera estática, lo que genera una resistencia mecánica al aplicar calor. El resultado es un aumento de la resistencia al cizallamiento y a la gravedad (Godoi et al., 2016; Mirzababaei & Pasebani, 2019).

Una aplicación destacada de la inyección por aglutinante es el desarrollo de tintas de grado alimenticio. Esta técnica utiliza impresoras como la Fujifilm Dimatix, que permiten la reducción de costos de materia prima y el aumento en la velocidad de producción. Sin embargo, el costo inicial de la maquinaria es elevado y los acabados superficiales finales pueden generar rugosidades (Holland et al., 2018; Sun et al., 2015). El proceso de inyección consiste en la aplicación selectiva de un aglutinante sobre el lecho de polvo, uniéndolo capa por capa para formar una parte verde (Wang & Zhao, 2017; Chen & Zhao, 2016). Esta técnica presenta objetivos prometedores al reducir los costos de fabricación y acelerar los tiempos de entrega, especialmente para diseños complejos, en comparación con la fabricación convencional (DebRoy et al., 2018).

Por otro lado, la fabricación de piezas de cerámica estructural mediante la inyección de aglutinante tiene aplicaciones potenciales en diversos campos de la ingeniería, como el diseño mecánico, la producción por moldeo y la educación innovadora (Lv et al., 2019).

Además, se utiliza para la fabricación de filtros cerámicos porosos, los cuales ofrecen una eficiencia mucho mayor que los filtros convencionales en la eliminación de partículas de gas de chimeneas y plantas de energía (Rambo et al., 2005).

La combinación de la tecnología de lecho de polvo por fusión láser con la inyección por aglutinante ha demostrado una buena consistencia en materiales como el acero inoxidable. Los resultados, tanto en el módulo de compresión como en el límite elástico, son muy prometedores y sugieren futuras aplicaciones en el diseño de estructuras de celosía con altas propiedades mecánicas gracias a la intervención de ambos procesos (Xu et al., 2023; Mao et al., 2023).

Es relevante mencionar que, aunque la manufactura aditiva y el proceso de inyección de aglutinante colaboran estrechamente, existen materiales como el magnesio (Mg) que presentan desafíos para la fabricación aditiva. En estos casos, es necesario recurrir al proceso de inyección sin aglutinante, especialmente con técnicas basadas en fusión, para determinar el nivel de saturación de materiales como la aleación de magnesio AZ91. Trabajar con esta aleación sin aglutinante implica ampliar los límites de sinterización para lograr una mayor densificación y potencialización de los componentes de Mg impresos (Salehi et al., 2023).

La impresión por capas es otra técnica que se asocia con la inyección de aglutinante para contener el polvo suelto dentro de un núcleo. Al analizar la microestructura y densidad de las muestras impresas, se observa una variación en el empaquetamiento del polvo entre la capa externa y el núcleo. Además, el tamaño de las partículas y el grosor afectan el empaquetamiento de la cubierta y el núcleo de manera diferente. Controlando adecuadamente el grosor de la capa y el tamaño de las partículas de polvo, la impresión final de la cubierta se convierte en un método idóneo para adaptar la densidad y reducir la anisotropía (elasticidad, velocidad de propagación, temperatura, conductividad, etcétera) (Miao et al., 2023).

La inyección de aglutinante es un proceso de fabricación aditiva en el cual los materiales en polvo se unen selectivamente mediante un aglutinante. Se trata de un método reconocido de impresión 3D que se destaca por su flexibilidad en términos de materiales, su capacidad para producir piezas de gran tamaño, y sus ventajas en cuanto a bajo costo de equipo y alta velocidad de fabricación. Además, este proceso tiene perspectivas prometedoras en áreas como el desarrollo de materiales, el diseño de aglutinantes y la tecnología de postratamiento, que incluye la reducción de emisiones nocivas en motores de combustión interna (Chen et al., 2022; Mostafaei et al., 2021; Zhao et al., 2023).

Manufactura aditiva: extrusión

La técnica de extrusión es un método utilizado para la creación de modelos 3D, mediante el cual se toma un perfil bidimensional y se transforma en una pieza tridimensional. Este

proceso implica la deposición de capas de material sólido a una temperatura controlada por un sistema computarizado (Cesar-Juárez et al., 2018). En el proceso de extrusión, inicialmente se emplea un tornillo helicoidal como transportador, que lleva el material desde la tolva a través de cámaras de calentamiento hasta la salida de descarga. Posteriormente, el polímero emerge de la matriz en un estado blando o ligero. Para dar forma al material final según lo deseado, se utilizan diferentes boquillas que se adaptan a la matriz, y luego se corta a la medida requerida.

El proceso de fabricación aditiva por extrusión ha tenido amplias aplicaciones en la ingeniería industrial, especialmente en el campo de los procesos de manufactura del acero inoxidable. Los resultados obtenidos muestran un buen control sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del acero, que se logra mediante un tratamiento térmico que minimiza la generación de defectos entre capas (Cho et al., 2023). La extrusión de materiales ha emergido como una tecnología altamente deseable para la creación de estructuras basadas en silicona, en particular en ámbitos como la robótica blanda y la biomedicina, debido a su facilidad de fabricación. Este proceso, cuando se combina con modelos numéricos y semianalíticos, puede predecir con precisión la fuerza de extrusión y calcular la fuerza de compresión de la silicona depositada en el sustrato (Pricci et al., 2023).

Sin embargo, se presentan efectos no deseados durante la impresión por extrusión de materiales, como la dinámica de extrusión indeseable, que resulta en esquinas irregulares en las piezas debido a altas aceleraciones y desaceleraciones del cabezal de la impresora. La aplicación de algoritmos avanzados, centrados en el control dinámico y el uso de redes neuronales para el aprendizaje automatizado, puede facilitar la compensación dinámica de la extrusión, mejorando la precisión y velocidad de la impresión. Esto, a su vez, contribuye a aumentar la economía y la competitividad entre las empresas dedicadas al diseño 3D (Zimenko et al., 2022).

La tecnología de polímeros por extrusión de materiales está atrayendo mucha atención en la actualidad debido a su disponibilidad de materia prima y a los bajos costos de equipos de producción (Olaiya et al., 2022; Raja & Rajan, 2023). En el ámbito del transporte de carga, se están utilizando materiales con estructura reticular para la absorción de impactos y el rendimiento mecánico, aplicando el diseño de experimentos para optimizar las propiedades mecánicas de las estructuras resultantes (Almesmari et al., 2023).

Por otro lado, se fabrican filtros de polvo metálico de diversas formas mediante manufactura aditiva de extrusión. Estos filtros se utilizan para crear estructuras tridimensionales a partir de un filamento que consiste en polvo de metal y aglutinante. Sirven para determinar la porosidad de flujo capilar del material y para reducir la densidad a medida que aumenta la temperatura de sinterización (Yi et al., 2022). Algunos materiales como el polietileno presentan desafíos particulares en su procesamiento mediante manufactura aditiva por extrusión, como la escasa adherencia y la contracción

durante el proceso de fabricación, lo que resulta en una mayor anisotropía mecánica y defectos en la forma final del producto (Montoya-Ospina et al., 2023).

A pesar de que la fabricación aditiva por extrusión es una técnica relativamente económica para el desarrollo de piezas 3D, las piezas producidas a menudo presentan detalles en cuanto a la calidad superficial. Sin embargo, diversas investigaciones están dirigidas a mejorar esta variable de calidad mediante la optimización de los parámetros de impresión (Golab et al., 2022). Los filamentos incrustados con una alta densidad de gránulos metálicos o cerámicos se están utilizando cada vez más, lo que resulta en piezas casi completamente densas. La sinterización mediante calentamiento por inducción indirecta de un filamento puede ser una ruta eficaz para densificar las piezas fabricadas con filamento fundido (FFF). Los resultados muestran que se pueden alcanzar densidades del 99,8 % con tiempos de remojo muy cortos, lo que representa una mejora significativa (Ortega et al., 2023).

En la ingeniería industrial, la manufactura aditiva se aplica en los procesos de fabricación de componentes de materiales creados para obtener estructuras ligeras. Sin embargo, la implementación de moldes de fundición puede resultar costosa, especialmente cuando se fabrican cantidades limitadas de piezas. La tecnología híbrida, que combina la fabricación aditiva con maquinaria convencional, ofrece beneficios como la eficiencia en la producción de moldes, en particular para la industria de materiales compuestos cuando se requieren piezas grandes (Liverani et al., 2023). La manufactura aditiva por extrusión, un proceso de impresión 3D en el que se construyen objetos capa por capa mediante la extrusión de material fundido o semilíquido, es conocida por su versatilidad en términos de materiales, accesibilidad y aplicabilidad en una variedad de industrias y aplicaciones, desde la creación de prototipos hasta la fabricación personalizada.

Manufactura aditiva: estereolitografía (SLA)

La estereolitografía (SLA) es un método que utiliza resina líquida como materia prima, la cual se solidifica bajo la influencia de la luz ultravioleta. La excelente calidad de sus superficies, los acabados impecables y la amplia gama de materiales disponibles hacen que la SLA sea una opción ideal para la fabricación de prototipos, visualización y aplicaciones donde se requiere alta calidad estética. Además, es perfectamente adecuada para técnicas como el moldeo a cera perdida y la fundición al vacío (Paśnikowska-Łukaszuk et al., 2022; Wang et al., 2016).

La fabricación aditiva ha ganado gran atención en la producción de componentes de carburo de silicio (SiC) con formas complejas mediante estereolitografía. Al emplear una suspensión cerámica adecuada y un método de oxidación a alta temperatura, es posible obtener piezas complejas con un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento y

un alto contenido de sólidos. Esto puede aprovecharse para producir cuerpos verdes con excelentes propiedades, y puede ser extendido para fabricar otros tipos de cerámicas como el nitruro de silicio (Ye et al., 2023).

En la vanguardia de la manufactura aditiva se encuentra la integración de elementos multifuncionales incrustados en piezas impresas en 3D. Esto fortalece aún más las aplicaciones industriales y permite desarrollar métodos a bajo costo. Estas técnicas pueden combinarse con la estereolitografía y la metalización selectiva sin electricidad para fabricar piezas con formas muy complejas y propiedades multifuncionales, incluyendo propiedades magnéticas, conductoras y mecánicas (Credi et al., 2023).

Los materiales cerámicos refractarios, como la mullita, son ampliamente utilizados debido a sus propiedades de resistencia y estabilidad a altas temperaturas. La mullita se emplea comúnmente en forma de ladrillos y bloques refractarios. A partir de este material cerámico, es posible fabricar andamios mediante estereolitografía. Para lograrlo, se requiere la combinación de sílice comercial con nanopartículas, y un proceso dual que implica la infiltración de piezas de sílice porosa impresas con un sol de alúmina coloidal, así como la impresión de sílice/alúmina a través del desarrollo de resina fotocurable mezclada con sílice (Rosado & Moreno, 2023).

Es crucial mantener la uniformidad y estabilidad adecuadas en la suspensión cerámica durante todo el ciclo de impresión para garantizar el rendimiento óptimo de las piezas (Wang et al., 2023). El desarrollo de piezas mediante estereolitografía, junto con la transición activa de la generación de prototipos y diversas pruebas de fabricación de productos funcionales, como el método de diagnóstico por láser-ultrasonido, contribuye a mejorar la calidad de la fabricación al reducir el número de defectos y garantizar la calidad de los productos terminados (Karabutov & Novikov, 2023).

La implementación de métodos de análisis computacionales en la fabricación de piezas con alta calidad superficial puede reducir el número de pasos experimentales y alcanzar la optimización de los materiales. Para lograrlo, es esencial mantener la estabilidad en la rugosidad y la adaptación superficial de las resinas impresas en 3D mediante estereolitografía procesadas con luz digital para conservar un acabado final aceptable (Spirrett et al., 2022; Wadhvani et al., 2022; W. Li et al., 2023).

La impresión 3D de actuadores neumáticos con múltiples materiales es una forma ideal para fabricar actuadores personalizados. La estereolitografía basada en cubetas es un método de impresión 3D de alta resolución que presenta ventajas en términos de capacidad de control de la deformación y facilidad de montaje (Song et al., 2023).

Según la empresa Dassault Systèmes (DS), la estereolitografía es un método muy preciso que tiene la capacidad de producir superficies lisas, lo que resulta en una fabricación altamente precisa. Aunque es un proceso eficaz, es importante tener en

cuenta que las piezas pueden deteriorarse con la exposición a la luz solar debido a la naturaleza fotosensible de las resinas. A medida que la impresión 3D SLA se vuelva más accesible para los usuarios en diferentes campos de la ingeniería, surgirán nuevas innovaciones con capacidades para exhibir geometrías complejas de mejor calidad de manera rápida y precisa (Basile et al., 2020).

Manufactura aditiva: deposición de energía dirigida (DED)

El proceso de deposición de energía funciona al guiar la energía, que actúa como un haz de electrones, para enfocarla en un área específica donde los polvos metálicos se calientan y luego se depositan después del proceso de fusión (Saboori et al., 2019; Tan et al., 2022).

Este tipo de tecnología ha sido ampliamente utilizada en la fabricación (Keist & Palmer, 2017; Kumara et al., 2019). Los objetivos principales de esta tecnología de ingeniería son la creación de piezas graduadas y uniones bimetálicas para asegurar la calidad de los productos terminados. Las estructuras de ingeniería pueden lograr la máxima eficiencia al combinar partes de varios materiales químicamente distintos, aprovechando completamente las ventajas económicas y de rendimiento de cada uno. Las parejas de componentes bimetálicos, como acero-cobre, acero-aluminio y acero-níquel, se fabrican uniendo metales diferentes que poseen propiedades mecánicas, físicas y químicas complementarias, de manera que adquieran resistencia mecánica, resistencia al desgaste, conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión, entre otras (Şimşir et al., 2009).

Algunas de las parejas de metales más conocidas son acero-cobre, acero-aluminio, acero-níquel y acero-titanio, que funcionan de manera estable con la disposición de energía dirigida (Al-Jamal et al., 2008). Otro proceso con potencial para revolucionar la producción de componentes es la disposición de energía dirigida por arco de alambre, que ofrece una velocidad de deposición más rápida a un costo menor. Este proceso se adapta al trabajo con materiales modernos, como los aceros de alto rendimiento que poseen propiedades de resistencia a la corrosión, al desgaste y al calor (K. Li et al., 2023; Cunningham et al., 2018).

Uno de los nuevos materiales que ha ayudado a superar las limitaciones de las propiedades mecánicas y que puede ser empleado en entornos extremos es la aleación de alta entropía (HEA), compuesta por materiales refractarios como el titanio. Esta aleación presenta gran dureza y resistencia al desgaste (Jeong et al., 2023; Krajňák et al., 2023).

En cuanto a los yacimientos naturales de cobre y sus aleaciones, la deposición de energía dirigida brinda la oportunidad de sustituir componentes complejos de bronce con piezas fabricadas menos críticas y con un nivel bajo de desgaste de material (Raghavendra et al., 2023).

Aunque el proceso DED es ampliamente utilizado en la fabricación, requiere un enfriamiento adecuado entre capas para evitar fallas geométricas causadas por el sobrecalentamiento de la sección media (Hwang et al., 2023). La fabricación aditiva por láser ha transformado varios sectores industriales, especialmente en el proceso de deposición de energía dirigida, con un potencial para controlar la eficiencia y el grosor de la capa, minimizando la rugosidad de la superficie de los materiales (Ehmsen et al., 2023; Ikeda et al., 2023; Notley et al., 2023; Sargent et al., 2023).

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación, se siguió un proceso sistemático y transparente para identificar investigaciones enfocadas en el tema objetivo. También implicó la consulta de información de artículos científicos, repositorios y editoriales especializadas en el campo del aprendizaje automático y sus aplicaciones en ingeniería. Se buscó en una variedad de fuentes, tanto en inglés como en español, que abarcaban editoriales como EBSCO Essentials, MDPI y Taylor & Francis. En la Tabla 1, se presenta un desglose detallado del mecanismo de búsqueda utilizado para recopilar datos.

Tabla 1

Mecanismo de búsqueda para la obtención de la información

Editorial					
EBSCO Essentials		MDPI		Taylor & Francis	
La manufactura aditiva en las organizaciones	Manufactura aditiva: fusión por lecho de polvo	Manufactura aditiva: inyección de aglutinante (BJ, binder jetting)	Manufactura aditiva: extrusión	Manufactura aditiva: estereolitografía (SLA)	Manufactura aditiva: deposición de energía dirigida (DED)
Temas de investigación					
La manufactura aditiva en las organizaciones	Manufactura aditiva: fusión por lecho de polvo	Manufactura aditiva: inyección de aglutinante (BJ, binder jetting)	Manufactura aditiva: extrusión	Manufactura aditiva: estereolitografía (SLA)	Manufactura aditiva: deposición de energía dirigida (DED)
Lenguajes de investigación de la literatura					
Español			Inglés		
Análisis de la información					
Algoritmos	Nombre del autor	Nombre de la revista		Año de publicación	Palabras clave

Paso 1. Alcance de la revisión

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la literatura relevante, con el objetivo de explorar la investigación existente sobre el tema en cuestión, específicamente sobre las revisiones de la manufactura aditiva y sus aplicaciones. Este proceso se centró en identificar tanto los desafíos inherentes como las aplicaciones innovadoras que contribuyen al avance continuo de la ingeniería.

Siguiendo las pautas establecidas para la realización de una revisión crítica, el enfoque metodológico fue diseñado para abarcar una selección amplia y representativa de artículos, tal y como recomiendan Paré et al. (2015). Además, dada la naturaleza dinámica y en constante evolución de las tecnologías de impresión 3D, se limitó el alcance de la revisión a las publicaciones que abarcan el periodo comprendido entre el 1 de enero del 2005 y el 2 de diciembre del 2023.

Paso 2. Procedimientos de búsqueda

Para garantizar una cobertura completa del tema de investigación, se emplearon algoritmos especializados para recuperar los documentos pertinentes de diversas editoriales, como se describe en detalle en la Tabla 2.

Tabla 2

Algoritmos de búsqueda para la extracción de documentos

Temas de investigación	Operadores lógicos	EBSCO Essentials	MDPI	Taylor & Francis
La manufactura aditiva en las organizaciones	AND additive manufacturing and organizations Title AND additive manufacturing Abstract AND additive manufacturing AllFields AND organizations AllFields	10	30	20
Manufactura aditiva: fusión por lecho de polvo	AND additive manufacturing and organizations Title AND additive manufacturing Abstract AND additive manufacturing AllFields AND organizations AllFields	9	16	18
Manufactura aditiva: inyección de aglutinante (BJ, binder jetting)	AND additive manufacturing and powder bed fusion Title AND additive manufacturing Abstract AND powder bed fusion AllFields AND additive manufacturing AllFields	7	15	17
Manufactura aditiva: extrusión	AND additive manufacturing and Binder jetting Title AND additive manufacturing Abstract AND Binder jetting AllFields AND additive manufacturing AllFields	10	10	15
Manufactura aditiva: estereolitografía (SLA)	AND additive manufacturing Title AND extrusion Abstract AND additive manufacturing AllFields AND extrusion AllFields	8	17	13

(continúa)

(continuación)

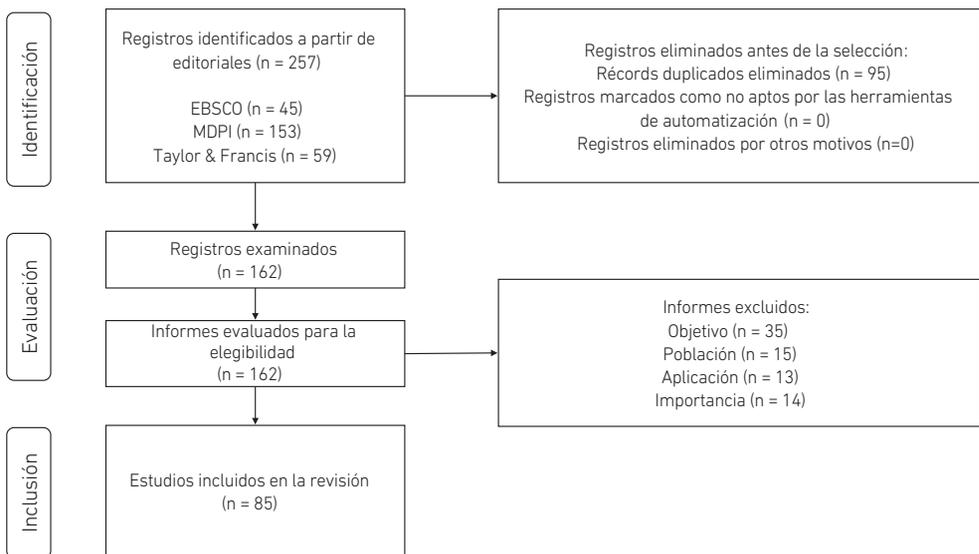
Temas de investigación	Operadores lógicos	EBSCO Essentials	MDPI	Taylor & Francis
Manufactura aditiva: deposición de energía dirigida (DED)	AND additive manufacturing and stereolithography Title AND additive manufacturing Abstract AND additive manufacturing AllFields AND stereolithography AllFields	10	22	10

Paso 3. Proceso de revisión y selección de artículos

Se optó por utilizar el método PRISMA (Haddaway, 2022) como punto de partida para llevar a cabo el proceso de revisión sistemática de la literatura. Este método utiliza un diagrama de flujo (véase la Figura 1) como modelo para la presentación organizada de la información examinada. Para esta investigación, se realizó una revisión de los 257 documentos iniciales, priorizando su importancia en relación con el tema de investigación. Durante este proceso, se descartaron 95 documentos por duplicidad o similitudes, quedando 162 documentos. De estos, se realizó una revisión exhaustiva por parte de expertos en la materia, teniendo en cuenta criterios como el objetivo de la investigación, la población objetivo, la falta de aplicación significativa y su relevancia; y se excluyeron 35 documentos por no cumplir con los objetivos de la investigación, 15 por no ajustarse a la población objetivo, 13 por carecer de aplicaciones significativas en el área de ingeniería y 14 por no ser relevantes en cuanto a la información proporcionada. En consecuencia, solo 85 textos fueron evaluados para su idoneidad e inclusión en la revisión sistemática.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA para determinar el número de artículos utilizados en la revisión de la literatura



La búsqueda se basó en la recopilación de información de diversas fuentes, como artículos, libros y páginas especializadas en los campos de investigación relacionados con la manufactura aditiva y sus aplicaciones. Se prestó especial atención a las publicaciones de los últimos diez años, priorizando las más recientes.

Paso 4. Proceso de análisis bibliométrico y resultados

En el análisis bibliométrico se aplicó el enfoque de creación de nubes de palabras utilizando el *software* MAXQDA en su versión 2020. La búsqueda bibliográfica es una práctica común en la investigación actual, ya que permite a los investigadores explorar los fundamentos teóricos relacionados con las variables de estudio. Del mismo modo, se muestran las palabras que tienen una mayor asociación con el tema de la manufactura aditiva, junto con el número de documentos en los que aparecen, el impacto y el número de palabras destacadas en total.

Para la presentación de los resultados sobre el número de publicaciones por año, se utilizó el *software* estadístico Origen 2022, el cual es un programa con una alta calidad en el diseño de gráficas estadísticas y presentación de resultados.

RESULTADOS

Análisis de la información

Para el análisis cualitativo, se empleó el *software* MAXQDA en su versión 2020. Su herramienta de nube de palabras permite estructurar visualmente un conjunto de palabras a partir del texto, organizando jerárquicamente los términos que aparecen con mayor frecuencia. En la Figura 2, se presentan las palabras clave más frecuentes utilizadas en la búsqueda de información de literatura científica aplicada en este trabajo.

Figura 2

Palabras clave utilizadas en la nube de datos

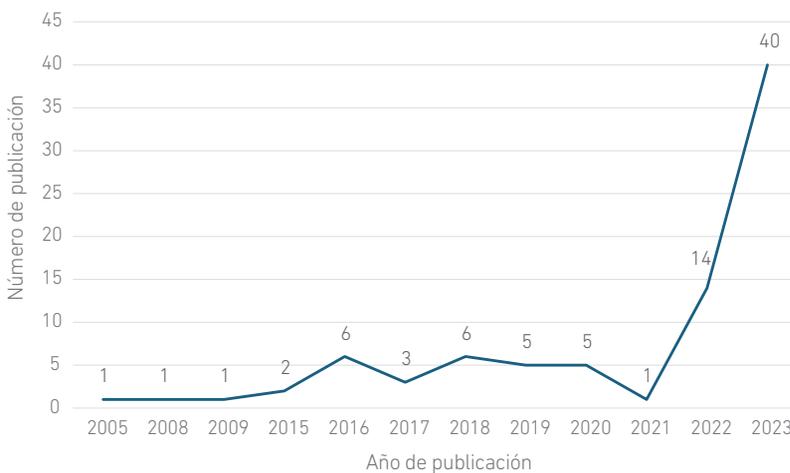


Nota. Elaborado con el *software* MAXQDA.

Las publicaciones relacionadas con el tema de la manufactura aditiva, considerada un elemento imprescindible en la ingeniería industrial, han tenido una notable presencia anual. Se identificaron 85 productos relacionados con este tema, como se muestra en la Figura 3. Del total de investigaciones, el 62 % corresponde a los años 2022 y 2023, lo que indica que este tema está siendo reconocido como una innovación significativa en el ámbito de la ingeniería industrial. Además, se está implementando como parte de las tecnologías 4.0 en diversas organizaciones.

Figura 3

Número de publicaciones por año



A continuación, se presenta la cantidad de artículos y el número de citas correspondientes a cada año en que fueron publicados. Los resultados de las citas se obtuvieron mediante el uso del navegador de citas Google Académico (véase la Tabla 3). Entre los años 2022 y 2023, se observa un total de 53 artículos con 50 citas en total, lo que representa el 62 % de la literatura actualizada en temas de manufactura aditiva. Por otro lado, en el 2015 se registró un número considerable de 2939 citas relacionadas con trabajos sobre procesos de extrusión, CNC y modelado por deposición fundida. En el 2016, se obtuvieron 4542 citas acerca de trabajos sobre impresión 3D, modelos de negocio, manufactura aditiva, diseño de manufactura y administración de operaciones. Además, en el ámbito de la manufactura aditiva y las tecnologías innovadoras, se han publicado investigaciones en el año 2023 que prometen ser citadas en numerosos estudios a nivel mundial, lo que contribuirá con nuevas aportaciones a la ingeniería industrial.

Tabla 3

Número de artículos y citas por año

Año	Artículos	Número de citas
2005	1	93
2008	1	79
2009	1	92
2015	3	2939
2016	6	4542
2017	3	279
2018	6	5505
2019	5	666
2020	5	116
2021	1	378
2022	14	31
2023	39	19
Total	85	14 739

En la Tabla 4, se presenta el autor principal, año de publicación y el título del artículo de cada uno de los documentos relacionados con los temas asociados al aprendizaje automático. Los datos de citación se obtuvieron a través de Google Scholar. De los 85 artículos, se identificaron los 10 más citados.

Tabla 4

Identificación de las principales citas

Autor	Año	Artículo
DebRoy et al.	2018	Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties
Gao et al.	2015	The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering
Ford y Despeisse	2016	Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges
Bikas et al.	2016	Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review
Godoi et al.	2016	3d printing technologies applied for food design: Status and prospect
Cunningham et al.	2018	Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing
Wang et al.	2016	Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms

(continúa)

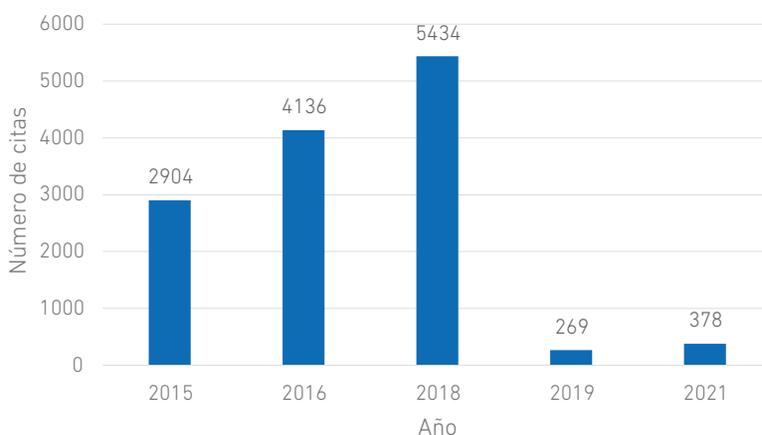
(continuación)

Autor	Año	Artículo
Mostafaei et al.	2021	Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges
Sun et al.	2015	A review on 3D printing for customized food fabrication
Saboori et al.	2019	Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair

En el 2016, hubo 4136 citas relacionadas con la manufactura aditiva en artículos sobre energía de deposición, impresión 3D, *binder jet* 3D y manufactura de los materiales. El año 2018 destacó con 5434 citas, que abordaron temas como el proceso de estereolitografía, materiales refractarios, energía dirigida por deposición, diseño por computadora y procesos de extrusión (véase la Figura 4). Cabe mencionar que actualmente la industria 4.0 y las tecnologías como internet de las cosas (IoT), *machine learning* (ML) y la inteligencia artificial (IA) están trabajando en beneficio de la ingeniería con el objetivo de mejorar los procesos industriales y la toma de decisiones.

Figura 4

Citas relacionadas de los temas por año



CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión de literatura, el uso de métodos tradicionales tiene sus limitaciones debido a factores como el tamaño del lote que se va a producir y la complejidad de la geometría de la pieza. En ocasiones, nos vemos forzados a emplear procesos que aumentan los costos finales del producto y no son sostenibles desde la perspectiva ambiental en aspectos como la contaminación y la falta de reciclaje.

La fabricación aditiva ha permitido el crecimiento y mejoramiento del valor agregado; es una nueva tecnología que presenta grandes ventajas competitivas, porque puede adaptarse a la personalización del diseño de producción. Esta es una de las herramientas clave para allegarse a la alta calidad de puestos de trabajo. La digitalización tridimensional se ha convertido en un instrumento valioso como componente del proceso a solicitud de la ingeniería inversa. Tener métodos con tanto potencial en la adquisición de puntos tridimensionales de una pieza abre los horizontes para el desarrollo de modelos, el procesamiento y el análisis de productos.

Dentro del campo de la ingeniería industrial, la fabricación 3D se considera actualmente una de las principales revoluciones industriales. Su aplicabilidad abarca diversos sectores industriales, y posee una notable flexibilidad para adaptarse a las demandas específicas de cada uno. Estas tecnologías representan una verdadera oportunidad para la innovación industrial y se anticipa que, en un futuro cercano, la fabricación 3D será común incluso en entornos domésticos, permitiendo el diseño y la creación de una amplia variedad de objetos. También contará con un modelo de negocio para el manejo y transporte de materias primas, que den respuesta a las necesidades de los clientes en la fabricación de productos solicitados.

En el campo de la manufactura, está sufriendo cambios significativos. Las nuevas investigaciones y aplicaciones de la manufactura aditiva sobre las demandas de los consumidores, producción económica y su distribución están evolucionando hasta un punto donde en cada hogar existirá algún tipo de tecnología aditiva o tecnología 4.0 que pueda administrar algún sistema o modelo de negocio de una manera óptima. Aprovechar las tecnologías aditivas y la industria 4.0 asegura un nuevo panorama de la manufactura en la ingeniería, las organizaciones y las personas.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses financieros, personales o profesionales que puedan influir en los resultados del estudio. Ninguno de los autores ha recibido financiamiento o mantiene relaciones que puedan afectar la objetividad e integridad de esta investigación.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN A LA AUTORÍA

Marco Antonio Díaz-Martínez: conceptualización, *data curation*, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, *software*, validación, visualización, escritura: borrador original, redacción: revisión y edición. **Reina Verónica Román-Salinas:** *data curation*, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, *software*, supervisión, validación, visualización, escritura: borrador original, redacción:

revisión y edición. **Santos Ruíz-Hernández:** conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, administración de proyecto, recursos, supervisión, visualización. **Nicolás Alberto Hernández-Cortés:** conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, recursos, supervisión, visualización. **Vania Iraís González-Rubín:** investigación, administración de proyecto, supervisión, validación, escritura: borrador original, redacción: revisión y edición.

REFERENCIAS

- Al-Jamal, O., Hinduja, S., & Li, L. (2008). Characteristics of the bond in Cu-H13 tool steel parts fabricated using SLM. *CIRP Annals*, 57(1), 239-242. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.010>
- Almesmari, A., Sheikh-Ahmad, J., Jarrar, F., & Bojanampati, S. (2023). Optimizing the specific mechanical properties of lattice structures fabricated by material extrusion additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 1821-1838. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.024>
- Azami, M., Siah Sarani, A., Hadian, A., Kazemi, Z., Rahmatabadi, D., Kashani-Bozorg, S., & Abrinia, K. (2023). Laser powder bed fusion of Alumina/Fe-Ni ceramic matrix particulate composites impregnated with a polymeric resin. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 3133-3144. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.181>
- Bar-Cohen, Y. (Ed.). (2018). *Advances in manufacturing and processing of materials and structures* (1.ª ed.). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b22020>
- Basile, V., Grande, M., Marroco, V., Laneve, D., Petri gnani, S., Pruden zano, F., & Fassi, I. (2020). Design and manufacturing of super-shaped dielectric resonator antennas for 5G applications using stereolithography. *IEEE Access*, 8, 82929-82937. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991358>
- Behjat, A., Shamanian, M., Taherizadeh, A., Lannunziata, E., Bagherifard, S., Gadalińska, E., Saboori, A., & Iuliano, L. (2023). Microstructure-electrochemical behavior relationship in post processed AISI316L stainless steel parts fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 3294-3311. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.229>
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1), 389-405. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>

- Butt, J. (2020). Exploring the interrelationship between additive manufacturing and Industry 4.0. *Designs*, 4(2), 1-33. <https://doi.org/10.3390/designs4020013>
- Cesar-Juárez, Á., Olivos-Meza, A., Landa-Solís, C., Cárdenas-Soria, V., Silva-Bermúdez, P., Suárez, C., Olivos, B., & Ibarra-Ponce, J. (2018). Uso y aplicación de la tecnología de impresión y bioimpresión 3D en medicina. *Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM*, 61(6), 43-51. <http://dx.doi.org/10.22201/fm.24484865e.2018.61.6.07>
- Chen, H., & Zhao, Y. (2016). Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process. *Rapid Prototyping Journal*, 22(3), 527-538. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2014-0149>
- Chen, Q., Juste, E., Lasgorceix, M., Petit, F., & Leriche, A. (2022). Binder jetting process with ceramic powders: Influence of powder properties and printing parameters. *Open Ceramics*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100218>
- Chen, Z., Wang, D., & Zhang, Y. (2023). Microphone signal specialities in laser powder bed fusion: single-track scan and multi-track scan. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 1344-1362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.091>
- Cho, Y. H., Park, S. Y., Kim, J. Y., & Lee, K. A. (2023). 17-4PH stainless steel with excellent strength-elongation combination developed via material extrusion additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 3284-3299. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.228>
- Credi, C., Bernasconi, R., Levi, M., & Magagnin, L. (2023). Self-activating metal-polymer composites for the straightforward selective metallization of 3D printed parts by stereolithography. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 1855-1867. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.035>
- Cunningham, C., Flynn, J., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. (2018). Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, 672-686. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>
- DebRoy, T., Wei, H., Zuback, J., Mukherjee, T., Elmer, J., Milewski, J., Beese, A., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112-224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- Ehmsen, S., Glatt, M., & Aurich, J. (2023). Influence of process parameters on the power consumption of high-speed laser directed energy deposition. *Procedia CIRP*, 116, 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.016>

- Elhazmiri, B., Naveed, N., Naveed, M., & Ul, M. (2022). The role of additive manufacturing in industry 4.0: An exploration of different business models. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 317-329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.07.001>
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C., Wang, C., Shin, Y., Zhang, S., & Zavattieri, P. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Godoi, F. C., Prakash, S., & Bhandari, B. R. (2016). 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>
- Gokcekaya, O., Ishimoto, T., Nishikawa, Y., Kim, Y., Matsugaki, A., Ozasa, R., Weinmann, M., Schnitter, C., & Nakano, T. (2023). Novel single crystalline-like non-equiatomc TiZrHfNbTaMo bio-high entropy alloy (BioHEA) developed by laser powder bed fusion. *Materials Research Letters*, 11(4), 274-280. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2147406>
- Golab, M., Massey, S., & Moultrie, J. (2022). How generalisable are material extrusion additive manufacturing parameter optimisation studies? A systematic review. *Heliyon*, 8(11), 1-30. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11592>
- Guo, A., Wang, J., Tang, R., Kong, H., Kong, D., Qu, P., Wang, S., Wang, H., & Hu, Y. (2023). Insights into the effects of epoxy resin infiltration on powder aging issue induced by powder recycling in powder bed fusion of Nylon12 materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 3151-3165. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.003>
- Guo, Y., Chen, C., He, W., Cao, Y., Xing, H., Fang, H., Wu, C., & Zhou, K. (2023). Compressive fatigue behavior of graded tantalum scaffolds produced by electron beam powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 6451-6462. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.235>
- Haddaway, N., Page, M., Pritchard, C., & McGuinness, L. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis. *Campbell Systematic Reviews*, 18(2), 1-12. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>

- Holland, S., Foster, T., MacNaughtan, W., & Tuck, C. (2018). Design and characterisation of food grade powders and inks for microstructure control using 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.008>
- Hwang, S., Oh, W.-J., Kim, D.-H., Kim, J., Oh, J., Nam, T.-H., Kim C.-S., & Lee, T. (2023). Optimizing interlayer cooling for SUS316L thin wall fabricated by directed energy deposition. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5239-5245. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.145>
- Ikeda, Y., Takeuchi, T., Koike, R., Kakinuma, Y., Kondo, M., Oda, Y., & Mori, T. (2023). Evaluation of fabrication parameters for foam stainless steel in directed energy deposition. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 17(1), 1-11. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2023jamdsm0011>
- Jeong, H.-I., Lee, C.-M., & Kim, D.-H. (2023). Manufacturing of Ti-Nb-Cr-V-Ni high entropy alloy using directed energy deposition and evaluation of materials properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5606-5617. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.168>
- Karabutov, A., & Novikov, M. (2023). Laser-ultrasound diagnostics of plastic products manufactured by laser stereolithography. *The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(2), 103-107. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W3-2023-103-2023>
- Keist, J., & Palmer, T. (2017). Development of strength-hardness relationships in additively manufactured titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 693, 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.102>
- Krajňák, T., Janeček, M., Preisler, D., Stráský, J., Kozlík, J., Škraban, T., Brázda, M. & Džugan, J. (2023). Microstructure evolution in compositionally graded Ti(4-12 wt% Mo) prepared by laser directed energy deposition. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 4527-4537. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.215>
- Kumar, N., Shaikh, S., Jain, P., & Tandon, P. (2015). Effect of fractal curve based toolpath on part strength in fused deposition modelling. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 5(2). <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2015.073576>
- Kumar, S., Gopi, T., Harikeerthana, N., Kumar, M., Gaur, V., Krolczyk, G., & Wu, C. (2023). Machine learning techniques in additive manufacturing: A state of the art review on design, processes and production control. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34, 21-55. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-02029-5>
- Kumara, C., Segerstark, A., Hanning, F., Dixit, N., Joshi, S., Moverare, J., & Nylén, P. (2019). Microstructure modelling of laser metal powder directed energy deposition of alloy 718. *Additive Manufacturing*, 25, 357-364. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.024>

- Leary, M. (2020). Powder bed fusion. En M. Leary (Ed.), *Design for additive manufacturing* (pp. 295-319). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816721-2.00011-7>
- Li, K., Chen, W., Gong, N., Pu, H., Luo, J., Zhang, D., & Murr, L. (2023). A critical review on wire-arc directed energy deposition of high-performance steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 9369-9412. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.163>
- Li, W., Wang, M., Ma, H., Chapa-Villarreal, F., Oliveira, A., & Zhang, Y. (2023). Stereolithography apparatus and digital light processing-based 3D bioprinting for tissue fabrication. *iScience*, 26(2), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106039>
- Liverani, A., Bacciaglia, A., Nisini, E., & Ceruti, A. (2023). Conformal 3D material extrusion additive manufacturing for large moulds. *Applied Sciences*, 13(3), 1-19. <https://doi.org/10.3390/app13031892>
- Lv, X., Ye, F., Cheng, L., Fan, S., & Liu, Y. (2019). Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment. *Ceramics International*, 45(10), 12609-12624. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.012>
- Majstorovic, V., Stojadinovic, S., Jakovljevic, Z., Zivkovic, S., Djurdjanovic, D., Kostic, J., & Gligorijevic, N. (2018). Cyber-Physical Manufacturing Metrology Model (CPM³) – Big data analytics issue. *Procedia CIRP*, 72, 503-508. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.091>
- Mao, Y., Cai, C., Zhang, J., Heng, Y., Feng, K., Cai, D., & Wei, Q. (2023). Effect of sintering temperature on binder jetting additively manufactured stainless steel 316L: densification, microstructure evolution and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 2720-2735. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.12.096>
- Matsumoto, M., Yang, S., Martinsen, K., & Kainuma, Y. (2016). Trends and research challenges in remanufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 129-142. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0016-4>
- Medrano, V., Arrieta, E., Merino, J., Ruvalcaba, B., Caballero, K., Ramirez, B., Diemann, J., Murr, L., Wicker, R., Godfrey, D., Benedict, M., & Medina, F. (2023). A comprehensive and comparative study of microstructure and mechanical properties for post-process heat treatment of AlSi7Mg alloy components fabricated in different laser powder bed fusion systems. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 6820-6842. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.129>
- Miao, G., Moghadasi, M., Li, M., Pei, Z., & Ma, C. (2023). Binder jetting additive manufacturing: Powder packing in shell printing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(1), 1-15. <https://doi.org/10.3390/jmmp7010004>

- Mirzababaei, S., & Pasebani, S. (2019). A review on binder jet additive manufacturing of 316L stainless steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), 1-36. <https://doi.org/10.3390/jmmp3030082>
- Montoya-Ospina, M., Zeng, J., Tan, X., & Osswald, T. A. (2023). Material extrusion additive manufacturing with polyethylene vitrimers. *Polymers*, 15(6), 1-14. <https://doi.org/10.3390/polym15061332>
- Mostafaei, A., Elliott, A., Barnes, J., Li, F., Tan, W., Cramer, C., Nandwana, P., & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing – Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, 119, 1-138. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>
- Nayak, A., Jain, P., & Kankar, P. K. (2019). Progress and issues related to designing and 3D printing of endodontic guide. En U. Chandrasekhar, L. J. Yang & S. Gowthaman (Eds.), *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)* (vol. 2, pp. 331-337). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2718-6_30
- Notley, S., Chen, Y., Thacker, N., Lee, P., & Panoutsos, G. (2023). Synchrotron imaging derived relationship between process parameters and build quality for directed energy deposition additively manufactured IN718. *Additive Manufacturing Letters*, 6, artículo 100137. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100137>
- Öberg, C., & Shams, T. (2019). On the verge of disruption: Rethinking position and role – The case of additive manufacturing. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 34(5), 1093-1105. <https://doi.org/10.1108/JBIM-10-2018-0293>
- Olaiya, N., Maraveas, C., Salem, M., Raja, S., Rashedi, A., & Alzahrani, A., El-Bahy, Z., & Olaiya, F. (2022). Viscoelastic and properties of amphiphilic chitin in plasticised polylactic acid/starch biocomposite. *Polymers*, 14(11), 1-24. <https://doi.org/10.3390/polym14112268>
- Ortega, M., Bardenhagen, A., Rohr, T., & Stoll, E. (2023). Indirect induction sintering of metal parts produced through material extrusion additive manufacturing. *Materials*, 16(2), 1-24. <https://doi.org/10.3390/ma16020885>
- Paré, G., Trudel, M.C., Jaana, M., & Kitsiou, S. (2015). Synthesizing information systems knowledge: A typology of literature reviews. *Information & Management*, 52(2), 183-199. <https://doi.org/10.1016/j.im.2014.08.008>
- Paśnikowska-Łukaszuk, M., Korulczyk, K., Kapton, K., Urzędowski, A., & Wlazło-Ćwiklińska, M. (2022). Time distribution analysis of 3D prints with the use of a filament and masked stereolithography resin 3D printer. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 16(5), 242-249. <https://doi.org/10.12913/22998624/154926>

- Patalas-Maliszewska, J., Topczak, M., & Klos, S. (2020). The level of the additive manufacturing technology use in polish metal and automotive manufacturing enterprises. *Applied Sciences*, *10*(3), 1-20. <https://doi.org/10.3390/app10030735>
- Pricci, A., Al Islam, S., Stano, G., Percoco, G., & Tadesse, Y. (2023). Semi-analytical and numerical models to predict the extrusion force for silicone additive manufacturing, as a function of the process parameters. *Additive Manufacturing Letters*, *6*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100147>
- Raghavendra, S., Jayashree, P., Rita, D., Piras, G., Scheider, D., Chemello, M., & Benedetti, M. (2023). Wear and material characterization of CuSn10 additively manufactured using directed energy deposition. *Additive Manufacturing Letters*, *6*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100136>
- Raja, S., & Rajan, A. (2023). Challenges and opportunities in additive manufacturing polymer technology: A review based on optimization perspective. *Advances in Polymer Technology*, *2023*(1), 1-18. <https://doi.org/10.1155/2023/8639185>
- Rambo, C., Travitzky, N., Zimmermann, K., & Greil, P. (2005). Synthesis of TiC/Ti-Cu composites by pressureless reactive infiltration of TiCu alloy into carbon preforms fabricated by 3D-printing. *Materials Letters*, *59*(8-9), 1028-1031. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.11.051>
- Roos, S., Botero, C., & Rännar, L. E. (2023). Electron beam powder bed fusion processing of 2507 super duplex stainless steel. as-built phase composition and microstructural properties. *Journal of Materials Research and Technology*, *24*, 6473-6483. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.230>
- Rosado, E., & Moreno, R. (2023). Mullite-silica scaffolds obtained by stereolithography and reaction sintering. *Open Ceramics*, *14*, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100361>
- Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. (2019). Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair. *Applied Sciences*, *9*(16), 1-26. <https://doi.org/10.3390/app9163316>
- Salehi, M., Kuah, K., Ho, J. H., Zhang, S., Seet, H., & Nai, M.. (2023). Towards binder jetting and sintering of AZ91 magnesium powder. *Crystals*, *13*(2), 1-17. <https://doi.org/10.3390/cryst13020286>
- Sargent, N., Wang, Y., Li, D., Zhao, Y., Wang, X., & Xiong, W. (2023). Exploring alloy design pathway through directed energy deposition of powder mixtures: A study of Stainless Steel 316L and Inconel 718. *Additive Manufacturing Letters*, *6*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2023.100133>

- Savolainen, J., & Collan, M. (2020). How additive manufacturing technology changes business models? Review of literature. *Additive Manufacturing*, 32, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101070>
- Schmidt, C., Finsterwalder, F., Griesbaum, R., & Sehr, T. (2023). Determination of factory locations for distributed additive manufacturing, considering pollution, resilience and costs. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 43, 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.03.005>
- Şimşir, M., Kumruoğlu, L., & Özer, A. (2009). An investigation into stainless-steel/structural-alloy-steel bimetal produced by shell mould casting. *Materials & Design*, 30(2), 264-270. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.074>
- Song, Q., Chen, Y., Hou, P., Zhu, P., Helmer, D., Kotz-Helmer, F., & Rapp, B. (2023). Fabrication of multi-material pneumatic actuators and microactuators using stereolithography. *Micromachines*, 14(2), 1-10. <https://doi.org/10.3390/mi14020244>
- Spirrett, F., Ito, T., & Kirihara, S. (2022). High-speed alumina stereolithography. *Applied Sciences*, 12(19), 1-11. <https://doi.org/10.3390/app12199760>
- Stavropoulos, P., Foteinopoulos, P., Stavridis, J., & Bikas, H. (2023). Increasing the industrial uptake of additive manufacturing processes: A training framework. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 6, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.aime.2022.100110>
- Sun, J., Peng, Z., Zhou, W., Fuh, J., Hong, G., & Chiu, A. (2015). A review on 3D printing for customized food fabrication. *Procedia Manufacturing*, 1, 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.057>
- Sundarkumar, V., Nagy, Z., & Reklaitis, G. (2022). Small-scale continuous drug product manufacturing using dropwise additive manufacturing and three phase settling for integration with upstream drug substance production. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 111(8), 2330-2340. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2022.03.009>
- Tan, W., Koo, C., Lau, W., Chong, W., & Tey, J. (2022). Recent advances in 3D printed membranes for water applications. En H.-H. Tseng, W. J. Lau, M. A. Al-Ghouthi & L. An (Eds.), *60 Years of the Loeb-Sourirajan Membrane* (pp. 71-96). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89977-2.00012-9>
- Wadhvani, V., Sivaswamy, V., & Rajaraman, V. (2022). Surface roughness and marginal adaptation of stereolithography versus digital light processing three dimensional printed resins. An *in-vitro* study. *The Journal of Indian Prosthodontic Society*, 22(4), 377-381. https://doi.org/10.4103/jips.jips_8_22

- Wang, J., Goyanes, A., Gaisford, S., & Basit, A. (2016). Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms. *International Journal of Pharmaceutics*, 503(1-2), 207-212. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2016.03.016>
- Wang, Y., & Zhao, Y. F. (2017). Investigation of sintering shrinkage in binder jetting additive manufacturing process. *Procedia Manufacturing*, 10, 779-790. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.077>
- Wang, N., Chang, H., Zhang, C., Wu, Y., Yang, R., Zhang, X., & Zhai, Z. (2023). Preparation of high-stability ceramic slurry with gel behavior for stereolithography 3D printing. *Materials*, 16(7), 1-19. <https://doi.org/10.3390/ma16072816>
- Xie, H., Tang, X., Chen, X., Sun, F., Dong, L., Tan, Y., Chu, H., Liu, P., & Fu, S. (2023). The effect of build orientations on mechanical and thermal properties on CuCrZr alloys fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 3322-3336. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.218>
- Xu, M., Guo, H., Wang, Y., Hou, Y., Dong, Z., & Zhang, L. (2023). Mechanical properties and microstructural characteristics of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion and binder jetting. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 4427-4439. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.069>
- Yang, F., Wang, J., Wen, T., Ai, X., Dong, X., Yang, H., & Ji, S. (2023). Microstructure and mechanical properties of pseudo binary eutectic Al-Mg₂Si alloy processed by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 2187-2199. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.147>
- Ye, G., Jiao, Y., Zhou, P., Sun, J., Zhu, L., Gong, F., Bai, J., Liu, G., Yan, M., & Zhang, R. (2023). Preparation of silicon carbide ceramic slurry for stereolithography based additive manufacturing. *Processing and Application of Ceramics*, 17(1), 47-54. <https://doi.org/10.2298/PAC2301047Y>
- Yi, Y. J., Lee, M. J., Yun, S. J., Park, M., Kim, J. Y., Lee, J., & Yun, J. Y. (2022). Fabrication of metal gas filter by material extrusion additive manufacturing process. *Archives of Metallurgy and Materials*, 67(4), 1517-1520. <https://doi.org/10.24425/amm.2022.141085>
- Zhang, C., Liu, T., Liao, W., Wei, H., & Zhang, L. (2023). Investigation of the laser powder bed fusion process of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si alloy. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36(32), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00863-z>
- Zhao, C., Cai, J., Zhang, B., & Qu, X. (2023). Key technology of binder jet 3D printing. *Journal of Materials Engineering*, 51(5), 14-26. <https://www.sciengine.com/JME/doi/10.11868/j.issn.1001-4381.2021.000581>

Zimenko, K., Afanasiev, M., & Kolesnikov, M. (2022). Pressure control in material extrusion additive manufacturing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 22(5), 929-940. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-5-929-940>