

MANUFACTURA ADITIVA PARA ACEROS INOXIDABLES POR PROCESOS SLM

EDUARD RODRÍGUEZ RAMOS

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL**



PAMPLONA, 2021

MANUFACTURA ADITIVA PARA ACEROS INOXIDABLES POR PROCESOS SLM

EDUARD RODRIGUEZ RAMOS

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial

DIRECTOR:

Ing. Albert Miyer Suarez Castrillón

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL**



PAMPLONA, 2021

MANUFACTURA ADITIVA PARA ACEROS INOXIDABLES POR PROCESOS

SLM

ADDITIVE MANUFACTURING FOR STAINLESS STEELS BY SLM

PROCESSES

Eduard Rodríguez Ramos, Albert Miyer Suarez Castrillon

Ingeniería Industrial

Universidad de Pamplona

Pamplona, Colombia.

Eduard.rodriguez@unipamplona.edu.co

Resumen

La manufactura aditiva (AM), es una técnica usada para la creación de piezas con geometrías complejas, que ha revolucionado el área del diseño y la fabricación en la industria y se puede utilizar con materiales de diferentes propiedades como los polímeros, materiales cerámicos y materiales con propiedades metálicas como por ejemplo en aceros inoxidable. Este artículo presenta un análisis de esta técnica, utilizando información específica sobre AM en aceros inoxidable por fusión selectiva por láser (SLM). Haciendo un breve recuento sobre las ventajas de ésta y los avances que representa la AM en la elaboración de piezas usadas en la ingeniería y demás campos a fines, para luego hacer una descripción detallada sobre como es

este proceso y en qué consiste. Posteriormente se presenta información que describe las materias primas, características físicas y moleculares del acero inoxidable elaborado mediante SLM, con la finalidad de dar a conocer más de cerca este tema en específico. Finalmente se presentan las conclusiones a las que se llegó con la realización de este estudio.

Palabras claves: Manufactura aditiva, SLM, Acero inoxidable, Molecular.

Abstract

Additive manufacturing (AM), is a technique used for the creation of parts with complex geometries, which has revolutionized the area of manufacturing in the industry and can be used with materials of different properties such as polymers, ceramic materials and materials with metallic properties such as stainless steels. This article presents an analysis of this technique, using specific information on AM in stainless steels by selective laser melting (SLM). A brief account of the advantages of this technique and the advances that AM represents in the elaboration of parts used in engineering and other fields is presented, followed by a detailed description of what this process is and what it consists of. Subsequently, information is presented describing the raw materials, physical and molecular characteristics of stainless steel produced by SLM is presented, to get to know this specific topic more closely. Finally, the conclusions drawn from this study are presented.

Key words: Additive Manufacturing, SLM, Stainless Steel, Molecular.

I. Introducción

Los procesos de manufactura aditiva (AM) son utilizados para la construcción de piezas tridimensionales (3D), lo cual consiste en agregar progresivamente capas delgadas de material que son guiadas por un modelo que ha sido diseñado en una computadora, Siendo esta característica única la que facilita la producción de piezas complejas o personalizadas directamente desde el diseño original, sin la necesidad de herramientas costosas, matrices o moldes de fundición, reduciendo así la necesidad de muchos procedimientos que debían llevarse a cabo con los métodos convencionales, los cuales consistían en ir retirando material hasta tener la pieza final (Debroy et al., 2018). Las piezas complejas, fieles a su diseño, se pueden fabricar en un solo paso sin las limitaciones de los métodos de procesamiento convencionales (por ejemplo, cortes rectos, orificios redondos) o formas comerciales (por ejemplo, láminas, tubos, entre otros). Además, se puede lograr una reducción significativa en el recuento de piezas al eliminar o reducir la necesidad de ensamblar múltiples componentes. La AM permite producir las piezas bajo demanda, reduciendo así el inventario de repuestos y disminuyendo el tiempo en cola para los componentes de reemplazo obsoleto o crítico. Por estas principales razones, la manufactura aditiva está siendo bastante aceptada como una nueva alternativa para diseñar y producir componentes de alta calidad y rendimiento, aplicados en la industria aeroespacial, médica, energética y automotriz. Entre los componentes aeroespaciales, se puede mencionar las boquillas de inyección de combustible complejas que anteriormente requerían el ensamblaje de múltiples piezas y estructuras de ingeniería livianas que ahora se traducen en reducción considerable de costos. En la medicina se encuentran los implantes médicos y dentales producidos por AM y que ofrecen mejoras significativas en la biocompatibilidad, integración y la

posibilidad de que los dispositivos sean adaptados al paciente bajo los requerimientos y especificaciones propias del mismo, con lo cual se reduce el margen de error en el diseño de una pieza. Por su parte las aplicaciones al sector automotriz incluyen la creación de prototipos y la fabricación y reparación rápida de hardware industrial como punzones, matrices y herramientas personalizadas.

En cuanto a la fusión selectiva por láser (SLM), es una técnica de fabricación aditiva que ha sido creada recientemente, la cual consiste en un rayo láser que incide sobre el material que está dispuesto por capas, causando su fusión o cambio de estado. Esta técnica ha permitido perfeccionar la fabricación aditiva de componentes metálicos, ya que reduce la formación de granos, de modo que las piezas fabricadas mediante procesos SLM cuentan con mejores características en comparación a las que han sido creadas mediante métodos convencionales. Este proceso involucra varios parámetros que deben ser tenidos en cuenta, para la obtención de piezas sin defectos y han surgido muchos estudios sobre tales parámetros del proceso. Uno de ellos, es el estudio realizado por Liu, el cual analiza cómo influyen dichos parámetros en la microestructura y propiedades mecánicas del acero inoxidable (Liu et al., 2020). Por su parte Hsu, hace un análisis sobre la relación que hay entre la microestructura y las propiedades del acero inoxidable SLM 17-4 PH, llegando a concluir que las propiedades físicas de dicho acero podrían mejorar, personalizando la micro estructura (Hsu et al., 2019). Estos, entre muchos otros estudios han representado avances significativos para la manufactura aditiva por procesos SLM en metales, reflejándose en su alto nivel de aceptación en la industria.

Si bien, la manufactura aditiva se encuentra en constante avance y cada vez son más sus

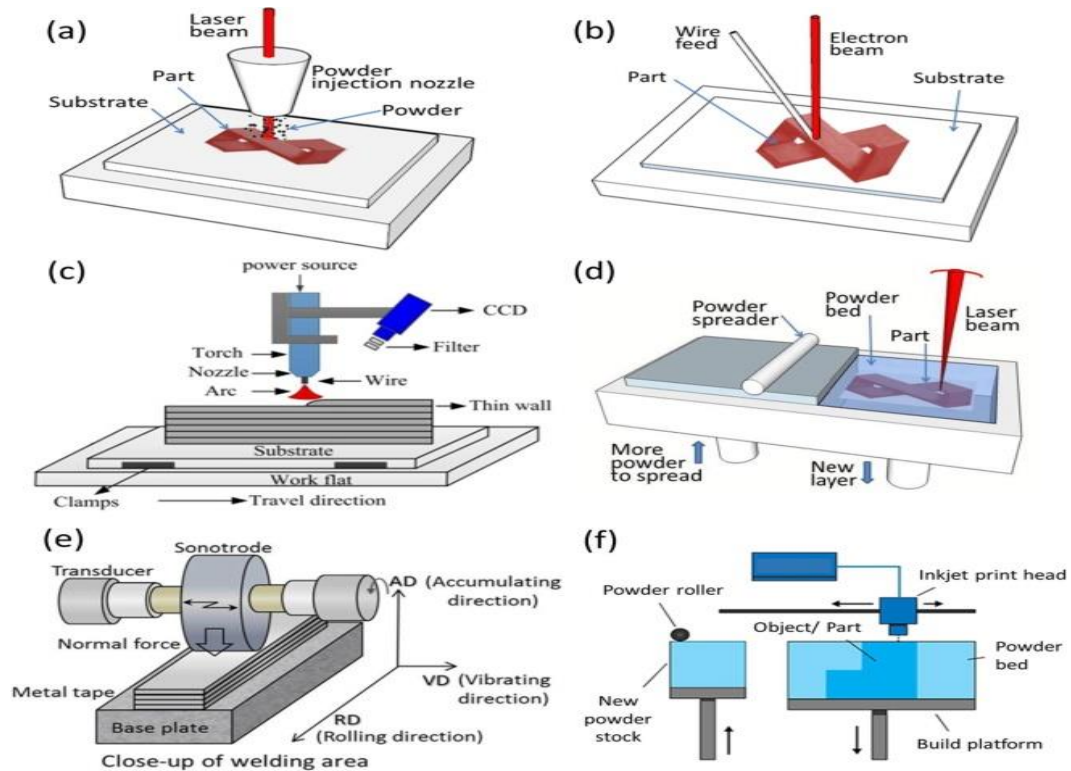
aplicaciones a los diferentes sectores de la industria como lo son el aeroespacial, automotriz, la medicina, entre otros que no están dentro del alcance de esta revisión, por lo cual se recomienda revisar periódicamente la información que se publica respecto a las novedades que esta presenta; por su parte este estudio, abarca una descripción general del proceso de AM, materias primas y micro estructura de aceros inoxidable fabricados mediante procesos SLM, por lo cual se espera que sea útil para entender un poco más la manufactura aditiva en aceros inoxidable por procesos SLM.

II. Proceso

La fabricación de una pieza estructuralmente sólida, libre de defectos y confiable requiere una comprensión de las opciones de proceso disponibles, sus procesos físicos subyacentes, materias primas, métodos de control de procesos y una apreciación del origen de los diversos defectos comunes y sus soluciones (Debroy et al., 2018). Los procesos de AM se dividen en dos categorías, Deposición de Energía Dirigida (DED) y Fusión por Lecho de Polvo, por sus siglas en inglés (PBF). Además se sub clasifican de acuerdo a la fuente de calor que se implemente; como lo son fuentes de calor por láser (L), haz de electrones (EB), arco de plasma (PA) y arco metálico de gas (GMA) quedando de la siguiente manera PBF-L, PBF-EB, DED-L, DED-EB, DED -PA y DED-GMA. En la Fig.1 se puede apreciar un esquema de las diferentes técnicas que se pueden utilizar en AM.

Figura.1.

Diagrama esquemático de (a) DED-L (b) DED-EB (c) DED-GMA (d) PBF-L (e) proceso de fabricación aditiva ultrasónica (UAM) y (f) proceso de chorro de aglutinante (Debroy et al., 2018)



La Figura 1 (a) muestra una vista esquemática de DED-L con polvo utilizado como materia prima. Básicamente consiste en ir agregando polvo en la trayectoria de la masa fundida y el baño fundido creado por un rayo láser para depositar material capa por capa sobre una placa de construcción. Debido a que los polvos son muy propensos a oxidarse, durante el proceso se implementa argón para proteger el metal fundido de la oxidación, el cual funciona como agente protector (Khalid et al., 2011). La figura 1(b) presenta DED-EB, el cual utiliza un haz de

electrones para crear un depósito introduciendo alambre tubular comercial en la piscina fundida. Una gran cámara de vacío proporciona un entorno de procesamiento de alta pureza durante la construcción y el enfriamiento. En DED-PA o DED-GMA, se utiliza un arco eléctrico como fuente de calor con alambres tubulares comerciales como materia prima similar a la soldadura por fusión (Zhang et al., 2017) . Estos procesos consisten en una fuente de alimentación, un sistema de adición de alambre, y un sistema de control multi-eje integrado, encargado de ejecutar los movimientos necesarios en la construcción del sólido, ver figura 1(c). En todos los procesos DED, una pieza 3D se fabrica capa por capa, siguiendo los parámetros preestablecidos en un archivo de diseño asistido por computadora (CAD). Otros factores de procesamiento, como la velocidad de exploración y la velocidad de alimentación del material, igualmente están preestablecidos o controlados durante el proceso mediante softwares y sensores integrados. Después del proceso de deposición, la pieza fabricada es retirada y a por lo general, requiere de algunas operaciones adicionales de acabado para lograr la calidad deseada.

La figura 1(d) PBF-L, comienza con un modelo CAD sólido o de superficie, orientándolo dentro de un volumen de construcción para incluir estructuras de soporte, cortando en capas planas, definiendo un escaneo de ruta y archivo de construcción basados en un conjunto de parámetros específicos del material y la configuración específica de la máquina (King et al., 2016). La pieza se forma extendiendo capas delgadas de polvo y fusionando el paso a paso y capas sobre capa de este polvo, bajo control de computadora, dentro de una cámara inerte, bajando gradualmente el eje Z después de cada capa. La fusión se produce por un movimiento de trama de la fuente de calor láser utilizando espejos impulsados por galvanómetro, lo que resulta en la fusión y solidificación de las pistas de fusión superpuestas.

PBF-EB es parecido a PBF-L pero en su lugar utiliza una fuente de calor EB dentro de una cámara de vacío. Las bobinas electromagnéticas disponen el haz de electrones a través de cada capa de polvo. El proceso consiste en una secuencia de dos pasos, en primer lugar sinterizando de cada capa de polvo para evitar la carga electrostática y la repulsión de las partículas de polvo, seguido de una pasada adicional que fusiona la región definida por el volumen de la pieza. Como el polvo de aleación ya está ligeramente sinterizado en un lecho que a menudo se mantiene a una temperatura general elevada, los procesos de PBF-EB normalmente permiten una velocidad de exploración del haz relativamente más rápida, pero se limitan al polvo eléctricamente conductor. Para los procesos PBF, el escaneo del haz para cada capa puede seguir diferentes patrones, también conocidos como bidireccional, espiral, sombreado, unidireccional, zigzag y transversal.

El proceso UAM implica la unión de láminas metálicas mediante el uso de vibraciones ultrasónicas bajo una fuerza normal constante, como se muestra esquemáticamente en la figura 1 (e) (Babu et al., 2010). Las láminas de metal disminuyen su dureza por el calor generado por la vibración ultrasónica y se unen en estado sólido. Finalmente, en el proceso AM de chorro de aglutinante, un cabezal de impresora de chorro de tinta suministra un chorro de aglutinante líquido sobre un lecho de polvo de aleación como se muestra en la Fig. 1 (f). El aglutinante se cura para mantener el polvo unido para fabricar el componente. (Debroy et al., 2018)

2.1 Materias primas y microestructura de aceros inoxidables fabricados procesos SLM.

Las propiedades de las materias primas juegan un papel fundamental en la fabricación selectiva por láser ya que, factores tales como la distribución del tamaño, forma, composición y morfología de superficie de las piezas fabricadas mediante SLM, están directamente relacionadas con la calidad de estas (Karlsson et al., 2013), es por eso que los polvos metálicos limitan la alta calidad en el proceso, debido a que estos tienden a oxidarse con facilidad, tal como lo demuestra Laleh en su estudio sobre la resistencia a la corrosión inter granular del acero inoxidable fabricado por SLM (Laleh et al., 2019), en el cual establece una relación lógica entre la corrosión que hay entre los granos de polvo y las características de dichos granos.

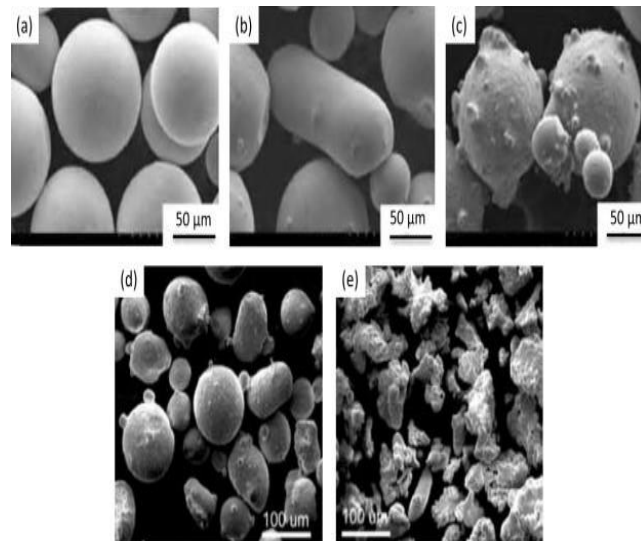
Los polvos de aleación que se utilizan para fabricar productos de aceros inoxidables por SLM, son producidos de cuatro formas. Una de ellas es el proceso de atomización de gas (GA), se atomiza la aleación por la supuración tan fuerte del gas de nitrógeno y argón (Anderson et al., 1991). Otro de los procesos es la atomización rotatoria (RA), en la cual el metal fundido se aplica sobre un disco rotatorio. Del disco se arrojan finas gotas de metal fundido, que posteriormente se solidifican y son recogidas como polvos (Debroy et al., 2018). Proceso de electrodo rotatorio de plasma (PREP), el extremo de una barra de metal se funde usando un arco eléctrico o plasma. A medida que la barra gira alrededor de su eje longitudinal, el metal fundido se expulsa por centrifugación dando como resultado finas gotas que se recogen como polvos solidificados (Champagne et al., 1984). Por último, está uno que emplea un chorro de agua a alta presión para atomizar y solidificar las gotas de metal fundido como polvos en el proceso de

atomización de agua (WA) (Okamoto et al., 1990).

La Figura 2 (a) - (e) muestra las imágenes de los polvos de aleación producidos por diferentes procesos. Los polvos PREP tienen una forma esférica con superficies lisas. Las partículas de polvo del proceso RA también presentan una superficie lisa pero no poseen forma esférica. El proceso GA forma polvos con morfología esférica y textura superficial con hoyuelos, aunque la presencia de partículas satélite aumenta la rugosidad de la superficie. Los polvos del proceso WA suelen tener una forma irregular con una textura superficial áspera, lo cual limita la fluidez en el proceso (Pinkerton et al., 2005).

Figura. 2.

Imagen de los polvos de aleación fabricados mediante el proceso (a) PREP (b) RA y (c) GA. Comparación de la forma de los polvos fabricados mediante el proceso (d) GA y (e) WA (Debroy et al., 2018)

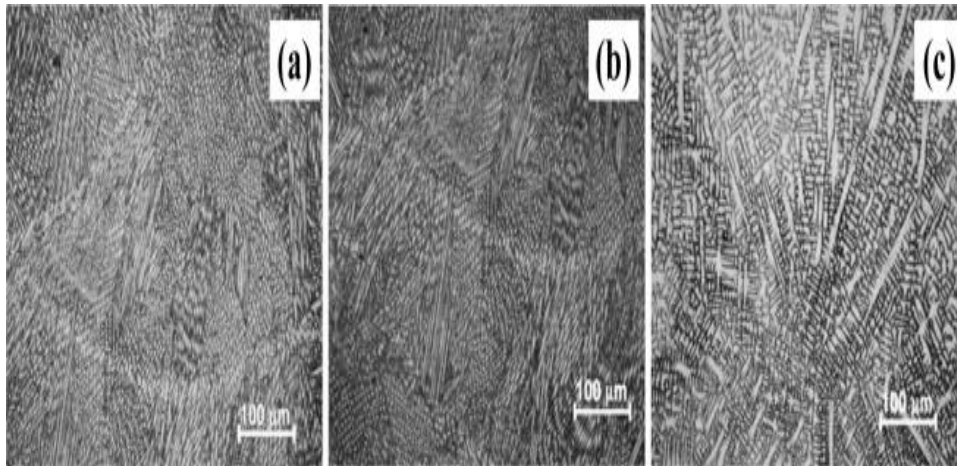


La manufactura aditiva por procesos SLM procesa una gran variedad de aceros inoxidables, como lo son, lo aceros endurecibles por precipitación (Yang et al., 2012), los aceros

inoxidables austeníticos (Yadollahi et al., 2015), los aceros maraging y los aceros magnéticos blandos con alto contenido de silicio (Garibaldi et al., 2016). Las microestructuras más comunes de los aceros inoxidables austeníticos fabricados de forma aditiva son las células y las dendritas columnares. La estructura equiaxial rara vez se informa debido al gradiente de alta temperatura en el proceso de AM. En la Fig.3 se puede apreciar la microestructura típica en diferentes ubicaciones de un depósito de nueve capas de acero inoxidable austenítico 316L por DED. Las estructuras solidificadas son principalmente células y el tamaño de las células aumenta con la altura de depósito debido a la acumulación de calor durante el proceso de AM (Manvatkar et al., 2011).

Figura.3.

Microestructuras solidificadas con escalas dependientes de la altura de capa. (a) Capa inferior, (b) media y (c) superior para una estructura de 9 capas de acero inoxidable austenítico 316L de DED-L (Manvatkar et al., 2011)



Básicamente, los resultados que se obtienen al endurecerse la pieza están sujetos al proceso y a las composiciones químicas de las materias primas, como ya se ha mencionado anteriormente. Es de vital importancia, establecer las correlaciones entre las propiedades

mecánicas y los parámetros de procesamiento.

III. Conclusiones

La manufactura aditiva resulta ser muy útil para la fabricación de piezas con altos niveles de complejidad, las cuales resultaban muy difíciles de hacer mediante los métodos de fabricación tradicionales.

La manufactura aditiva hace posible la impresión de diseños personalizados, inspeccionar estos antes de ser elaborados, disminuir las probabilidades de error en la fabricación, reducir los tiempos de fabricación de las piezas, logrando así optimizar procesos dentro de la industria que se reflejan en la disminución de costos y tiempos y aumento de la satisfacción del cliente.

Gracias a la gran variedad de materiales que se pueden utilizar en la fabricación aditiva de piezas, se incrementa la posibilidad de crear un sin número de estas, con distintas propiedades y aplicaciones en los diferentes sectores de la industria, lo cual amplía el mercado de la organización que la emplee.

El uso de software, permite el intercambio de información tipológica y topológica de un diseño entre personas de todo el mundo relacionadas con el área, la cual puede ser utilizada para la mejora e innovación de las piezas que se fabrican, ampliar la visión que se tiene respecto al uso que se le da a estas herramientas y aprovechar al máximo los beneficios que estas herramientas ofrecen.

Bibliografía

- Anderson et al. (1991). Flow mechanisms in high-pressure gas atomization. *Mater Sci Eng A*, 101.
- Babu et al. (2010). Characterization of interfacial microstructures in 3003 aluminum alloy blocks fabricated by ultrasonic additive manufacturing. *Acta Materialia*, 4305.
- Champagne et al. (1984). (Rotating Electrode Process) atomization mechanisms. *Powder Metall Int*, 125.
- Debroy et al. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in materials science*, 112.
- Frazier et al. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance volume*, 27.
- Garibaldi et al. (2016). Metallurgy of high-silicon steel parts produced using Selective Laser Melting. *Acta mater*, 207.
- Hsu et al. (2019). Microstructure and property of a selective laser melting process induced oxide dispersion strengthened 17-4 PH stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 30.
- Karlsson et al. (2013). Caracterización y comparación de materiales producidos por fusión por haz de electrones (EBM) de dos fracciones de polvo de Ti-6Al-4V diferentes. *J Mater Process Technol*, 2109.
- Khalid et al. (2011). Direct metal deposition (DMD) of H13 tool steel on copper alloy substrate: Evaluation of mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 8.
- King et al. (2016). Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*,

36.

Laleh et al. (2019). On the unusual intergranular corrosion resistance of 316L stainless steel additively manufactured by selective laser melting. *Corrosion Science*, 7.

Liu et al. (2020). Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, 186.

Manvatkar et al. (2011). Estimation of melt pool dimensions, thermal cycle, and hardness distribution in the laser-engineered net shaping process of austenitic stainless steel. *Metall Mater Trans*, 2080.

Okamoto et al. (1990). Effect of atomization variables on powder characteristics in the high-pressure water atomization process. *Met Powder Rep*, 38.

Pinkerton et al. (2005). Direct additive laser manufacturing using gas- and water-atomised H13 tool steel powders. *Int J Adv Manuf Technol*, 471.

Sames et al. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *Int Mater Rev*, 315.

Yadollahi et al. (2015). Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel. *Mater Sci Eng A*, 171.

Yang et al. (2012). Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 17-4PH stainless steel. *Mater Sci Eng A*, 80.

Zhang et al. (2017). Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 397.