

Desarrollo del proceso tixoforjado lateral para la fabricación de estructuras híbridas acero-aluminio



Development of tixoforging process for the production of steel-aluminum hybrid structures

Erik Echaniz-Hernandez¹, Nuria Herrero-Dorca², Iñaki Hurtado², Iñigo Loizaga³

¹ CIC marGUNE. R&D Department. Polígono Azitain, 3 - 20600 Eibar. Tfno: +34 943 740175. eechaniz@margune.org

² Mondragon Unibertsitatea, Goi Eskola Politeknikoa (MGE). Loramendi, 4 - 20500 Arrasate. Tfno: +34 943 712185

³ CIE Automotive. Product Development Manager. C/ Arzubia, 10 - 48220 Abadiano. Tfno: +34 946 217210

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7808> | Recibido: 04/9/2015 • Aceptado: 10/11/2015

ABSTRACT

Iron and aluminum alloys are among the most important materials in automotive industry because of their good properties. Combining both materials in a hybrid structure will implement the integrated load-supporting of steel with the advantages of aluminum in weight reduction. However, due to the highly differing physical and mechanical properties, metallurgical bonds between these materials are difficult to achieve with traditional welding methods. These differences in properties lead to the formation of hard and brittle intermetallic compounds (IMC) along the transition line which will significantly decrease the mechanical properties of the joining area.

Production of hybrid components by tixoforging of aluminum on steel is a promising method to manufacture near net shape components with good mechanical properties in a single process step. This process allows to join dissimilar materials in semisolid state at lower temperatures than traditional welding methods, causing a decrease in thickness of the intermetallic layer.

In this work, the mount of the front cradle of the car was manufactured in A356 aluminum alloy and joined to a S355JH2 quality steel tube in one step by tixoforging method. In order to determine the quality of the component and the joint a complete mechanical and a qualitative metallographic analysis was carried out. The results revealed that quality hybrid components can be achieved regarding the intermetallic bond, although geometric redesign is necessary to reduce local stresses.

Keywords: Aluminum-Steel hybrid structures, semi-solid, joining, intermetallic phase, tixoforging, lightweight.

RESUMEN

El acero y las aleaciones de aluminio son algunos de los materiales más importantes en la industria del automóvil debido a sus buenas propiedades. La unión de ambos materiales permite la creación de nuevas estructuras híbridas que combinan la dureza y resistencia al desgaste de los aceros con la baja densidad de las aleaciones de aluminio. Sin embargo, debido a las propiedades físicas y mecánicas dispares de estos metales, es difícil obtener uniones metalúrgicas con métodos de soldadura tradicionales. Estas diferencias en las propiedades conducen a la formación de compuestos intermetálicos (IMC) en la intercara que por su naturaleza dura y frágil resultan perjudiciales para su aplicación final.

La producción de estructuras híbridas mediante tixoforjado de aluminio sobre acero en un único paso es un proceso prometedor para la fabricación de componentes funcionales con buenas propiedades mecánicas. Este proceso permite unir materiales disímiles en estado semisólido, de forma que la unión de los materiales ocurre a una temperatura inferior que en los métodos tradicionales de soldadura, provocando una disminución del espesor de la capa intermetálica.

En el presente trabajo, se ha fabricado un componente real de automoción llamado brazo de la cuna delantera en la aleación de aluminio A356 y unido a un tubo de acero de calidad S355JH2. El conformado y la unión de los metales se ha realizado en un solo paso por el proceso de tixoforja lateral. Para determinar la calidad de la pieza así como la bondad de la unión se ha llevado a cabo un análisis mecánico y metalográfico cualitativo. Los resultados han revelado que es posible fabricar los componentes híbridos de calidad en cuanto a la unión intermetálica aunque se hace necesario un pequeño rediseño geométrico para reducir tensiones locales.

Palabras clave: Estructuras híbridas acero-aluminio, semisólido, unión, fase intermetálica, tixoforjado, ligero.

1. INTRODUCCIÓN

Las exigencias actuales de ahorro de energía en el sector del transporte promueven la optimización del diseño de componentes y la sustitución de componentes pesados por otros más ligeros de alta resistencia [1]. Se estima que por cada kilogramo de peso reducido en un vehículo disminuye en 20 kg las emisiones de dióxido de carbono y el uso de combustible se reduce en un 6-7 % por cada 10 % de peso eliminado del vehículo [2]. El bastidor del coche ofrece un alto potencial para la construcción ligera, ya que supone aproximadamente el 40 % del peso total del vehículo. El aligeramiento no sólo es conveniente debido a su impacto en la economía de combustible, sino que incide directamente en el rendimiento del producto donde la masa es crítica. Por ejemplo, la reducción de la masa total del peso no suspendido disminuye significativamente el ruido y las vibraciones en vista a mejorar el confort y el manejo del vehículo.

Los métodos tradicionales para aligerar el vehículo giran en torno a la sustitución de materiales, donde un material es reemplazado por otro. Sin embargo, debido a las propiedades mecánicas exigidas por la industria del automóvil la sustitución de materiales no es siempre posible. Para solucionar este problema, se pueden seguir diferentes estrategias. El primer método implica la opti-

mización en el diseño y/o el proceso de producción. Por ejemplo, es posible una reducción de los puntos de soldadura empleando nuevas técnicas de unión tales como soldadura láser o soldadura por fricción [3, 4]. El segundo método consiste en reemplazar los materiales de alto peso específico por materiales de menor densidad, sin comprometer otras propiedades tales como la rigidez o la resistencia al desgaste.

El acero y el aluminio son los materiales de construcción más importantes para la producción en masa de estructuras de automoción. La unión de ambos materiales permite la creación de nuevas estructuras híbridas que combinan la dureza y resistencia al desgaste de los aceros con la baja densidad de las aleaciones de aluminio [5-7]. Sin embargo, debido a las propiedades físicas y mecánicas dispares de estos metales como el punto de fusión, el coeficiente de expansión lineal y la densidad resulta difícil obtener uniones metalúrgicas [8]. Por otra parte, la interacción química de estos metales conduce a la formación de compuestos intermetálicos Fe_xAl_y en la intercara que por su naturaleza dura y frágil resultan perjudiciales para su aplicación final [9-12].

Actualmente, la gran mayoría de tecnologías de unión híbridas están basadas en procesos de soldadura convencionales, tales como soldadura MIG [13], TIG [6], por resistencia [14] o soldadura por fricción [15], que se utilizan para unir chapas de acero con chapa de aluminio con espesores comprendidos entre 0,5 y 3 mm. Por lo tanto, surge la necesidad de métodos de unión de bajo coste que permitan fabricar estructuras híbridas masivas para la industria automotriz. El conformado en estado semisólido, o *tixoconformado* de aluminio sobre acero, es un método prometedor para la fabricación de componentes "near net shape" en un solo paso.

Tixoconformado es una ruta alternativa para la fabricación de piezas, que combina las ventajas de los procesos de forja y de fundición. Sus ventajas radican en la reducción del material empleado, las operaciones de mecanizado finales y de los esfuerzos de conformado [16]. Los procesos de forja permiten fabricar componentes geoméricamente complejos, pero la relación entre la longitud del flujo y el grosor de la pared es mucho menor que en el conformado semisólido. En comparación con la fundición, las piezas fabricadas mediante conformado en estado semisólido presentan menor cantidad de defectos asociados a llenados turbulentos y atrapamientos de aire [17]. El tixoforjado lateral es una operación de conformado de la familia del tixoconformado. Este proceso, permite unir materiales disimilares en estado semisólido de forma que la unión de los materiales ocurre a una temperatura

inferior que en los métodos tradicionales de soldadura, provocando una disminución del espesor de la capa intermetálica.

No obstante, esta tecnología de unión es relativamente reciente. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo investigaciones fundamentales para obtener información de las características generales del proceso de unión entre el metal base (aluminio) y el inserto de acero. En el presente trabajo se han fabricado componentes híbridos de acero-aluminio para investigar el efecto de las condiciones de procesamiento en la resistencia de la unión. Por otra parte, se han analizado las propiedades mecánicas del componente para demostrar la viabilidad de este tipo de estructuras en comparación con otras soluciones convencionales tales como las uniones de acero y aluminio soldadas.

2. MATERIALES Y METODOS

Unidad de inducción: El sistema utilizado en este trabajo es un equipo de calentamiento vertical de baja frecuencia (<200 Hz), que permite una penetración más profunda de la corriente y, por tanto, un calentamiento del tocho rápido y homogéneo. El sistema está equipado con una bobina de cobre electrolítico con un diámetro interior $\varnothing i = 100$ mm y una altura $h = 100$ mm.

El calentamiento de los tochos hasta el estado semisólido es una etapa crítica ya que la calidad de las piezas producidas depende en gran medida del proceso de calentamiento. En el caso en el que la fracción líquida sea muy pequeña, la fluidez de la aleación no es suficiente y puede causar problemas de llenado. Por el contrario, si la fracción líquida es demasiado grande, además de causar un llenado turbulento, pueden ocurrir pérdidas de material y la manipulación de los tochos puede resultar complicada. Con el fin de obtener una estructura globular adecuada, así como el correcto llenado de las cavidades, el calentamiento debe ser tan rápido como sea posible y la distribución de temperatura por todo el material tiene que ser uniforme. La Fig. 1 muestra la evolución de la fracción líquida en función de la temperatura:

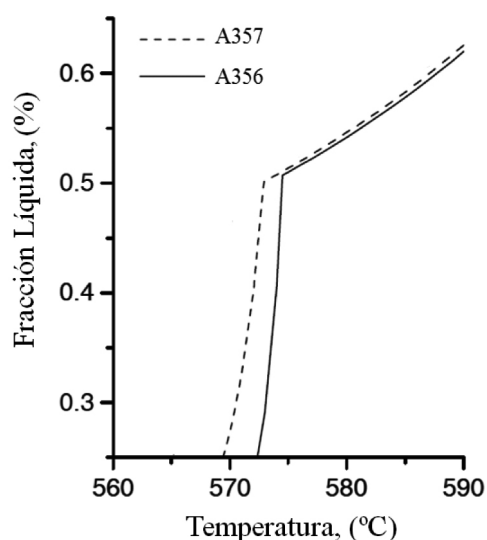


Fig. 1: Representación gráfica de la fracción líquida en función de la temperatura



Fig. 2: Instalaciones de Mondragon Unibertsitatea para el tixoconformado de estructuras híbridas

todo el utillaje hasta 300 °C. Por otra parte, se ha introducido una automatización integrada del calentamiento del tocho con el fin de conseguir la reproducibilidad requerida para el proceso. La Fig. 2 muestra los equipos utilizados para el proceso de conformado:

Descripción del prototipo: La geometría seleccionada para este trabajo es un brazo de la cuna delantera (BCD). El BCD es un elemento del subchasis o cuna-motor de un vehículo de clase C, (Tamaño medio, compacto), que a su vez se compone de dos partes: el "Crossmember" y el "Crash Extension". El subchasis se amarra rigidamente a la estructura principal del coche, (body in white), por medio de uniones atornilladas y provee al vehículo de zonas apropiadas para amarrar componentes de la dirección, la suspensión, soportes de motor, el Crash Extension y varias pantallas, mangueras, brackets y líneas.

El dibujo CAD de la estructura híbrida se muestra en la Fig. 3:

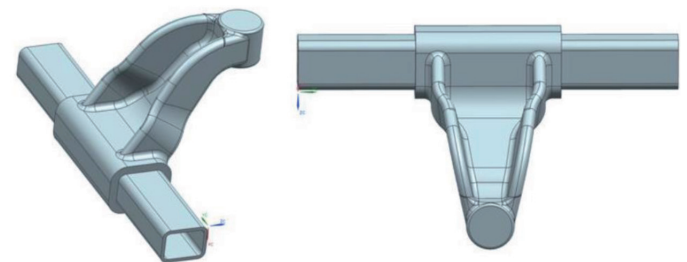


Fig. 3: Dibujo CAD del brazo de la cuna delantera

Materiales: El aluminio utilizado en este trabajo fue suministrado por SAG Aluminium Group en formato de barra cilíndrica de Ø= 76,2 mm y 3 m de longitud con estructura globular como se muestra en la Fig. 4. La microestructura de aluminio globular consiste en un esqueleto de granos con forma globular interconectados que cuando se calienta hasta una temperatura dentro del rango semisólido forma una suspensión de partículas sólidas en una matriz líquida. Este tipo de estructura es primordial para el proceso de tixoforjado puesto que durante la operación de conformado las fuerzas de cizalla generadas por el punzón rompen estas conexiones resultando en un descenso brusco de la viscosidad. La estructura globular necesaria para el tixoforjado se obtiene mediante agitación electromagnética.

Las aleaciones de aluminio seleccionadas son de la serie A3XX ya que es la familia más utilizada para piezas de fundición. Estas aleaciones solidifican en un amplio intervalo de temperaturas (555 °C-615 °C) y por lo tanto son adecuadas para ser procesadas en estado semisólido. Las aleaciones de aluminio A356 y A357 son conocidas por sus buenas propiedades mecánicas así como excelentes características de colabilidad y de alta resistencia a la

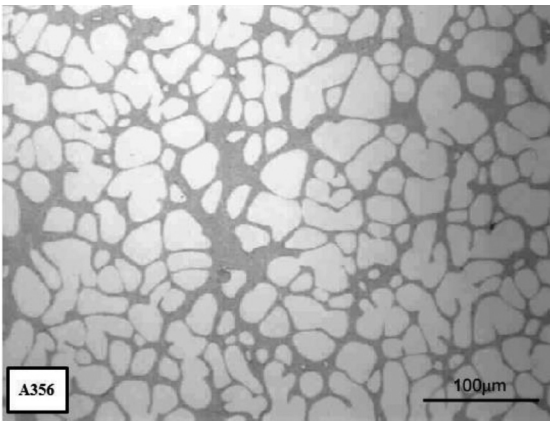


Fig. 4: Microestructura globular de la aleación A356 suministrada por SAG

corrosión. Además, es posible la mejora de las propiedades mecánicas mediante precipitación de la fase Mg₂Si después de un tratamiento térmico adecuado, especialmente con el tratamiento T6 [18, 19]. Este tratamiento consiste en una etapa de solubilización a 540 °C durante 8 h, seguido de un enfriamiento brusco en agua y un envejecimiento posterior a 157 °C durante 5,8 h. La Tabla 1 muestra los resultados del análisis químico realizado por el centro tecnológico IK4-Azterlan.

Para realizar la unión híbrida se ha utilizado un tubo de acero estructural de calidad S355J2H con 355 MPa de límite elástico, el cual es de uso común en aplicaciones industriales. Este material es el que se usa actualmente en la cuna delantera del motor. La Tabla 2 muestra la composición química de este material analizado por Condesa Fabril.

Se han utilizado 2 temperaturas para los tubos de acero: ambiente y 300° C. Los tubos fueron precalentados con el objetivo de minimizar el choque térmico entre el inserto de acero y aluminio. De esta manera el enfriamiento del aluminio es más lento y se prolonga el tiempo de contacto entre ambos metales a altas temperaturas. Esto permite mejorar la adherencia entre el acero y el aluminio ya que a mayores temperaturas de intercara es mayor la velocidad de difusión.

Caracterización del componente: Para demostrar la viabilidad de este tipo de estructuras en comparación con las soluciones tradicionales, como las estructuras de acero y aluminio soldadas, se ha llevado a cabo la caracterización mecánica del componente.

Para determinar la resistencia mecánica de la unión se han realizado 3 ensayos definidos por CIE Automotive. Por un lado se realizó un ensayo de tracción para determinar la carga estática necesaria para conseguir una deformación permanente superior al 1 % en la pieza o su rotura. Por otro lado se realizó un ensayo de recuperación elástica en el que se aplicaron 4,7 kN. Por último, con objeto de estimar la vida útil del componente se ha caracteri-

Notación UNS	Composición química (% en peso)							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
A356	7,2	0,13	0,016	0,006	0,3	0,0019	0,1	Balance
A357	6,9	0,15	0,005	0,01	0,48	0,0029	0,078	Balance

Tabla 1: Composición química real de las aleaciones de aluminio

Composición química (% en peso)										
C	Mn	Si	P	S	Nb	Ti	V	Mo	B	Al
0,06	0,49	0,01	0,015	0,009	0,0043	≤0,005	≤0,01	≤0,01	≤0,001	≥0,026

Tabla 2: Composición química real del tubo de acero

zando su comportamiento a fatiga en régimen dinámico siguiendo una curva senoidal con amplitud de 4,7 kN y una frecuencia de 5 Hz. Se han considerado $1,2 \cdot 10^6$ ciclos como *run-out*. El banco es el mismo que se ha utilizado para los ensayos de tracción y recuperación elástica.

La Fig. 5 muestra el punto y la dirección donde se aplicaron las fuerzas.

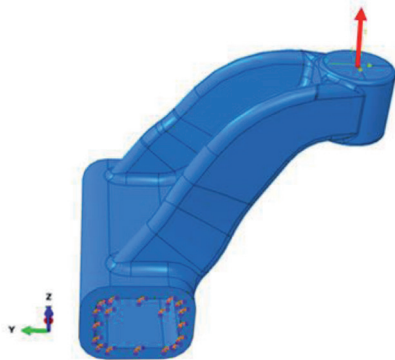


Fig. 5: Esquema de aplicación de cargas

En la Fig. 6 muestra el montaje experimental para la caracterización mecánica del brazo de la cuna delantera.



Fig. 6: Banco de ensayos servo hidráulico de CIE Automotive

Por otro lado, se ha realizado un análisis a nivel cualitativo de la unión entre el aluminio y el acero. Para ello se ha sacado radiografías de la pieza mediante rayos X y se han preparado varias secciones mostradas en la Fig. 12 con el fin de observar la intercara con mayor detalle.

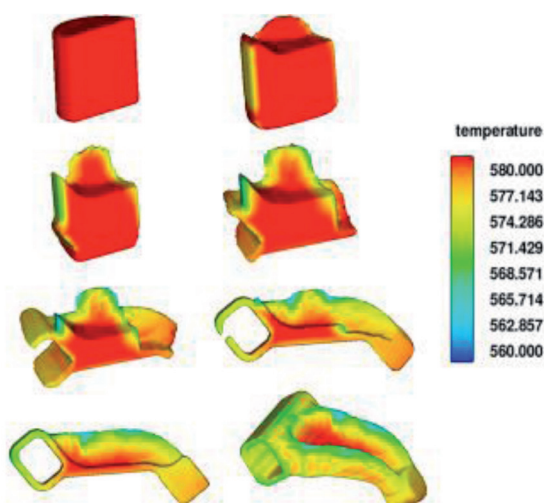


Fig. 7: Proceso de llenado para un tocho de Ø76,2 x 70 mm de aluminio A356. T° del material 580 °C, T° del molde 300 °C, velocidad de estampación 400 mm/seg.

3. RESULTADOS

Para determinar las condiciones óptimas de llenado y predecir los flujos de material dentro de la cavidad, se han llevado a cabo simulaciones numéricas con la herramienta comercial *Flow 3D*®. Los objetivos de estas simulaciones son por un lado, conseguir un llenado completo del molde y por otro lado, evitar puntos débiles en la unión debido a la unión de los frentes de solidificación del aluminio. A pesar de que *Flow 3D*® dispone de ecuaciones para simular el comportamiento tixotrópico, no proporciona los valores de los parámetros de estas. En este sentido, se decidió implementar el modelo Quak [20]. Un ejemplo de los resultados obtenidos se muestra en la Fig. 7.

De acuerdo con las simulaciones realizadas en *Flow 3D*® los parámetros con mayor influencia en el proceso son: La fracción sólida, la velocidad de conformado, el tiempo de compactación y la temperatura del molde y del tubo. La fracción sólida está directamente relacionada con la temperatura de calentamiento del tocho de aluminio. Cuanto menor sea la fracción sólida mayor será la fluidez del material y por ende disminuirá la presión necesaria para conformar la pieza. Por otro lado, el llenado del molde y la calidad del componente están influenciados de la velocidad de conformado. Una vez se ha llenado el molde es necesario mantener la presión durante la solidificación del material (tiempo de compactación) para asegurar una microestructura interna libre de poros.

Los resultados de la Fig. 7 muestran que el proceso de llenado del molde ocurre en todo momento por encima de 560°C, es decir por encima de la temperatura de solidus (555 °C-615 °C), lo que asegura el llenado completo de la cavidad. Se han obtenido resultados similares para la aleación A357. Por otro lado, la Fig. 7 indica que los frentes de solidificación se encuentran en la zona de unión entre el acero y el aluminio.

Se han fabricado varios prototipos con el objetivo de conseguir un buen llenado del molde y validar experimentalmente el modelo de simulación. Las condiciones de conformado para la aleación de aluminio A356 han sido las siguientes: 50 % de fracción sólida (580 °C), temperatura del molde 300 °C, temperatura ambiente para el tubo y una velocidad de avance de punzón de 250 mm/seg. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 8.

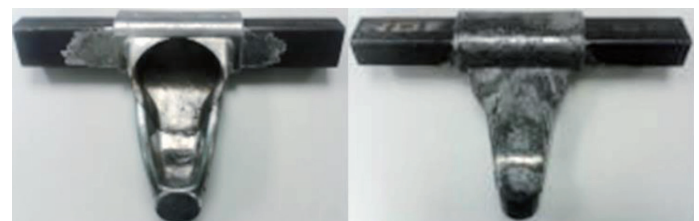


Fig. 8: Estructura híbrida obtenida mediante tixofundido

Tal como se evidencia la Fig. 8 es posible fabricar estructuras híbridas de acero-aluminio en un solo paso mediante el proceso de tixofundido lateral. De acuerdo con la literatura [21] es bien sabido que en el tixofundido un llenado laminar de la cavidad es determinante para obtener componentes de buena calidad. Para comprobar que los resultados obtenidos mediante *Flow3D*® se ajustan con los experimentales se hicieron algunos ensayos conocidos como llenados parciales. Los llenados parciales, son procedimientos de conformado donde el recorrido del punzón es interrumpido en varios puntos designados mediante insertos en la cavidad o bien bloqueando el carro de la prensa como en este caso. Los resultados obtenidos, comparando las simulaciones y los llenados parciales se exponen en la Fig. 9.

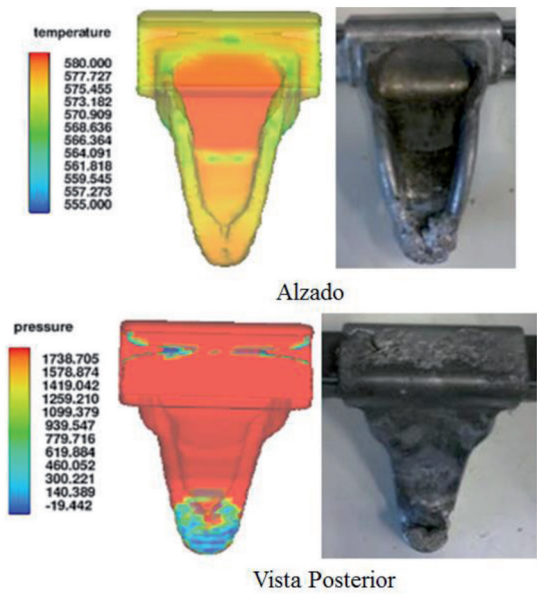


Fig. 9: Comparación de los resultados experimentales y simulados del proceso de llenado

En la Fig. 9 se pueden apreciar las zonas críticas donde no ha habido un llenado completo de la cavidad debido a la falta de compactación del material. Tanto en alzado como en el alzado posterior los defectos de llenado se concentran en la cabeza del brazo. Por otro lado también se puede ver la zona donde se juntan los dos frentes de flujo del aluminio que permite formar la unión mecánica del BCD con el tubo de acero. Estos resultados demuestran el buen ajuste del modelo numérico con la realidad.

Una vez se ha ajustado el proceso se han fabricado algunos lotes de prototipos en diferentes condiciones para determinar la influencia de cada parámetro en las propiedades finales del componente. Los parámetros utilizados se enumeran en la Tabla 3:

Parametros de conformado	
Fuerza del punzón (kN)	1200-1500
Velocidad del carro (mm/s)	320-400
Tiempo de compactación (s)	5
Tª del molde (°C)	280
Fracción líquida (%)	30-50
Temperatura del tubo (°C)	Ambiente/300

Tabla 3: Resumen de los parámetros de conformado

La Fig. 10 muestra un lote compuesto por 12 componentes, 6 de ellos están hechos con la aleación A356 y los otros 6 con la A357.

Tal y como muestra la Fig. 10 mediante el proceso de tixofundido lateral es posible obtener componentes híbridos de forma robusta y repetitiva.



Fig. 10: Lote de 12 componentes híbridos obtenidos mediante tixofundido lateral

3.1. ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA ESTRUCTURA HÍBRIDA

En caso de que los dos frentes de unión haya presencia de óxidos puede dar lugar a una mala soldadura debilitando la unión mecánica del aluminio con el inserto de acero. Para poder determinar las características de la estructura híbrida con mayor grado de detalle se ha realizado un análisis del componente desde una perspectiva mucho más próxima a la realidad industrial. Además de las propiedades mecánicas, cobra una gran importancia la ausencia de defectos tanto internos como externos. En este sentido, antes de la caracterización mecánica, se ha realizado un análisis exhaustivo de las piezas con la ayuda de rayos X. En la Fig. 11 se presentan el alzado en el lado izquierdo y la planta de la estructura en el derecho:

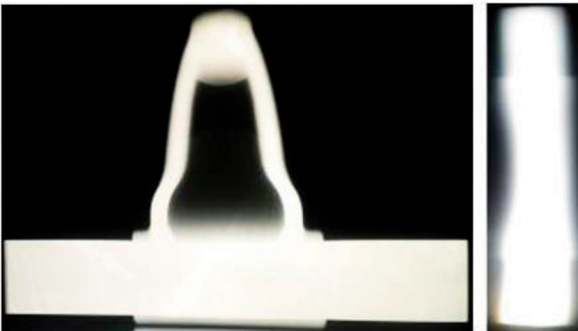


Fig. 11: Radiografías del prototipo

De los resultados obtenidos en la Fig. 11 se puede deducir que hay buena compactación del aluminio puesto que no se aprecian discontinuidades ni en el cuerpo ni en la zona de unión. Tampoco se aprecian rastros de la línea de soldadura lo que indica una buena unión entre los dos frentes de solidificación del aluminio. Por otro lado, en la imagen de la derecha cabe destacar la deformación que sufre el tubo de acero durante la etapa de compactación. La herramienta ha sido diseñada de manera que maximiza la presión ejercida en la zona de unión entre el aluminio y el inserto de acero. Se han introducido topes de acero de 25x30 mm en toda la longitud del tubo de acero para controlar la deformación que se genera en el tubo, de esta forma el aluminio necesario para llenar el hueco generado es siempre constante. Este tope no afecta a la unión.

A continuación, se han cortado varias secciones de una pieza para examinar distintos puntos de interés. En la Fig. 12 se pueden ver el cuerpo y la zona de la unión del BCD.

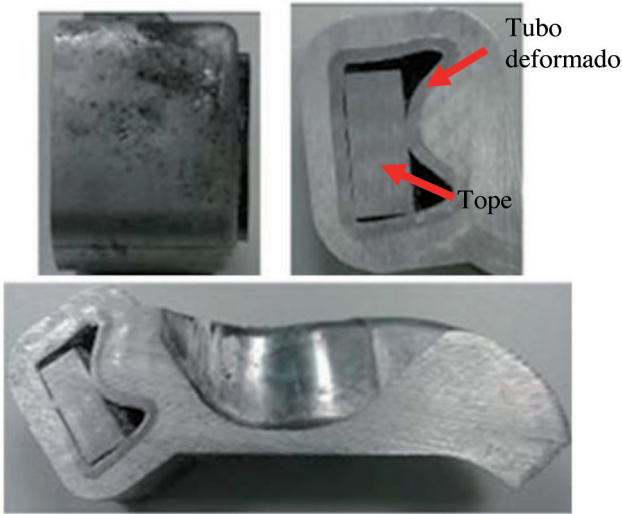


Fig. 12: Detalles de la unión, sección y exterior

En las secciones mostradas en la Fig. 12, se confirman los resultados comentados anteriormente. Por un lado, se hace patente la buena calidad del llenado y de la unión debido a que no se encuentran discontinuidades en la parte interior del componente como tampoco en la parte exterior. Por otro lado, según la Fig. 12 se puede ver la deformación sufrida por el tubo de acero; lo que genera una acumulación de aluminio en esa zona. El material acumulado en la cavidad producida por la deformación plástica del tubo ayuda a fijar el brazo de aluminio en una posición concreta, evitando desplazamientos y rotaciones del cuerpo de aluminio.

3.2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL COMPONENTE

En la Fig. 13 se muestran dos componentes con apreciables diferencias en el acabado superficial. Estas diferencias son debidas a que ambas fueron fabricadas con diferentes condiciones de ensayo. La pieza de la parte superior fue fabricada en aluminio A356 con una fracción líquida del 50 % y una velocidad de estampación 320 mm/seg. Por otra parte, la pieza de la parte inferior fue fabricada en aluminio A356 con una fracción líquida del 30 % y una velocidad de estampación 400 mm/seg.



Fig. 13: Estructuras híbridas tras un tratamiento térmico T6 y detalles de la zona de la cabeza y de la zona de la unión

Como muestra la Fig. 13 las condiciones de conformado tienen un remarcado efecto en las propiedad finales del cuerpo de aluminio. Tras realizar el tratamiento térmico se ha visto que las piezas procesadas con fracciones líquidas altas (50 %) o a velocidades bajas de conformado (320 mm/s), aparecen unas ampollas o blisters superficiales en las zonas más alejadas del punzón, es decir, la zona de la unión y la zona de la cabeza.

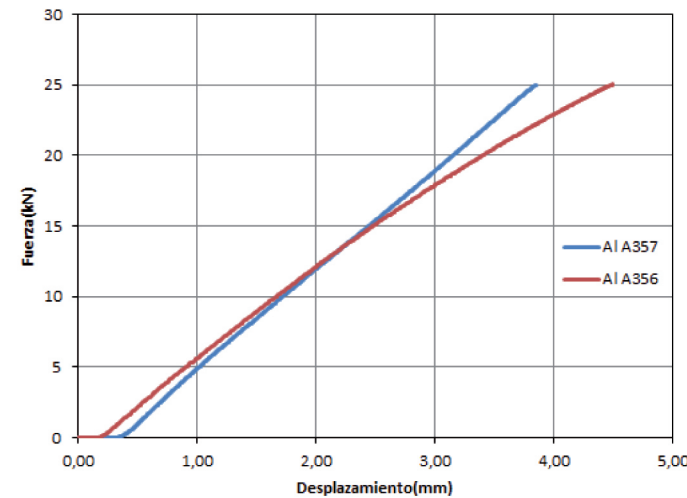


Fig. 14: Resultados del ensayo de tracción para diferentes aleaciones

Esto ocurre principalmente debido a fenómenos de segregación [22]. La segregación tiene lugar durante la solidificación de las aleaciones Al-Si-Mg. Por un lado, el líquido se enriquece de elementos de aleación y por otro lado, ocurre una disociación de la de la fase líquida respecto a la fase sólida hacia los extremos de la pieza por la presión hidrostática ejercida por el punzón, dando lugar a un componente con composición y propiedades heterogéneas. A continuación se llevaron a cabo los ensayos en régimen estático descritos anteriormente. Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción se resumen en la gráfica de la Fig. 14.

Tal y como se puede ver en la Fig. 14, tras aplicar 25 kN (fuerza máxima del actuador) el BCD se mantiene dentro del límite elástico en ambos casos. No obstante, en el inicio de la curva se aprecian desplazamientos de 0,3 y 0,4 mm respectivamente. Estos valores se corresponden con la holgura de las rótulas del actuador por lo que se puede considerar que el comportamiento del componente es completamente elástico la recuperación elástica del material es total.

Finalmente, con objeto de estimar la vida útil del componente se ha caracterizado su comportamiento a fatiga en régimen dinámico siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para las muestras analizadas:

Nº componente	Nº ciclos	Rotura
A356 -7	453.806	SI
A356-21	492.607	SI

Tabla 4. Nº de ciclos obtenidos hasta el fallo del componente en el ensayo de fatiga

Los datos de la Tabla 4 indican que la pieza sufre un fallo prematuro en condiciones descritas en el apartado caracterización del componente, es decir, una carga de $\pm 4,7$ kN y una frecuencia de 5 Hz. La Fig. 15 muestra las zonas de fallo del componente.

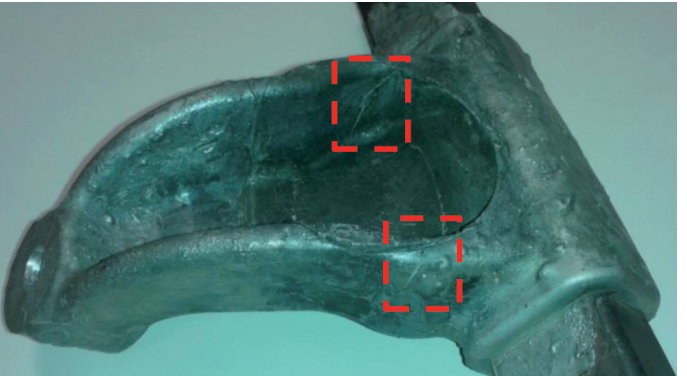


Fig. 15: Fallo prematuro a fatiga

Aunque la geometría ha superado la prueba de carga, no ha sido capaz de resistir el número de ciclos impuestos para fatiga, por ello no se considera válida para usarse en aplicaciones de automoción. En vista de los resultados de la Fig. 15 no quedan claras las causas del fallo prematuro ya que podría ser debido a la concentración de tensiones localizadas o a la combinación del esfuerzo flector y momento de inercia de la sección empotrada. Para obtener unas conclusiones más claras en un posterior trabajo se realizará un análisis más profundo mediante elementos finitos.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han cubierto los aspectos más relevantes de la tecnología de forja en estado semisólido para la producción de estructuras híbridas de acero- aluminio, estableciéndose una metodología que cubre el diseño la modelización y la caracterización de los componentes. Asimismo, se ha implementado una herramienta de simulación para predecir el comportamiento del material durante la operación de conformado. Mediante ensayos experimentales se ha demostrado el buen ajuste del modelo numérico con la realidad. Además, se han analizado las propiedades del componente prestando especial atención a los parámetros de proceso y a la optimización de los mismos de cara a lograr un proceso robusto y repetitivo.

Mediante caracterización metalográfica se demuestra la buena calidad del llenado y de la unión. Por otro lado, en el análisis del componente observan ciertas diferencias en el aspecto superficial de una pieza debidas a la disociación de la de la fase líquida respecto a la fase sólida durante la deformación del material. Ello da lugar a macrosegregaciones que influyen en las propiedades mecánicas finales de las piezas. Los ensayos realizados con velocidades de deformación elevadas demuestran que su incremento ayuda a la reducción de este fenómeno. Asimismo, la disminución de la temperatura y por consiguiente de la fracción sólida también contribuye a reducir este efecto negativo.

En general, las propiedades mecánicas medidas demuestran que los componentes no cumplen las exigencias impuestas para su uso en automoción. No obstante, sí permite la fabricación "near net shape" de piezas cuyas geometrías son relativamente complejas. En este sentido, como línea de continuidad del trabajo se plantea abordar el problema mediante análisis de elementos finitos y hacer un rediseño de la geometría para reducir tensiones locales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jeswiet J, Geiger M, Engel, U et al. "Metal Forming Progress since 2000". CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. July 2008, vol.1. p. 2-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.06.005>
- [2] Viñoles R, et al. "Análisis Del Impacto Medioambiental De Un Automóvil a Lo Largo De Su Ciclo De Vida". Dyna, 2004, vol. 79, no. 1. pp. 6-10. ISSN 0012-7361
- [3] Shi HX, Ranfeng Q, Yimin T et al. "Study on the Joining Characteristics of Diffusion Welding Lap Joint with various Temperatures between Aluminum Alloy and Stainless Steel". Advanced Materials Research, July 2011, vol. 291. p. 1003-1006. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.291-294.1003>
- [4] Joo SM, Young-Pyo K, Han-Sur B et al. "Welding of Steel and Aluminum by Nd-YAG Laser". Key Engineering Materials, August 2004, vol. 270. p. 2389. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.2389>
- [5] Springer HJ, Kostka A, Payton EJ, "Fundamental Research into the Role of Intermetallic Phases in Joining of Aluminum Alloys to Steel", Acta Materialia vol.59. p.1586-1600 December 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2010.11.023>
- [6] Lin S, Song J, Ma G, and Yang C. "Dissimilar Metals TIG Welding-Brazing of Aluminum Alloy to Galvanized Steel". Frontiers of Materials Science in China, 2009, vol. 3, no. 1. p. 78-83. DOI <http://dx.doi.org/10.1007/s11706-009-0007-2>
- [7] Ryabov VR, "Welding of Aluminium Alloys to Steels". Harwood Academic", 1998.
- [8] Rathod M and Kutsuna M, "Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel by Laser Roll Welding". Welding Journal-New York-, January 2004, vol. 83, no. 1. p. 16-26.
- [9] Wang N, Yamaguchi T and Nishio K, "Interface Microstructure and Weld Strength of Steel/Aluminum Alloy Joints by Resistance Spot Welding" Applied Mechanics and Materials, October 2012, vol. 117. p. 1895-1899. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1895>
- [10] Schäfer R, Pasquale P and Elsen A. "Material Hybrid Joining of Sheet Metals by Electromagnetic Pulse Technology". Key Engineering Materials, March

2011, vol. 473. p. 61-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.473.61>

- [11] Chun CK, Heung-Ju K, Hyeon-Jin C, et al. "Mechanical and Microstructural Properties of Dissimilar Friction Spot Welded Aluminum Alloy", June 2008, vol. 580. p. 389-392. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.580-582.389>
- [12] Choi C, Kim DC, Nam DG, et al. "A Hybrid Joining Technology for Aluminum/ Zinc Coated Steels in Vehicles". J.Mater.Sci.Technol, June 2010, vol. 26, no. 9. p. 858-864. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1005-0302\(10\)60137-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60137-5)
- [13] Thomy C. and Vollersten F. "Laser-MIG Hybrid Welding of Aluminum to Steel-Effect of Process Parameters on Joint Properties". Welding in the World, 2012, vol. 56, no. 5-6. p. 124-132 Springer. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03321356>
- [14] Qiu R, Iwamoto C. and Satonaka S. "The Influence of Reaction Layer on the Strength of aluminum/steel Joint Welded by Resistance Spot Welding". Materials Characterization, July 2008, vol. 60, no. 2. p. 156-159. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2008.07.005>
- [15] Aldanondo E, Monaco da Silva A, Álvarez P, et al. "Avances En La Tecnología De Soldadura Por Fricción Stir". Dyna, 2011, vol. 86, no. 6. pp. 614-618. ISSN 0012-7361
- [16] Hirt G. and Kopp R. T"Thixoforming: Semi-Solid Metal Processing". Wiley-vch, 2009.
- [17] Web T. Fuganti A and Cupitò G. " Thixoforming of Aluminium Alloy for Weight Saving of a Suspension Steering Knuckle", Metallurgical Science and Technology, 2000, vol. 18.
- [18] Sajjadi S.A. and Ezatpour H. "Microstructure and Mechanical Properties of Al-Al₂O₃ Micro and Nano Composites Fabricated by Stir Casting". Materials Science and Engineering A, August 2011, vol. 528. p. 8765- 8771. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.052>
- [19] Sajjadi S.A. and Ezatpour H. "Fabrication of A356 Composite Reinforced with Micro and Nano Al₂O₃ Particles by a Developed Compocasting Method and Study of its Properties". Journal of Alloys and Compounds, September 2012, vol. 511. p. 226-231. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.08.105>
- [20] Barkhudarov, M. and Hirt C. "Thixotropic Flow Effects Under Conditions of Strong Shear": Materials week'96 TMS conference Ohio October 1996, vol. 96.
- [21] Siegert K, Wolf A. and Baur J. "Thixoforging of Aluminium and Brass". Production Engineering. Annals of the German Academic Society for Production Engineering, 2000, vol. 2. p. 1.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a CIE Automotive, Alfa Idei y al Gobierno Vasco (Proyectos: HIMAT ER-2011/00042 – Etorgai 2011 e INPRORET IE12-342 – Programa Etorrek 2012-2014) por su apoyo económico.