

## RELACIÓN TEMPERATURA DE PROCESO-PROPIEDADES EN UNIONES FSW DE ALEACIONES DE ALUMINIO

*Ekaitz Arruti<sup>1</sup>, Egoitz Aldanondo<sup>1</sup>, Julen Sarasa<sup>1</sup>, Alberto Echeverria<sup>1</sup>, Eric Lacoste<sup>2</sup>, Dominique Coupard<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> IK4 LORTEK, Arranomendia Kalea 4A, 20240 Ordizia (Spain), [earruti@lortek.es](mailto:earruti@lortek.es)

<sup>2</sup> Université Bordeaux – Institut de Mécanique et d'Ingénierie, Bordeaux, France

**Resumen:** La tecnología de soldeo por fricción-agitación (FSW), es un proceso de unión termomecánico donde los materiales a soldar son procesados en estado sólido. Esta naturaleza particular del proceso, es la que marca la principal diferencia respecto a otras técnicas de soldeo por fusión, proporcionando propiedades muy específicas a las uniones. Sin embargo la temperatura de procesamiento del material puede tener efectos importantes en las propiedades finales. Por consiguiente, es muy importante controlar dicha temperatura y el primer paso para ello es desarrollar un sistema de control capaz de medir y registrar la temperatura en un proceso continuo de FSW. En este trabajo se presenta un sistema de control de temperatura inalámbrico, basado en una herramienta instrumentada con termopares y la transmisión de datos por radiofrecuencia. Se han realizado uniones FSW a tope en aleaciones de aluminio AA2024-T3 y AA6082-T6, utilizando diferentes parámetros de soldeo y las temperaturas obtenidas han sido monitorizadas. Se ha examinado la calidad de las uniones mediante un análisis microestructural y de este modo, se ha establecido la relación entre los parámetros de soldeo, temperaturas de procesamiento y propiedades de las uniones FSW.

**Palabras clave:** Soldadura por fricción-agitación, sistema de control de temperatura, AA2024-T3, fusión incipiente.

### 1. INTRODUCCIÓN

En cuanto a métodos de control, el control de posición y el control de fuerza han sido los principales métodos empleados en la mayoría de las aplicaciones y desarrollos llevados a cabo por la tecnología FSW. De este modo las máquinas y sistemas FSW estándar ofrecen la posibilidad de trabajar en métodos de control. Sin embargo los parámetros de soldeo que son controlados bajo dichos modos de funcionamiento normalmente no incluyen las temperaturas alcanzadas en los materiales procesados y por lo tanto es difícil de garantizar temperaturas constantes y adecuadas en algunas aplicaciones. Para ciertas aplicaciones críticas es muy importante controlar la temperatura de procesamiento ya que las propiedades de la unión dependerán de las temperaturas alcanzadas [1, 2].

Mantener las temperaturas de procesamiento dentro de un cierto rango es muy importante desde un punto de vista de estabilidad del proceso. Esto hace que el método de control de temperatura de FSW sea un modo de control de gran interés para un gran número de aplicaciones [3-8].

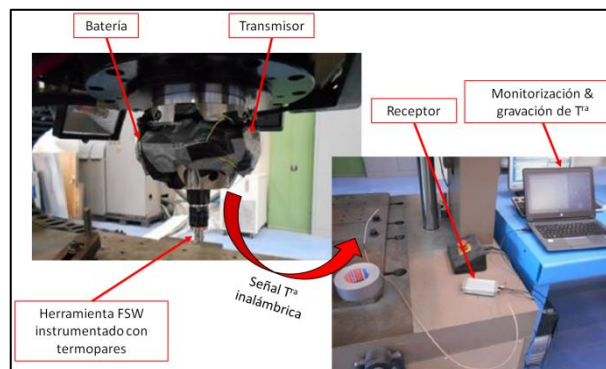
Por lo tanto, es muy importante desarrollar un sistema de medición de temperatura preciso, robusto y fiable para los procesos FSW que pueda ser utilizado para la monitorización de temperaturas o para el control del proceso si se implementa en el control de las máquinas FSW en lazo cerrado.

### 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este trabajo se ha desarrollado un sistema de medición y monitorización de temperaturas y se ha utilizado para realizar varias pruebas FSW en aleaciones

de aluminio. Los detalles sobre el sistema y las pruebas se resumen a continuación:

#### Desarrollo del sistema de monitorización de temperatura (1<sup>ra</sup>)



**Figura 1:** sistema de monitorización de temperatura inalámbrico acoplado a la máquina de FSW I-STIR PDS4 en IK4 LORTEK.

En la Figura 1 se muestra el sistema de monitorización de temperaturas desarrollado para el proceso FSW y acoplado a la máquina de LORTEK. El sistema se basa en una herramienta de FSW instrumentada con termopares, incorporados en los agujeros hechos por electroerosión. Estos termopares están conectados a un transmisor que a su vez es alimentado por una batería y que transmite los datos de temperatura mediante una señal inalámbrica. Todos estos elementos giran junto al cabezal de FSW. La señal de temperatura inalámbrica es capturada por un receptor estacionario situado en la bancada de la máquina y conectado a un software que registra, monitoriza y graba las temperaturas medidas por los termopares. El receptor ofrece la posibilidad de obtener los datos de temperatura mediante una señal de

salida analógica ( $\pm 10V$ ) que puede ser implementado en otros sistemas de monitorización, lazos de control, etc.

**Pruebas FSW**

**Tabla 1:** condiciones de soldeo FSW para las pruebas de medición de temperatura realizadas.

Aleación de aluminio	$\omega$ (rpm)	Velocidad de soldeo (ipm)	Fuerza axial (lbf)
AA2024-T3	500	10	2100
	1000		2000
	1500		1900
AA6082-T6	500	10	1800
		12	
	1000	10	1100
			1200
			1500
			1000

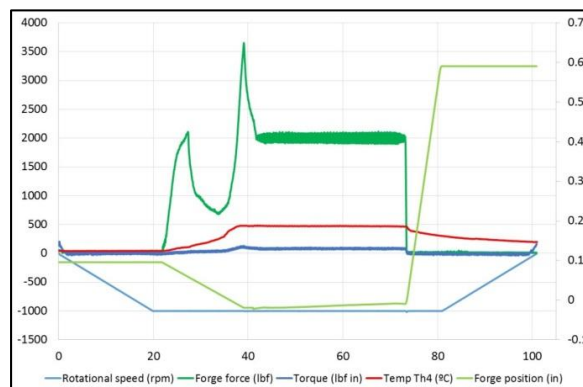
Con el sistema de medición de temperaturas incorporado a la máquina, se realizaron pruebas FSW utilizando chapas de las aleaciones de aluminio AA2024-T3 y AA6082-T6 de 3 mm de espesor con diferentes parámetros de soldadura, tal y como se muestra en la Tabla 1. Para ello se empleó una herramienta de pin cilíndrico roscado ( $\varnothing_{pin} = 4 \text{ mm}$  -  $L_{pin} = 2,8 \text{ mm}$ ) y hombro liso ( $\varnothing_H = 12 \text{ mm}$ ), instrumentada con termopares del tipo K. Se obtuvieron soldaduras a tope con penetración completa y libre de defectos para todas las condiciones de soldeo resumidas en la Tabla 1. Se registraron tanto las temperaturas, como los principales parámetros de proceso en todas las pruebas FSW, utilizando el sistema de medición de temperaturas y el controlador de la máquina respectivamente.

**3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

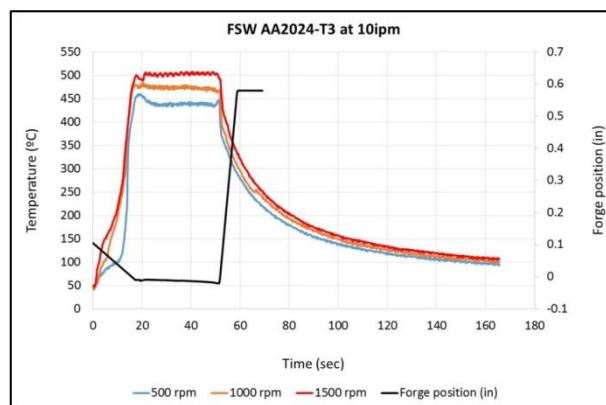
En el gráfico representado en la Figura 2, se pueden observar los principales parámetros de soldadura y las temperaturas adquiridas en función del tiempo. La temperatura comienza a aumentar a medida que la herramienta penetra en el material a una velocidad constante, pero el incremento más importante se produce cuando el hombro de la herramienta contacta con la superficie del material al final de la etapa de penetración. Este aumento de temperatura es coincidente con el aumento de la fuerza axial y el par de torsión. Después de la fase de penetración y tras un corto tiempo de mantenimiento, se da lugar a la fase de avance donde la temperatura, la fuerza axial y el par son constantes, sugiriendo que el proceso FSW es estable.

Tanto en la Figura 3, como en la Figura 4 se muestra una comparación de las temperaturas obtenidas en las pruebas FSW llevadas a cabo a diferentes velocidades de rotación para las aleaciones AA2024-T3 y AA6082-T6 respectivamente. Se puede apreciar como para ambas aleaciones, una mayor velocidad de rotación da como resultado una temperatura de procesamiento más alta. Se midieron diferencias de temperatura de  $\approx 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

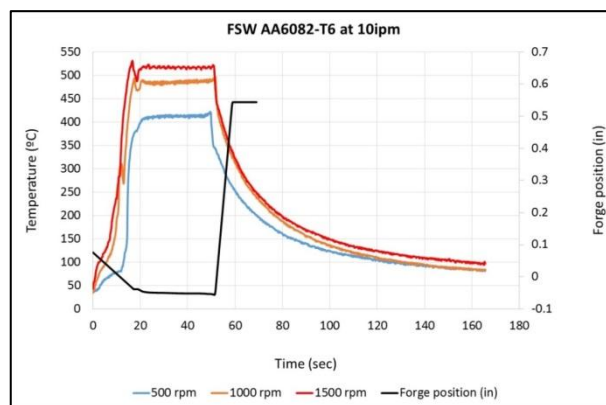
mediante el incremento de la velocidad de rotación de 500 a 1500 rpm en el caso de la aleación AA2024-T3.



**Figura 2:** evolución de parámetros de proceso en una prueba FSW con la aleación AA2024-T3 a 1000 rpm, 10 ipm y 2000 lbf.



**Figura 3:** comparación de la evolución de  $T^{ra}$ , en las pruebas FSW con la aleación AA2024-T3 a 10 ipm y diferentes velocidades de rotación.

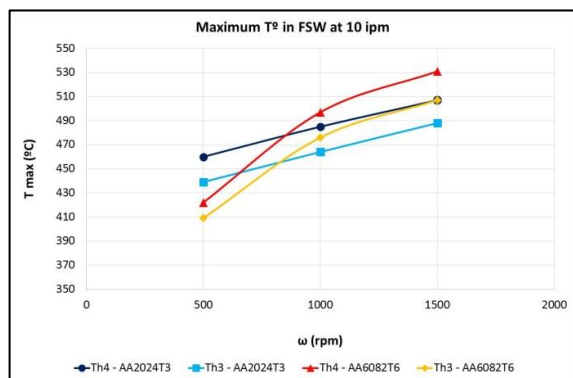


**Figura 4:** comparación de la evolución de  $T^{ra}$  en las pruebas FSW con la aleación AA6082-T6 a 10 ipm y diferentes velocidades de rotación.

En el caso de la aleación AA6082-T6 se observó que esta diferencia era de  $\approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$ . También es interesante que para la aleación AA6082-T6, las temperaturas obtenidas utilizando las mismas velocidades de rotación y de soldeo sean generalmente superiores a las de la aleación AA2024-T3, excepto las temperaturas obtenidas a baja velocidad de rotación (500 rpm). Esta

discrepancia se puede observar en el gráfico mostrado en la Figura 5, donde se representan los valores de temperatura máxima registrados para cada prueba FSW.

Una vez más se puede observar que las velocidades de rotación más altas producen temperaturas de procesamiento más altas. Se midieron temperaturas máximas de 531 °C en FSW de AA6082-T6 usando una velocidad de rotación de 1500 rpm; mientras que para la aleación AA2024-T3 se midió un valor máximo de 507 °C con condiciones FSW equivalentes.

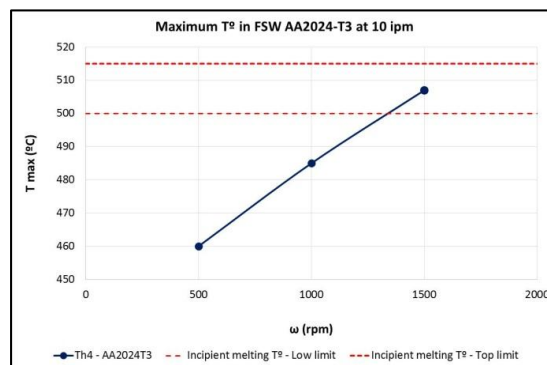


**Figura 5:** valores máximos de  $T^{ra}$  medidos en las pruebas FSW realizadas con las aleaciones AA2024-T3 y AA6082-T6, a diferentes velocidades de rotación.

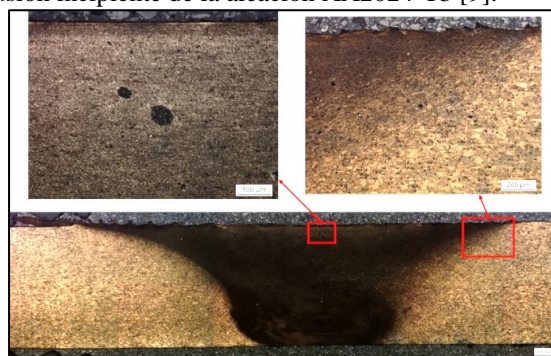
Las temperaturas máximas obtenidas durante el procesamiento FSW pueden acarrear consecuencias muy importantes en las propiedades microestructurales y mecánicas de las uniones FSW, especialmente en aleaciones de aluminio que son sensibles a los procesos termo-mecánicos, como la aleación AA2024-T3. En la Figura 6 se muestran las temperaturas máximas obtenidas en las pruebas FSW realizadas con esta aleación, a 10 ipm de velocidad de soldeo y a diferentes velocidades de rotación. En ella se puede observar como la prueba realizada a 1500 rpm produce una temperatura máxima de 507 °C, la cual está dentro del rango de temperatura donde sucede el comportamiento de fusión incipiente de la aleación AA2024-T3, identificado por Xu *et al.* en las pruebas de CDB [9]. Por lo tanto el procesamiento FSW a velocidades de rotación elevadas podría producir fenómenos de fusión incipiente en la microestructura de las soldaduras.

Se llevó a cabo un análisis microestructural de las uniones FSW de AA2024-T3, producidas bajo los parámetros de soldeo indicados en la Figura 7 y en la Figura 8. En estas imágenes se muestran las secciones transversales de muestras producidas a 500 rpm y 1.500 rpm, respectivamente. En ambos casos se pudieron identificar las zonas microestructurales típicas de uniones FSW (*Stir Zone*, *TMAZ*...). Se observó una *Stir Zone* recristalizada más ancha en la muestra realizada a 500 rpm, probablemente debido a un efecto de “pegado” del material a la herramienta FSW (*sticking effect*) más prominente a velocidades de rotación relativamente bajas. La característica microestructural más relevante se localizó en la región cercana a la superficie, en la muestra producida a 1500 rpm tal y como se muestra en

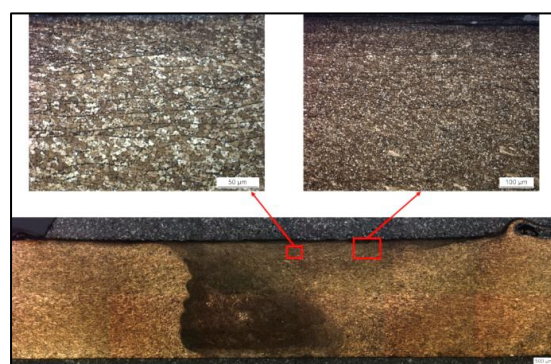
la Figura 8. Se observaron fases en forma de línea, alineadas paralelamente a la superficie en la misma dirección que las tensiones de cizallamiento producidas por la herramienta FSW durante el procesamiento.



**Figura 6:** valores máximos de  $T^{ra}$  medidos en pruebas FSW realizadas con la aleación AA2024-T3 a diferentes velocidades de rotación y el rango de temperatura de fusión incipiente de la aleación AA2024-T3 [9].



**Figura 7:** análisis microestructural de una prueba FSW realizada con AA2024-T3 a 500 rpm, 10 ipm y 2100 lbf.

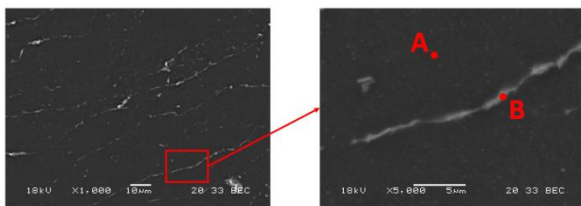


**Figura 8:** análisis microes. de la prueba FSW realizada con AA2024-T3 a 1500 rpm, 10 ipm y 1900 lbf.

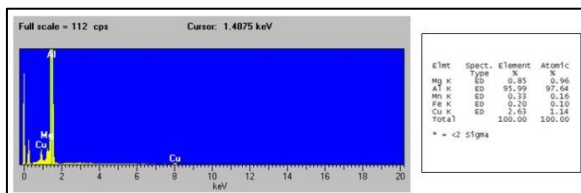
Con el fin de entender mejor la naturaleza de estas fases alineadas, las muestras fueron analizadas mediante observaciones SEM (microscopía electrónica de barrido) y análisis EDS (espectroscopia de energía dispersiva de rayos-X). En la Figura 9 se resumen las imágenes SEM de las fases en forma de línea obtenidas por electrones retrodispersados. El contraste brillante de estas fases alineadas indica una alta concentración de elementos de alto número atómico en estas regiones. Esto se confirma con los datos de EDS obtenidos, con el fin de investigar la composición química local de las



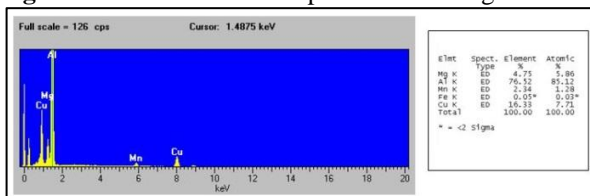
fases en forma de línea, los cuales se muestran en la Figura 10 y la Figura 11. En el punto A se midió una cantidad de 2,6% de Cu, que es representativa del metal base (Figura 10), mientras que en el punto B se midió una cantidad de 16,3% de Cu correspondiente a las fases alineadas (Figura 11). Por lo tanto, estas concentraciones de soluto localizado, junto con el rápido calentamiento que se produce en el procesamiento FSW y el hecho de que se evita la disolución de las fases ricas de elementos de Cu, podrían ser los responsables de la caída de la temperatura eutéctica local, produciendo efectos de fusiones localizadas en las regiones cercanas a la superficie de soldadura donde se generan las temperaturas máximas.



**Figura 9:** imágenes SEM de la región cercana a la superficie en la muestra de FSW realizada con aleación AA2024-T3 a 1500 rpm, 10 ipm y 1900 lbf.



**Figura 10:** análisis EDS del punto A de la Figura 9.



**Figura 11:** análisis EDS del punto B de la Figura 9.

#### 4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de medición de temperaturas para el proceso FSW y se realizaron pruebas FSW para investigar la relación entre las condiciones de procesamiento, las temperaturas producidas y las propiedades de las soldaduras. Se pudieron obtener las siguientes conclusiones:

- Se desarrolló un sistema de medición de temperatura preciso, robusto y fiable basado en herramientas FSW instrumentadas y la transmisión de datos de temperatura inalámbrica.
- El principal aumento de temperatura en los procesos FSW, así como el aumento de la fuerza axial y el par, se producen cuando el hombro de la herramienta contacta con los materiales a soldar.
- Se encontraron las siguientes principales relaciones entre los parámetros FSW y temperaturas medidas:

- A mayor velocidad de rotación, mayor temperatura de procesamiento.
- A mayor fuerza axial, mayor temperatura de procesamiento.
- A mayor velocidad de soldeo, menor temperatura de procesamiento.
- Las temperaturas máximas registradas en FSW de la aleación AA2024-T3 a altas velocidades de rotación (1500 rpm) están dentro del rango donde el fenómeno de fusión incipiente puede ocurrir en dicha aleación.
- Mediante los análisis microestructurales realizados por microscopía óptica, observación SEM y análisis EDS, se pudieron observar fases en forma de línea, alineadas paralelamente a la superficie e inducidas por el fenómeno de fusión incipiente en soldaduras FSW producidas a altas velocidades de rotación.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] A. Fehrenbacher et al., "Effect of tool-interface temperature on weld quality and quality improvements through temperature control in Friction Stir Welding", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, 71, 165-179.
- [2] A. Fehrenbacher et al., "Weld temperature effects during Friction Stir Welding of dissimilar aluminium alloys 6061-T6 and 7075-T6", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, 71, 643-652.
- [3] L. Cederquist et al., "Cascade control of the Friction Stir Welding process to seal canisters for spend nuclear fuel", *Control Engineering Practice*, 2012, 20, (1), 35-48.
- [4] L. Cederquist, "Friction Stir Welding of cooper canisters using power and temperature feedback", PhD thesis, Lund University, Lund, 2011.
- [5] J. De Backer et al., "Thermoelectric method for temperature measurement in Friction Stir Welding", *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, Vol. 18, Nº 7, 558-565.
- [6] J. De Backer et al., "Temperature control of robotic Friction Stir welding using the thermoelectric effect", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, 70, 375-383.
- [7] K. Ross et al., "Development and implementation of a robust temperature control algorithm for Friction Stir Welding", in *Proc. 9<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding*, 2012, Huntsville, USA.
- [8] K. Ross et al., "Advances in temperature control for FSP", *Friction Stir Welding and Processing VII in Proc. TMS 142<sup>nd</sup> Annual meeting & exhibition*, 2013, San Antonio, USA.
- [9] X.J. Xu et al., "Improvement in strength of 2024 Al alloy by enhanced solution treatment", *Key Engineering Materials*, 2005, Vols. 297-300, pp 2362-2367.