



INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW) EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA JUNTA DE ALUMINIO 6061

INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE FRICTION-STIR WELDING PROCESS (FSW) IN THE MECHANICAL PROPERTIES AT THE ALUMINUM 6061 JOIN

César Arroba-Arroba^{1,*}, Wilson Vaca-Ortega¹, Francisco Peña-Jordán¹,
Diego Núñez-Núñez¹, Raúl Toapanta-Bautista¹

Resumen

Existe una clara tendencia en la industria del transporte para la reducción de peso en los componentes estructurales con el objetivo de mejorar la eficiencia del consumo energético. Los materiales utilizados para este propósito son aleaciones de aluminio y magnesio; pero al utilizar el método de soldadura por fusión, las juntas presentan bajas propiedades mecánicas en comparación con el material base. La soldadura por fricción es una alternativa para unir en estado sólido estos materiales y ha mostrado una buena compatibilidad y alta eficiencia. El objetivo de este trabajo es el análisis del efecto de la velocidad de soldadura sobre la resistencia mecánica de las juntas para la aleación de aluminio 6061 T6 soldadas por FSW. Del estudio se obtiene curvas de resistencia a la tracción, doblado guiado y dureza en la soldadura mostrando un mejor comportamiento en probetas unidas a mayor velocidad de rotación de la herramienta.

Palabras clave: soldadura en estado sólido, soldadura por fricción, aluminio 6061.

Abstract

There is a clear trend in the transportation industry for the reduction of weight in structural components with the objective of improving the efficiency of energy consumption. The materials that are used for this purpose are aluminum and magnesium alloys; however the same as when bonded by fusion welding methods, the joints have low mechanical properties compared to the base material. Friction welding is an alternative to solid join these materials and has shown good compatibility and high efficiency. The objective of this work is the analysis of the effect of the welding speed on the mechanical strength of the joints for the 6061 T6 aluminum alloy welded by FSW. From the study, we obtained curves of tensile strength, guided bending and hardness in the weld showing better behavior in specimens that were joined to a higher speed of rotation of the tool.

Keywords: Solid state welding, Solder by friction, Aluminum 6061.

^{1,*}Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica – Universidad Técnica de Ambato, Ambato – Ecuador. Autor para correspondencia: ✉: ch.arroba@uta.edu.ec, <http://orcid.org/0000-0001-5656-7549>, <http://orcid.org/0000-0003-4321-5864>, <http://orcid.org/0000-0002-0140-3827>, <http://orcid.org/0000-0001-5248-4084>, <http://orcid.org/0000-0001-9409-8480>

Recibido: 20-04-2017, aprobado tras revisión: 30-05-2017

Forma sugerida de citación: Arroba, C.; Vaca, W.; Peña, F.; Núñez, D.; Toapanta, R. (2017). «Influencia de los parámetros del proceso de soldadura por fricción-agitación (fsw) en las propiedades mecánicas en la junta de aluminio 6061». INGENIUS. N.º 18, (julio-diciembre). pp. 47-52. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

Existe una clara tendencia en la industria del transporte para la reducción de peso en los componentes estructurales con el objetivo de mejorar la eficiencia del consumo energético [1].

El magnesio y las aleaciones de aluminio están aumentando continuamente en importancia como materiales estructurales ligeros para las aplicaciones automotrices por proporcionar una mayor flexibilidad de diseño y una respuesta mecánica mejorada con un peso reducido [2]. Varias tecnologías son utilizadas para soldar estas aleaciones, siendo la soldadura por fusión la más aplicada [3]. Sin embargo, esta es generalmente difícil debido a la formación de agujeros y alteración de la microestructura en la soldadura [4]. En la década pasada la soldadura por fricción-agitación (FSW) se desarrolló como un método a ser usado para unir metales similares y disímiles [5]. La FSW es una técnica de unión de estado sólido patentada por el Instituto de Soldadura (The Welding Institute) en 1991 [6] y consiste en el giro de una herramienta cilíndrica constituida básicamente de dos partes: pin y hombro, que se insertan en la línea de unión de las láminas [7]. La combinación de calentamiento por fricción y deformación sin ninguna fuente externa de calor da origen a la unión de los dos materiales en el trayecto de la herramienta [8]. El defecto común que ocurre con el proceso FSW son las cavidades que se forman cerca de la línea central de la soldadura, por tal motivo las propiedades mecánicas de la soldadura se ven afectadas [9].

Durante el proceso de soldadura FSW se usan sujeciones rígidas, las cuales provocan restricción en las placas soldadas, por consecuencia impiden la contracción del cordón de soldadura y de la zona afectada térmicamente durante el enfriamiento y, por lo tanto, implica que la zona afectada por el calor tenga tensiones residuales [10].

En estudios previos se analiza juntas de soldadura por fricción-agitación tipo tapón (FSpW) en aluminio 6061 T6. Los resultados de este estudio muestran que la profundidad de inmersión de la herramienta es un parámetro importante que afecta a la resistencia de la soldadura [11]. La soldadura FSW en juntas traslapadas de aleación de magnesio AZ31B y aluminio 6061 T6, mejora su resistencia a la tracción y ductilidad aumentando la velocidad de la herramienta a 1400 rpm y velocidad de avance de 40 mm/min [2]. Además, se analizó también la FSW en juntas traslapadas de aluminio y acero utilizando cinc como metal de relleno colocado entre las láminas a soldar [12]. En general los estudios se enfocan en su mayoría en materiales disímiles [13]. Sin embargo, existen pocos datos para juntas a tope para láminas de aluminio 6061 T6 unidos con FSW [14].

El objetivo de este trabajo es el análisis del efecto de la velocidad de soldadura sobre la resistencia mecánica de las juntas para la aleación de aluminio 6061 T6 soldadas por FSW.

2. Materiales y métodos

2.1. Método de ensayo

Para determinar los parámetros óptimos de FSW de láminas de aluminio 6061, se planteó el espesor (t) de 3 mm, en láminas de forma rectangular de dimensiones según AWS D 17.3 [15]: ancho (W) de 102 mm y largo (L) de 305 mm. Se realizó experimentos para seis velocidades de rotación de la herramienta como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Calor y temperatura generados en el cordón de soldadura

Probeta	Velocidad de rotación (V_r) rpm	Calor total (Q_{total}) W	Temperatura del proceso (T) K	$T < T_{fusión}$ $T_{fusión} = 660 \text{ } ^\circ\text{C}$
A	500	90,47	345,54	cumple
B	680	123,04	361,88	cumple
C	800	144,76	372,78	cumple
D	1000	180,95	390,94	cumple
E	1250	226,18	413,63	cumple
F	1600	289,51	445,41	cumple

Previo a los experimentos se calculó la temperatura generada en el cordón de soldadura según [16] verificando que el calor generado en el proceso de soldadura no incremente la temperatura en las láminas a valores que alcancen la temperaturas de fusión ($T_{fusión}$) indicadas en la Tabla 1.

La velocidad de penetración (V_a) de 0,9 mm/s se determinó según [17] utilizando factores para aleaciones de aluminio de la serie 6xxx. La soldadura se realizó a todo el largo de las dos láminas. La Figura 1 muestra las dimensiones de la herramienta diseñada según [16] y se fabricó en acero AISI 4340, templado y revenido a 315 °C.

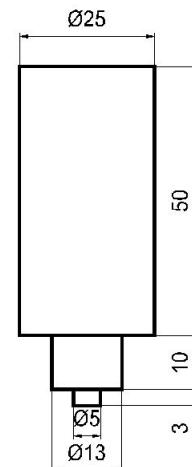


Figura 1. Dimensiones de la herramienta de soldadura (mm).

El proceso FSW se aplicó en una fresadora universal. Para evitar los desplazamientos longitudinales y transversales de las láminas durante el proceso de soldadura se fabricó un dispositivo de sujeción, ver Figura 2. Este dispositivo consta de tres partes: 1) Placa base fabricado en lámina de 38 mm que va sujeta al carro longitudinal de la fresadora. 2) Dos placas de fijación de 18 mm de espesor sujetadas en sus extremos a la placa base con pernos de 12,7 mm, a lo largo de la placa de fijación y con separación de 50 mm se realizó taladros de 6,35 mm que alojan pernos de la misma dimensión. 3) Pernos de 12,7 mm que sujetan las láminas a soldar contra la placa base.

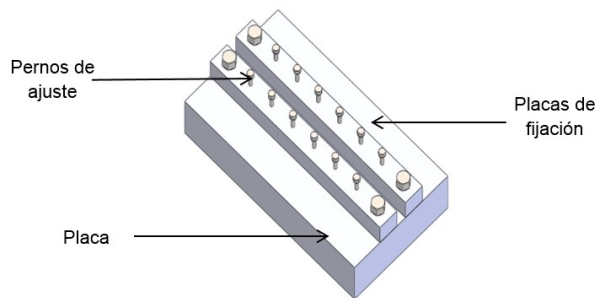


Figura 2. Dispositivo de sujeción.

2.2. Materiales

Las pruebas de soldadura se realizaron en láminas de 6061-T6 aleación de AlMgSi endurecida por precipitación según [18]. La composición química de este material es mostrada en la Tabla 2. Las configuraciones utilizadas para el proceso FSW fueron láminas a tope.

Tabla 2. Composición química y propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061-T6

Composición química								
Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn (%)	Ti (%)	Al (%)
0,7	0,28	0,25	0,09	1,1	0,19	0,06	0,02	Re
Propiedades Mecánicas								
Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación (%)	Dureza (HB)				
310	276	68,9	17	95				

2.3. Procedimiento de ensayo

Las muestras se identificaron con letras desde la A hasta la F y se realizó el proceso FSW a velocidades indicadas en la Tabla 2, de cada muestra se extrajo probetas según indica la Figura 3, utilizándolas para el ensayo de tracción según la norma AWS D17.3, en el ensayo de doblado se realizó con tres puntos de apoyo. Los rodillos de apoyo son de 10 mm de radio y 15 mm de radio el punzón. La medición de dureza en la soldadura se evaluó en la escala Brinell según norma

ASTM E-10. En ensayos de tracción de las probetas se determinó la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad. En el proceso de doblado de la soldadura se evaluó el porcentaje de deformación plástica. Para el ensayo dureza en la soldadura se aplicó una carga de 1839 N con un penetrador de bola de 2,5 mm de diámetro.

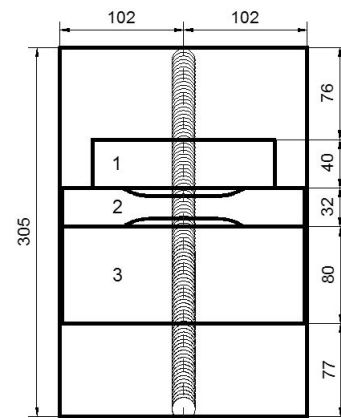


Figura 3. Extracción de probetas 1) probeta para medición de dureza, 2) probeta para el ensayo de tracción, 3) probeta para el ensayo de doblado.

3. Resultados y discusión

En la Figura 4 se muestra los aspectos superficiales de cada uno de las soldaduras para las diferentes velocidades de rotación de la herramienta según la Tabla 1. Se observa que para las probetas A, B, C, D la soldadura no tiene un buen acabado, mostrando discontinuidad en el cordón de soldadura y la presencia de pedazos de material que no han logrado forma la unión con el material base. Las probetas E y F muestran un buen acabado en la soldadura, sin embargo, en la probeta F tiene un acabado menor al de la probeta E.

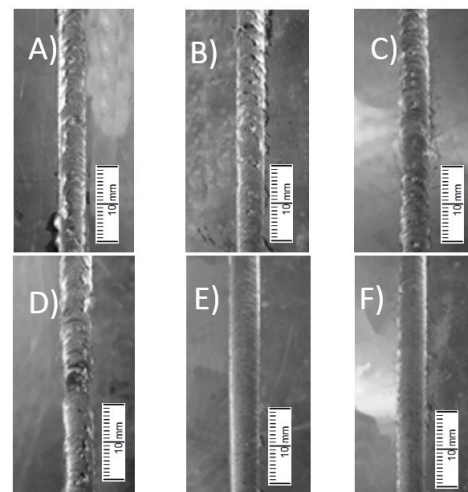


Figura 4. Aspectos superficiales de la soldadura para las diferentes velocidades de rotación de la herramienta.

3.1. Ensayo de tensión

La unión soldada para las diferentes velocidades de giro y 0,9 mm/s de velocidad de penetración presentaron diferentes formas de falla como se muestra en la Figura 5. En las probetas A y B se pueden observar que el material de la zona de soldadura no llega a unirse con el material base; la unión se produjo únicamente en la superficie de la lámina mostrando una pobre resistencia a la tensión como se indica en la Figura 6.

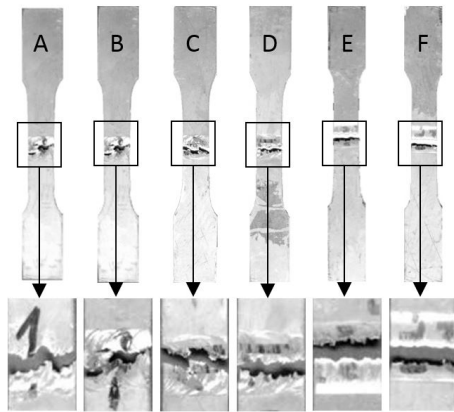


Figura 5. Probetas del proceso FSW a velocidades indicadas en la Tabla 2 ensayadas a tensión.

Para velocidades de giro aplicadas en las probetas C y D, el material de la zona de soldadura comienza a unirse con el material base. La unión se produjo en la superficie y también en el material base; luego de realizado el ensayo de tensión hubo desprendimientos de pedacitos de material de la soldadura. Estas probetas mejoraron la resistencia a la tensión, ver Figura 6. Las probetas E y F presentaron buena resistencia a la tensión según la Figura 6. La probeta E obtuvo la mayor resistencia a tensión disminuyendo su valor en la probeta F. En las dos probetas la falla se produjo en el centro de la unión evidenciando que las láminas se unieron. Estos resultados son similares a los de Cao, et al. [11], que obtuvo 135,61 MPa como resistencia a la tracción para velocidad de giro de la herramienta de 1500 rpm, y un espesor de placas es de 2 mm.

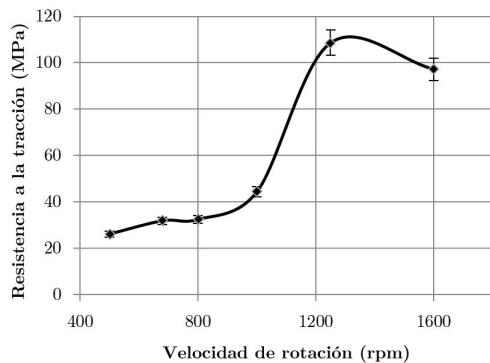


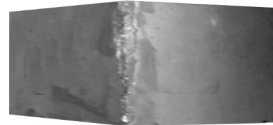
Figura 6. Resistencia a la tensión de las uniones soldadas.

Para velocidades de la herramienta comprendidas entre 400 hasta 1000 rpm no existe una variación considerable de la resistencia a la tracción; sin embargo, para velocidades mayores a 1000 rpm la resistencia a la tracción aumenta según se muestra en la Figura 6 coincidiendo con las probetas que presentan mejor soldadura.

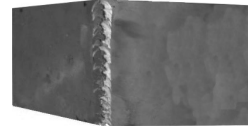
3.2. Ensayo de doblado

El comportamiento de las probetas luego del ensayo de doblado se muestra en la Figura 3.2. Las probetas A, B, C, D presentan falla por fractura en la soldadura; en cambio, en las probetas E y F no hay falla por fractura. Sin embargo, la probeta F es la que mayor porcentaje de deformación tiene durante el ensayo.

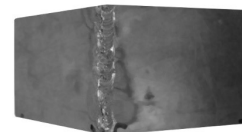
Probeta A doblada, deformación plástica 2,2 %



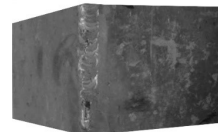
Probeta B doblada, deformación plástica 3,3 %



Probeta C doblada, deformación plástica 6,3 %



Probeta D doblada, deformación plástica 6,5 %



Probeta E doblada, deformación plástica 17 %



Probeta F doblada, deformación plástica 23,5 %

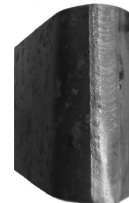


Figura 7. Probetas ensayadas a flexión

3.3. Ensayo de dureza

La dureza en el centro del cordón para cada probeta está ilustrada en la Figura 8. Se obtuvo de valores promedios medidos en la longitud de 40 mm la soldadura. La menor dureza se halló en la probeta A en la menor velocidad de giro. La dureza aumentó para velocidades de giro mayor.

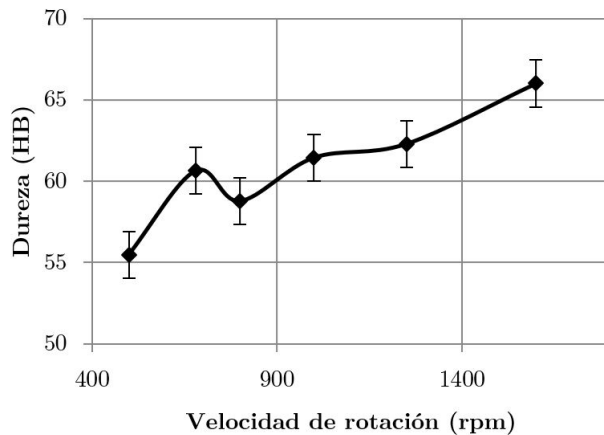


Figura 8. Dureza en la soldadura.

4. Conclusiones

Con los valores de velocidad de giro de la herramienta de 500, 680, 800, y 1000 rpm y velocidad de avance de 0,9 mm/s no se pudo generar soldadura con el proceso FSW. Sin embargo, para velocidades giro de la herramienta de 1200 y 1650 rpm, se obtuvo unión de las láminas con una resistencia a la tracción de hasta el 40 % de la resistencia del material base mostrando, además, buen acabado superficial.

La falla en los ensayos de tracción de las probetas E, F se produjo en zona afectada térmicamente. La probeta E obtuvo la mayor resistencia, con valores cercanos a la resistencia del material base. Las resistencias a la tensión de la probeta A hasta la probeta E indican tendencia ascendente correspondiente a velocidades de giro ente 500-1200 rpm y para velocidades mayores correspondiente a la probeta F la resistencia disminuye, esto tiene relación con el incremento del calor generado a mayores velocidades de rotación, condición en la que aumenta la plastificación del material y produce la junta soldada.

Referencias

[1] S. Tan, F. Zheng, J. Chen, J. Han, Y. Wu, and L. Peng, "Effects of process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir lap linear welded 6061 aluminum alloy to NZ30K magnesium alloy,"

Journal of Magnesium and Alloys, vol. 5, no. 1, pp. 56–63, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2016.11.005>

[2] J. Mohammadi, Y. Behnamian, A. Mostafaei, H. Izadi, T. Saeid, A. Kokabi, and A. Gerlich, "Friction stir welding joint of dissimilar materials between {AZ31B} magnesium and 6061 aluminum alloys: Microstructure studies and mechanical characterizations," *Materials Characterization*, vol. 101, pp. 189–207, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.01.008>

[3] K.-M. Hong and Y. C. Shin, "Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 245, pp. 46–69, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.008>

[4] W. Boonchouytan, J. Chatthong, S. Rawangwong, and R. Burapa, "Effect of heat treatment t6 on the friction stir welded ssm 6061 aluminum alloys," *Energy Procedia*, vol. 56, pp. 172–180, 2014, 11th Eco-Energy and Materials Science and Engineering (11th EMSES). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.146>

[5] S. A. Hussein, A. S. M. Tahir, and A. Hadzley, "Characteristics of aluminum-to-steel joint made by friction stir welding: A review," *Materials Today Communications*, vol. 5, pp. 32–49, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2015.09.004>

[6] Q. Zheng, X. Feng, Y. Shen, G. Huang, and P. Zhao, "Dissimilar friction stir welding of 6061 al to 316 stainless steel using zn as a filler metal," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 686, pp. 693–701, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.092>

[7] A. C. de Oliveira Miranda, A. Gerlich, and S. Walbridge, "Aluminum friction stir welds: Review of fatigue parameter data and probabilistic fracture mechanics analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 147, pp. 243–260, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.09.007>

[8] H. Dawood, K. S. Mohammed, A. Rahmat, and M. Uday, "Effect of small tool pin profiles on microstructures and mechanical properties of 6061 aluminum alloy by friction stir welding," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, no. 9, pp. 2856–2865, 2015. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63911-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63911-5)

- [9] L. T. Jr, G. Heredia, D. Rybicki, and L. B. Johannes, "Effect of tool shoulder features on defects and tensile properties of friction stir welded aluminum 6061-t6," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 219, pp. 271–277, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.027>
- [10] M. A. Abdulstaar, K. J. Al-Fadhalah, and L. Wagner, "Microstructural variation through weld thickness and mechanical properties of peened friction stir welded 6061 aluminum alloy joints," *Materials Characterization*, vol. 126, pp. 64–73, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.02.011>
- [11] J. Cao, M. Wang, L. Kong, and L. Guo, "Hook formation and mechanical properties of friction spot welding in alloy 6061-t6," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 230, pp. 254–262, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.026>
- [12] B. Fu, G. Qin, F. Li, X. Meng, J. Zhang, and C. Wu, "Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-t6 aluminum alloy to {AZ31B} magnesium alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 218, pp. 38–47, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.039>
- [13] A. Bist, J. Saini, and B. Sharma, "A review of tool wear prediction during friction stir welding of aluminium matrix composite," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 26, no. 8, pp. 2003–2018, 2016. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64318-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64318-2)
- [14] M.-N. Avettand-Fènoël and A. Simar, "A review about friction stir welding of metal matrix composites," *Materials Characterization*, vol. 120, pp. 1–17, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.07.010>
- [15] *Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications*, American Welding Society Std., 2010.
- [16] B. S. Yilbas and A. Z. Sahin, *Friction Welding: Thermal and Metallurgical Characteristics*, ser. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, 2017. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-54607-5>
- [17] R. S. Mishra, P. S. De, and N. Kumar, *Friction Stir Welding and Processing*. Springer International Publishing, 2014, vol. 31. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-07043-8>
- [18] M. Reimann, T. Gartner, U. Suhuddin, J. Göbel, and J. F. dos Santos, "Keyhole closure using friction spot welding in aluminum alloy 6061-t6," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 237, pp. 12–18, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.013>