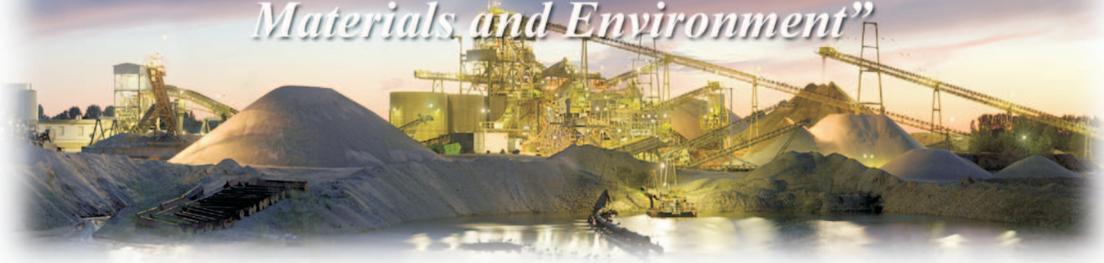




XIX International Conference on Extractive Metallurgy

*"Recent Developments in Metallurgy,
Materials and Environment"*



PAPER 47

FRICITION STIR WELDING (FSW) OF A Ti-6Al-4V ALLOY

Arturo Reyes Valdés¹, Morelia Vázquez Rentería², Jorge F. Dos Santos²

¹ CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES, S.A. DE C.V.

² GKSS FORSCHUNGSZENTRUM. INSTITUTE OF MATERIALS RESEARCH.
MATERIALS MECHANICS AND JOINING. SOLID STATE PROCESSES (WMP)

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO
MAY 18-21, 2010

FRICITION STIR WELDING (FSW) OF A Ti-6Al-4V ALLOY

ARTURO REYES VALDÉS¹. MORELIA VÁZQUEZ RENTERÍA². JORGE F. DOS SANTOS²

¹ Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V. Ciencia y Tecnología no.790. Saltillo, Coahuila México.

² GKSS Forschungszentrum. Institute of Materials Research. Materials Mechanics and Joining. Solid State Processes (WMP). Max Planck Str.1. Geesthacht, Germany.

Correo electrónico del autor: morelia.renteria@gkss.de

ABSTRACT

FSW as a recently joining solid state process has been a success technology for joining Aluminium materials; its expansion to higher melting temperature materials such as Titanium alloys has become challenging for industrial applications. Pioneer work of FSW on a mill annealed α - β Ti-6Al-4V alloy is presented by means of a process window study. Typical solid state defects were identified where process characterization indicates that defect formation is strongly dependent on tool features. A detailed microstructural characterization using scanning electron microscopy is presented in order to describe the microstructural evolution during FSW of Ti-6Al-4V. It is suggested that the stir zone reach the β -transus temperature due to the presence of prior- β grain boundary formation in a lamellar microstructure which it was determined to be fully dynamic recrystallized due to local deformation and phase transformation mechanisms. A narrow thermomechanical affected zone produced due to the low thermal conductivity of Ti-alloys was identified by the presence of few recrystallized α -equiaxed grains together with some α -elongated grains in the parallel direction to the stir zone while as a result of the thermal effect experienced the β fraction decrease in the heat affected zone as the distance from the stir zone to the base material increase.

Keywords: Friction stir welding, Ti-6Al-4V, microstructural evolution.

RESUMEN

FSW como un nuevo proceso de soldadura en estado sólido, se ha convertido en un éxito para la unión de materiales como el aluminio. La expansión tecnológica a materiales de alto punto de fusión se ha convertido un reto para aplicaciones industriales. En este trabajo se presenta un estudio preliminar sobre FSW en una aleación Ti-6Al-4V en base a una ventana de proceso. Se identificaron algunos de los defectos comúnmente encontrados en los procesos de soldadura en estado sólido, y de acuerdo a la caracterización del proceso se encontró que la presencia de los mismos es fuertemente dependiente de las características de la herramienta de

soldadura. Por medio de microscopía de barrido, se llevo a cabo a detalle la caracterización microestructural a fin de describir la evolución microestructural ocurrida durante el proceso FSW. La presencia alotrópica de β a temperatura ambiente acompañada de una microestructura laminar indica que la zona de agitación alcanzó una temperatura por arriba de la temperatura de transformación " β -transus". De acuerdo a la naturaleza del proceso, la formación de la microestructura laminar en la zona de agitación se llevo a cabo por medio de mecanismos de recristalización dinámica y transformaciones de fase. Por otro lado, el tamaño de la zona afectada termomecánicamente fue afectado por la baja conductividad térmica de las aleaciones de titanio y se identificó debido a la presencia de unos cuantos granos equiaxiales de α junto a otros granos alargados en dirección paralela a la zona de agitación mientras que debido al ciclo térmico que experimentó la zona afectada por el calor, se encontró que la fracción de β disminuye hasta alcanzar la fracción del metal base conforme se aleja de la zona de agitación.

INTRODUCCION

El proceso de soldadura Fricción-Agitación (FSW), es un proceso de soldadura en estado sólido creado a principios de la última década por el TWI "Technological Welding Institute" considerado como el desarrollo tecnológico en unión de metales más importante de la década [1]. Las ventajas que ofrece FSW están directamente relacionadas a la temperatura de trabajo, por debajo del punto de fusión de los materiales base, que evita la formación de defectos durante la solidificación, así como los gradientes de temperatura que resultan en esfuerzos residuales de importante magnitud y en la formación de microestructuras que degradan las propiedades mecánicas del metal base [2].

La aleación Ti-6Al-4V es una aleación de titanio $\alpha + \beta$ con mayor demanda en aplicaciones industriales debido a que presenta una interesante relación entre resistencia y tenacidad, así como también una buena estabilidad mecánica a temperaturas por arriba de los 400°C [3]. A pesar de su grado de soldabilidad, comúnmente se encuentran resultados indeseables que comúnmente acompañan a los procesos de soldadura por fusión; entre otros resultados indeseables se encuentran la formación de microestructuras frágiles de colado, porosidad, distorsión y esfuerzos residuales [4] que degradan la calidad de la unión.

Para evitar problemas asociados con la fusión y la solidificación en la soldadura de materiales, las tecnologías en estado sólido parecen ser muy convenientes para ser utilizadas en las aleaciones de Titanio. Procesos de Soldadura por fricción [5] y Soldadura por fricción lineal [6] son empleados para soldar estas aleaciones, desafortunadamente su uso está limitado a ciertas configuraciones geométricas de los materiales base aunado a la posterior eliminación de rebaba aglomerada durante el proceso y retenida en los materiales base.

Basado en el éxito de las uniones de Aluminio, Magnesio y Cobre por el proceso FSW, en los últimos años ha aumentado el interés de extender este proceso a materiales de alta resistencia. El proceso FSW produce microestructuras finas, poca distorsión y segregación en la zona de unión en las aleaciones de Titanio, lo que significa que la unión de estos materiales mediante FSW ofrece definitivamente más ventajas en comparación con los procesos de soldadura convencionales [7, 8, 9].

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Equipo y herramientas

Las uniones se llevaron a cabo con un sistema Gantry, el cual posee una fuerza de 60 y 20 KN en fuerza axial y longitudinal respectivamente; una capacidad de velocidad de rotación que va desde 200 a 6000 rpm así como de 0.1 hasta 8 m/min velocidad de avance para realizar uniones de hasta 2500 mm de longitud. En el recuadro rojo de la Figura 1, se observa que la herramienta se encuentra protegida por una estructura metálica, la cual contiene el suministro de gas inerte. El argón utilizado durante el proceso crea una atmósfera protectora inerte en las áreas adyacentes a la herramienta que evita la oxidación del material base durante el proceso, ya que el titanio presenta una reactividad muy alta a los gases de la atmósfera a temperaturas de aproximadamente 550°C.

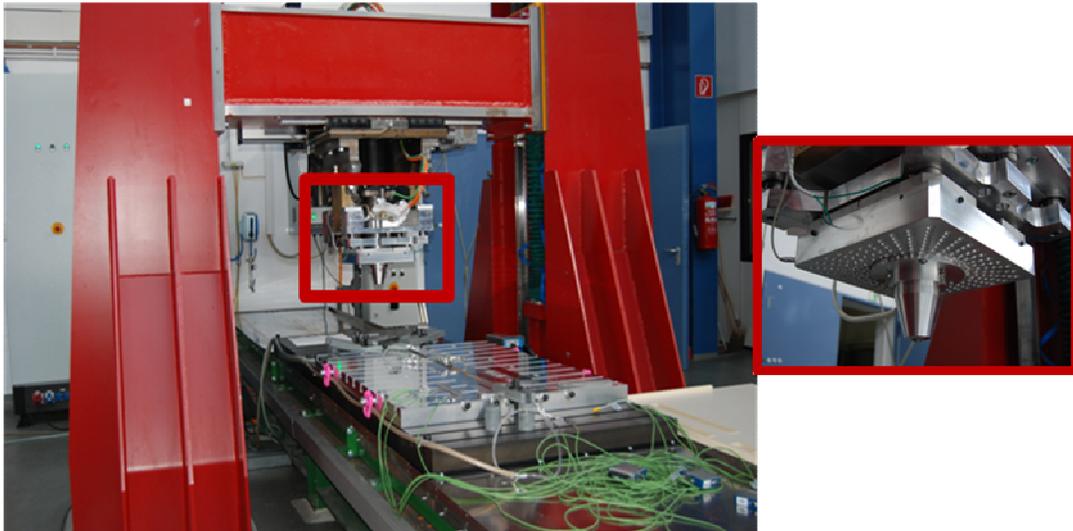


Figura 1. Equipo de Soldadura FSW Gantry utilizado en esta investigación, el equipo se encuentra ubicado en el departamento WMP del centro de investigación GKSS.

La herramienta que se utilizó fue diseñada con una geometría cónica trunca para el pin con 6.5 mm de diámetro y un hombro cóncavo de 13 mm de diámetro; se fabrica a partir de una aleación W-25%Re, cuyas propiedades mecánicas son muy atractivas para su uso en la industria aeroespacial, sin embargo, su uso se ha extendido exitosamente al proceso FSW en materiales con relativa alta resistencia mecánica a altas temperaturas [10].

Procedimientos de soldadura

Se produjeron uniones a tope de una aleación Ti-6Al-4V de 2.5 mm de espesor. En la figura 2 se muestra la microestructura del material base, la cual consiste de una estructura α equiaxial decorada con granos de β al límite de grano β previo a la transformación. La composición química de la aleación y sus propiedades mecánicas se presentan en las Tablas 1 y 2. Para las uniones producidas se utilizaron parámetros de 65000 rpm y 700 rpm a velocidades de 1.5 y 2 mm/seg. Durante el proceso FSW se registraron las magnitudes de fuerza axial y torque para cada una de las uniones producidas.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la aleación Ti-6Al-4V.

Resistencia a la Tensión (Mpa)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HV)
1040	1008	14.1	331

Tabla 2. Comp. química correspondiente a la aleación Ti-6Al-4V; (% en masa).

Al	Fe	V	O	N	Ti
6	0.25 max	4	0.19 max	0.016 max	Balance

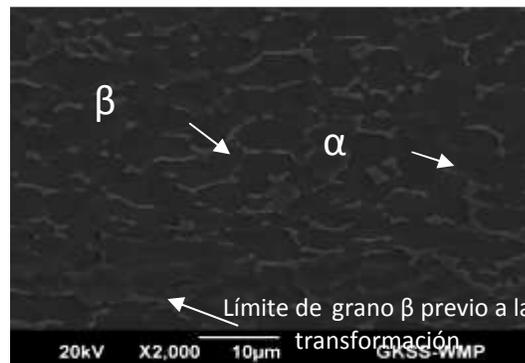


Figura 2. Microestructura del material base Ti-6Al-4V.

El análisis microestructural de las uniones producidas se llevo a cabo vía Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). Se extrajo una muestra de cada unión (sección transversal) y se prepararon metalográficamente comenzado por el esmerilado grueso hasta el pulido con silica coloidal de 0.02 μm . Para los ensayos de tensión, así como de microdureza, se siguió un procedimiento de acuerdo a los estándares ASTM E8 y ASTM E384 respectivamente. Se realizaron perfiles de dureza en la sección transversal de las muestras bajo una carga de 500 kgf con un tiempo de indentación de 10 segundos. La velocidad de tracción para las probetas de tensión fue de 5mm/min.

RESULTADOS Y DISCUSION

Descripción y caracterización del proceso

La unión de los componentes metálicos se lleva a cabo mediante un proceso termomecánico producido por una herramienta cilíndrica rotatoria compuesta

de dos cuerpos cilíndricos concéntricos y constituye la parte fundamental del proceso, ver en la Figura 3. El cilindro de menor diámetro consta de un perno conocido como “pin” y el cilindro de mayor diámetro es un componente de apoyo denominado hombro que produce el confinamiento de material y evita que sea expulsado hacia la superficie. La formación de la unión se lleva a cabo cuando la herramienta en rotación penetra el material base bajo una acción mecánica en donde el hombro hace contacto con la superficie del mismo. El calentamiento y la deformación del material a causa de la generación de calor como resultado de la fricción entre hombro - material base debido a la rotación de la herramienta promueven un comportamiento plasto-viscoso del material que favorece el flujo del mismo cuando la herramienta rotatoria se desplaza a lo largo de la junta originando una gran cantidad de deformación plástica, al mismo tiempo que el material es transportado desde el frente de la herramienta hacia la parte trasera de la misma; así, al final de la junta la unión se consolida y posteriormente se retira la herramienta dejando a su vez un orificio característico del proceso.

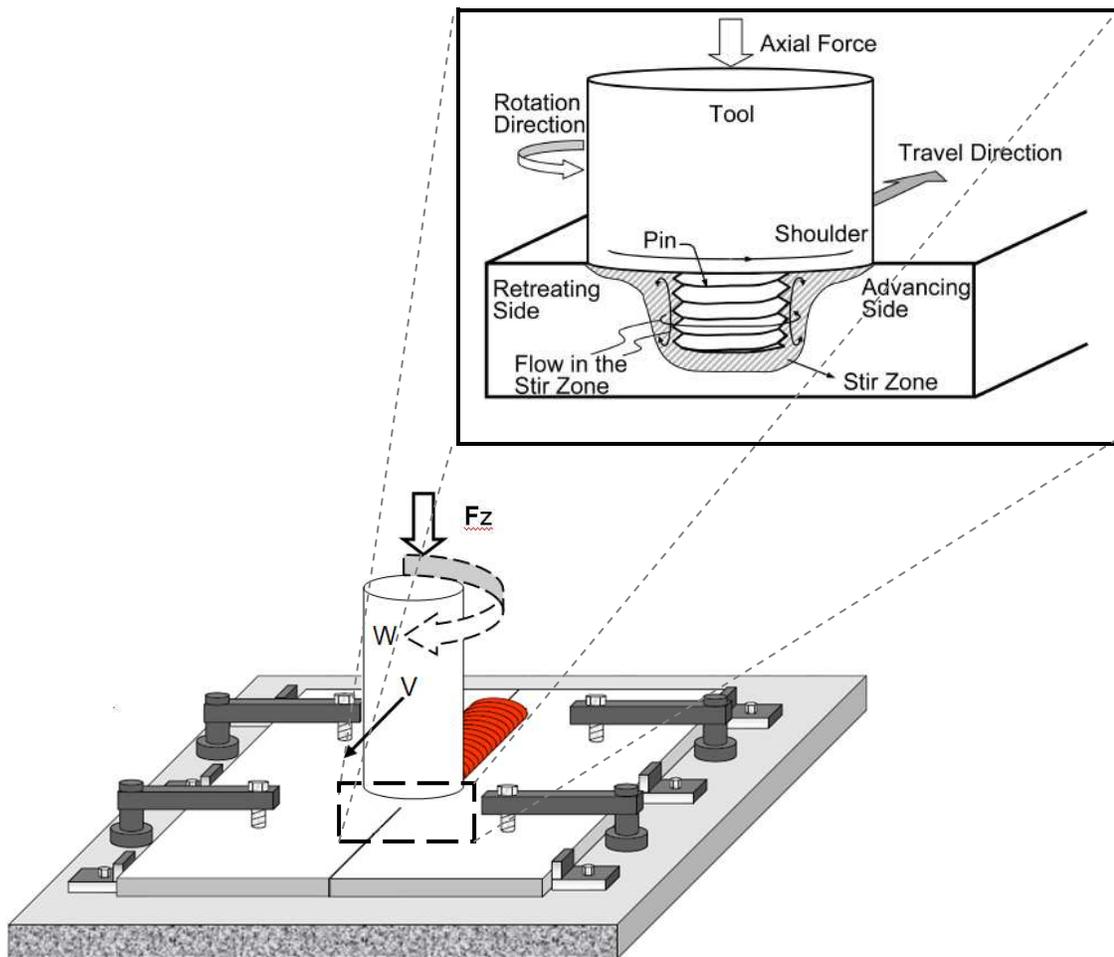


Figura 3. Representación y configuración esquemática del proceso FSW; F_z : fuerza axial; W : velocidad de rotación; V : velocidad de avance.

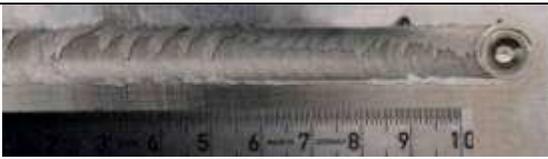
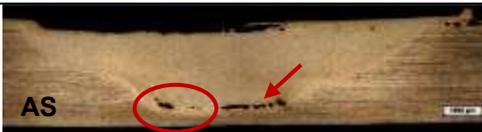
A diferencia de los procesos de soldadura convencionales, el calor generado (CG) durante el proceso de unión es producto de la fricción como resultado de la fuerza friccional y la velocidad de deslizamiento del material base, así como también producto de la deformación plástica generada en la interface herramienta-material a consecuencia de los esfuerzos cortantes y la velocidad del material base que se adhiere a la herramienta en movimiento [8]; por lo tanto, se torna complicado determinar el CG ya que cada uno de esos valores son fuertemente dependientes de la temperaturas locales que se alcanzan durante el proceso. Sin embargo, de las fuerzas involucradas en el proceso, el momento de torsión (Torque) proporciona una idea del promedio de flujo de esfuerzos cerca de la herramienta y el deslizamiento entre la herramienta y el material base [8]. En base a la definición de Torque, de la ec. 1 [35], se calculó el CG a lo largo del proceso de soldadura. En la tabla 3 y 4 se presentan las uniones producidas, el CG, los valores de Torque Fuerza axial que interactúan a lo largo del proceso y los parámetros de proceso utilizados en cada unión.

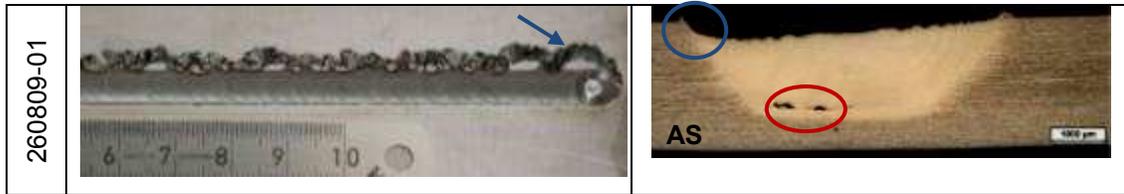
$$CalorEntrada = \frac{Torque * VelocidadRotacion}{VelocidadAvance} \quad Ec. (1)$$

Tabla 4. Caracterización de las uniones producidas con la herramienta CST.

Unión	(RPM)	(mm/s)	Axial Load (N)	Torque (Nm)	CG (JK/mm)
FSW 160709-02	650	2	1.5-2.5	19	375
FSW 100609-04	650	1.5	2.9	14	390
*FSW 160709-06	650	2	7	9	220
*FSW 260809-01	700	1.5	4.2	9	275

*El hombro de la herramienta no entró en contacto con el material base.

Tabla 5. Caracterización de las uniones producidas	
160709-02	 
100609-04	 
160709-06	 



Formación de defectos

De acuerdo a la apariencia superficial de las uniones producidas, éstas se consideran aceptables; sin embargo, en las micrografías se observa la presencia de dos tipos principales de defectos; “tunneling” (indicado por flechas rojas en la tabla 5) y “wormhole” (círculos rojos). Ambos tipos de defectos indican que el material se encuentra a una temperatura relativamente baja (debido a la baja generación de calor friccional ya que la velocidad de rotación en la parte inferior cónica de la herramienta es menor) y que a ese punto el material presenta considerable resistencia a la cedencia, impidiendo que la herramienta lo deforme con facilidad.

Cuando el proceso de consolidación de la unión se lleva a cabo, el material detrás de la herramienta en el lado RS es forzado a fluir hacia el lado AS dentro de la cavidad que se forma detrás de la herramienta (justo entre RS y AS); sin embargo, cuando la temperatura del material en estado plástico no es la suficiente para conformar la unión metalúrgica al alcanzar el lado SA, la unión no se consolida, o la porción de material en dichas condiciones térmicas concluye en la formación de un wormhole. Por otro lado, tunneling se considera el resultado de una distribución heterogénea del calor generado a consecuencia de la baja conductividad térmica de las aleaciones de titanio. Con base en los resultados anteriores, la generación de calor en la superficie de la unión se puede disminuir evitando el contacto del hombro en el material base lo que propicia una distribución de calor más homogénea (ver las condiciones FSW_160709-06 FSW_260809-01 en Tabla 5); sin embargo se observa claramente un exceso de material en el RS (circulo azul), el cual es generado debido a la falta de penetración del hombro, que evita que el material sea expulsado hacia el exterior. La expulsión de material hacia el RS, a su vez, resulta en un defecto de socavado en el AS (flecha azul).

Efecto de los parámetros de proceso en la sanidad de la unión

La velocidad de soldadura, la velocidad de rotación, la penetración de la herramienta en el material base y el diseño de la misma, son las principales variables con las que se controló el proceso FSW. De acuerdo a la literatura, el calor de entrada y la temperatura máxima alcanzada durante el proceso, aumenta al incrementar la velocidad de rotación y disminuye al incrementar la velocidad de avance debido al tiempo de interacción de la herramienta con el material base y la cantidad de calor de fricción generado en ese instante. Sin embargo, de las uniones producidas con cada una de las diferentes herramientas utilizadas, no se observa dicha tendencia por lo que entonces es necesario considerar el efecto de las fuerzas involucradas en el proceso.

De acuerdo a los resultados de las Tablas 4 y 5 (y con base en la literatura), se observa que los valores de torque aumentan al disminuir el CE, lo que indica que el flujo de material se torna más difícil al paso de la herramienta. También, se puede decir que a un incremento de F_z corresponde un incremento en la temperatura de la unión y que este valor está directamente relacionado con los valores de torque. Se observa que los resultados presentados en la Tabla 5 no son consistentes con la descripción anterior. La inconsistencia en las variables de proceso con respecto a los resultados; indica la gran inestabilidad y falta de control del proceso. Se puede observar que no se proporciona información acerca de la penetración de la herramienta en los materiales base durante el proceso; sin embargo, se aprecia en las macrografías la variación en cuanto a falta de penetración, debido a la dificultad de controlar dicha variable. Se espera por tanto, que a una mayor o menor penetración afecte directamente las fuerzas durante el proceso y como resultado el CG aún y cuando se use la misma velocidad de rotación y de avance.

Evolución microestructural en la ZF

El esquema de la Figura 4 ilustra la evolución microestructural durante el proceso FSW, la cual se describe como sigue: cuando la herramienta está en contacto con el material base, éste se encuentra en un estado plástico de deformación a máxima temperatura producto del calor friccional generado durante el contacto de la herramienta en rotación y las fuerzas de corte o cizalla así como las de compresión que actúan sobre él. Inmediatamente al avance de la herramienta se lleva a cabo el enfriamiento local en la FZ que da lugar a los procesos de restauración a una temperatura por arriba de la temperatura de transformación T_β , donde crecimiento de grano y minimización de la energía interna en esa zona se lleva a cabo por medio de un mecanismo de recristalización dinámica. Durante el enfriamiento (a partir de la zona bifásica del diagrama de fase (esq. sup der. de la Figura 4), β continua estable debido a la alta temperatura; sin embargo, α comienza a nuclear en las zonas de alta en energía (puntos triples al límite de grano de β) consumiendo una cantidad de β . A partir de ese punto, la microestructura final en la FZ depende principalmente, del grado de subenfriamiento, el tiempo de permanencia por encima de T_β y la velocidad de enfriamiento.

- Estructura α acicular, crece a un grado de subenfriamiento determinado por tratarse de un sistema fuera del equilibrio a relativas bajas velocidades de enfriamiento hasta consumir los granos de β previos a la transformación.
- Microestructura laminar (widmanstätten). Cuando la velocidad de enfriamiento es relativamente alta, no se da el tiempo suficiente para dar lugar al crecimiento alotromórfico de α , entonces la estructura laminar crece directamente a partir de los límites de grano previos a la transformación.

El Crecimiento y engrosamiento de grano de ambas fase se lleva a cabo hasta que el crecimiento de α da por terminado u obstaculiza el crecimiento de los granos de β previos a la transformación.

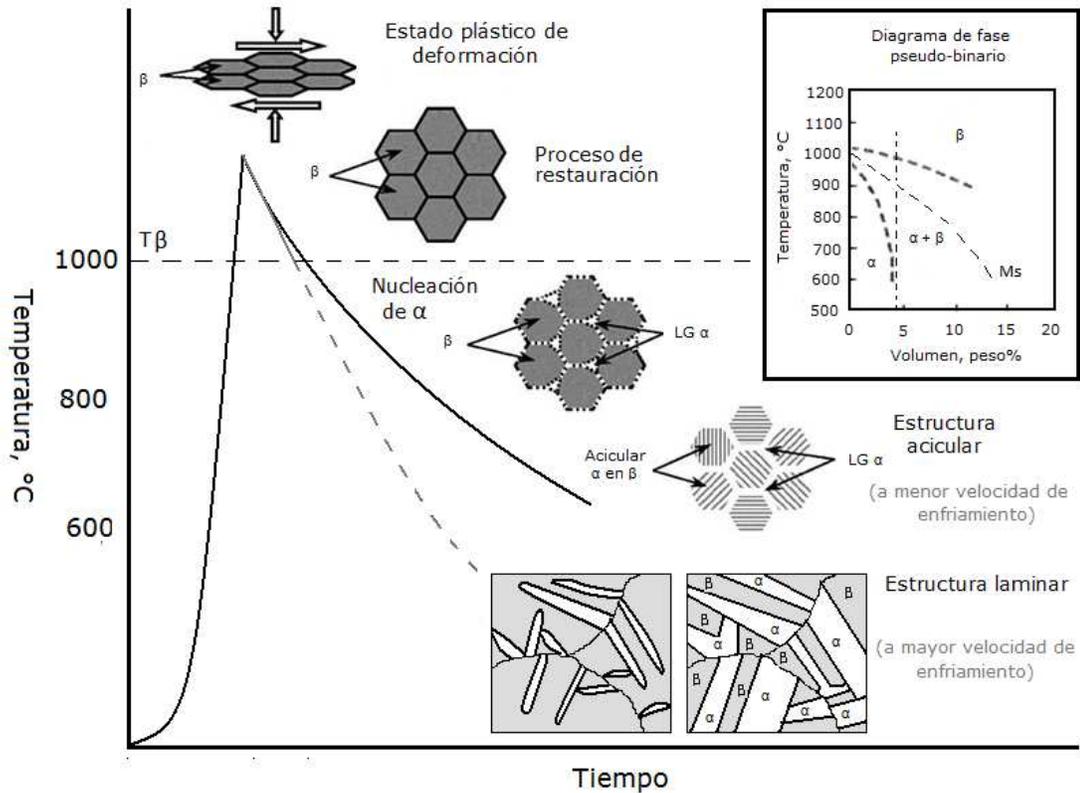


Figura 4. Ciclo térmico representativo de la evolución microestructural en la FZ durante el proceso FSW conformado por el diagrama tiempo – temperatura – transformación.

Características microestructurales

De las uniones soldadas se observaron 3 regiones diferentes, las cuales se denominan como zona de fusión, zona afectada termomecánicamente y zona afectada por el calor las cuales experimentan condiciones mecánicas y térmicas diferentes dando como resultado la microestructura final de cada una de ellas.

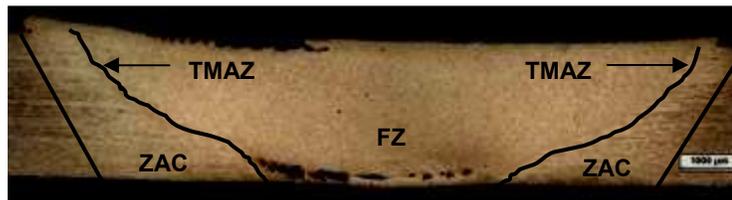


Figura 26. Zonas metalúrgicas presentes en una unión Ti-6Al-4V producida mediante FSW.

Se presenta la evaluación microestructural para las uniones que presentan un CG de 375 y 220 JK/mm ya que la geometría de la herramienta tiene un

impacto mayor sobre el CG a diferencia de los parámetros de proceso (debido a la superficie de contacto y a la distribución de la fuerza aplicada).

Zona de agitación (FZ)

Con base en la microestructura de la FZ se considera que para un alto CG (Figura 5b), la temperatura máxima que se alcanzó durante el proceso fue mayor a la temperatura de transformación de la fase β (aprox. 1100°), ya que se aprecia en el límite de grano β antes de la transformación algunos granos widmanstätten que decoran estos límites por granos alotrópicos α , a diferencia de la unión con bajo CG, ver Figura 5a donde la máxima temperatura en esa región está apenas por encima de T_β , lo cual se refleja en la presencia de algunos granos sin transformar y el rápido enfriamiento da lugar al refinamiento microestructural en esa región.

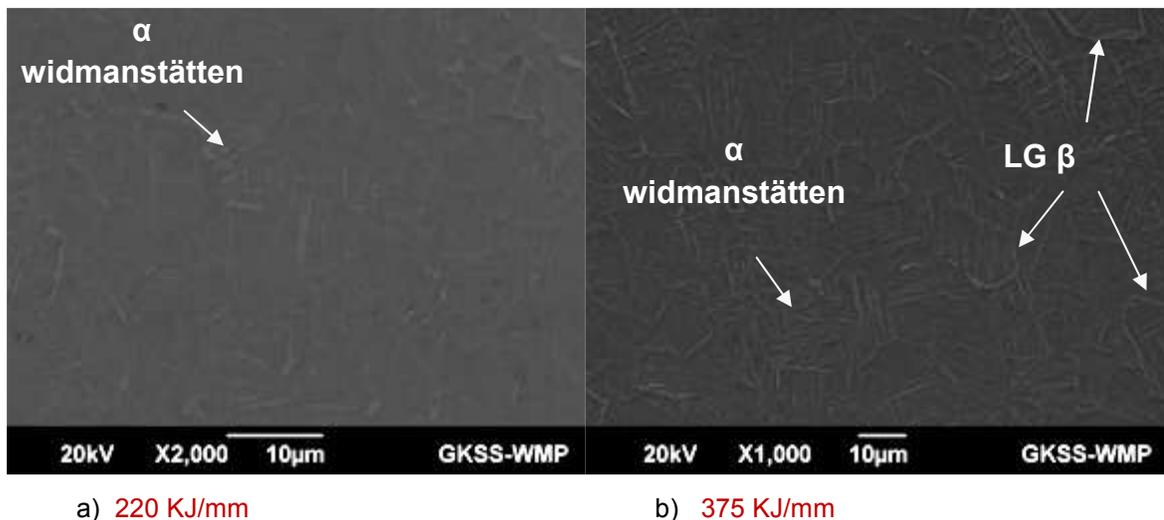


Figura 5. Comparación microestructural de la FZ a diferentes CG; FSW- FSW_160709-06 para 220 KJ/mm y FSW_160709-02 para 375 KJ/mm.

Se considera que el tiempo en que el material permaneció a dicha temperatura fue muy corto, ya que la cantidad de β que se formó es relativamente pequeña, pero suficiente para completar la transformación, ya que no se observa evidencia de la presencia de α retenida. Por otro lado, para ambas uniones, el enfriamiento no fue lo suficientemente rápido para evitar la formación de una estructura martensítica pero sí la formación widmanstätten.

Zona afectada termomecánicamente (TMAZ)

Del calor friccional generado por la herramienta, sólo una pequeña cantidad de éste es transmitido hacia el resto del material por conducción y/o eliminado por convección debido a la baja capacidad que el titanio presenta para conducir el calor, la velocidad de generación de calor tiene entonces mayor ventaja que la velocidad de disipación del mismo, lo que origina un incremento local de la temperatura para promover los mecanismos de transformación que se llevan a cabo de manera local y a diferencia de otras

aleaciones no ferrosas, la TMAZ es considerablemente pequeña y algunos autores la consideran inexistente [12]. Sin embargo, entre las zonas FZ - HAZ se observa la presencia de granos alargados en sentido paralelo a la deformación originada por la herramienta, ver Figura 6a; estos granos, coexisten con algunos otros más pequeños completamente equiaxiales, indicando que algunos mecanismos de restauración se llevaron a cabo en esa zona (se sugiere que se trata de mecanismos de recristalización dinámica), dando pie a que a dicha región se le defina como TMAZ.

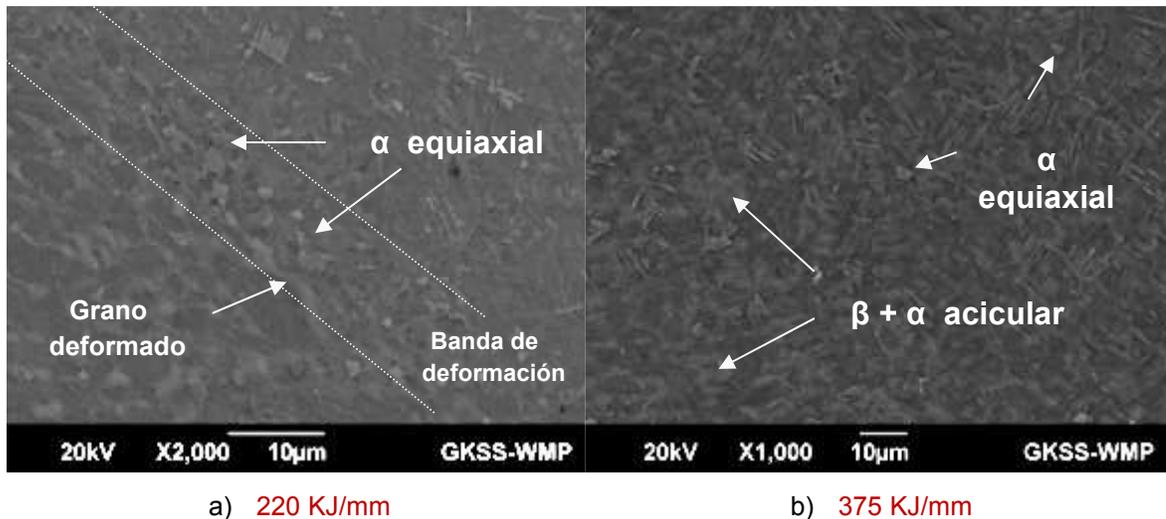


Figura 6. Comparación microestructural de la TMAZ a diferentes CG; FSW- FSW_160709-06 para 220 KJ/mm y FSW_160709-02 para 375 KJ/mm.

En la Figura 6b se observa una microestructura $\beta + \alpha$ acicular dentro de β previo a la transformación como producto de una transformación fuera del equilibrio similar al mecanismo que se describió en la evolución microestructural.

Zona afectada por el calor (HAZ)

La zona afectada por el calor, a diferencia de la FZ y la TMAZ, está gobernada directamente por el ciclo térmico del proceso y ningún mecanismo de recristalización se lleva a cabo. Debido a que el perfil de temperatura presenta un comportamiento gradual que disminuye conforme alcanza el material base, dicha temperatura y la velocidad de enfriamiento a lo largo de la HAZ propician las condiciones para que se observen dos diferentes regiones microestructurales dentro de la HAZ, las cuales difieren una de otra principalmente por la distribución en porcentaje de α y β , aumentado la fracción de volumen de β conforme el material base alcanza la FZ.

Perfiles de Mirodureza

Ambas FZ's presentan un perfil de dureza más homogéneo que el material base con valores Vickers más altos originados por el refinamiento microestructural y donde posiblemente el efecto Hall-Petch [38] se lleve a cabo. Se observan valores de dureza ligeramente más altos en el AS en

comparación con el RS como resultado del grado de deformación ya que se considera que el primer encuentro de material frío con la herramienta de soldadura en el AS conlleva considerablemente un mayor trabajo mecánico y por lo tanto se genera una mayor cantidad de calor friccional.

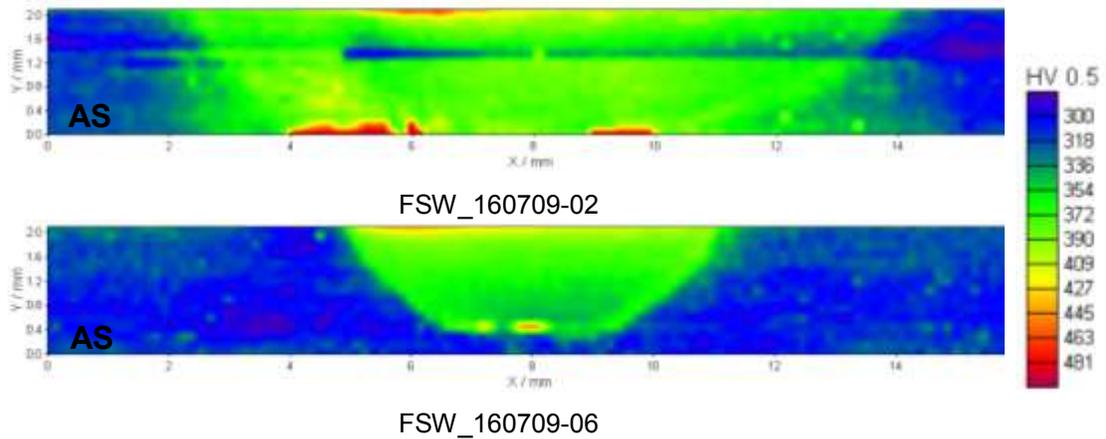


Figura 7. Mapa de microdureza.

El incremento de dureza en la superficie está relacionado a la pérdida de calor por convección en la superficie, dando lugar a una velocidad de enfriamiento más rápida y una microestructura relativamente más fina. Se observa también una zona con dureza considerable en la parte inferior de la unión (raíz), la cual está relacionada directamente a la presencia de defectos como se detallo anteriormente, por lo que no se puede evaluar como inherente al proceso.

Resistencia a la tensión

En la Tabla 6 se presentan los resultados del ensayo de tensión.

Tabla 6. Comparación de los valores del ensayo de tensión de las uniones producidas con diferentes herramientas con respecto a los valores del MB.

	FSW_160709-06 (220 KJ/mm)	FSW_160709-02 (375 KJ/mm)	Material Base
Resistencia a la Tensión	775.13 MPa	820.789 MPa	1048 MPa
Elongación	1.5 %	8.4 %	14.8 %

Los valores de resistencia a la tensión están por debajo de los valores del MB; no obstante, se deben señalar algunos puntos que son importantes. Para la condición FSW_160709-06, como se observa en la Figura 8a; todas las uniones ensayadas presentan fractura en la FZ; sin embargo, la presencia de defectos periódicos como se observa a diferentes magnificaciones en la Figuras 8b y 9 afecta directamente la elongación del material. Se indica con un círculo rojo en la Figura 8b el posible punto de inicio de la fractura. Por otro lado, la falta de penetración así como la mala preparación de los materiales base previa a la unión (macrografía de la Figura 9), se refleja en los bajos valores de resistencia a la tensión.

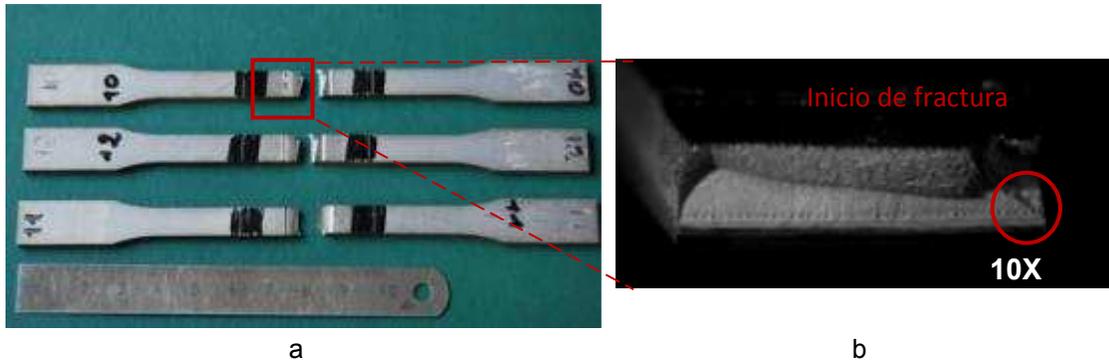


Figura 8. a) Apariencia de la fractura a bajas magnificaciones; b) Fractura en la ZA para la unión FSW_160709-06 producida con la herramienta CST.



Figura 9. Apariencia a altas magnificaciones de la presencia periódica de los defectos que se observan en la macrografía de la unión FSW_160709-06.

Durante la evaluación de los resultados del ensayo de tensión para la condición FSW_160709-02 se encontró que dos de las probetas ensayadas fracturaron en la FZ a causa de la presencia de defectos, como se observa en la macrografía de la Figura 11, así como también en la superficie de fractura de las Figuras 10b y 11; sin embargo, una de las probetas ensayadas fracturó en el MB (ver Figura 10a en el círculo negro) dando a conocer resultados prometedores ya que su resistencia a la tensión corresponde a un 98.55% la carga con respecto al MB, lo que indica que la presencia de varios tipos de defectos en las uniones producidas afecta directamente las propiedades mecánicas de la unión.

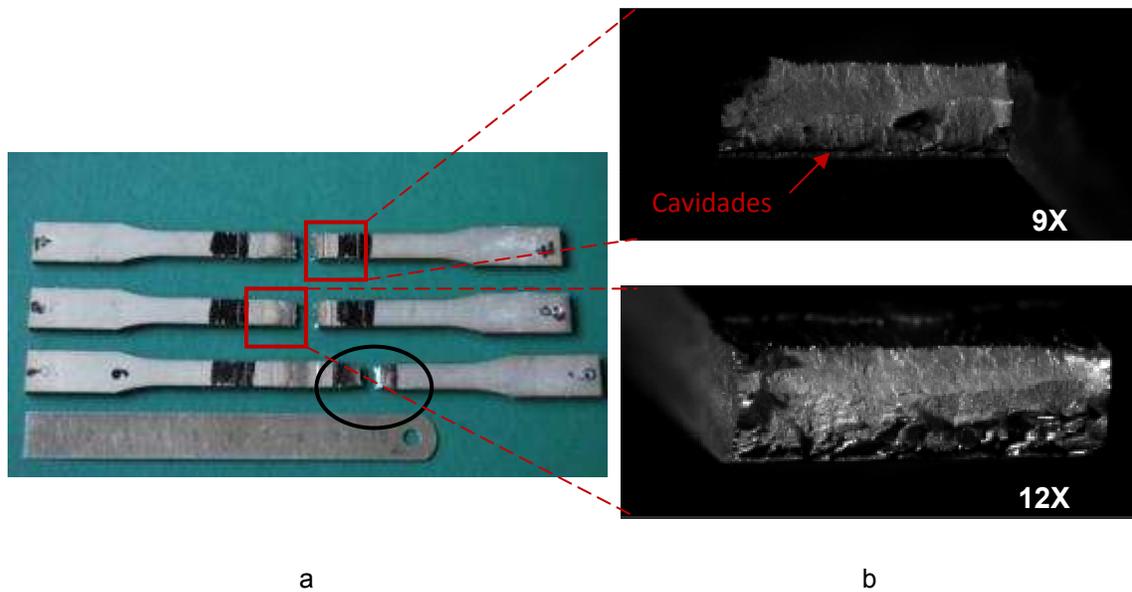


Figura 10. Zona de fracturas para la unión FSW_160709-02.

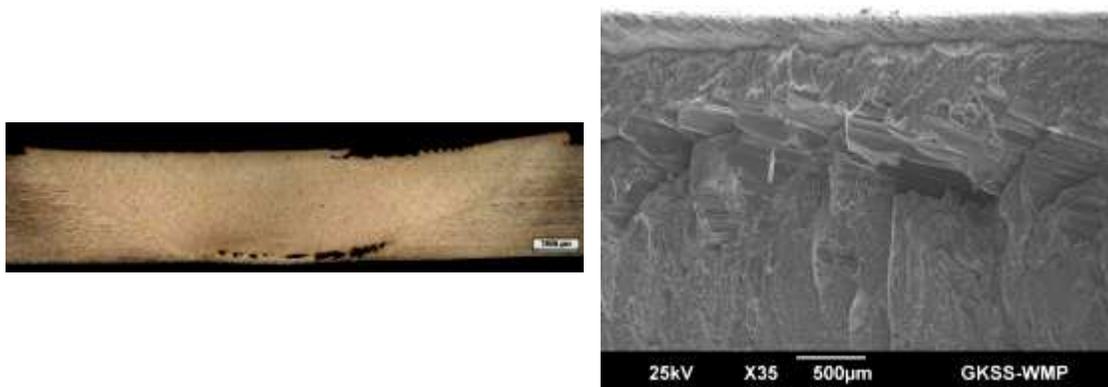


Figura 11. Apariencia a altas magnificaciones de la presencia periódica de los defectos que se observan en la macrografía de la unión FSW_160709-02.

REFERENCIAS

- [1] Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple-Smith, P., and Dawes, C. J., "Friction stir butt welding. International patent no. PCT/GB92/02203" (1991).
- [2] Mishra, R. S. and Ma Z. Y., "Friction stir welding and processing", Materials science and engineering R, Volume 50, pp. 1-78 (2005).
- [3] Donachie, Mathew J., "Titanium. A technical guide. 2nd Edition.", ASM International, pp. 8 (2000).

- [4] Qi Yunlian, Deng Ju, Hong Quan, Zeng Lizing. Electron Beam Welding, Laser Welding and Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Sheet. Materials Science Engineering A280 (2000) 177-181.
- [5] Nessler, C. G., Rutz, D. A., Eng, R. D., Vozzela, P. A., "Friction welding of titanium alloys", Welding journal, Volume 50, no. 9, pp. 379-385 (1971).
- [6] Wanjara, P. and Jahazi M. "Linear friction welding of Ti-6Al-4V: processing, microstructure and mechanical - property inter - relationships", Metallurgical and materials transactions A, Volume 36A, pp. 2149 (2005).
- [7] John, R.; Jata, K. V. and Sadananda, K., "Residual Stress Effects on Near-Threshold Fatigue Crack Growth in Friction Stir Welds in Aerospace Alloys", International Journal of Fatigue, Volume 25, pp. 939 – 948 (2003).
- [8] Pilchak, A. L., Juhas, M. C. and Williams, J. C., "Microstructural changes due to friction stir processing of investment – cast Ti-6Al-4V", Metallurgical and materials transactions A, Volume 38A, pp. 401-408 (2007).
- [9] Khumar, N. Rodelas, J. and Mishra, R. S., "The effects of friction stir processing on the microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy", Friction stir welding and processing V, pp. 45-53 (2009).
- [10] Bernath, J., Thompson, B., Ames, N., "Friction stir welding of steels and hard metals – advances in tool technology and thick section welding", 7th International Friction Stir Welding Symposium, Awaji Island Japan 2008.
- [11] Nandan, R., DebRoy, T., Badhesia, H. K. D. H, "Recent advances in friction stir welding – process, weldment, structure and properties", Progress in materials science, Volume 53, pp. 980-1023 (2008).
- [12] Mishra, R. S., Mahoney, M. W., "Friction Stir welding and processing", ASM International, pp. 123-154, (2007).