







Afectación de los parámetros operativos de la soldadura láser para la determinación de la morfología del cordón de soldadura sobre placas de aluminio grado automotriz.

S. Estrada-Hernández ^a, F. Reyes-Calderón ^a, N. Alcantar-Mondragón ^a, V. García-García ^a, P. Garnica-González ^a, A. Aguilar-Cano ^b

^aTecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, Lomas de Santiaguito, 58120, Morelia, Michoacán, México (División de Estudios de Posgrado e Investigación, Departamento de Metalmeccánica)

^bCodinter México, Paseo Centenario del Ejército Mexicano, KM 1+37, Bodega D1, Colonia Terrapark Centenario, 76269 Qro.

ABSTRACT

The present research work proposes the study of the effect of laser welding parameters performed on an aluminum plate (AA6061), by means of a statistical analysis. This design will be carried out with the implementation of a Design of Experiments (DoE), with which it will be possible to evaluate the geometry of the welding beads. The main factors involved that modify this morphology are the oscillation amplitude of the laser beam and the power. The macrographs obtained allowed observing that the modification of the oscillation amplitude of the laser beam (wobble) has a notable impact on the geometry of the beads, obtaining square and conical geometries according to its manipulation. Likewise, the laser power is another factor that influences the penetration of the bead.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Recibido 04 Diciembre, 2024
Revisado 28 Diciembre, 2024
Aceptado 31 Diciembre, 2024



KEYWORDS

Laser Beam Welding;
AA6061; Wobble; Laser
Power

Introducción

El aluminio AA6061 es una aleación de magnesio y silicio, el cual es ampliamente utilizado en la industria aeroespacial, automotriz y aeronáutica [1], ya que presenta las propiedades como lo son la buena conformabilidad resistencia a la corrosión, baja densidad, alta ductilidad, bajo costo, soldabilidad, así como maquinabilidad, alta conductividad térmica y eléctrica, apariencia atractiva y es un material reciclable [2, 3]. Además, el agrietamiento por corrosión bajo tensión se presenta muy rara vez, en comparación con otras series, como lo son la 2000 y la 7000 [4].

También es indispensable destacar que el aluminio presenta problemas, como lo es la formación de una capa de alúmina en la superficie, derivado de la alta afinidad con el oxígeno. Proveniente de esta afinidad, es posible la formación de poros al realizar uniones soldadas, así como provocación de cráteres y soldaduras rápidas por la alta conductividad térmica del material [5]. La soldadura es un proceso fundamental en la industria y como ya se mencionó, es utilizada en una gran variedad de sectores. La soldadura láser utiliza un haz de luz como fuente de calor, el cual está altamente concentrado y es enfocado en la posición exacta para poder evaporar los materiales. La soldadura por láser tiene la ventaja de realizarlo con mayor precisión, velocidad y menos distorsión del material, lo que implica un cordón más estrecho y por lo tanto estético visualmente, a comparación de otros métodos de soldeo.

AUTOR DE CORRESPONDENCIA Sarahí Estrada  sara.eshernandez@hotmail.com  División de Estudios de Posgrado e Investigación, Departamento Metalmeccánica, Instituto Tecnológico de Morelia, México. Se puede acceder a los datos complementarios en línea en <https://doi.org/10.71103/2az4sw24>

Para realizar un cordón por medio de soldadura láser, influyen distintos parámetros que pueden modificar la geometría de este, entre los que se encuentran la potencia del láser, la frecuencia de oscilación del láser, el flujo del gas, el ángulo al cual se coloca la antorcha para soldar, la velocidad con la que se está soldando, entre otros. Shahin Sanati et al. [6] propusieron un estudio donde se comparaba la influencia de un láser normal y un láser con modificación de la amplitud de oscilación, en donde se compararon desde distintas perspectivas (metalúrgica, geométrica y mecánicamente), en donde uno de los resultados importantes fue el crecimiento de grano derivado de la modificación del wobble en comparación de un láser normal. Dicho crecimiento proporciona una mayor resistencia a la fractura. Pero también da como resultado un cordón más ancho y con menos penetración. También reportó una mejor resistencia a la fractura, lo que puede significar un avance en aplicaciones estructurales. K. Y. Benyounis et al. [7] compararon el efecto de distintos parámetros sobre el perfil de los cordones de soldadura, donde encontraron que el calor de aporte juega un papel sumamente importante derivado de los parámetros del cordón de soldadura, así mismo la velocidad de soldeo presenta un efecto negativo, mientras que el efecto de la potencia del láser es positivo, sobre la geometría del cordón (penetración, ancho de la zona soldada y ancho de la zona afectada por el calor). El presente trabajo implementa un DoE para determinar con exactitud la influencia de algunos de los parámetros anteriormente ya descritos sobre la geometría del cordón.

Metodología

Condiciones de soldeo

Se emplearon 16 probetas para realizar el diseño de experimentos 24, dichas probetas tienen un ancho de 4.5 mm de aluminio AA6061. Los cortes se realizaron con una sierra cinta con refrigeración constante para asegurar cortes rectos y evitar defectos derivados por la afectación del calor producido por el mismo corte. El proceso de soldadura láser se llevó a cabo con una máquina marca Ronch modelo 45 con carátula digital, la cual permitió ajustar cada parámetro de manera sencilla y rápida. Así mismo se utilizó un carro de desplazamiento recto y velocidad variable marca COR*12M modelo CG-100. La selección tanto de los parámetros como de los niveles se realizó a partir de un DoE 23 previo. Lo cual permitió un acercamiento hacia la observación del comportamiento geométrico causado por algunos factores. Los factores y niveles del DoE 24 se describen a continuación: potencia (4.8 kW y 3.8 kW), frecuencia (400 Hz y 100 Hz), wobble (2.5 mm y 0.1 mm), velocidad de avance (1.43 cm/s y 1.17 cm/s). Los cuales se muestran a continuación en las 16 corridas descritos en la matriz de experimentación (Tabla 1.). Una vez descrita la matriz de experimentación, se procedió a realizar la soldadura láser sobre las placas, obteniendo cordones visualmente estéticos continuos y prácticamente sin salpicaduras, dichos cordones se muestran en la Figura 1, los cuales pertenecen a cada una de las 16 corridas experimentales.

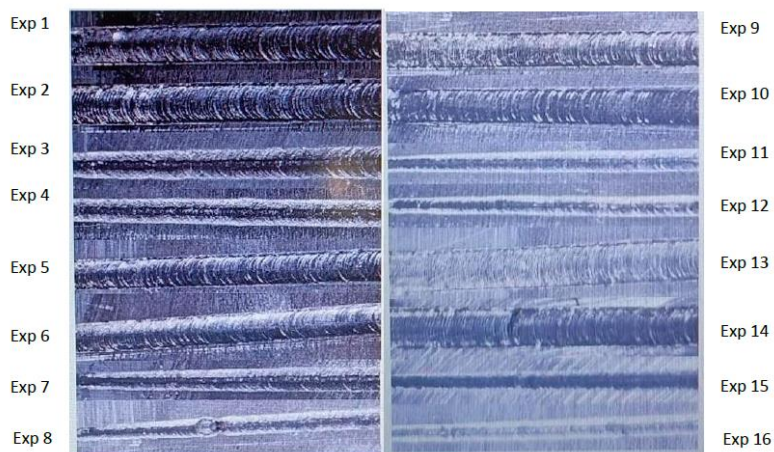


Figura 1. Cordones sobre placas de aluminio AA6061.

Tabla 1. DoE 2⁴ de soldadura láser sobre placas AA6061.

Experimento	Potencia (kW)	Frecuencia (Hz)	Amplitud de oscilación (mm)	Velocidad de avance (mm/s)
1	4.8	400	2.5	1.425
2	4.8	400	2.5	1.174
3	4.8	400	0.1	1.425
4	4.8	400	0.1	1.174
5	4.8	100	2.5	1.425
6	4.8	100	2.5	1.174
7	4.8	100	0.1	1.425
8	4.8	100	0.1	1.174
9	3.84	400	2.5	1.425
10	3.84	400	2.5	1.174
11	3.84	400	0.1	1.425
12	3.84	400	0.1	1.174
13	3.84	100	2.5	1.425
14	3.84	100	2.5	1.174
15	3.84	100	0.1	1.425
16	3.84	100	0.1	1.174

Caracterización macrográfica

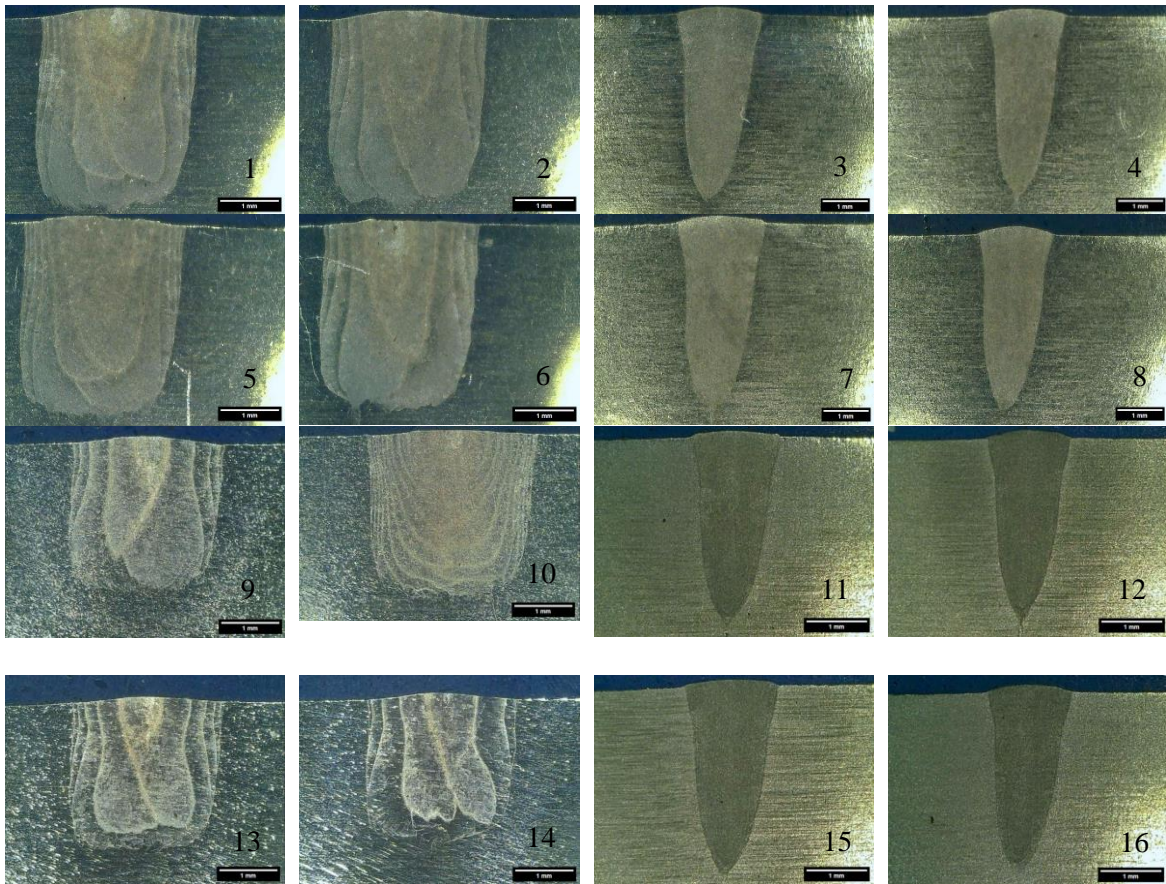
Ya que se tienen los cordones, éstos se cortan por mitad para observar la superficie transversal, esto se realiza con una sierra manual y un tornillo de banco para asegurar la sujeción correcta de la sección transversal del cordón. Posteriormente, estas 16 secciones se montaron sobre baquelita con una máquina marca STRUERS modelo Labotom 3. Se llevó a cabo el desbaste de las probetas con el empleo de lijas de SiC marca Fandeli con granulometría que va desde la 220, hasta la 2000. Posteriormente, se realizó un pulido sobre un paño de metalográfico en rotación con la utilización de agua, Al₂O₃ y alcohol etílico. Finalmente se realizó el ataque químico para revelar la macrografía, a través de dos reactivos, Tuckers por 10 segundos y posteriormente Wecks por 5 segundos. Para el ataque con estos reactivos, se utilizó el método swabbing con enjuague a chorro de agua y alcohol, con secado posterior con aire tibio. Las macrografías se analizaron con el software de procesamiento de imágenes Image J, con el cual se observó la forma del cordón y se cuantificó la penetración, el ancho y la sobremonta del cordón.

Resultados

La cuantificación de los experimentos, mejor conocido como respuestas del DoE, están descritos a continuación en la Tabla 2. A partir de dichos datos y de las macrografías obtenidas de las secciones transversales (mostradas en la figura 2), se puede observar la morfología de los cordones, entre lo que se destacan las formas cuadradas (experimento 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13 y 14) y las formas cónicas (experimento 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15 y 16) de los mismos. Además se analizaron con el software Minitab 19, las respuestas del diseño de experimentos, como se muestra en la Figura 3.

Tabla 2. Respuestas de las corridas experimentales del DoE 2⁴.

Experimento	Ancho (mm)	Penetración (mm)	Sobremonta (mm)
1	2.697	3.141	0.148
2	2.735	3.245	0.153
3	1.774	4.006	0.168
4	1.911	4.109	0.162
5	2.659	3.112	0.100
6	2.755	3.231	0.124
7	1.706	3.94	0.187
8	1.948	4.138	0.168
9	2.944	2.737	0.092
10	2.631	2.444	0.139
11	1.359	3.048	0.138
12	1.488	3.097	0.111
13	2.564	2.424	0.120
14	2.578	2.448	0.101
15	1.405	2.953	0.129
16	1.636	3.099	0.111

**Figura 2.** Macrografías de las secciones transversales de los cordones.

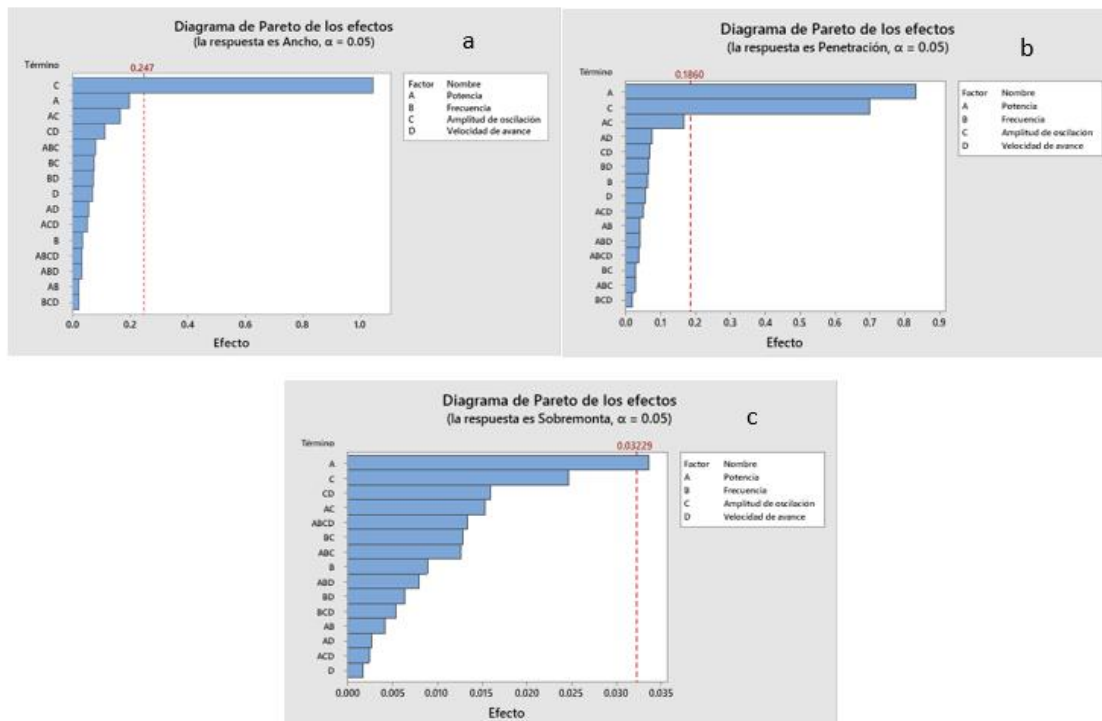


Figura 3. Gráfica de efecto principales respecto al a) ancho, b) penetración y c) sobremonta del cordón.

Como es posible observar a través de la figura 3 a), el ancho del cordón se ve afectado significativamente por el wobble, como se mencionó con anterioridad este parámetro describe la amplitud de oscilación del haz láser, por lo tanto, es conveniente afirmar que un wobble de 0.1 da como resultado un cordón soldado estrecho, con un ancho promedio de 1.65 mm y una desviación estándar de 0.22 mm; mientras que un wobble mayor, como lo es el de 2.5, arroja un cordón más grueso, con ancho promedio de 2.69 mm y una desviación estándar de 0.12 mm.

Por otra parte, los factores que afectan la penetración significativamente son la potencia y el wobble, seguido por el efecto combinado derivado entre ambos factores. Donde, a mayor potencia, se tiene mayor penetración, en cambio entre más grande sea el wobble, esta penetración disminuye. Por último, el factor que causa un efecto relevante en la sobremonta del cordón es la potencia; con la máxima potencia del láser (100%, que equivale a 4.8 kW), la sobremonta del cordón es mayor en un 22.23% con respecto a una potencia del 80% (3.84 kW). Además de la potencia, la sobremonta se ve afectada en menor proporción por el wobble.

Conclusiones

1. Los principales efectos sobre los cordones están dados por los siguientes factores: la potencia del láser y el wobble.
2. Para obtener una cierta penetración de un cordón, se debe tener un mayor análisis de las consideraciones entre ambos factores (potencia y wobble), ya que sus efectos son inversamente proporcionales.
3. Además de las medidas descritas del ancho del cordón, es indispensable precisar la morfología que determina un wobble grande (2.5 mm), puesto que la raíz del cordón se aprecia de forma

cuadrada, en comparación de un wobble muy pequeño (0.1 mm), siendo resultante una raíz cónica, a pesar de que el ancho del cordón no sea tan estrecho.

4. Derivado de este diseño de experimentos es posible obtener una predicción de la morfología de la sección transversal de un cordón de soldadura, procedente de los parámetros a considerar, lo que evita la realización de ensayos de soldadura láser a prueba y error.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Morelia – Tecnológico Nacional de México, a la asociación AMECSMI y a la empresa CODINTER, Inc. por el apoyo en los laboratorios y equipo, así como al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT, México) por el apoyo con el cual fue posible el desarrollo del proyecto, con las becas nacionales para la estudiante de posgrado S. Estrada Hernández

Declaración de conflicto de interés

Los autores no informaron ningún posible conflicto de intereses relacionado a esta publicación

ORCID

Sarahí Estrada  <https://orcid.org/0009-0003-2905-9700>

Francisco Reyes  <https://orcid.org/0000-0002-2745-4833>

Nereyda Alcantar  <https://orcid.org/0000-0002-4658-5409>

Victor García  <https://orcid.org/0000-0003-3042-3226>

Pedro Garnica  <https://orcid.org/0000-0002-2618-0009>

Referencias

- [1] Chauhan, K. P. S. (2017). Influence of heat treatment on the mechanical properties of aluminium alloys (6xxx series): A literature review. *Int. J. Eng. Res*, 6(03), 386-389.
- [2] Cao, X., Wallace, W., Poon, C., & Immariageon, J. P. (2003). Research and progress in laser welding of wrought aluminum alloys. I. Laser welding processes. *Materials and Manufacturing Processes*, 18(1), 1- 22.
- [3] Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., & Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in materials science*, 74, 401-477.
- [4] Rambabu, P. P. N. K. V., Eswara Prasad, N., Kutumbarao, V. V., & Wanhill, R. J. H. (2017). Aluminium alloys for aerospace applications. *Aerospace materials and material technologies: volume 1: aerospace materials*, 29-52.
- [5] Zhao, H., White, D. R., & DebRoy, T. (1999). Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys. *International materials reviews*, 44(6), 238-266.
- [6] Sanati, S., Nabavi, S. F., Esmaili, R., & Farshidianfar, A. (2024). Laser Wobble Welding Process: A Review on Metallurgical, Mechanical, and Geometrical Characteristics and Defects. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 1-38.
- [7] Benyounis, K. Y., Olabi, A. G., & Hashmi, M. S. J. (2005). Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile. *Journal of materials processing technology*, 164, 978-985.