

S. Señorís^a, R. Fernández^a, J. Ibáñez^a, G. González-Doncel^a,
D. Verdera^b, C. Llovo^b

^a Departamento de Metalurgia Física, CENIM, C.S.I.C. Av. de Gregorio del Amo 8, 28040 Madrid, España

^b AIMEN, Centro Tecnológico, Porriño, 36418 Pontevedra, España

Soldadura por fricción-agitación, FSW, de materiales compuestos de matriz metálica, MMCs, con elevado contenido de refuerzo

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Keywords:

Materiales compuestos de matriz metálica, Soldadura por fricción-agitación
Deformación plástica severa

En buena medida, las expectativas tan prometedoras que se pusieron en los años 80 en los materiales compuestos de matriz metálica, MMCs, se han diluido en las últimas décadas. Una de las razones de esta frustración radica en la imposibilidad de unir estos materiales por los métodos convencionales de soldadura: estos métodos (que involucran la fusión) destruyen la distribución homogénea del refuerzo y dan lugar a productos de reacción perjudiciales para las propiedades de la unión. La soldadura por fricción-agitación, FSW, sin embargo, se produce sin fusión, tiene lugar por un proceso de deformación plástica severa, eliminando los inconvenientes de las técnicas de soldadura tradicionales. Por ello, los últimos años han sido testigo de un creciente interés en el estudio de soldaduras mediante esta técnica, no sólo de MMCs sino también de soldaduras disimilares MMC-metal monolítico

La unión de MMCs mediante FSW no es sencilla, en particular si el contenido de refuerzo es elevado, >20% vol. En este trabajo se comentan las dificultades más importantes que afronta este proceso de soldadura y se resumen los resultados recientes de los estudios realizados en CENIM-AIMEN sobre uniones de materiales compuestos, con hasta un 40% en volumen de refuerzo, y uniones disimilares. Se presentan las correlaciones más relevantes entre los diferentes esfuerzos mecánicos requeridos bajo diferentes velocidades de avance y rotación. Ello permitirá más adelante realizar un análisis del balance energético del trabajo necesario para producir la deformación del material y para calentarlo. En definitiva, se destaca la importancia de medir estos esfuerzos con el fin de profundizar en el proceso de deformación plástica severa que tiene lugar, siempre a altas velocidades de deformación.

Friction stir welding, FSW, of metal matrix composites, MMCs, with high reinforcement content

ABSTRACT

Keywords:

Metal matrix composites,
Friction stir welding
Severe plastic deformation

To a large extent, the promising expectations that were set in the 1980s in metal matrix composites, MMCs, have been diluted in recent decades. One reason for this frustration lies in the impossibility of joining these materials by conventional welding methods: these methods (involving fusion) destroy the homogeneous distribution of the reinforcement and give rise to reaction products detrimental to the properties of the joint. Friction stir welding, FSW, however, does not involve fusion, it occurs by a severe plastic deformation process, avoiding the drawbacks of traditional welding techniques. Therefore, recent years have witnessed a growing interest in the study of welds by this technique, not only of MMCs but also of dissimilar welds MMC-monolithic metal.

joining MMCs by FSW is not simple, particularly if the reinforcement content is high, > 20 vol%. This paper discusses the most important difficulties facing this welding process and summarizes the recent results of CENIM-AIMEN studies on joints of MMCs with up to 40%vol. of reinforcement, and dissimilar joints. The most relevant correlations between the different mechanical stresses required under different advancing and rotational velocities are presented. This will allow an analysis of the energy balance of the work necessary to produce the deformation of the material and to heat it. In summary, it is emphasized the importance of measuring these efforts to deepen the severe plastic deformation process that takes place, always at high strain rates.

1 Introducción

Los materiales compuestos de matriz metálica (o MMCs, del inglés Metal Matrix Composites) se conocen desde hace varias décadas [1,2]. Dado su interés, estos años han sido testigo de numerosos estudios, particularmente sobre aleaciones de aluminio reforzadas con partículas cerámicas, como carburo de silicio, SiC. La transmisión de esfuerzos mecánicos externos a través de la intercara en este sistema metal-cerámico es muy eficiente, factor esencial en la excelente respuesta macroscópica de estos MMCs a solicitaciones externas. Con ello, se mejoran notablemente muchas propiedades mecánicas como son: la resistencia mecánica, las propiedades frente al desgaste, el comportamiento en fluencia, y otras como la estabilidad térmica, etc. Todo ello sin que el peso de estas aleaciones sufra un incremento apreciable. Sin embargo, y a pesar de las propiedades tan ventajosas en comparación con las de las aleaciones sin reforzar, la irrupción de MMCs en aplicaciones cotidianas (sector de automoción, aéreo...), se está produciendo a un ritmo muy lento. Solamente para casos muy concretos (centrados en campos como el aeroespacial o en defensa), donde el factor económico no es crítico, se justifica el uso de MMCs.

Hay diversas razones por las que la implementación de estos materiales en la industria está siendo tan costosa. Una de ellas, quizá una de las más importantes, es la dificultad de soldar estos materiales para fabricar componentes específicos. Esto se debe a que los métodos convencionales de soldadura llevan consigo la fusión del material, circunstancia que, en el caso de estos MMCs, implica la destrucción de la distribución inicial del refuerzo. Esta distribución, idealmente homogénea, condiciona de manera muy sensible las propiedades mecánicas. Estas se degradan de forma considerable en la región de la unión. Además, se producen productos de reacción entre el metal y el refuerzo que son perjudiciales para las propiedades de la intercara. Estas dificultades reducen la bondad de las técnicas convencionales de soldadura para unir piezas fabricadas en estos MMCs y, con ello, su empleo masivo.

Existe, sin embargo, una técnica de unión muy diferente y que se desarrolló inicialmente para unir aleaciones de aluminio que eran difícilmente soldables por otros procedimientos, ya que se evita la fusión del material: es la técnica de soldadura por fricción-agitación (FSW, del inglés, Friction Stir Welding) [3]. Sus detalles más relevantes se describirán más adelante. Cabe destacar que con esta técnica la unión se realiza en estado sólido, por un proceso de deformación plástica severa que exige aplicar esfuerzos mecánicos elevados mediante una herramienta que gira a gran velocidad al tiempo que avanza de forma controlada. Al no haber fusión del material, no sólo se evita la destrucción de la distribución del refuerzo en el caso de MMCs, sino que se mejora. Tampoco se altera la naturaleza de la intercara matriz-refuerzo. Además, no genera humos, por lo que es una técnica respetuosa con el medio ambiente. No requiere de material de aporte, considerando incluso que los espesores de las piezas a unir pueden ser grandes, de varios centímetros, ni tampoco de un equipo sofisticado para realizar las uniones. El equipo es, en esencia, una fresadora convencional, con robustez suficiente para

aplicar y soportar esfuerzos muy elevados. Por todo ello, esta técnica se ha revelado como la ideal para la fabricación de componentes que requieran la soldadura de MMCs. Además, también permite unir materiales compuestos con aleaciones de aluminio para realizar uniones disimilares. Esto permitiría fabricar componentes en los que el compuesto se encuentre solamente en aquellas regiones donde se requieran sus propiedades, ampliando considerablemente sus posibles aplicaciones.

Dada la poca plasticidad que admiten los MMCs, la unión mediante FSW no es sencilla. Esta dificultad se acentúa en uniones disimilares, en las que hay que compatibilizar la deformación de dos materiales que pueden tener propiedades plásticas muy diferentes. Encontrar las condiciones que eviten la formación de defectos, y lograr uniones con propiedades mecánicas óptimas, no es, por ello, fácil ni inmediato. Puesto que el proceso encierra la deformación plástica a alta temperatura, es obvia la necesidad de conocer no sólo la temperatura, sino también los esfuerzos mecánicos que se generan durante el avance de la herramienta. Estos esfuerzos son, en esencia, el par necesario para que la herramienta gire, M (Nm), el esfuerzo vertical, o de forja, F_z (kN), el esfuerzo de avance, F_x (kN), y el esfuerzo lateral, F_y (kN), tomando un sistema de coordenadas ligado a la dirección normal y a la de avance de la herramienta, figura 1. Medir estos esfuerzos es esencial para conocer las condiciones en las que se produce la deformación entre las piezas a unir: tanto su magnitud como la velocidad de deformación a la que se produce.

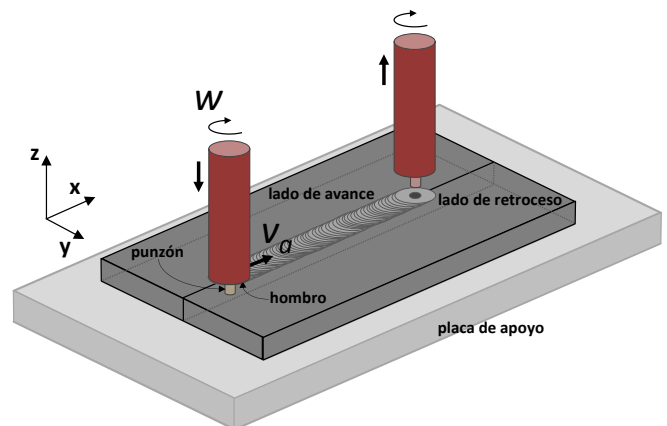


Figura 1. Esquema del proceso de FSW mostrando la disposición de la herramienta al comienzo y al finalizar la soldadura.

El propósito de este trabajo se centra, así, en profundizar en la dependencia entre los esfuerzos mecánicos requeridos para que se produzca la plasticidad del material y los de control del proceso de FSW. De esta manera se podrá progresar en el conocimiento del fenómeno de deformación plástica que tiene lugar. Como se ha mencionado, no son muchos los trabajos en los que se estudien estos parámetros mecánicos. De hecho, son prácticamente inexistentes para el caso de MMCs y uniones disimilares [4]. Así, este estudio constituye uno de los primeros, realizado en CENIM-AIMEN, sobre uniones de materiales compuestos, con hasta un 40% en volumen de refuerzo, y uniones disimilares aleación-MMC. Se realiza así mismo una revisión bibliográfica de trabajos realizados en aleaciones de aluminio [5-19]. Se presentan las correlaciones más relevantes entre los diferentes esfuerzos mecánicos, como el par y el esfuerzo de forja, bajo diferentes velocidades



de avance y rotación. Con este tipo de estudios se podrá realizar un análisis del balance entre la energía necesaria para deformar el material y para calentarlo. En definitiva, este estudio se centra en destacar la importancia que tiene medir estos esfuerzos si se pretende profundizar en el proceso de deformación plástica severa, muy condicionado por las propiedades de los materiales a unir.

2 La técnica de soldadura por fricción-agitación, FSW

La técnica de FSW consiste en esencia en hacer pasar un punzón entre las superficie en contacto de las piezas a unir que gira a gran velocidad, w , mientras avanza a velocidad controlada, v_a , Figura 1. El proceso es, en cierto modo, similar al de una fresadora haciendo un trabajo de mecanizado. En el avance, el punzón deforma las regiones adyacentes, deformando el material y transportándolo desde la zona delantera hacia la trasera. Las piezas se calientan gracias a la fricción que simultáneamente se produce en la superficie de contacto entre un “hombro” y las piezas. El hombro y el punzón forman la parte esencia de la herramienta. El hombro se apoya sobre la superficie de las piezas generando, además de fricción, un estado de esfuerzos triaxial, que condiciona y facilita la deformación del material sin que éste “escape” de la superficie, y sin que aparezcan defectos (siempre que los parámetros del proceso sean los “adecuados”). Puesto que generalmente se emplean fresadoras convencionales para realizar estas uniones, no siempre se conocen los diferentes esfuerzos que se están desarrollando mientras se realiza la unión.

3 Materiales y parte experimental

Los materiales compuestos y aleaciones en los que se han realizado uniones, similares y disimilares, son los que se resumen en la tabla 1.

Material	Suministrador
2124Al	Alustock
2124Al/25%SiCp	AMC-Materion
6061Al	Alustock
6061Al/40%SiCp	AMC-Materion

El equipo empleado para realizar las uniones, ubicado en AIMEN, es un modelo ISTIR PDS, de MTS, especialmente diseñado y fabricado para realizar este tipo de soldaduras. Es capaz de controlar y medir los parámetros relevantes del proceso: en particular, la velocidad de avance, v_a , la de rotación, w , así como los esfuerzos antes definidos, M , F_x , F_y , y F_z , mediante sensores adecuados. Se han realizado, así, uniones similares (entre el mismo material) y uniones disimilares. Para este caso, las uniones se han realizado siempre entre una aleación y un compuesto con matriz igual a la de la aleación. En la Tabla 2 se recogen los valores de los parámetros de control, v_a (mm/min) y w (rpm) así como los esfuerzos medios alcanzados para las diferentes uniones realizadas en el compuesto con 40%SiC.

La herramienta empleada, fabricada en una sola pieza en material ultra-duro WC-Co, dispone de un punzón sin rosca, de forma cónica y con tres caras planas. El diámetro del hombro, del punzón, y la longitud del punzón son, respectivamente: 25, 7.2–6.35, y 7.6 mm. Las uniones se realizaron en chapas de 8 mm de espesor, y la placa de apoyo

empleada, figura 1, era de acero. Las uniones se realizaron controlando la posición del hombro sobre la superficie de las chapas.

Cabe destacar que uno de los logros de este grupo de investigación ha sido minimizar el desgaste de la herramienta durante la unión de estos materiales, algo muy común en MMCs. Esto se ha conseguido empleando herramientas sin rosca y fabricadas en este material ultra-duro. Las partículas cerámicas, de elevada dureza, son un foco ideal para que se produzca un rápido desgaste en herramientas fabricadas en acero convencional, y con aristas agudas (cuando tienen rosca) que, por otro lado, facilitan el flujo plástico.

4 Revisión Bibliográfica

Además de los experimentos llevados a cabo en este trabajo, se ha realizado un análisis de datos publicados, todos ellos sobre uniones en aleaciones de aluminio [5-19]. Aparte de los relativos a las pruebas realizadas por este grupo [4], no se han encontrado en la bibliografía datos de parámetros mecánicos en uniones realizadas en MMCs o uniones disimilares.

5 Resultados y discusión

Los parámetros de control así como los resultados de los esfuerzos mecánicos obtenidos de las uniones realizadas en esta investigación, para el caso de la aleación 6061Al y el compuesto con esta misma matriz de aleación de aluminio, tanto similares como disimilares, se resumen en la Tabla 2.

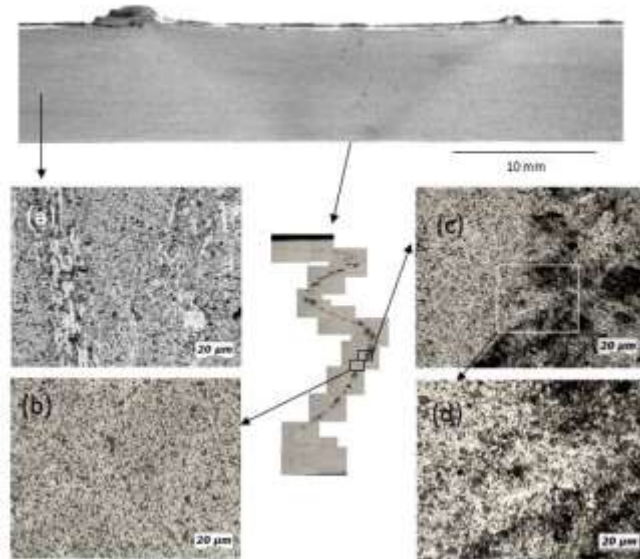


Figura 2. Sección transversal de una unión realizada en el compuesto 2124Al/25%SiCp ($w=400$ rpm, $v_a=20$ mm/min) mostrando algunos de los detalles de la microestructura en el material base y en la zona de junta, apenas perceptible.

Los valores de w y v_a usados las uniones realizadas en el compuesto 2124Al/25%SiC se resumen en [4].

En la figura 2 se muestra la microestructura de la sección transversal de un cordón de una soldadura realizada sobre el material compuesto 2024Al-25%SiC, y en la figura 3 algunas uniones disimilares 6061Al-6061Al/40%volSiC obtenidas bajo diferentes condiciones, Tabla 2. Se aprecia la ausencia de defectos, lo que da cuenta de la bondad de esta técnica para conseguir uniones fiables entre estos materiales.



En la figura 2 se aprecia la forma trapezoidal de la zona de la unión en el material compuesto, más ancha en la parte superior. Es la zona termomecánicamente afectada, TMAZ. En su interior se observa una línea curva que revela la frontera entre los materiales antes de la unión. Pone de manifiesto la no homogeneidad del flujo plástico. Es relevante cómo mejora la distribución del refuerzo en la zona batida, en la parte central, respecto el material base, figuras 2a) a 2b). Así mismo, se aprecian algunos defectos asociados a la falta de unión a nivel muy local, figuras 2c) a 2d).

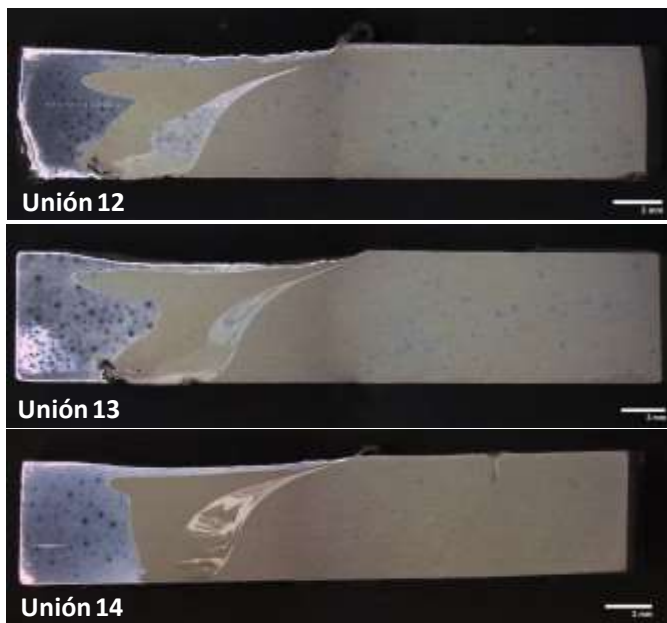


Figura 3. Sección transversal de uniones disimilares entre la aleación 6061Al y el compuesto 6061Al/40%SiCp (el lado derecho es el material compuesto). Se aprecia la ausencia de defectos, y la frontera entre ambos materiales, lo que da cuenta de la dependencia del flujo plástico con las condiciones de unión.

En la figura 3 se distinguen varias uniones disimilares 6061Al-6061Al/40%SiCp, Tabla 2. Apenas se observan defectos, alcanzándose uniones con propiedades mecánicas aceptables. También, se comprueba cómo cambia la forma de la frontera de la unión, lo que da cuenta de la variación del flujo plástico con las condiciones a las que se realizan.

Con el fin de entender el flujo plástico que tiene lugar durante este proceso, es interesante buscar correlaciones entre los distintos parámetros, como por ejemplo, la que se encuentra entre M y F_z . Esta correlación se muestra en la figura 4a) para uniones realizadas en diversas aleaciones de aluminio [5-13]. Para mayor claridad, se incluye en la figura 4b) el detalle de los datos del recuadro inferior izquierdo de esta gráfica. Se aprecia que M y F_z toman valores en un amplio intervalo. A pesar de que es difícil establecer comparaciones entre los resultados obtenidos en las diferentes aleaciones (se emplean diversas condiciones, espesores, etc), en todos los casos se observa una dependencia similar: se produce una reducción de M , más o menos lineal, a medida que disminuye F_z . Esta tendencia pone de relieve el aumento de las fuerzas de fricción conforme aumenta F_z , de acuerdo con la relación de Coulomb. Además, se aprecia que el valor de M extrapolado a $F_z=0$, M_0 , es positivo. Tal como se ha propuesto en [4], M_0 debe estar ligado al par que ejerce el punzón sobre el material durante el avance de la herramienta, sin la contribución de la

superficie del hombro sobre la muestra, ya que $F_z=0$. Al valor M_0 , deben contribuir tanto la fricción como la deformación plástica del material durante el avance, igual que ocurre para el esfuerzo que realiza el hombro sobre la muestra. El balance entre una y otra contribución depende de varios factores, como la relación $M-F_z$, los parámetros de control, además de consideraciones geométricas (espesor de chapa, tamaño y forma del punzón, etc.). Debido a que la geometría y los niveles de esfuerzos en uno y otro caso no son los mismos, el balance energético debido a la fricción y a la deformación plástica en la superficie del punzón es diferente de la del hombro.

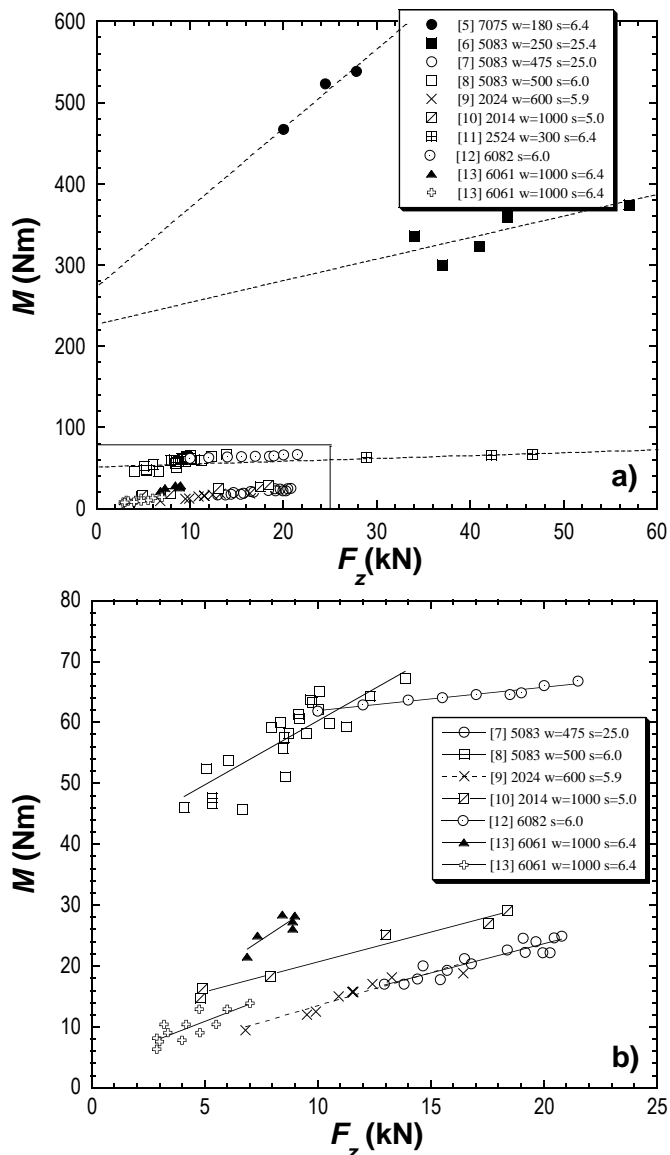


Figura 4. Correlación $M-F_z$ en uniones realizadas en aleaciones de aluminio [5-13]. El recuadro detalla la aleación, la velocidad de rotación, w (rpm), y el espesor, s (mm). En b) se muestra los datos de la esquina inferior izquierda de la gráfica anterior. El número entre corchetes indica la referencia del trabajo. Los dos grupos de datos de la referencia [13] corresponden a diferentes punzones.

De la misma manera que existe la dependencia entre M y F_z , resumida en las gráficas de la figura 4, se encuentra una relación proporcional entre el esfuerzo de avance, F_x , y la velocidad de avance, v_a , figura 5. En esta figura se observa esta dependencia para uniones practicadas en diversas



aleaciones de aluminio [6,9,13-15]. Como antes, se aprecian correlaciones aproximadamente lineales, con pendientes diferentes y valores de la ordenada en el origen también diferentes, aunque generalmente positivas. Estas correlaciones, que también abarcan un amplio intervalo de valores de F_x y v_a (corresponden a uniones realizadas en muy diversas condiciones), también dependen de las propiedades plásticas de los materiales. El valor de la ordenada en el origen, F_x^0 , corresponde al esfuerzo horizontal para el caso en el que $v_a=0$, es decir, cuando la herramienta no avanza. En estas condiciones debería cumplirse, por simetría del sistema, que $F_x=F_y$ (al ser $v_a=0$). El aumento de F_x con v_a debe estar relacionado con el comportamiento potencial de la tensión de fluencia, σ , con la velocidad de deformación, $\dot{\epsilon}$, a través del exponente n , según la relación,

$$\sigma = k \dot{\epsilon}^n \tag{1}$$

donde k es una constante que depende de la microestructura del material y la temperatura a la que tiene lugar el proceso de deformación [20].

Las correlaciones de la figura 5 también sugieren que así como en la zona delantera del punzón F_x aumenta con v_a , en la zona trasera debería disminuir. Esto es consistente con el hecho de que el transporte de material ocurre desde la zona de delantera, donde la deformación y el transporte de material debe ser máximo, hacia la trasera. Revela también que el balance entre fricción y deformación para distintos ángulos, θ , con la dirección de avance debe ser también diferente. La deformación debe ser máxima en la dirección de avance, $\theta=0$, y mínima en la dirección posterior, $\theta=\pi/2$.

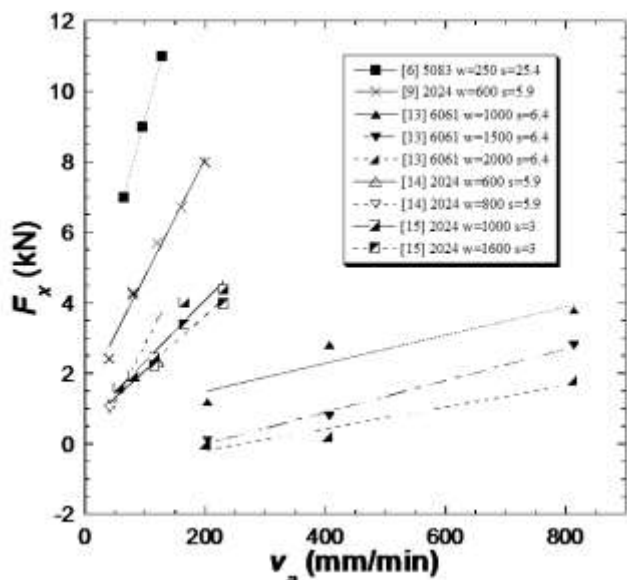


Figura 5. Correlación F_x - v_a en uniones similares realizadas en aleaciones de aluminio [6,9,13-15]. Se indica la aleación así como la velocidad de rotación, w , y el espesor, s , en cada caso. El número entre corchetes indica la referencia del trabajo.

Al igual que en las aleaciones de aluminio [5-19], en las uniones en materiales compuestos y en uniones disimilares realizadas en este estudio se encuentran correlaciones M - F_z parecidas, como se muestra en la figura 6. Esta similitud pone de manifiesto la importancia del flujo plástico de la matriz metálica en la unión de estos MMCs.

Finalmente, cabe considerar también la dependencia que se pone de manifiesto entre M y w , figura 7. Se aprecia de manera sistemática una caída del M a medida que w aumenta, en este caso no lineal. Esto se asocia a que un aumento de w lleva consigo un aumento de la energía aportada al sistema, H , de acuerdo con la relación [4].

$$H = M \frac{w}{v_a} \tag{2}$$

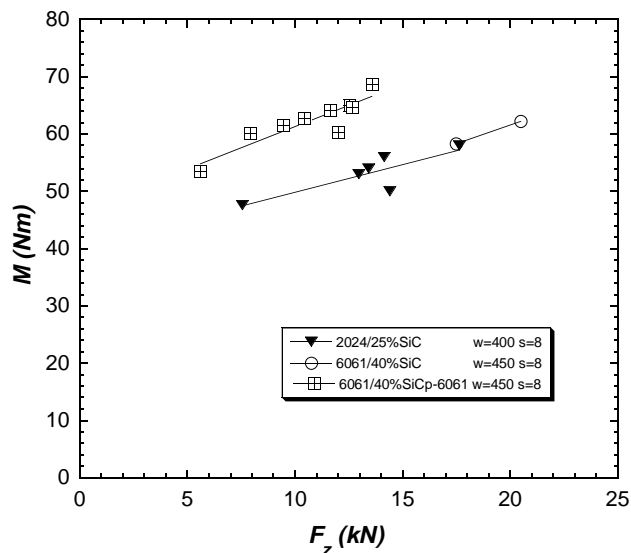


Figura 6. Correlación M - F_z para las uniones similares en materiales compuestos y uniones disimilares aleación-material compuesto, del presente estudio. Se aprecian dependencias como las de la figura 4.

Un incremento de H supone un aumento de la fricción entre la herramienta y el material, que da lugar a un aumento de la temperatura de este último y, con ello, un ablandamiento del material. Como consecuencia, se debe producir una disminución en los esfuerzos mecánicos requeridos para producir la deformación del material.

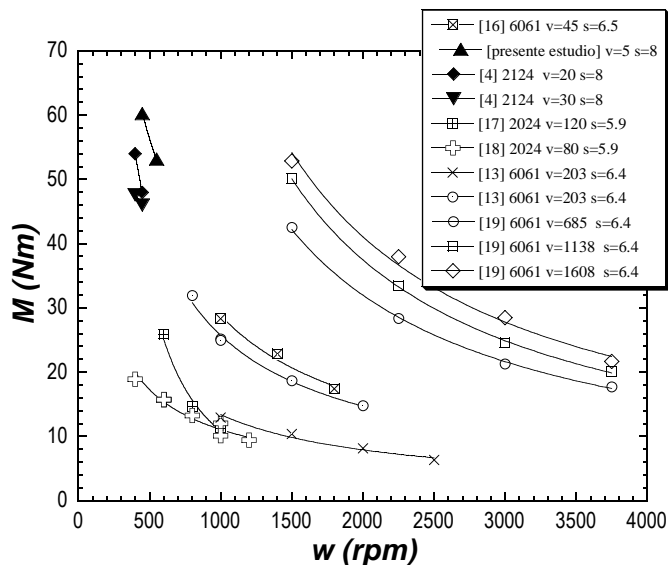


Figura 7. Correlación M - w para uniones similares realizadas en aleaciones de aluminio [4,13,16-19] y en los materiales compuestos del presente estudio. Se observa un patrón común de comportamiento, que da cuenta de la influencia de la temperatura en el proceso.



Está en curso un estudio detallado de estas dependencias en términos de las características plásticas de los materiales estudiados a diferentes temperaturas. Este tipo de análisis es esencial para lograr comprender las condiciones bajo las que se consiguen soldaduras sin defectos y con buenas propiedades mecánicas en estos materiales compuestos.

6 Conclusiones

Empleando una herramienta de material ultra-duro, WC-Co, con un punzón liso, sin rosca, se logran uniones en materiales compuestos de matriz metálica con contenidos de refuerzo cerámico muy elevados (de hasta el 40% en volumen), sin defectos, sin que se produzca desgaste de la herramienta, y con buenas propiedades mecánicas. Se consiguen también uniones disimilares con propiedades mecánicas aceptables. Es importante, en particular en uniones disimilares donde las propiedades plásticas de los metales y los materiales compuestos son muy diferentes, entender cómo se produce el flujo plástico durante el avance de la herramienta. Se

encuentran correlaciones entre los distintos parámetros que intervienen en el proceso que encierran información de las condiciones de tensión, velocidad de deformación, y temperatura bajo las que tiene lugar el proceso de deformación plástica severa. Las correlaciones que se observan en este estudio se han comparado con datos recogidos en la bibliografía para diversas aleaciones de aluminio, dada la ausencia de datos en uniones realizadas en materiales compuestos. Se observa un patrón general de comportamiento, asociado al proceso, y que da cuenta del comportamiento plástico de estos materiales a temperaturas elevadas y a altas velocidades de deformación.

Agradecimientos

Trabajo financiado por el proyecto, MAT13-48483-C2-2-P del MICINN. Se agradece así mismo a Edurne Laurín su ayuda en la preparación metalográfica de las muestras para el estudio metalográfico y a Florencia Cioffi sus trabajos previos en el material compuesto 2124Al/25%SiC.

Unión	w	Control, z	Control, F_z	F_x	F_y	F_z	M
1.- aleación-compuesto	450	7,78		0,90	0,67	12,00	60,29
2.- aleación-compuesto	450	7,78		0,59	0,61	12,56	65,02
3.- aleación-compuesto	450	7,78		0,52	0,61	12,66	64,64
4.- aleación-compuesto	450	7,78		0,51	0,54	10,46	62,68
5.- aleación-compuesto	450		6	1,28	0,71	5,60	53,45
6.- aleación-compuesto	450		8	0,73	0,47	7,93	60,16
7.- aleación-compuesto	450		10	0,51	0,57	9,45	61,48
8.- aleación-compuesto	450		12	0,56	0,60	11,63	64,19
9.- aleación-compuesto	450		14	0,77	0,61	13,58	68,60
10.- aleación-compuesto	550	7,78		0,43	0,61	9,65	63,53
11.- aleación-compuesto	650	7,78		0,47	0,67	8,48	49,26
12.- aleación-compuesto	450	7,9		1,47	0,43	16,66	69,47
13.- aleación-compuesto	450	7,9		0,85	0,40	16,73	63,87
14.- aleación-compuesto	450	7,9		0,71	0,48	11,45	56,47
15.- aleación-aleación	450	7,78		0,93	0,48	10,09	57,63
16.- aleación-aleación	450	7,78		1,05	0,45	10,35	59,99
17.- aleación-aleación	550	7,78		0,74	0,45	8,75	59,02
18.- aleación-aleación	450	7,78		0,41	0,64	8,08	45,58
19.- aleación-aleación	450		10	0,97	0,60	9,96	65,09
20.- aleación-aleación	450		12	0,51	0,66	11,26	64,82
21.- aleación-aleación	450		14	1,06	0,60	13,50	47,63
22.- compuesto-compuesto	450	7,78		1,31	0,53	17,49	58,28
23.- compuesto-compuesto	450	7,78		1,17	0,65	18,28	53,14
24.- compuesto-compuesto	450	7,78		1,60	0,67	20,50	62,23

Tabla 2. Parámetros de control y esfuerzos mecánicos de las uniones realizadas con la aleación Al6061 y el compuesto Al6061/40%SiCp. Es siempre $v_s=5$ mm/min y $s=8$ mm. En las uniones disimilares (compuesto-aleación) la zona de avance, figura 1, coincide con el material compuesto.



Referencias

- [1] V.C.Nardone, J.R.Strife, *Metallurgical Transactions*, **18A** (1987), pág.109.
- [2] T.Christman, A.Needleman, S.Suresh, *Acta Materialia*, **37** (1989) pág.3029
- [3] Thomas, W M et al: "Friction Stir Butt Welding" International patent application No•PCT/GB92/02203 and GB patent application No.9125978.8, 6, December 1991.
- [4] R. Fernández, J. Ibáñez, F. Cioffi, D. Verdera, G. González-Doncel, *Science and Technology of Welding and Joining*, en prensa.
- [5] A.P.Reynolds, W.Tang, Z.Khandkar, J.A.Khan, K.Lindner, *Science and Technology of Welding and Joining*, **10**, 2, pág. 190-199 (2005).
- [6] K..I.Colligan, J.Su, J.R.Pickens, *Friction Stir Welding and Processing II*, San Diego (California) (2003).
- [7] R.Kumar, K.Singh, S.Pandey, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **22**, pág. 288-298 (2012).
- [8] D.G.Hattingh, C.Blignault, T.I.van Niekerk, M.N.James, *Journal Of Materials Processing Technology*, **203**, pág. 46-47 (2008).
- [9] R.Jain, S.K.Pal, S.B. Singh, *Journal of Manufacturing Processes*, **23**, pág. 278–286 (2016).
- [10] K.Ramanjaneyulu, G.M. Reddy,A.V. Rao, *Transactions Indian Institute of Metals*, **67**, 5, pág. 169-780 (2014).
- [11] J.Yan, M.A.Sutton, A.P.Reynolds, *Science and Technology of Welding and Joining*, **10**, 6, pág. 725-736 (2005).
- [12] S.Zimmer, L.Langlois, J.Laye, J.C.Goussain, P.Martin, R.Bigot, *International Journal Materials Forum*, **2**, Suppl 1, pág. 299–302 (2009).
- [13] D.E.Clark, K.S.Miller, C.R.Tolle, *7th International Conference on Trends in Welding Research*, Georgia (USA), (2005).
- [14] H.Su, C.S.Wu, A.Pittner, M.Rethmeier, *Journal of Manufacturing Processes*, **15**, pág. 395-500 (2013).
- [15] A.Astarita, A.Squillace, L.Carrino, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **23**, 10 pág. 3754–3761 (2014).
- [16] M.Nourani, A.S.Milani, S.Yannacopoulos, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **79**, pág. 1425–1441 (2015).
- [17] H.Su, C.S.Wu, A.Pittner, M.Rethmeier, *Journal of Manufacturing Processes*, **15**, pág. 495–500 (2013).
- [18] R.Jain, S.K.Pal, S.B.Singh, , *Journal of Manufacturing Processes*, **23**, pág. 278–286 (2016).
- [19] R.Crawford, G.E.Cook, A.M.Strauss, *International Journal Modelling, Identification and Control*, **1**, 2, pág. 101-106 (2006).
- [20] R. Fernández, G. González-Doncel, *Acta Materialia*, **56**, pág. 2549-2562 (2008).

