

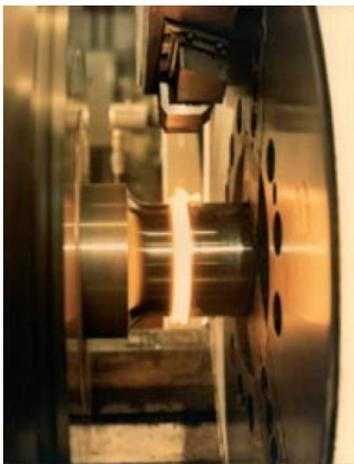
AVANCES EN LA TECNOLOGÍA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN “STIR”

Egoitz Aldanondo, Pedro Álvarez,
Antonio Augusto Monaco Da Silva,
Alberto Echeverría, Ekaitz Arruti

Centro de Investigación en Tecnologías de
Unión Lortek (Iortek-ik4)

1. INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción (*Friction Welding* o FW) de dos piezas metálicas es un antiguo proceso que se consolidó industrialmente en los años 60 y que se conseguía combinando una semifusión por fricción controlada de los materiales a unir con la presión ejercida para consolidar la unión. Se practicaba la fricción giratoria para unir ejes o piezas de revolución por sus cabezas y se aplicaba a diferentes tipos de materiales: acero, aleaciones de aluminio, de cobre... Más recientemente se ha desarrollado la fricción lineal alternativa para unir productos planos, y sobre todo para álabes para turbinas.



FW de dos ejes

El proceso *Friction Stir Welding* (FSW), nuevo paso sobre el principio anterior, fue inventado y patentado en el año 1991 en el centro británico “*The Welding Institute*” (TWI). Desde su invención despertó un gran interés debido a sus características singulares respecto a los procesos de soldadura tradicionales y el esfuerzo en investigación y desarrollo llevado a cabo a nivel internacional ha sido muy importante. En abril de 2008 se tenía constancia de 178 licencias en curso para el uso del proceso, repartidos entre la industria, institutos de investigación y universidades.

Todo el trabajo realizado en el desarrollo de la tecnología FSW a lo largo de estos casi veinte años, ha generado una serie de derivaciones o subprocesos basados en los principios básicos de tecnología FSW. Dichas derivaciones han tenido a su vez un desarrollo en función del interés que han generado y algunas, por ejemplo la derivación denominada “*Friction Stir Spot Welding*” (FSSW), se han llegado a implementar en la industria. Por otra parte, el abanico de materiales que se han unido de manera satisfactoria por FSW ha sido considerable. Aunque en sus inicios la tecnología FSW se creó trabajando con aleaciones de aluminio, posteriores desarrollos han demostrado la viabilidad de la tecnología para unir otras aleaciones metálicas tales como aceros, níquel, titanio, etc.

El desarrollo de la tecnología FSW y la capacidad de trabajar con una amplia variedad de aleaciones metálicas han llevado a la proliferación de aplicaciones industriales en diversos sectores tales como el aeronáutico, ferroviario o la automoción. A continuación pretendemos dar a conocer los principios de la tecnología FSW y sus derivaciones, las particularidades a tener en cuenta al trabajar con distintos tipos de aleaciones metálicas y algunas aplicaciones que han hecho uso de esta tecnología.

2. LA TECNOLOGÍA FSW: PRINCIPIOS BÁSICOS

La tecnología FSW se basa en el calentamiento por fricción y deformación plástica producidas mediante una herramienta no consumible. En la Figura 1 se muestran los principios básicos del proceso donde una herramienta rotativa es introducida en la intercara de las piezas a unir y recorre la junta generando una unión soldada. La fricción entre la herramienta y el material de las piezas a soldar produce un calentamiento que reblandece el material sin llegar a fundirlo y lo deforma en estado sólido consolidando la unión de las piezas. Por lo tanto, se trata de un proceso de deformación en caliente en estado sólido que se asemeja más a un proceso de extrusión que a un proceso de fusión-solidificación.

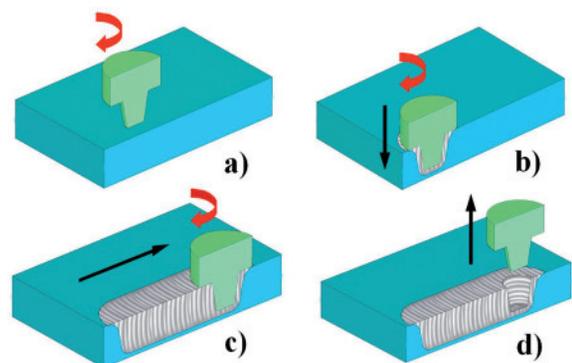


Figura 1: Esquema explicativo del proceso FSW: a) posicionamiento y rotación; b) penetración; c) avance; d) extracción.

La principal singularidad de la tecnología FSW que supone el hecho de no llegar a fundir el material y producir la unión en estado sólido acarrea ciertas ventajas que se comentan a continuación:

- La microestructura obtenida en la zona soldada es análoga a microestructuras obtenidas en procesos de extrusión de grano recristalizado muy fino. Esta microestructura característica confiere a la unión de unas propiedades mecánicas generalmente superiores a uniones soldadas producidas por técnicas por arco eléctrico tradicionales.
- Por lo tanto, problemas típicos de soldadura tales como el agrietamiento en caliente, porosidad, pérdida de elementos de bajo punto de fusión, etc. no ocurren en el proceso FSW. Debido a esto, materiales anteriormente considerados como no soldables tales como las aleaciones de aluminio 2XXX y 7XXX, (aleaciones de aluminio tratables térmicamente de alta resistencia) ampliamente utilizadas en la aeronáutica, son perfectamente soldables por FSW.
- No hay necesidad de utilizar consumibles tales como material de aporte, gases de protección... No se producen emisiones peligrosas como proyecciones, gases nocivos, etc. Además la preparación de la junta no es tan exigente como en procesos de soldadura por arco eléctrico y la limpieza de las superficies en aleaciones de aluminio es más simple, pues no hay necesidad de eliminar la capa superficial de alúmina.
- Generalmente el input energético del proceso FSW es inferior que en procesos de soldadura por arco eléctrico. Debido a esto las distorsiones y tensiones residuales de los componentes soldados son inferiores y la estabilidad dimensional aumenta.
- El consumo energético requerido en el proceso FSW es generalmente inferior al requerido por otros procesos tales como la soldadura laser o los procesos de soldadura por arco eléctrico.
- FSW es una tecnología automatizable por lo que la calidad de las uniones no depende de la habilidad de mano de obra cualificada y la repetitividad de los resultados es alta.

A su vez, la tecnología FSW también presenta ciertas desventajas:

- Al ser un proceso termomecánico, los esfuerzos generados en el proceso de soldadura FSW son grandes y es necesario sujetar los componentes a soldar firmemente mediante unos adecuados útiles de amarre. Además es necesario utilizar una máquina lo suficientemente robusta para poder transferir a la herramienta la potencia necesaria en los diferentes grados de libertad que se deben controlar durante el proceso. Dependiendo de los espesores y los materiales a soldar resulta necesario emplear máquinas hidráulicas de gran precisión de modo que la inversión en equipamiento puede ser elevada.

- La tecnología FSW requiere de ciertos automatismos o maquinaria para su ejecución y pueden existir limitaciones en casos donde el acceso a las uniones o las trayectorias de las juntas son complicadas. Para minimizar este problema se pueden emplear robots adaptados para FSW, pero esta práctica conlleva otras limitaciones en aspectos como materiales y espesores soldables.
- En el proceso básico FSW generalmente hay presencia de un agujero en el extremo final del cordón de soldadura como consecuencia de la geometría característica de la herramienta empleada.
- La tecnología FSW es especialmente complicada en el caso de aleaciones metálicas de alto punto de fusión tales como acero, titanio, níquel... En estos casos es necesario emplear herramientas especiales cuyo coste es relativamente elevado.

3. DERIVACIONES O SUBPROCESOS DEL PROCESO FSW

Debido al interés que generó el gran potencial de la tecnología FSW, los esfuerzos de desarrollo han sido muy importantes en los últimos años y, como consecuencia, han surgido nuevas derivaciones a partir de sus principios básicos. A continuación se detallan las derivaciones más significativas y que mayor atención han suscitado.

3.1. Friction Stir Spot Welding (FSSW)

El proceso FSSW es una derivación del proceso FSW en el cual se generan uniones por puntos tal y como se puede ver en el esquema explicativo de la figura 2. Ideado por *Mazda* en el año 2003, el proceso FSSW ha demostrado el potencial suficiente para sustituir otros procesos por puntos más tradicionales tales como “Resistance Spot Welding” (RSW), “Self-Piercing Rivets” (SPR) o “Clinching” en algunas aplicaciones. Aunque, al igual que la tecnología FSW, se aplicó inicialmente a uniones de aleaciones de aluminio, desarrollos posteriores han demostrado la viabilidad del proceso FSSW para unir aceros de alta resistencia.

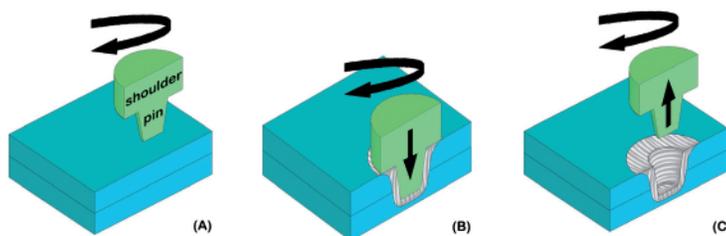


Figura 2: Esquema explicativo del proceso FSSW: a) posicionamiento y rotación; b) penetración; c) extracción.

Una de las principales desventajas del proceso FSSW es el agujero final que queda en la unión al extraer la herramienta, hecho que reduce significativamente el

volumen de material que la forma. Con el fin de aumentar dicho volumen y mejorar la resistencia mecánica de las uniones se han desarrollado una serie de derivaciones del proceso FSSW:

- **Refill FSSW:** Inventado por el Centro de Investigación GKSS alemán (Grupo *Helmholz*), combina el movimiento relativo entre la punta (“pin” en la Figura 2a) y el hombro (“shoulder” en la Figura 2a) de la herramienta para eliminar el agujero que se forma en el proceso FSSW convencional.
- **Stitch y Swing FSSW:** Ideados por *Hitachi*, estas derivaciones del proceso FSSW añaden un corto movimiento lineal de la herramienta entre las fases de penetración y extracción (Figura 2b y Figura 2c respectivamente). Debido a este movimiento adicional el volumen de material unido aumenta y, por consiguiente, la resistencia de la unión también aumenta.
- **Octaspot FSSW:** Desarrollado por la *Wichita State University* (WSU), se basa en el mismo principio que las derivaciones *Stitch y Swing FSSW* con la diferencia de que el movimiento adicional de la herramienta se da en forma de rotación en lugar de hacerlo de forma lineal.

3.2. Otras derivaciones de la tecnología FSW

Aunque no han tenido la repercusión e importancia de estas dos, se deben mencionar también, debido a las posibilidades que presentan respecto al proceso FSW convencional las variantes siguientes:

- **Self-reacting/bobbin tool:** El trabajo desarrollado en el diseño de las herramientas empleadas para FSW ha sido muy importante puesto que se considera que la herramienta es uno de los elementos críticos a la hora de producir uniones de calidad. Normalmente las herramientas convencionales para FSW se componen de un hombro (*shoulder* en la Figura 2a) y una punta (*pin* en la Figura 2a). El uso de este tipo de herramientas requiere del uso de un respaldo de apoyo lo suficientemente rígido que compense los grandes esfuerzos de pisado que ejerce la herramienta sobre los componentes a soldar. La tecnología *Self-reacting/bobbin tool* se distingue por el uso de una herramienta especial compuesta por dos hombros unidos por un eje que realizaría las funciones de la punta. De este modo los esfuerzos axiales son absorbidos por la herramienta y no hay necesidad de utilizar ningún respaldo de apoyo.
- **Skew-Stir:** Esta variante se basa en el uso de una punta excéntrica de la herramienta con el fin de incrementar el área de material unido y mejorar las propiedades mecánicas de las uniones. Resulta especialmente útil en uniones a solape.
- **Re-Stir:** La particularidad de esta variante es la alternancia del sentido de la velocidad de giro de la

herramienta durante la fase de avance (Figura 1c). Esta acción permite obtener uniones con tramos de propiedades ligeramente diferentes con el fin de mejorar el comportamiento a fatiga de los componentes soldados.

- **Twin-Stir:** En esta otra variante se hace uso simultáneo de dos herramientas trabajando juntas en la misma unión de modo que además de ampliar el área unida y mejorar las propiedades mecánicas de las uniones, los esfuerzos laterales generados en el proceso se compensan y se simplifica el utillaje necesario para amarrar los componentes a soldar.

3.3. Materiales soldables por FSW

La tecnología FSW inicialmente se ideó para aleaciones de aluminio debido al hecho de que su relativamente baja temperatura de fusión permite realizar procesos de transformación en caliente de una forma relativamente sencilla. Los materiales metálicos procesados por FSW se calientan hasta temperaturas cercanas a su punto de fusión aunque, al tratarse de un proceso en estado sólido, no llegan a alcanzarse temperaturas superiores a ese punto. Durante el desarrollo de la tecnología FSW se ha demostrado la viabilidad de trabajar con otras aleaciones metálicas además de las aleaciones de aluminio tales como acero, titanio, níquel, etc. Aún así, es necesario tener en cuenta las características y propiedades de cada aleación para adecuar la tecnología y procesar cada material de una forma exitosa.

4. APLICACIONES

La tecnología de soldadura FSW es la tecnología de unión más emergente actualmente y que mayor peso tiene entre la actividad científica en temas relacionados con tecnologías de unión. Además de la actividad científica, también existe una actividad industrial. Así, las primeras aplicaciones industriales de FSW se iniciaron en 1995 y desde entonces el número de aplicaciones es creciente.

La industria aeroespacial fue uno de los primeros sectores en detectar su gran potencial. *Boeing* lo ha utilizado en la fabricación de los tanques de propulsión de aluminio 2014 o en los cohetes espaciales *Delta II y Delta IV*. *Lockeed Martin* y la *NASA* han desarrollado e implementado el proceso FSW en la fabricación de los tanques externos del transbordador espacial. *Airbus*, tras un programa de aproximadamente 7 años de desarrollo ha anunciado la utilización de FSW en partes seleccionadas del *Airbus A350* y dos versiones del *A340*. En el año 2000 en Estados Unidos bajo una iniciativa de la *Air Force* se fabricaron diversos componentes para aplicaciones del departamento de defensa.

Una compañía privada de EEUU que fabrica jets de clase business, obtuvo la certificación de la administración de la aviación federal para el uso del proceso de FSW en la fabricación del jet *Eclipse 500*. En este caso se realizan uniones a solape para reemplazar remaches en la unión de

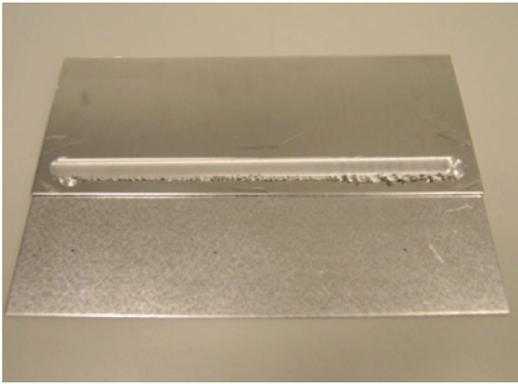


Figura 3: Chapas de aluminio y acero soldadas por FSW

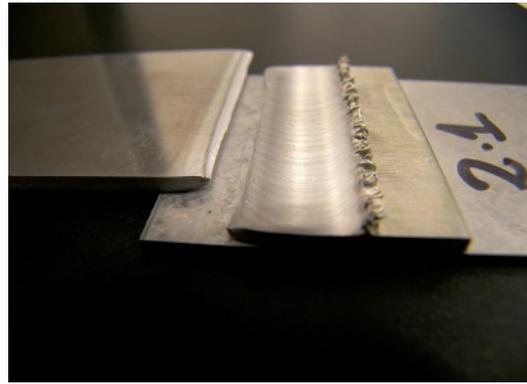


Figura 4: Fallo de la unión en la Zona Afectada Térmicamente (ZAT) del aluminio

rigidizadores internos longitudinales y circunferenciales. El equipamiento para la realización de estas uniones ha sido desarrollado por *MTS Systems Corporation*. Esta firma americana afirma haber reducido de manera considerable el tiempo de ciclo, respecto al proceso de remachado.

En cuanto a aplicaciones en automoción, *Ford* ha producido el ensamblaje del túnel de combustible del *Ford GT*, coche deportivo de la firma, utilizando la técnica de FSW. Por su parte *Mazda* ha utilizado este proceso en más de 100.000 puertas traseras de su modelo RX8.

Otro campo interesante de aplicación en la automoción y elementos de transporte es poder utilizar configuraciones multimaterial con el objeto de aligerar la estructura. En el caso de combinar acero y aluminio, su soldadura por medios que requieran una fusión del material suponen un gran desafío debido a la formación de intermetálicos frágiles. Fruto de un extenso programa de investigación interno, en colaboración con otros centros internacionales punteros en la tecnología, los demostradores realizados en LORTEK-IK4 de soldadura por FSW de aluminio con acero son muy esperanzadores (Figura 3 y Figura 4) y ya se está pensando en aplicaciones concretas dentro del sector transporte por carretera.

Shinkansen, que se componen básicamente de extrusiones de doble piel de aleaciones de aluminio de la serie 6XXX (aleaciones de alta resistencia de aluminio tratables térmicamente). Uno de los mayores beneficios del proceso reportado por esta firma japonesa, es la reducida distorsión del proceso y su buen acabado final. Ver en la Figura 5 las uniones realizadas en LORTEK-IK4 de perfiles extruidos.

En las construcciones marinas o navales, el número de aplicaciones para la soldadura de aluminio son numerosas. Como ejemplo, conviene citar que el ferry de aluminio más rápido del mundo, el ferry japonés *Osawara*, para transporte de pasajeros entre islas, hace un uso extensivo de la tecnología en su superestructura.

Una aplicación interesante es la fabricación de intercambiadores de calor en aluminio, debido a su alta conductividad térmica y por tanto eficiencia de intercambio. En la Figura 6 se muestra la formación de canales mediante la combinación de procesos de mecanizado y de soldadura por FSW. Estos prototipos realizados por LORTEK-IK4 han resultado ser plenamente operativos a altas presiones del fluido interior, asegurando una estanqueidad total y robusta en toda la zona soldada.

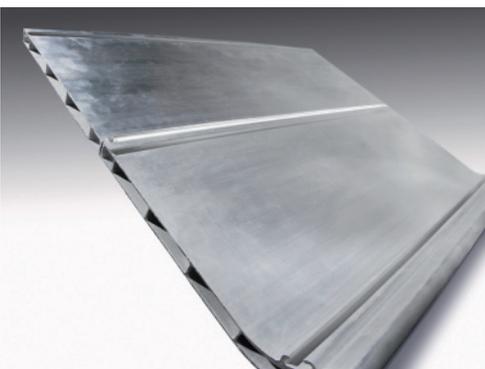


Figura 5: Perfiles extruidos soldados por FSW en LORTEK-IK4

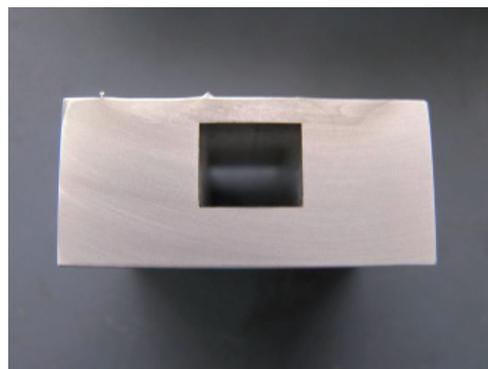


Figura 6: Canales estancos fabricados por mecanizado+FSW

Las aplicaciones en estructuras de transporte por ferrocarril, son abundantes: *Hitachi* en Japón aplica el proceso para unir los coches de los trenes de alta velocidad

5. CAMPOS DE DESARROLLO

Como ya se ha mencionado anteriormente en el apartado de aplicaciones, el grado de madurez tecnológica del proceso de FSW para aleaciones de aluminio es alto. En la actualidad existen diferentes frentes en los que se está trabajando a nivel de desarrollar más el proceso FSW. Los frentes más significativos son: a) extensión del proceso FSW a metales de temperatura de fusión superior al aluminio, b) Aplicación del proceso a materiales y metales disimilares y c) Desarrollo de estándares y especificaciones para el proceso FSW en aluminio.

El grado de madurez tecnológica del proceso FSW aplicado a aceros, níquel, titanio y cobre es medio, sin llegar al grado que tiene su aplicación en aleaciones de aluminio. En algunos casos, el grado de madurez es mayor que en otros, debido a los problemas intrínsecos de cada uno. De manera general se puede señalar que la mayor diferencia respecto a las aleaciones de aluminio se debe a su punto de fusión más alto y por tanto temperaturas de procesamiento más elevadas (en general la temperatura de proceso es un porcentaje de la temperatura de fusión como suele ser común en los procesos de deformación en caliente), lo que lleva a desarrollar herramientas en otros materiales. Otra diferencia importante es la menor conductividad térmica de estos materiales respecto al aluminio (el cobre es una excepción) y su influencia en un control adecuado del proceso de deformación local y flujo de material.

No queremos dejar de mencionar aquí el proceso denominado FSP que se basa en la tecnología FSW aunque en realidad no se emplea para la unión de componentes sino para modificar la microestructura y cambiar la composición del material procesado en las zonas de acción de la herramienta produciendo constituyentes con propiedades locales mejoradas. De este modo, la característica microestructura de grano fino generada en FSP abre nuevas posibilidades para producir conceptos de producto que eran impensables anteriormente.

6. CONCLUSIONES

En sus aproximadamente veinte años de existencia la tecnología FSW ha sido objeto de extensos estudios y desarrollos. Fruto de toda esta actividad investigadora, hoy en día la tecnología FSW es una tecnología madura en ciertos ámbitos y las aplicaciones industriales existentes en diferentes mercados son numerosas. Aún así, las posibilidades que presenta esta tecnología hacen que nuevas aplicaciones y nuevas derivaciones o subprocesos sigan apareciendo continuamente.

La tecnología FSW se desarrolló inicialmente para aleaciones de aluminio puesto que su relativamente baja temperatura de fusión permite que el procesamiento de estas aleaciones sea más sencillo. Es por ello que la mayoría de aplicaciones de la tecnología FSW se centran en este ámbito

siendo una tecnología que se encuentra en su madurez. Aún así, existen ámbitos de la tecnología FSW que se encuentran en la fase de desarrollo. Ciertos ámbitos como la soldadura FSW para aleaciones de alto punto de fusión, materiales disimilares, etc. son campos donde los investigadores están trabajando exhaustivamente por lo que los continuos avances de la tecnología y la proliferación de nuevos productos están garantizados.

Aunque la tecnología FSW se encuentra en un grado de madurez avanzado el nivel de transferencia al tejido industrial no ha sido acorde al potencial mostrado por el proceso. La falta de estándares, guías de diseño, conocimiento general del proceso o desarrolladores de la tecnología han dificultado enormemente la transferencia de la tecnología, además del alto coste del equipamiento específico para FSW. Se espera que la creación de una normativa específica para el proceso junto con la inclusión de la tecnología en programas de formación regladas sea un revulsivo que estimule la transferencia de la tecnología FSW al tejido industrial.

PARA SABER MÁS

- [1] ASM specialty handbook: Friction Stir Welding and Processing', (ed. R.S. Mishra and M.W. Mahoney), 273-308, March 2007, Materials Park, OH, ASM International.
- [2] Friction Stir Welding and Processing V, TMS Annual Meeting, San Francisco (CA), USA, The Minerals, Metals and Materials Society, Feb 2009
- [3] Friction Stir Welding and Processing VI, TMS Annual Meeting, San Diego (CA), USA, The Minerals, Metals and Materials Society, 2011
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Friction_stir_welding
- [5] LORTEK-IK4
<http://www.lortek.es/?content=18;descripcion>
- [6] 8th International Symposium on Friction Stir Welding, (8ISFSW). Timmendorfer Strand, Lübeck, Germany 18th-20th May 2010.
<http://www.twi.co.uk/content/fswintro.html>