

Aplicación de Soldadura Láser para la Fabricación de Componentes en la Industria Aeroespacial

Christian A. Piña Blancas

Ingeniero de Diseño Cetro de Ingeniería Avanzada en Turbomaquinaria (GE - CIAT)

Alumno del Posgrado de Manufactura Avanzada

christian.pina@ge.com

RESUMEN.

El objetivo de este trabajo es documentar la aplicación de soldadura láser en componentes de la industria aeroespacial, los beneficios de este proceso en comparación con procesos de soldadura tradicionales y proveer de manera general, los posibles escenarios para la sustentación de este tipo de proceso el cual se propone sustituir a procesos convencionales de soldadura.

Palabras Claves: soldadura, láser, AISI 321.

1 INTRODUCCIÓN.

Existen una serie de procesos de manufactura convencional, sin embargo, la ingeniería de manufactura es un campo dinámico con constantes innovaciones en el desarrollo de procesos para productos avanzados; cada proceso de manufactura tiene características singulares que impactan la calidad, costo y dificultad de procesar un producto final.^[1]

En muchos casos, la fabricación de un producto en forma de una sola pieza con una calidad aceptable no es factible o económico y requiere la unión de formas complejas que son fabricadas por separado. Varios procesos de unión incluyen la soldadura, unión mecánica, o unión adhesiva, entre otros. La soldadura es un grupo de procesos de unión tales como la soldadura por fusión, soldadura de estado sólido y soldadura fuerte. La soldadura fuerte y soldadura blanda son generalmente consideradas como procesos de baja temperatura en la que dos partes están unidas entre sí por el uso de material de relleno que posteriormente es fundido por una fuente de calor externa.

La aplicación del láser en los procesos de manufactura se puede encontrar en procesos de fundición, formado, unión y maquinado; algunos de estos procesos se encuentran todavía en etapa de desarrollo.

La soldadura láser es el proceso de soldadura más preciso que existe en la actualidad y el que menos calor aporta.^[2] Mediante este procedimiento se puede realizar todo tipo de unión o reparación en el que se desee evitar deformaciones.

Los procedimientos de soldadura con rayo láser producen soldaduras de buena calidad, con contracción y distorsión mínima. Estas soldaduras tienen buena resistencia y en general son dúctiles y libres de porosidades. [1] El proceso se puede automatizar, de tal modo que se use en diversos materiales con grosores hasta de 25 mm; es especialmente eficaz en piezas delgadas. En los metales y aleaciones que normalmente se sueldan están el aluminio, titanio, metales ferrosos, cobre, súper aleaciones y los metales refractarios. Las velocidades de soldado van de 2.5 m/min hasta 80 m/min para metales delgados.

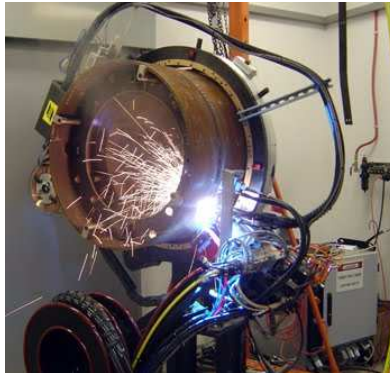


Figura 1. Soldadura por Láser.

2 FUNDAMENTOS

La soldadura por medio de láser es la segunda aplicación más extendida del láser en la industria después del corte, registrándose un aumento progresivo de sistemas instalados. El sistema de soldadura láser es similar al de corte necesitando así mismo aporte de gas, pero en este caso, el gas actúa como una atmósfera protectora del material fundido. Hay esencialmente dos formas de soldar con láser, lo que se conoce como soldadura limitada por conducción y la soldadura de penetración

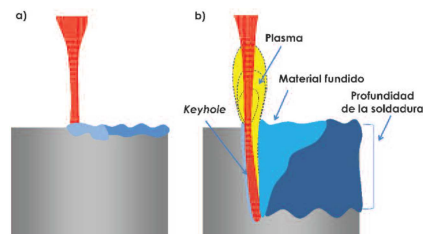


Figura 2. Tipos de soldadura láser. a) Limitada por conducción. b) Soldadura de penetración.

En la soldadura limitada por conducción el material se funde allá donde se alcanza la temperatura de fusión, manteniéndose la intensidad del láser siempre por debajo del límite para producir evaporación. El haz láser funde el material en el punto de focalización

y, por conducción de calor a través de la pieza, se funde el material adyacente, consiguiéndose un cordón de perfil semicircular. Este método se emplea sobre todo para piezas de pequeño espesor lográndose muy buenos acabados superficiales.

En la soldadura de penetración, las altas intensidades producen evaporación de material, creándose un agujero con forma de ojo de cerradura (conocido como keyhole) que permite aumentar la absorción de radiación por las múltiples reflexiones en las paredes del mismo y la consiguiente fusión de material. Esto es muy importante en materiales de elevada reflectancia en las longitudes de onda de trabajo. El material en fase líquida va solidificando rápidamente a medida que se produce el avance del haz láser, formando así el cordón de soldadura. Mediante este método se consiguen profundidades de soldadura muy grandes y, por tanto, se pueden soldar piezas de mayor espesor.

El control de los parámetros del proceso tales como energías, focalización y las diferentes configuraciones geométricas de la unión, permiten obtener resultados óptimos. La soldadura láser se caracteriza por la alta calidad del cordón de manera que, en la mayoría de los casos, no es necesario post-procesado.

Al igual que el corte por láser, las principales razones de su implantación industrial a gran escala son:

- La rapidez del proceso,
- Se evita el cambio de herramientas, al no existir contacto,
- Se adapta muy bien a diversos materiales de diferentes espesores,
- Fácilmente integrable en líneas de producción robotizadas, como pueden ser las cadenas de montaje de la industria automovilística.

La soldadura láser posee una alta flexibilidad en términos de integración en procesos productivos y de posibles configuraciones geométricas. Las aplicaciones de la soldadura láser son diversas: extintores, tuberías gruesas, láminas metálicas de lavadoras, construcción de barcos, baterías de litio y especialmente, la soldadura láser es un proceso crucial en las líneas de ensamblaje de piezas de chasis de automóviles.

Láser Nd:YAG. Los láseres de estado sólido son una clase importante de los láseres basándose en medios sólidos en oposición a medios en fase de gas, como el CO₂. Los láseres de estado sólido pueden ser hechos de cristales o vidrios dopados con tierras raras o iones de metales de transición, así como los semiconductores. Los láseres de estado sólido pueden generar potencias de salida entre unos pocos mili-watios y muchos kilovatios. Como ejemplo de un láser de estado sólido, el de Neodimio-YAG, utiliza el ion Nd³⁺ para dopar el cristal anfitrión de itrio-aluminio-granate (YAG), para producir la geometría triplete que hace posible la inversión de población. Los láseres neodimio-YAG,

se han convertido en importantes láseres debido a que se pueden usar para producir altas potencias. Se han construido tales láseres, para producir potencias de alrededor de un kilovatio de láser continuo a 1.065 nm, y pueden alcanzar potencias extremadamente altas en el modo pulsado. Los láseres de neodimio-YAG se utilizan en el modo de pulso en los osciladores láser, para la producción de una serie de pulsos muy cortos para la investigación, con resolución de tiempo de femto segundos. [1]

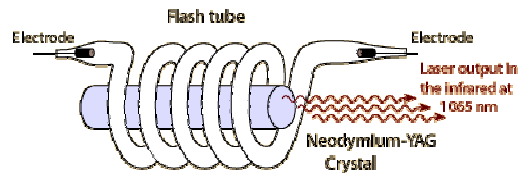


Figura 3. Láser Neodimio YAG.

En los últimos años se ha realizado una intensa labor de investigación sobre la aplicación potencial de una nueva generación de láseres: los láseres de pulsos ultracortos. Actualmente podemos decir que éstos se han convertido en herramientas de extraordinaria versatilidad en el ámbito del procesado de precisión y en el microestructurado de materiales. En comparación con las fuentes láser convencionales, además de la mejor calidad en los acabados y precisión, debemos destacar la posibilidad de procesar materiales transparentes y/o de muy alta dureza.

En general y comparado con procesos tradicionales de soldadura, las ventajas de la soldadura láser se enfocan en los siguientes puntos: [3]

- La densidad de la energía es alta y el proceso es rápido. Los daños debidos a la concentración de calor son mínimos y en su caso eliminados en procesos de soldadura de alta velocidad.
- La soldadura láser puede ser aplicada sin necesidad de proteger el entorno en donde se va a aplicar la soldadura como un ambiente al vacío o protegido por medio de gas inerte.
- La pieza de trabajo no necesita estar en contacto con la máquina de soldadura láser, el haz de láser puede ser guiado a zonas de difícil acceso por medio de un reflector, un prisma o por medio de fibra óptica.

3 PROCEDIMIENTO

Uno de los materiales de mayor aplicación en la industria aeroespacial es el acero inoxidable (AISI 321), utilizado por su baja densidad, resistencia a temperaturas por debajo de los 426.6 °C, manufacturabilidad y bajo costo. Es común encontrar componentes como paneles de aire utilizados para proveer aire de enfriamiento a estructuras con la finalidad de controlar el claro entre dichas estructuras y componentes

móviles como alabes. Este tipo de paneles son fabricados por medio de hojas de acero inoxidable con espesores de hasta 0.71 mm.

La unión de estas hojas de acero, las cuales forman cavidades por donde circulara el aire, es por medio de soldadura fuerte (soldadura de horno). Como se mencionó previamente, este tipo de soldadura es un proceso de unión de baja temperatura en la que, para este ejemplo, las hojas de acero inoxidable serán unidas entre sí por el uso de un material de relleno que posteriormente será fundido por una fuente de calor externa (horno). En este tipo de proceso, cabe mencionar, no es necesario un operador con cierto tipo de habilidades y es un proceso práctico siempre y cuando sea posible pre-posicionar el material de relleno. El tipo de hornos utilizados, es preferible mantenerlos operando de manera continua (24/7) para eliminar tiempos muertos asociados al arranque o al proceso de enfriamiento de este tipo de equipo, además de ser poco eficientes en cuanto al uso de energía se refiere.



Figura 5. Horno de banda continúa.

Como principales requerimientos para la implementación del proceso de soldadura láser para la unión de este tipo de componentes (paneles de aire), es necesario demostrar que este proceso es capaz de:

- Mantener el mismo tipo de material (AISI 321),
- Mantener el mismo espesor de material (hojas de metal de hasta 0.71 mm),
- Mantener el mismo diseño/forma del componente,
- Mantener o mejorar las propiedades mecánicas de la unión

Para cumplir con dichos requerimientos, se propone el siguiente método de validación:

1. Manufactura de probetas soldadas con la finalidad de obtener experiencia en el proceso mediante la obtención de datos como los diferentes parámetros de máquina (densidad del láser, velocidad, etc.) y las diferentes características del cordón de soldadura como tamaño y calidad dependiendo de la variación de estos parámetros.
2. Análisis Metalográfico para identificar posibles riesgos o problemas de calidad como porosidad o indicaciones.

3. Análisis comparativo de esfuerzos a tensión y cortante de probetas unidas por medio de soldadura láser y soldadura fuerte.

La generación de datos para entender las características del cordón de soldadura, entender el proceso y desarrollar procedimientos para el control de la soldadura ha sido experimentado utilizando placas de acero inoxidable AISI 304 con un láser de 10 kW de potencia y a diferentes velocidades. [4] El espesor de las placas de acero AISI 304 utilizadas fue de 8 mm y 20 mm respectivamente. La potencia máxima utilizada durante la prueba fue de 10kW, velocidades entre 5 - 250 mm s⁻¹ y diámetro del punto de soldadura de 130-560 μm. A una velocidad de 75 mm s⁻¹ a diferentes diámetros de punto de soldadura se encontró lo siguiente: con un diámetro de punto de soldadura de 560 μm, se tuvo una penetración de 8.3 mm pero el cordón de soldadura no logro formarse; con un diámetro de 130 μm se midió una penetración de 11 mm pero se encontraron ondulaciones en el cordón de soldadura. Se observó que con un diámetro de punto de soldadura de 200 y 360 μm, donde la penetración de soldadura alcanzo 10.8 y 8.5 mm, respectivamente, lo cual representa un 30% más de penetración comparado con un punto de soldadura de 560 μm.


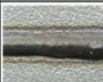

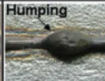




	Spot diameter			
	φ 560 μm	φ 360 μm	φ 200 μm	φ 130 μm
Power density	35 kW mm ⁻²	100 kW mm ⁻²	0.4 MW mm ⁻²	0.9 MW mm ⁻²
Surface ↑ 2 mm ↓				
Cross section ↑ 8 mm ↓				
Penetration	8.3 mm	8.5 mm	10.8 mm	11 mm

Figura 6. Apariencia visual, corte y penetración de cordones de soldadura producidas con un láser de 10 kW de potencia a diferentes diámetros de punto de soldadura.

El efecto de tener 4 diámetros de punto de soldadura en relación a la penetración es relacionada con la velocidad de aplicación de la soldadura. La penetración máxima registrada durante este experimento fue de 18 mm, con un diámetro de 200 μm y a una velocidad de 5 mm s⁻¹; de esto se pudo concluir que el punto de soldadura igual o menor a 200 μm produjeron una penetración de 10 mm a una velocidad de 100 mm s⁻¹. Arriba de 100 mm s⁻¹ se observó falta de material en el cordón de soldadura y curvaturas con diámetros de entre 360-560 y 130-200 μm respectivamente. Con velocidades debajo de los 50 mm s⁻¹, se presentó porosidad en la soldadura.

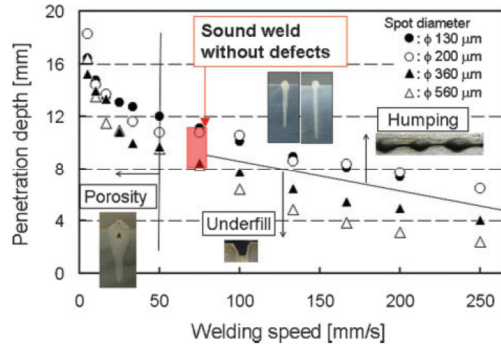


Figura 7. Efectos de diámetro y velocidad de soldadura relacionados con la penetración y defectos de la misma.

Otros experimentos muestran el efecto de los parámetros del proceso en las características de la geometría de uniones a tope. Dado que el proceso de soldadura por láser tiene la habilidad de ser reproducido a gracias al control numérico, ha sido exitosamente utilizado en aplicaciones en donde la alta velocidad, alta densidad energética y penetración profunda son requeridas y los retos son el controlar la distorsión del material debido al calor sin afectar las dimensiones finales de la pieza de trabajo.^[5]

Los parámetros del proceso analizados fueron la posición del punto de soldadura, la energía y velocidad del láser. La Tabla 1 muestra los factores de diseño incluyendo las variables del láser.

Tabla 1. Variables y Factores de Diseño

No	Variables	Levels				
1	Laser Power (W)	500	525	550	575	600
2	Laser Welding (mm/s)	90	95	100	105	110
3	Focal Point (mm)	-3	-2.5	-2	-1.5	-1

Para este experimento se fabricaron probetas de acero inoxidable AISI 10018 de 50 x 50 x 1.5 mm³ de espesor y de 50 x 25 x 1.5 mm³. Las probetas fueron maquinadas en el área de aplicación de soldadura, las probetas fueron soldadas por medio de láser con una potencia de 1 kW.



Figura 8. Configuración del Experimento.

Después de la finalización de las probetas, estas fueron seccionadas perpendiculares a la dirección de la soldadura y dimensionadas como a continuación se describe:

- TH – Altura Cara; TW – Ancho Cara; RH – Altura Raíz; RW – Ancho Raíz

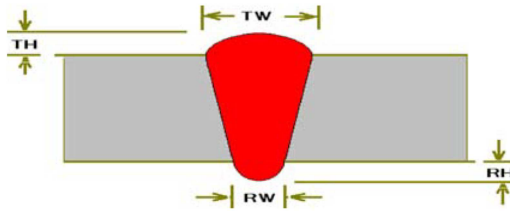


Figura 9. Esquemático de la sección de las probetas.

Para entender las condiciones óptimas del proceso, se utilizó la metodología de Superficies de Respuesta, la cual ayudo a realizar la clasificación de los factores de proceso críticos y contabilizar los datos de salida del experimento. Para entender la importancia de los datos de entrada y su correlación con las dimensiones de la soldadura se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA).

Tabla 1. Datos ANOVA para Altura de Cara (TH)

Source	Sum of Squares	df	Mean square	F value	Prob >F	Effect
Model	18833.03	9	2092.56	1.55	0.2096	Not Significant
A-Power (w)	431.34	1	431.34	0.32	0.5797	Not Significant
B-Speed (mm/s)	4440.87	1	4440.87	3.28	0.0877	Significant
C-Focal point (μm)	33.38	1	33.38	0.025	0.8770	Not significant
AB	5648.19	1	5648.19	4.18	0.0568	Significant
AC	3007.09	1	3007.09	2.22	0.1543	Not significant
BC	410.55	1	410.55	0.30	0.5889	Not significant
A ²	4417.01	1	4417.01	3.27	0.0885	Significant
B ²	5538.37	1	5538.37	4.09	0.0591	Significant
C ²	1070.16	1	1070.16	0.79	0.3862	Not significant
Residual	22997.64	17	1352.80			
Lack of Fit	1168.64	1	1168.64	0.86	0.3684	Not significant
Pure Error	21829.00	16	1364.31			
Cor Total	41830.67	26				

$\alpha \leq 0.01 = \text{H significant}$, $\alpha \leq 0.1 = \text{significant}$, A- Power and B-Speed C- Focal plane position.

De este experimento se pudo observar:

- Perfil de soldadura: Tanto la cara como la raíz del cordón de soldadura sobresalieron de la superficie del material (probeta), la forma del cordón de soldadura era cónica.

- Características Cara Cordón Soldadura: Se pudo observar que a ciertos valores de velocidad del láser y potencia se puede tener una altura de la cara del cordón en 0 μm (net-shape). Además, la velocidad y potencia del láser están asociados con la formación de la zona de fusión (keyhole); el ángulo del keyhole varía de acuerdo a la velocidad, siendo mayor cuando esta incrementa. A mayor velocidad se reduce el ancho de la cara del cordón.

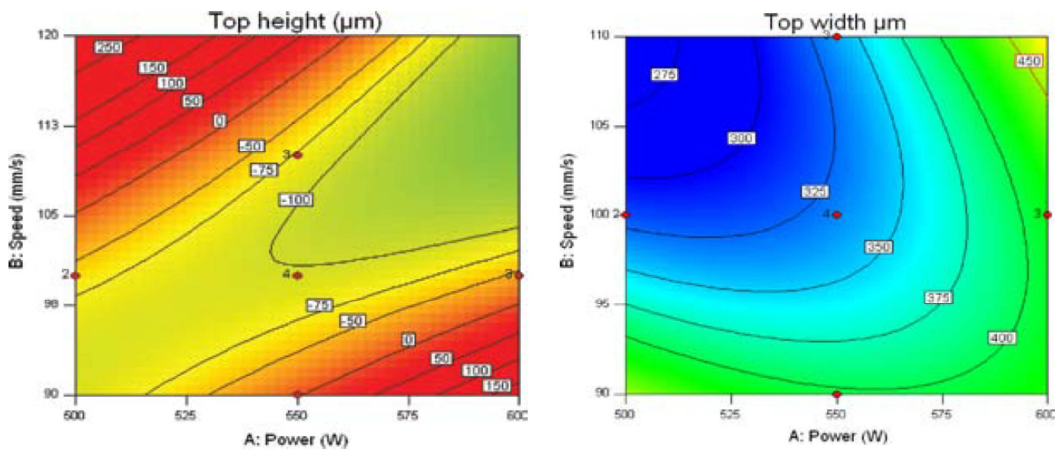


Figura 10. Gráfica Efecto Potencia y Velocidad en altura y ancho cara cordón.

- Características Raíz Cordón Soldadura: Se pudo observar que a velocidades mayores a 95 mm/s y potencia por debajo de los 575 W se obtiene una altura de 0 μm (net-shape). Con una velocidad constante en la aplicación de la soldadura y variando la potencia del láser se pudo observar una relación directa entre el ancho y profundidad del área fundida por el láser; cuando la velocidad es reducida, se apreció una disminución en el ancho de la raíz del cordón y viceversa con la potencia del láser.

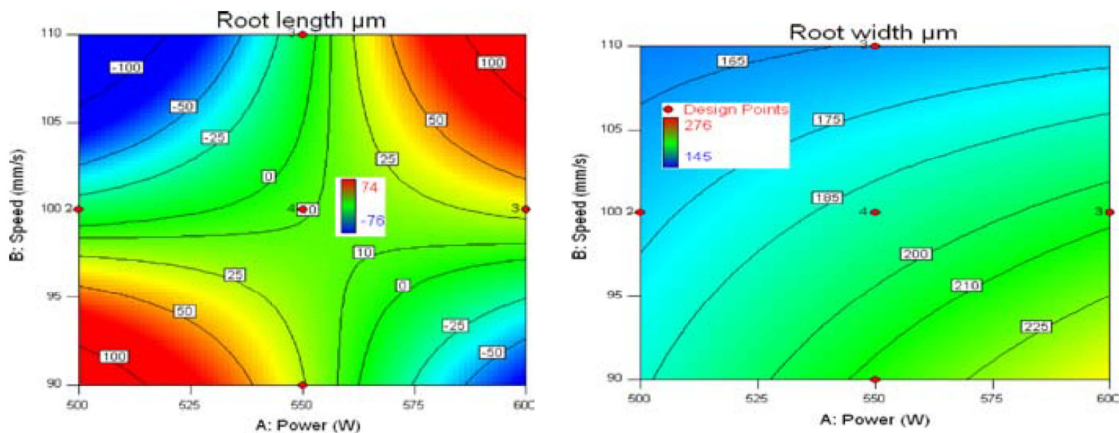


Figura 11. Gráfica Efecto Potencia y Velocidad en altura y ancho raíz cordón.

4 CONCLUSION

El proceso de soldadura láser produce soldaduras de buena calidad, mínima distorsión del material, tienen buena resistencia y en general son dúctiles y libres de porosidades. La implementación de este proceso en la industria aeroespacial tiene beneficios como reducción de costo y peso siempre en los componentes siempre y cuando se pueda demostrar que las características mecánicas de las uniones por medio de este proceso son iguales o mejor que las realizadas por medio de un proceso convencional como lo es la soldadura fuerte. En este artículo se presentaron algunos experimentos que se han realizado para demostrar las ventajas de la soldadura láser así como establecer los parámetros para controlar la calidad del cordón de soldadura. Además de la experimentación, existen modelos matemáticos que han sido desarrollados con la finalidad de predecir el comportamiento de la soldadura.

REFERENCIAS

- [1] Dahotre, Narendra; Harimkar, Sandip, Laser Fabrication and Machining of Materials, Springer pp 412-444
- [2] Rooks, Bryan, Laser Become the Acceptable Face of Precision Welding and Cutting, Industrial Robot: An international Journal, MCB University Press 2003 pp 103-107.
- [3] Luo Xiaoling; Deng, Lei, Laser Weld Technology Status and Prospects, College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology pp 1-3.
- [4] Kawahito, Y, High Quality Welding of Stainless Steel with 10 kW High Power Fibre Laser, Institute of Materials and Mining, pp 588-594.
- [5] Eghlio, R.M, Characterization of Weld Bead Geometry in Fibre Laser Butt Welding of Mild Steel Sheets by Means of Statistical Modelling, Old City Publishing, pp 281-298