

Empleo del fenómeno de la fricción rotativa en máquina torno para la unión de aleaciones disímiles

Ledennis Torres Suárez

lstorres@ismm.edu.cu

Tomás Fernández Columbié

Yanelis Marzo Herrera

ymarzo@ismm.edu.cu

Elís Guzmán Romero

Universidad de Moa

Resumen: Se obtuvo la unión metalúrgica entre la aleación de cobre Cu-DHP y el acero AISI 1045 a partir del fenómeno de la fricción rotativa con el empleo de una máquina herramienta torno. La unión se realizó con 1 400 r/min en barras de 12 mm de diámetro y 100 mm de longitud, se aplicó presión de soldadura de 30 MPa. Las variables del proceso fueron el tiempo de soldadura, la presión y el tiempo de forja. En la zona termomecánicamente afectada y la térmica afectada, se pudo determinar que, existe la fase α y β y óxido cuproso (Cu_2O) en el lado del Cu-DHP y en el acero AISI 1045, la presencia de la fase austenítica residual, la martensita y fase α , producto de la interacción atómica entre ambas aleaciones. La dureza se incrementó desde 89,7 HV en el cobre y 180 HV en el AISI 1045 hasta 389 HV en la ZTMA.

Palabras claves: fricción rotativa; disímil; forja; dureza.

Use of the phenomenon of rotary friction in a lathe machine for the union of dissimile alloys

Abstract: The metallurgical union between the Cu-DHP copper alloy and the AISI 1045 steel was obtained from the phenomenon of rotary friction with the use of a lathe machine tool. The union was made with a number of revolutions of 1 400 r/min in bars of 12 mm in diameter and 100 mm in length, welding pressure of 30 MPa was applied. Process variables were welding time, pressure, and forging time. In the thermomechanically affected zone and the affected thermal zone, it was possible to determine that there is the α and β phase and cuprous oxide (Cu_2O) on the Cu-DHP side and in the AISI 1045 steel, the presence of the residual austenitic phase, the martensite and α phase, product of the atomic interaction between both alloys. The hardness increased from 89.7 HV in copper and 180 HV in AISI 1045 to 389 HV in ZTMA.

Keywords: rotary friction; dissimilar; forging; hardness

Introducción

El proceso de soldadura por fricción es una técnica de unión en estado sólido usada para soldar materiales similares y disímiles con integridad. En este proceso, el calor es generado por la conversión de energía mecánica en térmica en la interfase de unión de las piezas durante la rotación bajo presión. Es un proceso metalúrgico que está acompañado por la generación friccional de calor, deformación plástica, enfriamiento de metal a alta temperatura y variación de fase en estado sólido, donde el ciclo térmico de la soldadura por fricción es corto.

De acuerdo con Kimura *et al.* (2015) y Guzmán-Romero *et al.* (2017), esta soldadura tiene la finalidad de lograr uniones en materiales con perfiles cilíndricos que no pueden ser soldadas de forma convencional. Conocido como el proceso de unión de dos piezas en un estado sólido, la soldadura por fricción rotativa, es un proceso utilizado en áreas de la industria manufacturera, la naval, aeroespacial y el transporte terrestre y en menor escala; la de motorización eléctrica, en electrodomésticos, para la fabricación de tanques, tanto para almacenar de líquidos como gases y en la química y agrícola.

Refieren Seshagirirao, Sivaramakrishna & Saikrishnaprasad (2015) y Koteswara *et al.* (2017) que, el proceso se realiza en estado sólido, donde se mezclan los materiales, sin llegar a la temperatura de fusión. Debido a la fricción de una de las piezas con respecto de la otra con la producción de calor, se desplaza plásticamente material de empalme y se produce la unión. No se requiere metal de aporte, fundente, ni gas protector, ofrece propiedades mecánicas y se puede automatizar con la utilización de máquinas y herramientas ya existentes. Es una técnica generosa con el medio ambiente por no producir gases tóxicos, radiación, ni chispa alguna. Supera métodos convencionales de arco eléctrico y permite obtener juntas sanas a temperaturas por debajo que las producidas por estos procesos (Weglowski, 2011; Mumin, 2016).

Según Buffa *et al.* (2008) y Mercan, Aydin & Ozdemir (2015), la distribución de esfuerzos residuales en la dirección radial presenta un perfil en forma de "M", donde las tensiones a tracción más elevadas se alcanzan a una distancia similar a la cual finaliza el cordón, entre la zona afectada termomecánicamente y la afectada térmicamente; mientras que en la zona de mezcla dichos esfuerzos siguen, siendo a tracción, pero con magnitudes inferiores comparados con los alcanzados en la región termomecánicamente afectada.

De acuerdo con Sriram & Ramadoss (2015) se puede emplear para unir variedad de materiales, siempre y cuando uno de los componentes tenga simetría rotacional. Es posible unir las partes sólidas o tubulares con buena resistencia. Se ha logrado unir con éxito, barras de acero con hasta 100 mm de diámetro y tubos que llegan a los 250 mm de diámetro exterior.

Seshagirirao, Sivaramakrishna & Saikrishnaprasad (2015) exponen que en la etapa de fricción, al hacer contacto las piezas, existe adherencia entre las superficies de empalme y una adhesión en diversos puntos de contacto, con el cizallamiento se transfiere metal de una superficie a otra, con incremento del par de torsión y la temperatura de la interfase. El tamaño de los fragmentos transferidos crece hasta que estos se convierten en una capa continua de metal plastificado.

Al rotar el componente axialmente simétrico contra otro estático, con aplicación de fuerza, en espacio de tiempo de segundos, el punto de unión alcanza la temperatura y cesa la rotación, con la aplicación de una fuerza que forja y consolida la unión. En el proceso se combinan los parámetros velocidad de rotación, tiempo, temperatura y fuerza para obtener la soldadura de los diversos materiales (Shanjeevi *et al.*, 2017). En la etapa de forjado de acuerdo con Suppachai *et al.* (2017), se aplica una presión después del calentamiento para que la pieza de trabajo experimente un acortamiento axial. Este vuelco produce material forjado o deformado. A continuación, el par de torsión que se produce disminuye y la velocidad rotacional baja hasta cero.

La formación de tensiones residuales en las uniones soldadas se debe a la presencia de campos no uniformes de deformaciones no elásticas, las plásticas y las térmicas mientras se efectúa la soldadura. Al ser las temperaturas alcanzadas menores que la de fusión, se considera que, estas tensiones sean menores a las generadas en soldaduras por fusión. Sin embargo, se requiere una sujeción rígida de las piezas a unir, que restringe la contracción durante el enfriamiento, lo que genera un aumento en las tensiones por esta causa (Guzmán-Romero *et al.*, 2017).

El trabajo tiene como objetivo obtener, a través de la fricción radial o rotativa, la unión metalúrgica en barras de acero AISI 1045 y de cobre en una máquina herramienta tipo torno.

Desarrollo experimental

La composición química de las aleaciones a unir por fricción rotativa se determinó en un espectrómetro cuántico de masa, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química de las aleaciones, % en masa

Aleación	C	Mn	P	S	Si	Cu	Fe
AISI 1045	0,44	0,90	0,04	0,05	0,2	0,02	97,75
Cu-DHP	Sn	Pb	Zn	S	Ni	P	Cu
	0,010	0,011	0,010	0,002	0,044	0,020	99,86

El acero AISI 1045 es de medio contenido de carbono que presenta una microestructura ferrita/perlita. Aunque el contenido del carbono no es el único factor que afecta la soldabilidad, al incrementar el por ciento de este elemento, aumenta el agrietamiento en el mismo. Al alcanzar niveles en el rango de 0,30 a 0,35 %, se requiere tomar precauciones, como son el precalentamiento, el control de la entrada de calor y el tratamiento térmico post soldadura.

Según la designación es un cobre de alta conductividad, dentro de sus elementos, el fósforo afecta la conductividad eléctrica, sin embargo, en estado de recocido es de 57 o 58 m/mm². No se recomienda su soldadura sin material de aporte, debido al contenido de oxígeno, tiende a la formación de grietas. Se aplica donde está presente el fenómeno de la corrosión.

Proceso de instalación de las piezas para la unión

En la figura 1 se muestra la forma de instalación considerada para la realización de la junta de soldadura entre el acero AISI 1045 y el cobre Cu-DHP. El proceso se realizó en barras de 12 milímetros de diámetro.

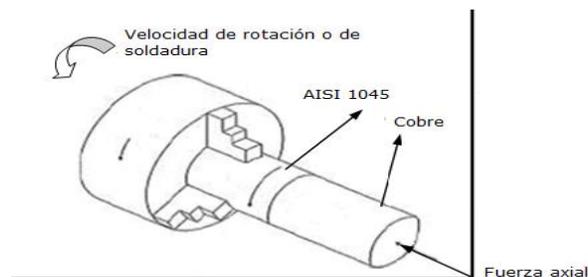


Figura 1. Procedimiento empleado para la soldadura por fricción radial o rotativa.

La máquina herramienta empleada fue el torno C 11 MT. Para la ejecución de la unión por fricción radial entre el acero AISI 1045 y el cobre Cu-DHP, se consideró que rotara el primero, instalándose en el plato autocentrante de tres muelas, el segundo se fijó en un portabroca.

Variables operativas utilizadas para el proceso de unión

En la tabla 2 se muestran los parámetros empleados para la unión de las barras. Se realizaron tres uniones, donde el número de revoluciones y la presión de soldadura fueron constantes para determinar el tiempo de ejecución del proceso, la presión y el tiempo de forja.

Tabla 2. Parámetros del proceso de soldadura

No. experimentos	Parámetros		
	Tiempo de soldadura (s)	Presión de forja (MPa)	Tiempo de forja (s)
1	X	X	X
2	X	X	X
3	X	X	X

Las muestras antes de ser soldadas fueron refrentadas hasta obtener en las superficies a unir paralelismo entre ellas. La velocidad de rotación o de soldadura fue de 1 400 r/min y la presión aplicada de 30 MPa.

Preparación metalográfica de las probetas

La preparación de las probetas se realizó según las normas ASTM E3-95. Se emplearon semiproductos con longitudes de 100 mm. En la figura 2a se muestran los empleados para la soldadura y en la 2b, las uniones soldadas.

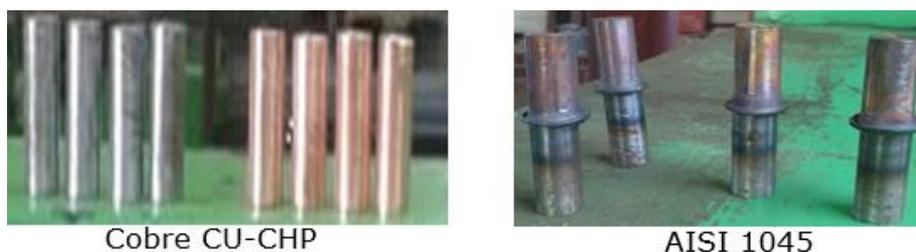


Figura 2 a) Barras para las uniones. b) Unión obtenida por la fricción.

Según las soldaduras realizadas y observadas macroscópicamente, no se visualizan defectos que puedan invalidar la junta. En la unión, el cobre ha formado una pepita, lo

cual está asociado a la que presenta una temperatura de fusión menor que la del acero AISI 1045.

Se realizó un corte transversal sin refrigeración, con una segueta manual, para obtener las dimensiones de la superficie a examinar, como se observa en la figura 3, de esta forma se evita el excesivo calentamiento que se genera por efecto de la fricción. La sujeción se realizó en una mordaza. Dicho corte permitiera su manipulación y posterior nivelación, así como el ataque químico, la longitud de las probetas elaboradas fueron de 15 mm. Luego de pulidas se les aplicó un reactivo sobre las superficies, para el acero AISI 1045 se empleó el nital al 4 % y para el cobre el dicromato potásico.



Figura 3. Muestras seccionadas transversalmente.

El corte se realizó de forma que se pudiera aprovechar las zonas con un mayor espesor de soldadura para su fácil manipulación y posterior nivelación, así como el ataque químico. Luego fueron encapsuladas para conservar durante las operaciones de desbaste y pulido, un ángulo de 90° en el área a observar.

Para la medición de la dureza, se realizó un barrido, donde se consideraron las diferentes zonas de la unión soldada. El mismo procedimiento se tuvo en cuenta para el análisis microestructural. Como en el proceso de soldadura por fricción radial, las zonas que se obtienen son de pequeña área, se precisó la limitación de cada una de ellas, se midió la dureza en el material base (MB), en la zona afectada térmicamente (ZAT) y en la termomecánicamente afectada (ZTMA), esto se realizó en las zonas de ambas aleaciones.

Microestructura patrón de las aleaciones

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, se empleó un microscopio óptico marca NOVEL modelo NIM-100, las cuales se acoplaron en un dispositivo con plastilina para la nivelación de las mismas. Se realizó para observar el

comportamiento microestructural y emplearla para establecer la comparación luego de realizado el proceso de soldadura. Las muestras de las figuras 4 se corresponden con la estructura metalográfica del cobre CU-DHP y el AISI 1045.

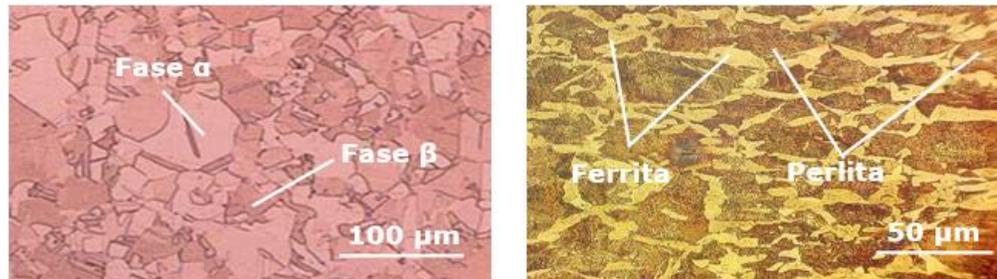


Figura 4 a) Microestructura del cobre. b) Microestructura del AISI 1045.

En la estructura del cobre CU-CDH, se observan granos equiaxiales, con una fase α clara y una fase β oscura. Aparecen en forma de rosarios alargados y la estructura atacada se compone de granos maclados de cobre con tamaño uniforme. En el AISI 1045, tiene como constituyente la ferrita y como disperso la perlita, distribuidos casi de forma equitativa sobre la matriz. Se trata de un acero hipoeutectoide, con un contenido menor de 0,8 % C. El objetivo fue obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que permitiera determinar, luego de la soldadura, los cambios ocurridos en la zona afectada térmicamente (ZAT), en la termomecánicamente afectada (ZTMA) y el metal base (MB).

Resultados y discusión

Comportamiento de los parámetros de soldadura

En la tabla 3 se muestra los resultados obtenidos de los parámetros empleados en el proceso de soldadura por fricción radial o rotativa entre el acero AISI 1045 y el cobre Cu-DHP.

Tabla 3. Parámetros de soldadura determinados

No. experimentos	Parámetros		
	Tiempo de soldadura (s)	Presión de forja (MPa)	Tiempo de forja (s)
1	12	10	6
2	14	11	8
3	11	10	5

Para la ejecución del proceso de soldadura con la velocidad de rotación de 1 400 r/min y la presión aplicada de 30 MPa, se logró la unión de las barras de cobre y acero en un

tiempo de soldadura promedio de 12 s, con una presión de forja de 10 MPa y tiempo de 6,3 s. Los mismos están asociados a las características que presenta la soldadura como proceso termomecánico de ambos materiales base, que incluye el calentamiento adicional producido por las deformaciones, a la fuerza de contacto que garantiza que, al calentarse, por efecto de la fatiga térmica, el material se mezcle por medio de la turbulencia, reportado por Mumin (2016). En cada una de las muestras no siempre se obtiene la misma precisión de ejecución, pero si se encuentra entre los parámetros establecidos para lograrla.

Análisis de la microestructura en la ZTMA

Para realizar el análisis microestructural de las muestras, se tuvo en cuenta las diferentes condiciones de soldadura a las que fueron sometidas. Las microestructuras analizadas en las figuras 5 se muestra la zona termomecánicamente afectada.

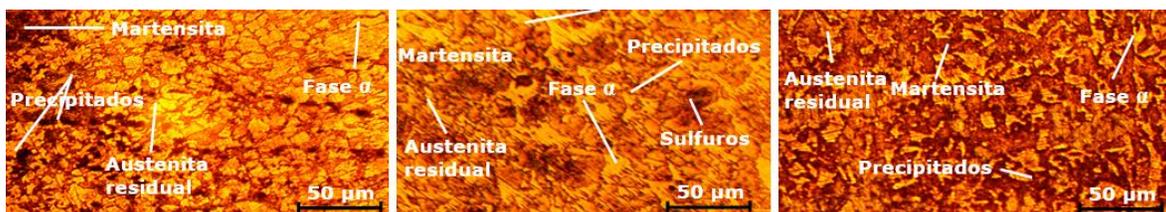


Figura 5 a) Muestra 1. b) Muestra 2. c) Muestra 3.

Se observa en cada una de las probetas los cambios ocurridos en las estructuras, donde el tamaño de grano se reduce en la medida que se aproxima a la zona de la unión soldada, esto es por la acción del calor provocado por el frotamiento pieza con pieza, para la realización del soldeo por fricción. En las tres muestras se observa la presencia de la martensita y la austenita residual, así como la presencia de la fase α , esta última producto de la unión interatómica entre ambos.

También es consistente la formación de la fase martensítica, lo cual es producto del contenido de carbono en el AISI 1045, la presencia de la austenita retenida es debido a la temperatura de plastificación de 1 392 °C con un proceso que ocurre en un período de tiempo rápido de 4 s, donde todo el carbono no tiene tiempo de transformarse y da lugar a la formación de esta fase.

El mayor destello de la soldadura ocurre en el cobre, debido a su menor temperatura de fusión, además en la estructura de este se han formado partículas eutécticas, con puntos oscuros (precipitados), mezcla de cobre puro y óxido cuproso (Cu_2O), disperso

en la superficie. Un refinamiento de grano α se observa en la región causado por el esfuerzo mecánico en la dirección de la fricción aplicada y en la zona termomecánicamente afectada los granos son alargados en dirección paralela a la frontera, que indica la deformación por efecto de la fricción y temperatura durante el proceso, reportado por Liang *et al.* (2015).

Análisis de la microestructura en la ZAT

El comportamiento microestructural relacionado con la figura 6 se corresponde con la zona térmica afectada. La 6a es la del acero AISI 1045 y la 6b la del cobre Cu-DHP.

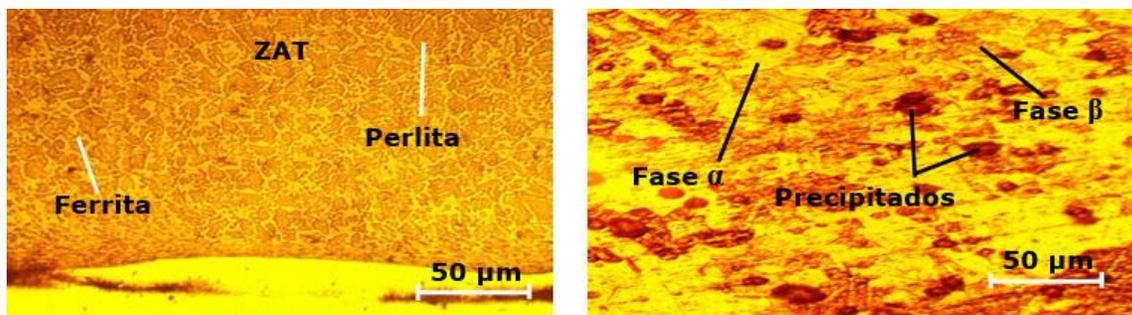


Figura 6 b) ZTA (AISI 1045). b) ZAT(Cu-DHP).

La microestructura en la ZAT es similar a la del metal base. En el acero AISI 1045, se observa la presencia de ferrita y perlita, formación de granos de estas dos fases de forma equiaxial, pero de un menor tamaño en relación a la muestra patrón. La estructura del cobre mantiene la formación de la fase α y la β , donde ha ocurrido un refinamiento en el tamaño de los granos de ambas fases, se observan precipitados, mezcla de cobre puro y óxido cuproso (Cu_2O), disperso en la superficie del cobre.

Las transformaciones experimentadas en ambas aleaciones implican que, la temperatura en la ZTA es inferior a la que ocurre en la ZTMA. El material en la afectada por el calor no experimenta deformación plástica detectable durante el proceso, por lo tanto, cualquier evolución microestructural en esta región resulta del aumento de la temperatura, según lo ha reportado Maalekian y Cerjak (2015).

Análisis de la microestructura en la interfase

El efecto de los parámetros de soldadura en las transformaciones microestructurales originadas en la interfase de la soldadura se muestra en la figura 7.

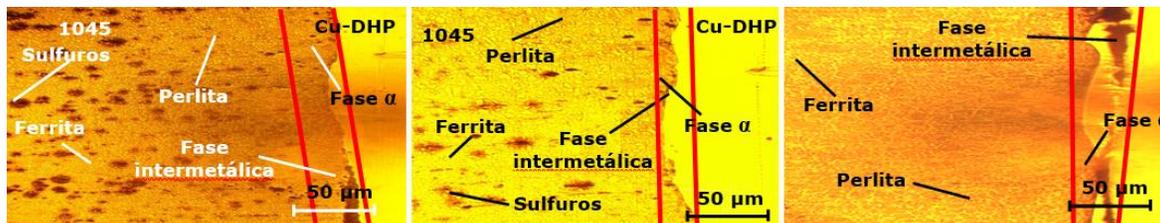


Figura 7 a) Muestra 1. b) Muestra 2. c) Muestra 3.

Luego de sobrepasar la línea del centro de unión, en la interfase, los granos son más finos, lo cual es atribuible al aporte de calor y el sub enfriamiento en esta zona, además de la posible recristalización y crecimiento de grano. En las tres muestras existe la formación de fase intermetálica en el centro ya que los granos fueron sometidos a proceso de deformación y trajo consigo el flujo de material debido a las variables del proceso de fricción. La formación de los mismos es equiaxial y finos.

Las microestructuras presentan una estructura de mayor tamaño en el crecimiento de grano. La fuerza impulsora del proceso del crecimiento de estos granos resulta de la disminución de la energía libre, como consecuencia de la reducción del área de la frontera de grano. El crecimiento se produce por difusión al ser la temperatura suficientemente elevada y el tiempo de tratamiento térmico largo, lo que fue reportado por Liang *et al.* (2015).

Análisis de la microdureza en las diferentes zonas

En la tabla 4 se muestra los resultados de dureza obtenidos para el material de acuerdo a cada condición de selección de las muestras, tanto en las secciones transversales y longitudinales.

Tabla 4. Dureza en las diferentes zonas de las uniones

Probeta	Dureza MB (HV)	Dureza ZAT (HV)	Dureza ZTMA (HV)
1	89,7/180	370	389
2	89,7/180	364	384
3	89,7/180	360	380

Se observa la variación de la dureza obtenidas en las uniones soldadas. A partir de los materiales base, esta propiedad se reduce más en la ZAT con respecto a la ZTMA donde presenta un incremento cerca de la periferia, el cual puede estar asociado a factores como la presencia de la martensita y de los precipitados de cobre que se forman luego del proceso de fricción. La presión provoca la compactación y

disminución de los granos en la línea central de la soldadura. Esta zona presenta una estructura de grano más fina motivado al rápido enfriamiento del pozo de soldadura.

Conclusiones

Los parámetros establecidos para la unión entre el acero AISI 1045 y el cobre Cu-DHP ejercen influencias para lograr la unión interatómica entre ambas aleaciones y producir cambios en las microestructuras y la morfología de las mismas.

Los parámetros de soldadura por fricción como la velocidad de rotación, la presión axial, el tiempo de soldadura, la presión y tiempo de forja, permiten obtener la unión metalúrgica entre el acero AISI 1045 y el cobre Cu-DHP bajo estas condiciones, sin embargo, por la diferencia de temperatura, este último tiende a acortarse más rápido.

Al realizar la dureza en las diferentes zonas, teniendo en cuenta una relación de 89,7/180 HV en ambos materiales bases, en la zona térmica afecta esta propiedad se incrementa hasta 370 HV y en la zona termomecánicamente afectada hasta 389 HV, siendo la martensita y los precipitados de cobre quienes mayores influencias ejercen.

Referencias bibliográficas

- BUFFA, G.; FRATINI, L.; PASTA, S. & SHIVPURI, R. 2008. On the thermo-mechanical loads and the resultant residual stresses in friction stir processing operations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 57(1): 287-290.
- GUZMÁN-ROMERO, E.; FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; ALCÁNTARA-BORGES, D. & RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I. 2017. Efecto de la velocidad angular y la presión en el proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754. *Minería y Geología* 33(3): 312-325.
- KIMURA, M.; FUJI, A. & SHIBATA, S. 2015. Joint properties of friction welded joint between pure magnesium and pure aluminium with post-weld heat treatment. *Materials and Design* 85(10): 169-179.
- KOTESWARA, P.; MOHAN, V.; SURYA, N. & KRISHNA, G. 2017. Effect of speed on hardness in rotary friction welding process. *International Journal of Materials Science* 12(4): 635-641.

- LIANG, Z.; QIN, G.; WANG, L.; MENG, X. & LI, F. 2015. Microstructural characterization and mechanical properties of dissimilar friction welding of 1060 aluminum to AZ31B magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A* 645(214): 170-180.
- MAALEKIAN, M. & CERJAK, H. 2015. Modelling the orbital friction welding of pearlitic steel bars, Trends in Welding Research, Proceedings of the 8th conference, 736-741.
- MERCAN, S.; AYDIN, S. & OZDEMIR, N. 2015. Effect of welding parameters on the fatigue properties of dissimilar AISI 2205–AISI 1020 joined by friction welding. *International Journal of Fatigue*. 81(12): 78-90.
- MUMIN, S. 2016. Optimizing the parameters for friction welding stainless steel to copper Parts. *Materials and technology* 50(1): 109-115.
- SESHAGIRIRAO, B.; SIVARAMAKRISHNA, V. & SAIKRISHNAPRASAD, G. 2015. Experimental investigation of rotary friction welding parameters of aluminum (H-30) and mild steel (AISI-1040). *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 4(5): 2920-2925.
- SHANJEEVI, C.; JESWIN. J.; ARPUTHABALAN, R.; DUTTA, D. & PRADEEP, S. 2017. Investigation on the effect of friction welding parameters on impact strength in dissimilar joints. *Materials Science and Engineering* 197(100): 3-7.
- SRIRAM, R. & RAMADOSS. R. 2015. A study on mechanical and metallurgical properties of friction welded dissimilar materials. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* 3(1): 32-38.
- SUPPACHAI, C.; CHAIYOOT, M. & MUHAMAD, T. 2017. Rotary friction welding of dissimilar joints between SSM 356 and SSM 6061 aluminum alloys produced by GISS. *Engineering Journal* 21(1): 181-191.
- WEGLOWSKI, A. 2011. Friction stir processing-analysis of the process. *Archives of metallurgy and materials* 56(12): 779-788.