

OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE UNA SOLDADURA POR FRICCIÓN Y AGITACIÓN (FSW) EN CHAPAS DE ALUMINIO.

L. E. Feloy, D. A. Vucetich(*), A. C. Gonzalez

ProInTec (en formación), Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina

(*) Facultad de Ingeniería de La Plata (UNLP), BA, Argentina

(*). Email: danilo.vucetich@ing.unlp.edu.ar

Introducción

A finales de 1991 fue concebido y desarrollado por The Welding Institute (TWI) un nuevo método de soldadura, el cual se denominó Friction Stir Welding (FSW). Este nuevo proceso demostró a lo largo de estos últimos años tener un gran potencial para la realización de cualquier tipo de uniones, en especial para aleaciones de aluminio.

En el proceso FSW una herramienta cilíndrica compuesta de dos cuerpos, el hombro y el pin, la cual gira a un determinado número de revoluciones, es introducida lentamente por una fuerza axial, entre la línea de unión de las dos chapas o placas a unir, las cuales se encuentran dispuestas a tope una con otra.

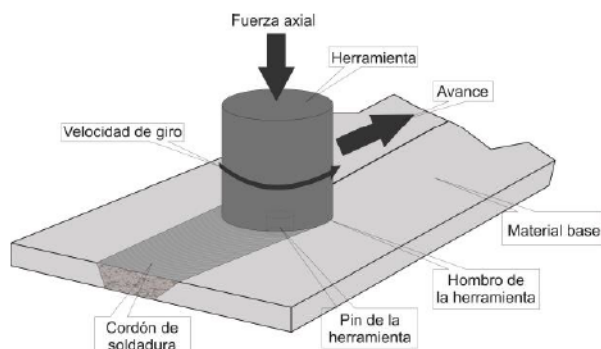


Figura 1: esquema de funcionamiento del proceso de soldadura por fricción-agitación.

El calor de fricción es generado por el contacto entre el hombro de la herramienta de soldadura giratoria con la superficie de las chapas a soldar y la deformación del material promovida por el pin de la herramienta. Este calor provoca un ablandamiento del material, sin llegar a la fusión, favoreciendo la deformación del mismo. El movimiento de rotación y avance de la herramienta promueve un flujo y mezclado del material desde un borde hacia el otro de la soldadura, lo cual conduce a la unión, en estado sólido, entre las dos piezas.

Entre las principales variables a considerar en el proceso de soldadura FSW, las cuales son fácilmente controladas, se destacan:

- Velocidad de rotación de la herramienta.
- Fuerza axial que se aplica sobre la herramienta.
- Velocidad de avance de la herramienta.

El diseño de la herramienta juega un importante rol en la calidad final de la soldadura, como así también, en la velocidad de soldadura.

En el desarrollo del presente trabajo se persiguió la hipótesis de que la reducción del calor aportado al material se traduce en un aumento en las propiedades mecánicas de la zona del cordón de soldadura, debido a que no se activarían los mecanismos térmicos que las

reducen. La forma de controlar el calor aportado por la herramienta es mediante la modificación de la velocidad de giro y de avance de la misma.

Desarrollo experimental

La planificación de la velocidad de giro y de avance de la herramienta fue desarrollada sobre la base de experiencias anteriores. La realización de las soldaduras para la generación de las muestras fue mediante una herramienta nueva con sus dimensiones controladas según el procedimiento de medición de la herramienta desarrollado bajo la norma AWS D17.3. La herramienta denominada M4 presenta un diámetro de hombro de 12 mm y de pin de 4,5 mm.

Se midieron en las experiencias 2 parámetros particulares, el torque generado por el motor y la temperatura del material en el proceso de unión. El torque del motor fue obtenido directamente del controlador del mismo. El procedimiento de medición de temperatura constó de la introducción de una termocupla tipo K de alta sensibilidad en el material base hasta la línea de unión de las chapas, como se muestra en la figura 2, y la recolección de datos mediante un pirómetro digital con data logger. Aunque se sabe que el método no es capaz de dar la temperatura exacta del proceso, debido a que la termocupla interfiere en el flujo y por lo tanto, en la temperatura puntual, se entiende que es el método que puede brindar más ajustadamente la temperatura de la región.

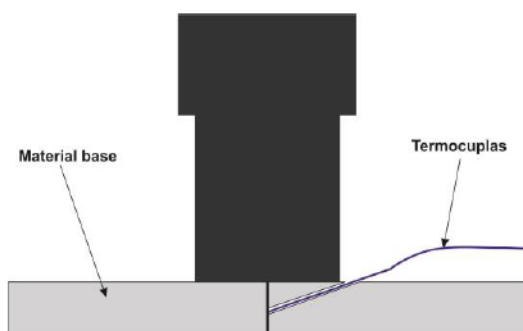


Figura 2: Esquema de posición de termocupla.

La tabla 1 en el apartado de resultados muestra las mediciones tomadas durante la generación de las muestras. En ella se puede observar un cambio importante en el aspecto del torque desarrollado por el motor impulsor del usillo, promovido por el descenso de la temperatura del material.

Una vez realizadas las muestras, se corroboró su sanidad bajo las condicionantes de la norma AWS D17-3 y procedimientos de autoría propia. Estos procedimientos especifican que luego de generada la muestra, se deben practicar las siguientes operaciones:

- Inspección visual de la muestra.
- Ensayos de tintas penetrantes en la raíz del cordón.
- Micrografía de la sección transversal del cordón.

Inspección visual

Todas las muestras generadas en esta tanda fueron aprobadas por la inspección visual. Ninguna mostró signos de falta de penetración, cavidades eclosionadas o excesivo flash o desalineación.

Ensayos de tintas penetrantes en la raíz.

Aprobada la inspección visual de las muestras, se procedió a realizar el ensayo de tintas penetrantes. Éste fue ejecutado por personal entrenado para Nivel 2 bajo el procedimiento propio con el nombre de "Procedimiento para la inspección por líquidos penetrantes soldaduras por fricción-agitación". El resultado del procedimiento fue exitoso.

Ensayos metalográficos

Para completar la inspección de las muestras con el objetivo de determinar su sanidad, se procedió a realizar micrografías de la sección transversal del cordón. El procedimiento generado bajo la norma anteriormente mencionada para la realización de estas micrografías determina que se deben obtener dos cortes del cordón según el esquema mostrado en la figura 3.

El resultado de este análisis también fue exitoso. No se vieron muestras de falta de penetración en el cordón y la estructura de la zona de batido no mostró defectos. La figura 4 muestra una selección de las quince micrografías obtenidas



Figura 3: esquema de corte de probetas para el análisis micrográfico.

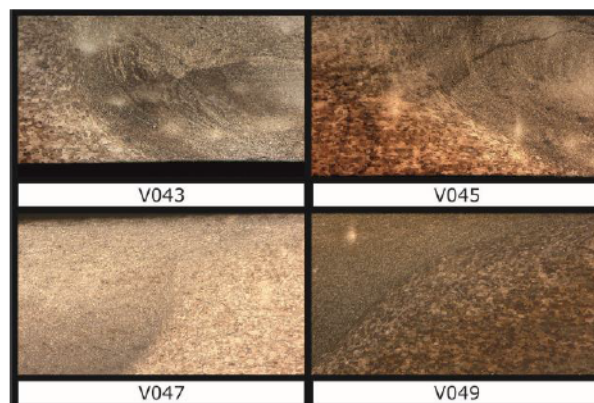


Figura 4: Selección de micrografías tomadas con 50x de aumento.

Las imágenes son elocuentes. Como se puede observar, no existen muestras de defectos, tanto de falta de penetración, como internos en el cordón.

Ensayos mecánicos.

Luego de haber demostrado la sanidad de las muestras realizadas se procedió a medir las propiedades mecánicas logradas por las uniones. Para esto se prepararon probetas de tracción según norma IRAM 766. La figura 5 muestra el esquema de la probeta.

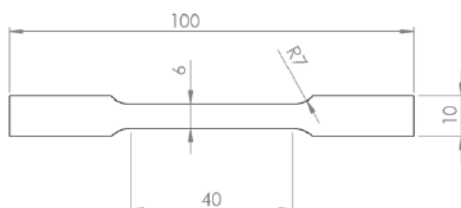


Figura 5: probeta subdimensionada según norma IRAM 766

Los ensayos de las probetas de las muestras soldadas se realizaron con extensómetro a la rotura. Este método permite determinar de manera más exacta la tensión de fluencia. Para un mejor resultado, se realizaron 4 probetas por muestra. Esto es debido a que la desviación estándar de los resultados es significativamente mayor a los del material base. Los resultados se muestran en la tabla 1 de la sección Correspondiente.

Resultados

En la tabla 1 se muestran los resultados de las mediciones y los ensayos de experiencias realizadas.

Tabla 1: Datos medidos de la generación de muestras de esta tanda

Muestra	Velocidad de giro [RPM]	Velocidad de avance [mm/min]	Coefficiente de aporte de calor ¹	Torque [Nm]	Temperatura máxima medida [°C]	Tensión de fluencia [MPa]	Tensión máxima [MPa]
001	2900	180	16,1	5,4	416,4	182,2	316,4
002	2800	180	15,6	5,53	392,1	183,5	319,4
003	2700	180	15,0	5,1	366,5	181,4	329,2
004	2600	180	14,4	5,3	393,4	177,8	325,5
005	2500	180	13,9	5,4	356,4	185,1	355,3
006	2300	180	12,8	6,2	375,3	185,3	343,3
007	2100	180	11,7	6,9	343,4	183,8	330
008	1900	180	10,6	7,5	361,2	188,1	335
009	1700	180	9,4	8,1	347,5	190,5	346
010	1500	180	8,3	9	351,3	193	351
011	1300	180	7,2	10,2	355,7	193	341,1
012	1100	180	6,1	11,7	353,7	189,8	336
013	1100	195	5,6	12,5	356,4	184	306
014	1100	210	5,2	12,7	349,3	191	345
015	1100	225	4,9	13,8	344,4	180	341

¹ El Coeficiente de aporte de calor es una medida comparativa del calor aportado que relaciona la velocidad de giro con la velocidad de avance de la herramienta.

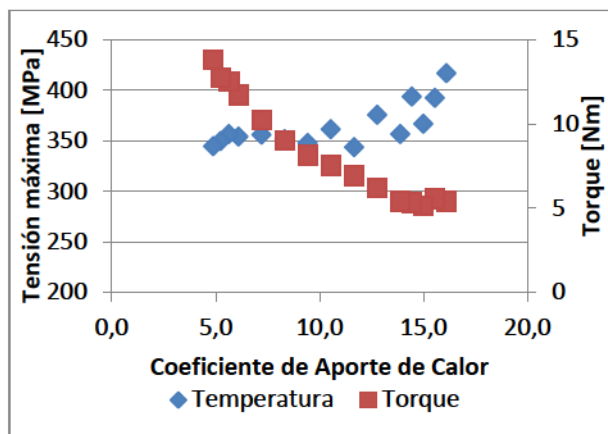


Figura 6: gráfico de temperatura máxima medida y torque medido en función al coeficiente de aporte de calor.

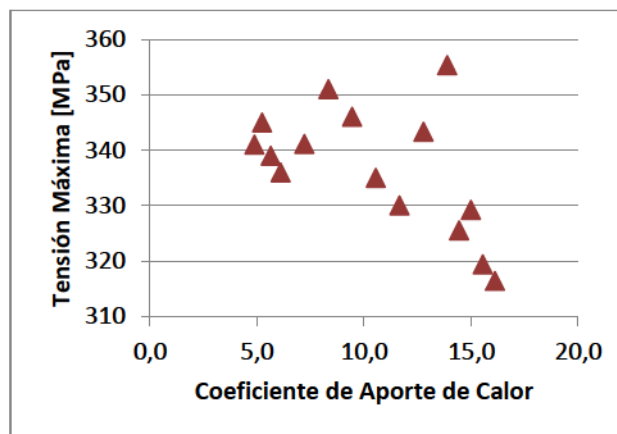


Figura 7: Tensión Máxima en función al coeficiente de aporte de calor.

Como se observa, el torque medido fue ascendiendo ininterrumpidamente a medida que se avanzaba con la planificación, tanto en las muestras donde se mantuvo la velocidad de avance constante como en la etapa donde se mantuvo la velocidad de giro constante y se varió el avance. Está demás decir que la condición opuesta se observó en la temperatura medida durante el proceso debido al calor aportado.

Probablemente lo más importante se mostró en los resultados de los ensayos mecánicos donde se puede observar que a medida que se reduce el calor aportado, se aumentan las propiedades mecánicas.

Este fenómeno no hace más que confirmar lo que físicamente se supone sobre el aporte de calor al material. Queda determinar, como aportan cada uno de los parámetros a este efecto, que como se explicó anteriormente no lo hacen de manera proporcional.

Lo importante de este aspecto y que cumple con el análisis planteado en este trabajo es que se diseñó la planificación para disminuir la temperatura del proceso y eso fue particularmente lo sucedido. No solo se encuentra demostrado por el aumento del torque aplicado por el usillo, sino que también se midió la temperatura del cordón de soldadura durante el proceso.

Conclusiones

El trabajo planteado, en general, pudo demostrar la hipótesis propuesta. Es decir, quedó demostrado que a medida que se aporta menos calor a la soldadura, la eficiencia mecánica de las mismas aumenta.

Las muestras realizadas resultaron libres de defectos. Si bien se buscó, como se mencionó anteriormente, bajar la temperatura del proceso, no se evidenciaron inconvenientes resultantes de esto. Lo que todavía está quedando pendiente en estas soldaduras es analizar la microestructura de la zona de batido para ver la evolución de la recristalización de los granos y la aglomeración de precipitados.

Todos los eventos físicos previstos fueron demostrados. A medida que se avanzó en la reducción del calor aportado, la temperatura disminuyó y la respuesta del material se mantuvo acorde. Un aspecto llamó la atención de este resultado. La temperatura del material descendió hasta un cierto valor, 350 °C aproximadamente, y frenó su caída.

Mientras que el torque de la herramienta siguió aumentando. No es posible con los análisis realizados en este trabajo determinar la causa real de este fenómeno, con lo que queda pendiente para futuros estudios.

Los resultados de los ensayos mecánicos de las muestras en promedio resultan de una eficiencia² en la unión que supera el 77%, y en algunos casos puntuales por encima del 80%, aumentando más del 10 % sobre valores obtenidos en las primeras tandas. Si bien la tensión de fluencia es baja con respecto a la del material base, con valores máximos que superan el 55 %, esta tensión ya es superior a la obtenida por los métodos convencionales de unión por fusión del material.

Bibliografía

1. **American Society for Metals.** *ASM Specialty Handbook, Aluminium and Aluminium Alloys.* 1996.
2. **International Standard Organization.** ISO 25239-2. *Friction Stir Welding - Aluminium - Part 2: Design of weld joints.* 2011.
3. —. ISO 25239-4. *Friction Stir Welding - Aluminium - Part 4: Specification and qualification of welding procedures.* 2011.
4. **International Standard Organisation.** ISO 25239-5. *Friction Stir Welding - Aluminium - Part 5: Quality and inspection requirements.* 2011.
5. **Adamowski, J. y Szkodo, M.** Friction Stir Welds (FSW) of aluminium alloy AW6082-T6. *Journal of achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* 2007, Vol. 20, págs. 403 - 406.
6. **Arora, A., y otros, y otros.** Strains and strain rates during friction stir welding. *Scripta Materialia.* 2009, Vol. 61, págs. 863 - 866.
7. **Arora, A., De, A. and DebRoy, T.** Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter. *Scripta Materialia.* 2011, Vol. 64, pp. 9 - 11.
8. **Elangovan, K. and Blasubramanian, V.** Influence of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering A.* 2007, Vol. 459, pp. 7 - 18.
9. **Gerlich, A., Su, P. y North, TH.** Peak temperatures and microstructures in aluminium and magnesium alloy friction stir spot welds. *Science and Technology of Welding & Joining.* 2005, Vol. 10, 6, págs. 647 - 652.
10. **Jata, K. V. and Semiatin, S. L.** Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. *Scripta Mater.* 2000, Vol. 43, pp. 743 - 749.
11. **Mase, George.** *Mecánica del Continuo.* s.l. : MacGraw-Hill, 1983.
12. **Mishra, R. S. and Ma, Z. Y.** Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering.* 2005, Vol. 50, pp. 1 - 78.

² Eficiencia que se mide en función a la tensión máxima. Tomada con respecto al resultado del ensayo transversal al sentido de laminación debido a la orientación que tienen las chapas con las que se generaron las muestras.