

Evolución Microestructural en Uniones de la Aleación Ti-6Al-4V Mediante el Proceso de Soldadura de Punto por Fricción-agitación

Flor Araceli Garcia-Castillo^{1,2}, Felipe de Jesús García-Vázquez¹, Felipe Arturo Reyes-Valdés¹, Patricia del Carmen Zambrano-Robledo², Guadalupe Maribel Hernández-Muñoz², Ezequiel Roberto Rodríguez-Ramos^{1,2}

¹ Industrial Welding Technology, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Saltillo, Coahuila, México.

² Universidad Autónoma de Nuevo León - UANL, Monterrey, Nuevo León, México.

Recibido: 28 Enero, 2016

Aprobado: 06 Jun., 2016

E-mail: flor.garciacs@uanl.edu.mx (FAG-C)

Resumen: La soldadura de punto por fricción-agitación (Friction Stir Spot Welding, FSSW) es un tema de reciente desarrollo e interés, principalmente en aleaciones de Titanio, ya que existen estudios previos realizados en aleaciones de aluminio, magnesio, aceros y polímeros. Las aleaciones de Titanio tienen una amplia aplicación en la industria aeronáutica, principalmente como componentes en el tren de aterrizaje en aviones comerciales, por lo cual este trabajo se centra en la aleación Ti-6Al-4V, este tipo de aleación presenta fases alfa (α) y beta (β), brindado mejor balance en propiedades mecánicas de dureza y esfuerzo a la tensión. El proceso FSSW se realizó mediante un centro de maquinado de alta velocidad, utilizando una velocidad de rotación de 500 RPM, una velocidad de penetración de la herramienta de 2 mm/s y 3 s en tiempo de sostenimiento, en láminas con un espesor de 1,5 mm y una longitud de traslape de 20 mm. Los resultados mostraron el efecto de las variables del proceso de soldadura FSSW sobre la microestructura de la aleación Ti-6Al-4V ocasionada por el efecto térmico y la deformación plástica del proceso de la soldadura, concluyendo que una adecuada combinación de parámetros permite realizar una unión sin defectos.

Palabras-clave: Aleación Ti-6Al-4V; Análisis microestructural; Soldadura de punto por fricción-agitación (FSSW); Aleaciones aeronáuticas; Zona afectada termo-mecánicamente.

Microstructural Evolution in Joints of Ti-6Al-4V Alloy by Friction Stir Spot Welding

Abstract: Friction stir spot welding (FSSW) is a process of recent development and interest, mainly in titanium alloys, since there are previous studies of aluminum alloys, magnesium, steel and polymers. Titanium alloys have a wide range of applications in the aeronautical industry, mainly in the components of commercial aircrafts as landing gear. Therefore, this work was focused on the Ti-6Al-4V alloy, this type of alloy has alpha (α) and beta (β) phases, giving a better balance between its mechanical properties as hardness and tensile strength. The FSSW process was performed using a high speed machining center, with a rotational speed of 500 RPM, plunge speed of 2 mm/s and 3 sec in dwell time, in sheets with a thickness of 1.5 mm and overlap length of 20 mm. The results showed the effect of process variables during FSSW process on microstructure of Ti-6Al-4V alloy caused by the thermal effect and plastic deformation of the welding process, obtaining an appropriate combination of parameters and binding flawless.

Key-words: Titanium alloy Ti-6Al-4V; Microstructural analysis; Friction Stir Spot Welding (FSSW); Aeronautical alloy; Thermo-mechanically affected zone.

1. Introducción

La industria aeronáutica es un evidente modelo del gran avance científico y tecnológico alcanzado en el último siglo. Las aeronaves están en capacidad de volar a más altura, con mayor velocidad y transportar un mayor número de pasajeros [1,2]. Esta industria actualmente utiliza tecnología de unión mecánica para unir componentes metálicos en la fabricación de aviones de carga, militares y comerciales de gran tamaño [3]. Las notables características de rendimiento de las aeronaves modernas son en gran medida el resultado de la aplicación de materiales de alto rendimiento y la tecnología de fabricación tanto en los fuselajes como en los sistemas de propulsión, por esta razón la industria aeronáutica ha promovido la utilización de nuevos materiales que sean más livianos, con mayor resistencia mecánica y a la corrosión, y principalmente que tengan



resistencia a altas temperaturas, son propiedades de los materiales muy necesaria en los aviones de alta velocidad, donde el calentamiento de la estructura debido a la fricción del aire es un aspecto importante [4]. El titanio es un material que ha despertado mayor interés en el sector aeronáutico. La unión de componentes de titanio mediante el proceso de soldadura por fusión con frecuencia degrada las propiedades mecánicas en relación con el material base [5]. Casi todas las tecnologías convencionales de soldadura se han aplicado para unir el Ti-6Al-4V. Sin embargo, la aplicación de procesos de soldadura por fusión en aleación Ti-6Al-4V presentó la formación de microestructuras frágiles, porosidad, distorsión y esfuerzos residuales. Por lo tanto, procesos de unión en estado sólido presentan una ventaja al evitar los problemas asociados con la fusión de los materiales a unir [6].

El titanio es un material que ha despertado mayor interés en el sector aeronáutico. Sin embargo, la unión de la aleación de titanio Ti-6Al-4V con los procesos de soldadura convencionales no es factible, ya que este tipo de proceso denominado soldadura por fusión genera defectos tales como microestructuras frágiles, porosidad, distorsión y esfuerzos residuales que impactan en el decremento de la calidad del producto. Para evitar la presencia de los defectos asociados con la fusión y solidificación en la unión de materiales, el proceso de soldadura por fricción-agitación (Friction Stir Welding, FSW) demuestra ser muy conveniente en la unión de este tipo de aleaciones [7].

El proceso de soldadura por fricción-agitación es un proceso en estado sólido [8-13], aplicado con gran éxito en aleaciones de Al, Mg, Cu, Fe y Ti [14]. La soldadura de punto por fricción-agitación (FSSW) es una variación de la soldadura FSW. En el proceso FSSW se utiliza una herramienta con movimiento rotativo que penetra el material a una profundidad, la cual es determinada por el espesor de las placas y la longitud del pin. La herramienta penetra generando calor por la fricción que se produce al contacto con las láminas, al llegar a la profundidad determinada la herramienta se mantiene rotando un tiempo de sostenimiento. El hombro y el pin de la herramienta dan lugar a la agitación y unión del material, posteriormente la herramienta es retraída dando fin al punto de soldadura [15], la Figura 1 muestra el esquema del proceso FSSW.

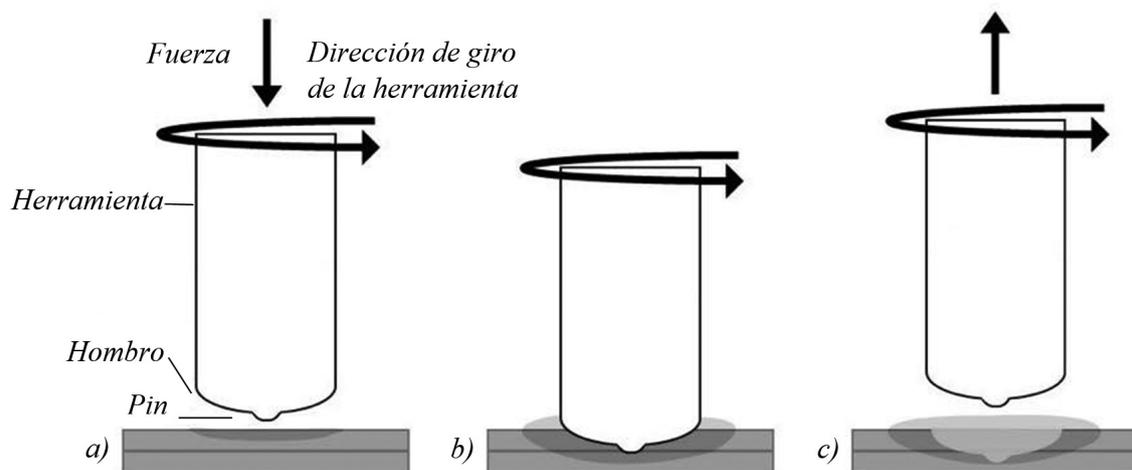


Figura 1. Esquema del proceso de soldadura por puntos por fricción- agitación (FSSW). (a) Penetración, (b) Tiempo de sostenimiento y (c) Salida de la herramienta.

La calidad de la soldadura depende de los parámetros del proceso tales como la velocidad de rotación, velocidad de penetración, tiempo de sostenimiento [16,17]. Durante el proceso FSSW, los parámetros de operación determinan la cantidad de calor generado, la plastificación del material alrededor del pin, la geometría de la soldadura y por tanto las propiedades mecánicas de la unión [18]. El proceso FSSW produce una unión con diferentes zonas bien definidas conocidas como Zona de Agitación (ZA), Zona Afectada Termomecánicamente (ZATM) y Zona Afectada por el Calor (ZAC) [19-21], en la Figura 2 se muestra las diferentes zonas representativas en una unión producida por el proceso FSSW.



Figura 2. Diferentes zonas de una unión producida por el proceso FSW. (A): Zona de Agitación, (B): Zona Afectada Termomecánicamente, (C): Zona Afectada por el Calor y (D): Metal Base.

El calentamiento y la deformación plástica del material provocada por la rotación de la herramienta, principalmente el hombro, promueve un comportamiento plasto-viscoso en el material. Esto favorece el flujo del mismo cuando la herramienta rotatoria se desplaza a la profundidad de la junta originando una gran cantidad de deformación plástica al mismo tiempo que el pin de la herramienta genera el flujo del material tanto en la circunferencia como en las direcciones axiales. Se considera que este mecanismo de flujo consolida la unión de los materiales mediante la extrusión y forja del material a altas velocidades de deformación [22]. En la Figura 3 se muestra el proceso de deformación y flujo de material en el proceso de FSSW.

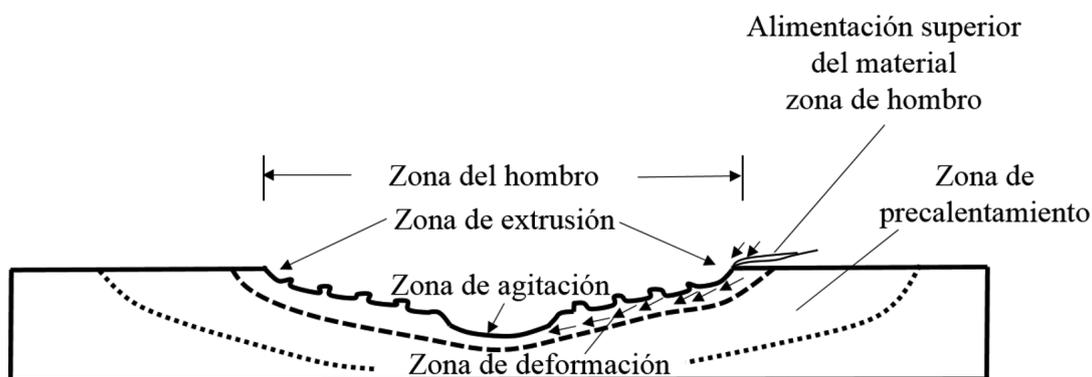


Figura 3. Proceso de deformación y flujo de material.

La herramienta cumple dos funciones principales: la generación de calor como resultado de la fricción entre el hombro y el material base, siendo esta la mayor fuente de generación de calor y la segunda función es el flujo del material a causa del movimiento y avance de la herramienta [12].

La aleación Ti-6Al-4V es una aleación grado 5 del tipo $\alpha+\beta$ y es una de las aleaciones más utilizadas tanto en aplicaciones biomédicas como industriales. Contiene un porcentaje de peso del 6% de aluminio, 4% de vanadio y presenta una interesante relación entre resistencia y tenacidad, así también como una muy buena estabilidad mecánica a temperaturas por arriba de los 400 °C [23]. En comparación a la mayoría de las aleaciones estructurales de titanio, la aleación Ti-6Al-4V es considerada una de las aleaciones con mayor grado de soldabilidad. Sus características de soldabilidad son atribuidas principalmente a dos factores: la morfología laminar martensítica (α') que se forma a partir del rápido enfriamiento producido por el proceso de soldadura, posee niveles de fragilidad y dureza menores a diferencia de las aleaciones $\alpha+\beta$ con mayor número de elementos estabilizadores β . Las aleaciones Ti-6Al-4V presentan un bajo nivel de endurecimiento, lo que permite la formación de una alta fracción en volumen de α Widmanstätten + una estructura β retenida, aún a altas velocidades de enfriamiento [24].

El objetivo de este trabajo es análisis en las uniones de la aleación Ti-6Al-4V mediante análisis microestructural y microdureza de los efectos de los parámetros del proceso de FSSW de velocidad de rotación de 500 RPM, velocidad de penetración de 2 mm/s y tiempo de sostenimiento de 3 s, utilizando una herramienta con geometría convexa a lo ancho del área que conforma el hombro, la cual es diferente a las reportadas en la literatura [12]. Los valores de los parámetros utilizados en este estudio fueron obtenidos mediante un diseño de experimentos central compuesto.

2. Material y Métodos

2.1. Método de ensayo

Con el objetivo de determinar los valores de velocidad óptimos en el proceso de soldadura por puntos por fricción-agitación en aleación de Titanio Ti6Al4V, se planteó un diseño central compuesto (DCC) con dos factores: velocidad de rotación (500–800 RPM) y velocidad de penetración (1-2 mm/s), el cual está estructurado con 4 puntos del cubo, 5 puntos centrales y 4 puntos axiales. Teniendo un distancia de las corridas axiales al centro del diseño (α) con valor de 1,41421, el diseño se replicó una vez. Las pruebas se realizaron aleatoriamente, en la Tabla 1 se presenta completo el diseño de experimentos (DOE) usado con los valores codificados para la realización de esta investigación. El cual se desarrolló tomando como referencia valores utilizados en proceso FSW en Ti-6Al-4V [25], considerando las geometrías y dimensiones. En el presente trabajo se muestran los resultados de la prueba número 3 con una combinación de 500 RPM en velocidad de rotación y 2 mm/s en velocidad de penetración.

Tabla 1. Diseño central compuesto aplicado.

<i>Experimento</i>	<i>Velocidad de rotación (rpm)</i>	<i>Velocidad de penetración (mm/s)</i>
9	650	1,5
7	650	0,79
4	800	2
10	650	1,5
3	500	2
5	437,86	1,5
13	650	1,5
12	650	1,5
11	650	1,5
8	650	2,2
2	800	1
1	500	1
6	862,13	1,5

El proceso FSSW se implementó en un centro de maquinado CNC de alta velocidad marca Bridgeport modelo VMC 760 XP³, con una capacidad en velocidad de 12.000 RPM y una potencia de 25 HP. De acuerdo con el diseño de experimentos central compuesto aplicado en el presente trabajo, se seleccionó una velocidad de giro de 500 RPM y una velocidad de penetración de 2 mm/s en combinación con los parámetros que se mantuvieron constantes durante la experimentación, 3 s en tiempo de sostenimiento, 2,5 mm de penetración y sentido horario en el giro de la herramienta.

La herramienta fue fabricada de nitruro de boro cubico policristalino (PCBN) ver Figura 4, la cual tiene un hombro de 36,8 mm de diámetro, un pin de 5 mm de diámetro y 0,94 mm de longitud. La herramienta tiene una geometría convexa a lo ancho del área que conforma el hombro.

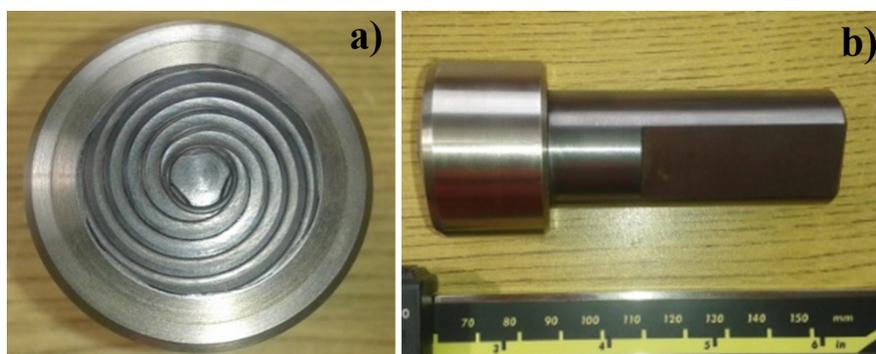


Figura 4. Herramienta utilizada para unir la aleación de titanio Ti-6Al-4V. (a) Vista de geometría del hombro y (b) Vista lateral de la herramienta.

Para colocar las láminas en el centro de maquinado de alta velocidad se fabricó un dispositivo de sujeción con la posición de tipo de junta a traslape de 20 mm considerando las dimensiones de las mismas y se colocó termopar tipo K para obtener la temperatura durante el proceso FSSW. Para unir el material fue realizado y ejecutando el programa elaborado previamente. La Figura 5 muestra el montaje en el centro de maquinado de CNC para realizar las soldaduras por punto.

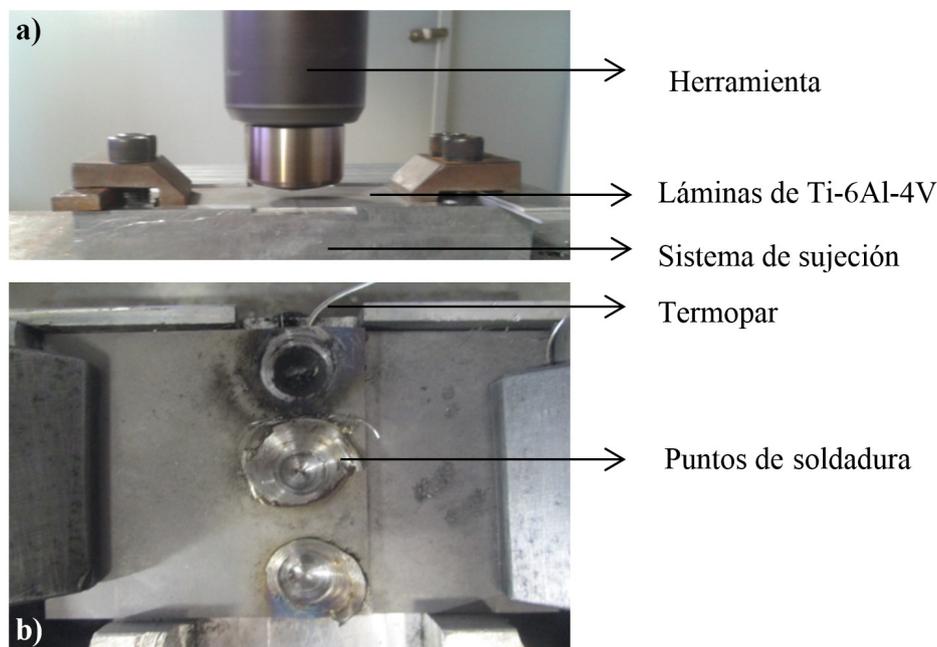


Figura 5. Proceso FSSW (a) Montaje de las láminas en el centro de maquinado CNC, (b) Vista superior de los puntos de soldadura por el proceso FSSW.

2.2. Materiales

Las pruebas de soldadura se realizaron en láminas de Ti-6Al-4V (50 mm x 50 mm x 1,5 mm), la composición química y propiedades mecánicas se muestra en la Tabla 2 y 3. De acuerdo a las configuraciones para procesos FSW [7], utilizaron las láminas en forma de traslape de 16 mm como se muestra en la Figura 6.

Tabla 2. Composición química (% e.p.) de aleación de Titanio Ti-6Al-4V [22].

C	O	N	Fe	Al	V	Ti
0,019	0,19 máx.	0,016	0,25 máx.	6,2	3,87	Balance

Tabla 3. Propiedades mecánicas de la aleación de Titanio Ti-6Al-4V [22].

Resistencia a la tensión (MPa)	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HV)
1040	1008	14,1	331

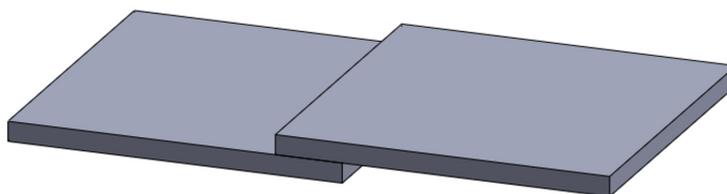


Figura 6. Tipo de junta a traslape utilizado para unir las láminas por el proceso FSSW.

2.3. Procedimiento de ensayos

Las muestras se identificaron de acuerdo a los parámetros utilizados en el proceso FSSW y posteriormente en cada una se realizó un corte transversal a través de la unión y se preparó una probeta aproximadamente 2,54 mm de diámetro para facilitar su manejo, se empleó el método de montaje en frío con resina epóxica. Posteriormente se realizó un desbaste inicial de la superficie con lija de SiC hasta granulometría 2200 seguido se pulieron utilizando paños con alúmina de 0,05 μm para dar un acabado tipo espejo, y finalmente las muestras se atacaron durante 15 segundos con un reactivo conocido como Kalling's, compuesto de 100 ml de HCl, 50 ml de etanol y 5 gr de CuCl_2 , con el propósito de revelar los límites de grano.

Las muestras fueron observadas mediante microscopía óptica (MO), utilizando un equipo de platina invertida, marca Zeiss, modelo Observer Z1 y por microscopía electrónica de barrido (MEB) utilizando un equipo marca Jeol, modelo 6510-LV para obtener la evolución de la microestructura e identificar las zonas características de la unión por el proceso FSSW.

Se obtuvieron los perfiles de dureza mediante un durómetro Shimadzu modelo HMV2 utilizando una carga de 980,7 mN por 15 s en cada medición [26]. Esta misma técnica y parámetros fueron utilizados para la medición de microdureza en el metal base. La probeta también fue sometida a ensayos de tracción uniaxial para evaluar las propiedades mecánicas de la unión. Los ensayos fueron realizados en una máquina servo hidráulica marca MTS Landmark modelo 64725, con una tasa de deformación constante de 0,02 s⁻¹.

3. Resultados y Discusión

La Figura 7a muestra una imagen del corte transversal y vista frontal de la unión estudiada. Se observa en una primera instancia la unión en una sección transversal y en la Figura 7b se observa la vista superior del punto de soldadura por proceso FSSW. Cabe mencionar que la prueba número 1 con combinación de 500 RPM, 1 mm/s y 3 s y la prueba número 5 con 437,86 RPM, 1,5 mm/s y 3 s no permitió la unión de las láminas.

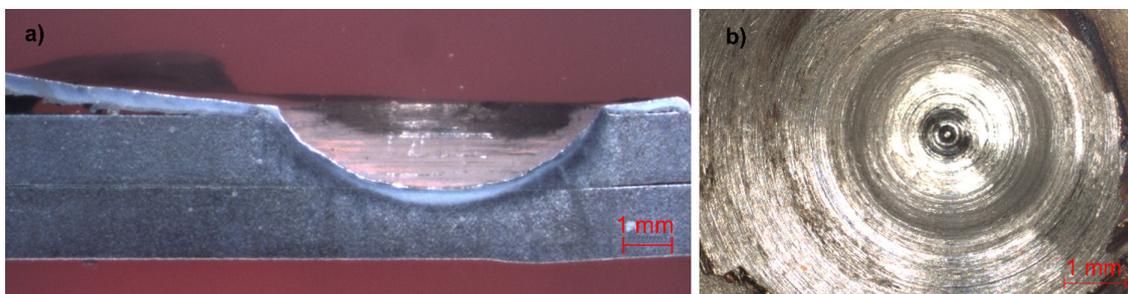


Figura 7. (a) Vista transversal de soldadura, (b) Vista superior del punto de soldadura por proceso FSSW.

3.1. Microestructura en el metal base y zonas de la unión

El Ti-6Al-4V como aleación bifásica que contiene 6% en masa de Al que estabiliza la fase α (HC) y 4% en masa de V que estabiliza la fase β (CC) y dependiendo del tratamiento térmico y del contenido en elementos intersticiales puede presentar diferentes tipos de microestructuras destacando la equiaxial, la martensítica, la laminar y la bimodal mezcla de equiaxial y laminar [27]. En la Figura 8 se observan imágenes obtenidas mediante microscopía óptica y electrónica de barrido donde se muestra el metal base tal como se recibió, el cual tiene una microestructura inicial compuesta por fases primaria α alongada + β laminar. En la Figura 8a se observan las regiones blancas y grises presentes en la micrografía obtenida en MO que representan la fase α y fase β respectivamente. En la Figura 8b se muestra imagen de electrones secundarios donde se detallan las fases α , fase β y $\alpha+\beta$ laminar presentes en la aleación.

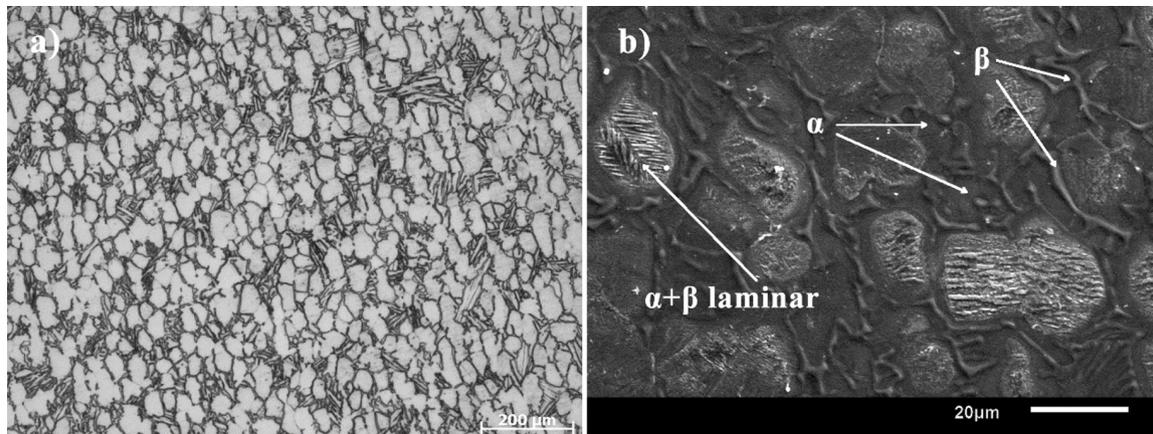


Figura 8. (a) Micrografía óptica metal base de aleación Ti-6Al-4V, (b) Imagen de electrones secundarios de la microestructura del metal base Ti-6Al-4V. Ataque con Kalling's.

Las micrografías de las probetas unidas bajo las condiciones de 500 RPM en velocidad de rotación, 2 mm/s en velocidad de penetración y 3 s en tiempo de sostenimiento se examinaron y según las observaciones del MO y MEB, la microestructura se puede dividir en cuatro zonas: una zona agitada (ZA), una zona afectada termomecánica (ZATM), una zona afectada por el calor (ZAC) y la zona del metal base (MB), adicionalmente se identifica material en la parte superior del punto que fue arrastrado por el pin y el hombro de la herramienta en un sentido ascendente.

Los límites entre las diferentes zonas están indicados por las líneas punteadas en la Figura 9. Un refinamiento de grano α se observa en la región ZA causado por el esfuerzo mecánico en la dirección de la fricción aplicada y en la zona ZATM los granos son alargados en dirección paralela a la frontera, lo que indica la evidencia de la deformación por efecto de la fricción y temperatura durante el proceso FSSW. La microestructura en la zona ZAC es similar a la del metal base, esta microestructura bimodal consiste en granos aislados de α en una matriz β transformada, esto implica que la temperatura en la zona ZAC es inferior a la temperatura transus β [28]. El material en la zona afectada por el calor no experimenta deformación plástica detectable durante el proceso FSSW. Por lo tanto, cualquier evolución microestructural en esta región resulta del aumento de la temperatura. En la Figura 9a, b se muestra a detalle la zona de agitación ZA, la zona afectada termomecánica ZATM y la zona afectada por el calor ZAC en la unión, evidencia de que puede ser unida mediante el proceso FSSW con éxito, utilizando una herramienta especialmente diseñada y fabricada de nitruro de boro cubico policristalino (PCBN).

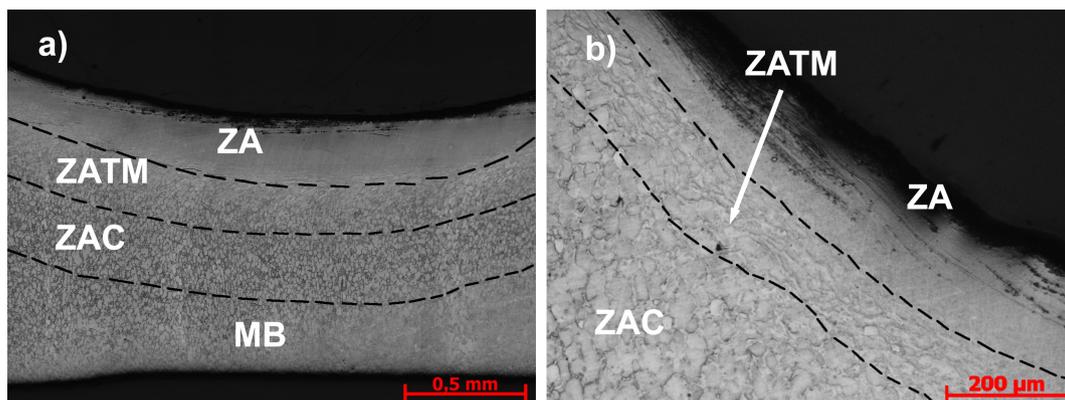


Figura 9. (a) Micrografía óptica de las zonas presentes en soldadura por proceso FSSW, (b) Micrografía a 100X cerca de la penetración que deja la herramienta donde se aprecian las zonas ZA, ZATM y ZAC.

La Figura 10 muestra las microestructuras obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB), en este caso puede observarse un refinamiento de grano en el botón de soldadura denominada ZA, al lado de la zona ZA se encuentra la ZATM con alargamiento de grano mostrando la evidencia de flujo de material durante el proceso de soldadura por puntos por fricción-agitación, la deformación plástica ocurre en la fase α , principalmente mediante deslizamiento de dislocaciones. Estas dislocaciones se emiten desde las interfaces α/β y se deslizan en planos basales, más que en planos prismáticos, debido a su compatibilidad con la interfaz HC-CC [29].

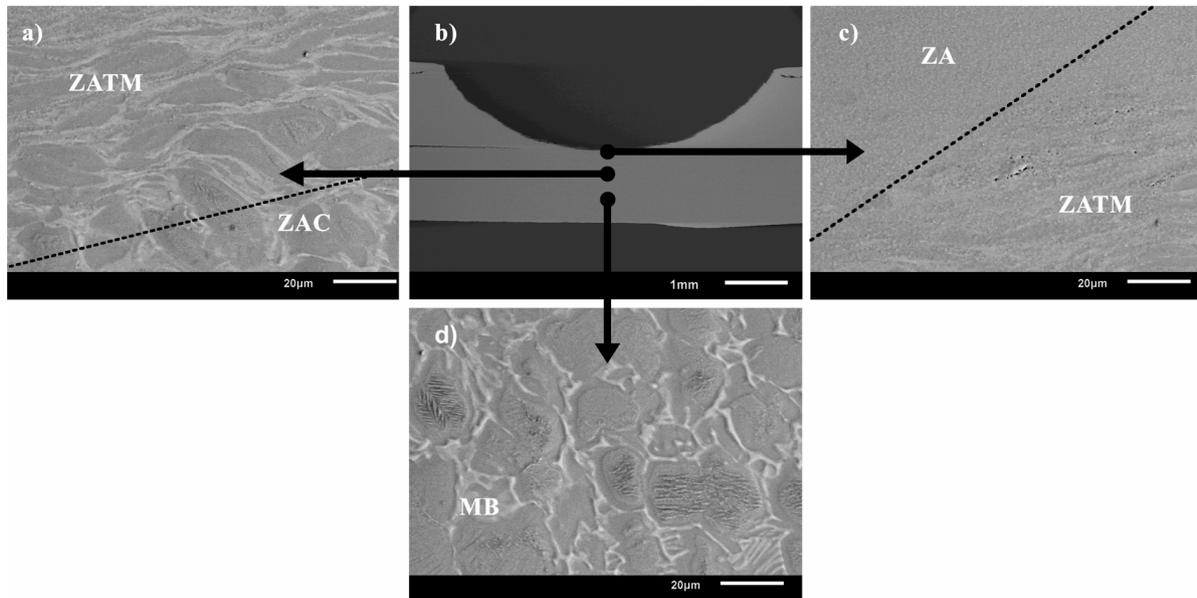


Figura 10. Micrografías obtenidas mediante MEB de la muestra con 500 RPM, 2,0 mm/s y 3 s (a) Micrografía donde se observan las zonas ZATM y ZAC (b) Imagen sección transversal del punto de soldadura (c) Micrografía donde se observan las zonas ZA y ZATM y (d) Micrografía donde se observa la zona del MB.

En las uniones efectuadas por el proceso de soldadura por puntos por fricción-agitación se observó una morfología laminar $\alpha+\beta$ en la ZA y una microestructura bimodal en la ZAC, la formación de la microestructura bimodal es debido al efecto de la combinación de la transformación de fase y de la recrystalización cuando se procesa, esta zona exhibe dureza menor que la zona MB, mientras que la zona ZA es la parte de la soldadura con una dureza cercana al promedio de la zona MB, la disminución de la dureza en la zona ZAC se puede explicar por el efecto de recocido causado por el calentamiento generado por la fricción. La microestructura en la ZA está influenciada significativamente por las velocidades de rotación y penetración. Para lograr la unión en la aleación de titanio $\alpha+\beta$ la temperatura en la zona ZA debe superar la temperatura β -transus, y por lo tanto se forma una microestructura laminar completa [30-32].

El perfil de temperatura del proceso FSSW se muestra en la Figura 11. La temperatura más alta se registra en 904°C manteniendo un rango entre 892°C a 904°C durante el tiempo de sostenimiento, esto significa que la unión de la aleación Ti-6Al-4V se procesó por arriba de la temperatura de transformación $T\beta$ [33]. Durante el enfriamiento, la transformación $\beta\rightarrow\alpha$ puede ocurrir por la difusión ordenada de los átomos mediante proceso de nucleación y crecimiento o por una transformación adifusional martensítica que depende de la velocidad y la composición de la aleación. Los sistemas $\beta+\alpha$ contienen elementos estabilizadores de las fases β y α . A consecuencia de esta combinación, es relativamente fácil alcanzar la temperatura de transformación transus β .

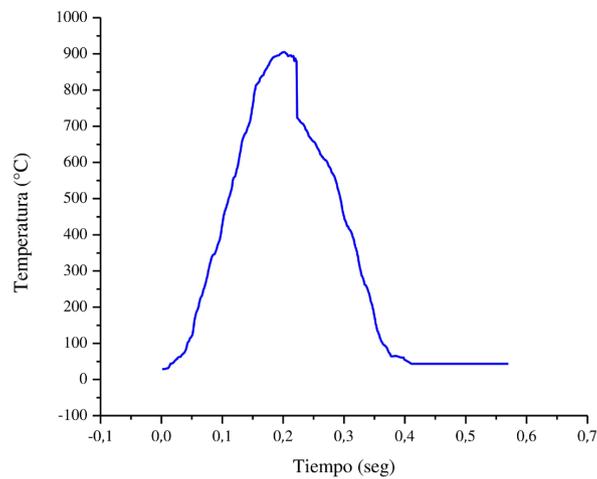


Figura 11. Perfil de temperatura.

3.2. Microdureza

El perfil de microdureza para las diversas zonas de la aleación de Titanio Ti-6Al-4V soldada por el proceso FSSW se muestra en la Figura 12. Se observa la variación de la dureza que experimenta la unión realizada por proceso FSSW con velocidad de rotación de 500 RPM, 2 mm/s en velocidad de penetración y 3 s en tiempo de sostenimiento. Se obtuvieron valores promedio partiendo desde la zona de agitación (ZA) de 356 HV, la zona afectada termomecánicamente (ZATM) de 355 HV, la zona afectada por el calor (ZAC) de 321 HV y el metal base (MB) de 360 HV, se puede observar que la zona de agitación tiene una dureza ligeramente menor que la del metal base, la disminución de la dureza en la zona afectada por el calor puede explicarse por el efecto de recocido causado por el calentamiento producido por la fricción [34].

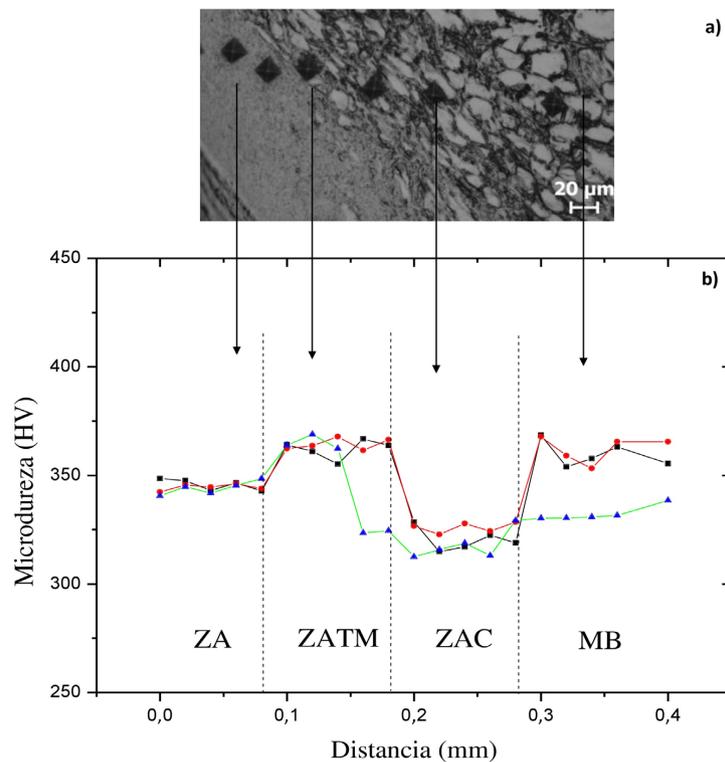


Figura 12. (a) Micrografía que indica donde fueron obtenidos los valores y (b) Perfil de microdureza Vickers de las zonas de soldadura producida a 500 RPM, 2 mm/s y 3s.

3.3. Ensayo de tensión

Las uniones soldadas con valores de parámetros de 500 RPM, 2 mm/s y 3 s en velocidad de giro, velocidad de penetración y tiempo de sostenimiento respectivamente, presentaron un modo de falla de forma circunferencial nugget pull-out o falla por desprendimiento en una de las zonas presentes en unión mediante FSSW. En la Figura 13a se muestra el montaje de la probeta y la Figura 13b muestra el modo de falla nugget pull-out en la zona afectada por calor, esta región exhibe la dureza con valores más bajos con respecto a los valores del metal base convirtiéndose en la posición de fallo durante el ensayo de tracción en el punto de la soldadura. La rotura de las probetas de los

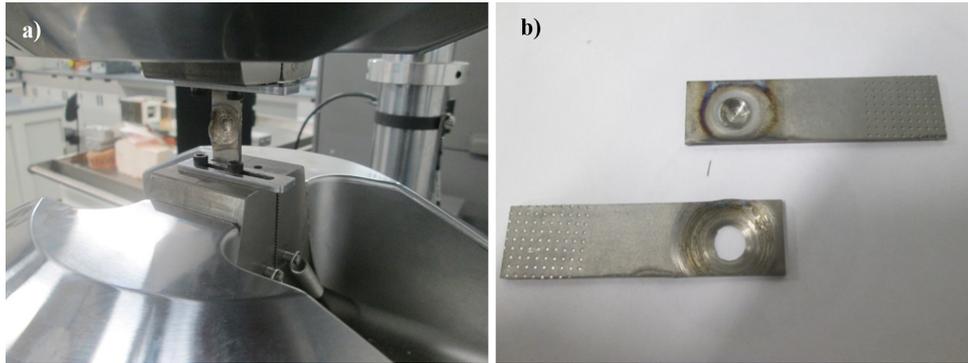


Figura 13. (a) Montaje de la probeta y (b) Probeta que muestra el modo de falla nugget pull-out en la zona afectada por calor de la soldadura producida a 500 RPM en velocidad de rotación, 2,0 mm/s en velocidad de penetración y 3 s en tiempo de sostenimiento.

ensayos de tracción se han producido al nivel de la zona ZAC y no al nivel de la soldadura, esto se debe a que el nivel de la unión en la zona recristalizada que esta caracterizada por un tamaño de granos finos inferior al tamaño de los granos del metal base, lo que proporciona a la unión una resistencia elevada. La relación Hall-Petch se deriva sobre la base del aumento de la resistencia que resulta del apilamiento de dislocaciones como obstáculos físicos, tales como límites de grano. A tamaños de granos finos, los granos individuales no pueden mantener más de una dislocación, por lo que la dureza no obedece la relación de Hall-Petch [35,36]. Las propiedades mecánicas de las aleaciones de titanio dependen en gran parte de su microestructura, es decir de la forma y del tamaño de los granos, y de la proporción de las fases α y β .

Los resultados de los ensayos de tensión sobre las probetas mostraron una tendencia de aumento con el incremento en la velocidad de rotación, se observa una tendencia de decremento con respecto a la combinación en velocidad de rotación y velocidad de penetración, ver Figura 14. Con velocidad de rotación de 500 RPM, 2 mm/s en velocidad de penetración y 3 s en tiempo de sostenimiento se observa que la resistencia a la tracción máxima

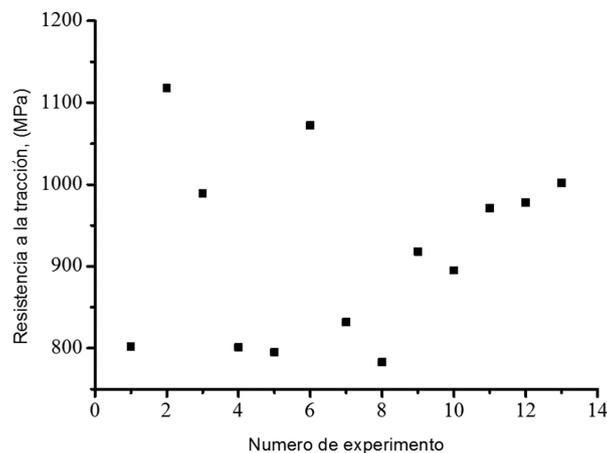


Figura 14. Gráfico de la relación de la Resistencia a la tracción de las uniones soldadas con respecto al número de experimentos desarrollados.

para la unión es de 989 MPa, y en el experimento 2 con 800 RPM, 1 mm/s y 3 s y el experimento 6 con 862,13 RPM, 1,5 mm/s y 3 s la resistencia a la tracción fue de 1118 MPa y 1072 MPa respectivamente.

4. Conclusiones

En este trabajo se han presentado resultados que permiten realizar la unión de una forma óptima mediante el proceso FSSW en la aleación de Titanio Ti-6Al-4V con valores en los parámetros de 500 RPM en velocidad de rotación, 2 mm/s en velocidad de penetración y 3 s en tiempo de sostenimiento.

Los valores de los parámetros de velocidad de giro de 500 RPM, velocidad de penetración de 2 mm/s y 3 s en tiempo de sostenimiento logran la unión de las láminas con espesor de 1,5 mm. La zona agitada ZA presentó granos finos con respecto al MB, mientras que la ZATM presenta las líneas de flujo que evidencia la deformación ocurrida y la zona ZAC presenta un microestructura similar a la del metal base.

Con los valores de 500 RPM, 1 mm/s y 3 s y con 437,86 RPM, 1,5 mm/s y 3 s no se logró generar soldaduras, este resultado podría explicarse por la recrystalización y el crecimiento de los granos por la concentración de calor por fricción de la herramienta a baja velocidad de penetración; mientras que para mayores velocidades de penetración se logra una plastificación suficiente en el material logrando soldadura en las láminas.

La temperatura máxima alcanzada en el proceso fue en la etapa del tiempo de sostenimiento, el perfil de microdureza presentó una disminución en la zona afectada por el calor (ZAC) obteniendo un promedio de 321 HV, la disminución de la dureza se dio por el efecto de recocido causado por el calentamiento producido por la fricción.

La falla de las probetas en los ensayos de tracción se produjo en la zona ZAC, la cual conservo una microestructura similar a la del metal base, las transformaciones microestructurales en la zona ZA y ZATM proporcionaron mejores propiedades mecánicas. Los valores más altos que se obtuvieron en la Resistencia a la tracción fueron en los experimento 6 con 862,13 RPM, 1,5 mm/s y 3 s, y en el experimento 2 con 800 RPM, 1 mm/s y 3 s, con estos resultados se observa un tendencia clara en el aumento de la resistencia a la tracción con el incremento en la velocidad de rotación, teniendo relación con el incremento de calor generado a mayores velocidades de rotación, condición en la cual se logra la plastificación del material que produce la unión.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A de C.V por las facilidades otorgadas para el desarrollo de la presente investigación. Flor Araceli García-Castillo agradece a PROMEP por la beca de posgrado.

Referencias

- [1] Davis JR, Johnson R, Stepanek J. Fundamentals of aerospace medicine. 4. ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2008. 725 p.
- [2] Airplanes BC. Statistical summary of commercial jet airplane accidents: worldwide operations 1959-2005. Seattle: Boeing Commercial Airlines; 2006.
- [3] John R, Jata KV, Sadananda K. Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys. *International Journal of Fatigue*. 2003;25(9):939-948. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.08.002>.
- [4] Cantor B, Assender H, Grant P. Aerospace materials and manufacturing processes at the millennium: aerospace materials. New York: CRC Press; 2010. 319 p.
- [5] Lippold JC, Livingston JJ. Microstructure Evolution During Friction Stir Processing and Hot Torsion Simulation of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science*. 2013;44(8):3815-3825. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-013-1764-1>.
- [6] Zhou L, Liu HJ, Liu QW. Effect of process parameters on stir zone microstructure in Ti-6Al-4V friction stir welds. *Journal of Materials Science*. 2010;45(1):39-45. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-009-3881-1>.
- [7] Mishra RS, Ma ZY. Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2005;50(1):1-78.
- [8] Dawes CJ, Thomas WM. Friction stir process welds aluminium alloys: the process produces low-distortion, high-quality, low-cost welds on aluminium. *Welding Journal*. 1996;75(3):41-45.
- [9] Thomas WM, Dolby RE. Friction stir welding developments. In: David SA, DebRoy T, Lippold JC, Smartt HB, Vitek JM, editors. *Proceedings of the 6th International Trends in Welding Research*; 2003; Materials Park, USA. Ohio: ASM International; 2003. p. 203-211.
- [10] Nandan R, Debroy T, Bhadeshia HKDH. Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2008;53(6):980-1023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>.

- [11] Mishra RS, Mahoney MW, editors. Introduction, friction stir welding and processing. Ohio: ASM International; 2007.
- [12] Rai R, De A, Bhadeshia HKDH, DebRoy T. Review: friction stir welding tools. *Science and Technology of Welding Joining*. 2011;16(4):325-342. <http://dx.doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023>
- [13] Zimmer S, Langlois L, Laye J, Bigot R. Experimental investigation of the influence of the FSW plunge processing parameters on the maximum generated force and torque. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010;47(1-4):201-215. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-009-2188-3>.
- [14] McNelley, T. R. Procesado por fricción batida (FSP): afino de la microestructura y mejora de propiedades. *Revista de Metalurgia*. 2010;46(Extra):149-156. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalMadrid.19XIIPMS>.
- [15] Bozkurt Y, Salman S, Çam G. Effect of welding parameters on lap shear tensile properties of dissimilar friction stir spot welded AA 5754-H22/2024-T3 joints. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013;18(4):337-345. <http://dx.doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000111>.
- [16] Lakshminarayanan, A. K., Annamalai, V. E., & Elangovan, K. Identification of optimum friction stir spot welding process parameters controlling the properties of low carbon automotive steel joints. *Journal of Materials Research and Technology*. 2015;4(3):262-272. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.01.001>.
- [17] Mahmoud TS, Khalifa TA. Microstructural and mechanical characteristics of aluminum alloy AA5754 friction stir spot welds. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014;23(3):898-905. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-013-0828-0>.
- [18] D'Urso G, Giardini C. FEM model for the thermo-mechanical characterization of friction stir spot welded joints. *International Journal of Material Forming*. 2015;9(2):149-160. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-015-1218-y>.
- [19] Tutar M, Aydin H, Yuce C, Yavuz N, Bayram A. The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array. *Materials & Design*. 2014;63:789-797. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.003>.
- [20] Babu S, Sankar VS, Ram GJ, Venkitakrishnan PV, Reddy GM, Rao KP. Microstructures and mechanical properties of friction stir spot welded aluminum alloy AA2014. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013;22(1):71-84. <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-012-0218-z>.
- [21] Fanelli P, Vivio F, Vullo V. Experimental and numerical characterization of Friction Stir Spot Welded joints. *Engineering Fracture Mechanics*. 2012;81:17-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.07.009>.
- [22] Arbegast WJ. Constitutive analysis, modeling and simulation. In: Jin Z, Beaudoin A, Bieler TA, Radhakrishnan B, editors. Hot deformation of aluminum alloys III. Warrendale: John Wiley & Sons; 2003. 313 p.
- [23] Donachie MJ. Titanium: a technical guide. 2. ed. Ohio: ASM international; 2000. 369 p.
- [24] Welsch G, Boyer R, Collings EW, editors. Materials properties handbook: titanium alloys. 4. ed. Ohio: ASM international; 1993. 1047 p.
- [25] Mishra R, De P, Kumar N. Friction stir welding and processing. New York: Springer; 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-07043-8>.
- [26] Kitamura K, Fujii H, Iwata Y, Sun YS, Morisada Y. Flexible control of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded Ti-6Al-4V joints. *Materials & Design*. 2013;46:348-354. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.051>.
- [27] Kaixuan W, Weidong Z, Yitao S, Yongqing Z, Yigang Z. Quantification of microstructural features in titanium alloys based on stereology. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2009;38(3):398-403. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.008>.
- [28] Elmer JW, Palmer TA, Babu SS, Zhang W. Phase transformation dynamics during welding of Ti-6Al-4V. *Journal of Applied Physics*. 2004;95(12):8327-8339. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1737476>.
- [29] Salem AA, Semiatiin SL. Anisotropy of the hot plastic deformation of Ti-6Al-4V single-colony samples. *Materials Science and Engineering A*. 2009;508(1):114-120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2008.12.035>.
- [30] Knipling KE, Fonda RW. Texture development in the stir zone of near- α titanium friction stir welds. *Scripta Materialia*. 2009;60(12):1097-1100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.02.050>.
- [31] Ramirez AJ, Juhas MC. Microstructural evolution in Ti-6Al-4V friction stir welds. En *Materials Science Forum*. 2003;426-432:2999-3004. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.426-432.2999>.
- [32] Zhang Y, Sato YS, Kokawa H, Park SHC, Hirano S. Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*. 2008;485:448-455. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.05>
- [33] Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys. Weinheim: Wiley-VCH; 2003. 207 p.
- [34] Liu HJ, Zhou L, Liu QW. Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded joints of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Materials & Design*. 2010;31(3):1650-1655. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.025>.
- [35] Suryanarayana C. Nanocrystalline materials. *International Materials Reviews*. 1995;40(2):41-64. <http://dx.doi.org/10.1179/imr.1995.40.2.41>.
- [36] Nieh TG, Wadsworth J. Hall-Petch relation in nanocrystalline solids. *Scripta Metallurgica et Materialia*. 1991;25(4):955-958. [http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X\(91\)90256-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0956-716X(91)90256-Z).