

Temperaturas generadas en una soldadura por fricción radial disímil mediante elementos finitos

Rafael Ngombo Dombaxe

ngomboambrosiod@gmail.com

Tomás Fernández Columbié

tfernandez@ismm.edu.cu

Eider Gresesqui Lobaina

egresesqui@ismm.edu.cu

Eider Sánchez Olivero

Universidad de Moa (Cuba).

Resumen: Se establecieron las temperaturas que se generan en la soldadura por fricción en barras de acero AISI 316L y el cobre Cu-DHP por medio del método de los elementos finitos (MEF). La simulación se realiza a partir de barras de 12 mm de diámetro y 100 mm de longitud, donde se considera que rota el primero a 1 200 r/m y se le aplica presión de 30 MPa. El mallado se estructuró con 1 358 nodos y 473 mallas. Se determinó que, la máxima temperatura se obtiene a 1 059 °C en la barra de cobre con variación en la interfase entre 945,61 °C y 831,41 °C y que durante el flujo de calor existe un descenso en la línea central de la soldadura.

Palabras claves: elementos finitos; temperatura; flujo de calor; fricción radial.

Temperatures generated in a dissimilar radial friction welding through finite elements

Abstract: The objective of the work is to establish the temperatures that are generated in friction welding in AISI 316L steel bars and Cu-DHP copper by means of the finite element method (FEM). The simulation is carried out using bars of 12 mm in diameter and 100 mm in length, where the first is considered to rotate at 1200 r/m and a pressure of 30 MPa is applied. The mesh was structured with 1358 nodes and 473 meshes. It was determined that the maximum temperature is obtained at 1059 °C in the copper bar with a variation in the interface between 945,61 °C and 831,41 °C and that during the heat flow there is a decrease in the center line of the weld.

Keywords: finite elements; temperature; heat flux; radial friction.

Introducción

La soldadura por fricción es un proceso de fase total de penetración sólida, tiene como principio de trabajo la conversión de la energía mecánica en térmica mediante la fricción de elementos externos sobre las piezas a unir o entre dichas piezas bajo la acción de una fuerza exterior de compresión, es clasificado como una unión en estado sólido ya que la temperatura no alcanza a fundir el metal y además al analizar microscópicamente dicha zona no se observa dilución entre los materiales, para realizar la misma se requiere de fases o etapas (Arun *et al.*, 2017).

La etapa de fricción es, cuando las piezas hacen contacto, hay frotamiento entre las superficies de empalme y una fuerte adhesión en diversos puntos de contacto, existe cizallamiento y se transfiere metal de una superficie a otra. Al continuar la frotación, aumentan tanto el par de torsión como la temperatura de la interfase. El tamaño de los fragmentos transferidos crece hasta que estos se convierten en una capa continua de metal plastificado. Se puede formar una película líquida en ese punto (Seshagirao *et al.*, 2015).

La etapa de forjado es, cuando 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 (Ren *et al.*, 2007).

De acuerdo con Mumin (2016) el torque en el husillo depende de factores como la fuerza horizontal sobre la junta, el coeficiente de fricción y el grado de deslizamiento entre las piezas. El incremento en la velocidad de rotación de la máquina genera una disminución en el torque debido al incremento de la tasa de generación de calor en la junta y al incremento en la temperatura de esta, lo que permite que el material se deforme con mayor facilidad a alta temperatura y a alta tasa de deformación. El torque no es afectado significativamente por la velocidad de avance de la herramienta, debido a que la tasa de generación de calor no es afectada considerablemente por este parámetro.

Withers y Bhadeshia (2001); Sutton *et al.* (2002) y Peel *et al.* (2006) han estudiado el efecto que tienen los parámetros del proceso en la distribución de esfuerzos residuales de las juntas unidas mediante el proceso soldadura por fricción. En estas

investigaciones se ha concluido que, son mayores los esfuerzos alcanzados en la dirección radial, en la dirección de la soldadura, en comparación con los que se presentan en la transversal, es decir perpendicular a la línea de unión.

La distribución de esfuerzos residuales en la dirección radial presenta un perfil en forma de "M", donde los de tracción más elevados se alcanzan a una distancia similar a la cual finaliza el cordón de soldadura, entre la zona afectada termomecánicamente y la afectada térmicamente; mientras que en la zona de mezcla los esfuerzos siguen siendo a tracción, pero presentan magnitudes menores comparados con los alcanzados en la región termomecánicamente afectada (Peel *et al.*, 2006; Buffa *et al.*, 2008).

La temperatura de fricción se obtiene rotando un componente axialmente simétrico contra otro estático y bien sujeto, con la aplicación de una fuerza. Después de unos instantes (segundos), el punto de unión alcanza la temperatura óptima y cesa la rotación y con la aplicación de una fuerza que forja y consolida la unión. Durante el proceso se combinan los parámetros velocidad de rotación, desplazamiento, tiempo, temperatura y fuerza para obtener la soldadura de los diversos materiales (Mishra *et al.*, 2014).

El objetivo del trabajo es determinar las tensiones en una soldadura por fricción radial, generadas por las temperaturas en una unión disímil AISI 316L-Cu Cu DHP a través del método de los elementos finitos.

Desarrollo experimental

Composición química de las aleaciones

En la tabla 1 se muestra la composición química del acero ASI 316L.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 316L, % en masa

Tipo	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo
AISI 316 L	0,03	1,00	16 - 18	10 - 14	2,00	2,00 - 3,00

Para la soldadura, los elementos cromo y carbono definen la soldabilidad de estos aceros, son formadores de fase sigma al ser expuestos a temperaturas de 475°.

En la tabla 2 se muestra la composición química del cobre Cu-DHP.

Tabla 2. Composición química estándar del cobre Cu-DHP, % en masa

Tipo	Sn	Pb	Zn	S	Fe	Mn	P	Cu
UNS C10100	0,0022	< 0,002	< 0,001	0,002	0,038	< 0,0005	0,001	Resto

En otro proceso de soldadura no se recomienda realizarla sin material de aporte, debido a su contenido de oxígeno tiende a la formación de grietas, sin embargo, en la soldadura por fricción, las etapas del proceso favorecen la unión metalúrgica. La principal diferencia entre el acero inoxidable y el acero al carbono es la forma del diagrama tensión-deformación. Mientras que el acero al carbono tiene un comportamiento elástico lineal hasta el límite elástico y luego presenta, en la mayoría de los casos, un claro escalón de cedencia. Como consecuencia de este comportamiento no lineal del material, el acero inoxidable pierde rigidez a partir de bajos niveles de tensión.

Modelo matemático del proceso de soldadura

Actualmente la mayoría de los procesos de soldadura se llevan a cabo mediante la aplicación de calor a las piezas a unir. Este es de suficiente intensidad y cantidad como para producir la fusión de los materiales a unir. En la figura 1 se muestra el modelo de la soldadura por fricción entre el AISI 316L y el cobre Cu-DHP y en la 1a los parámetros.

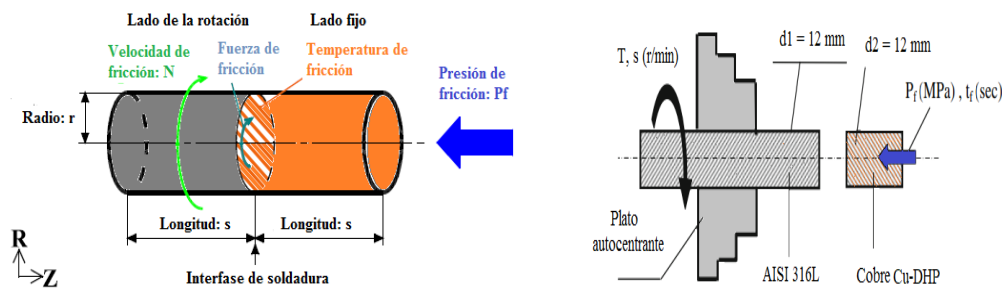


Figura 1. Modelo de la soldadura por fricción. 1a. Parámetros del proceso.

Fuente: Kimura *et al.* (2010).

Para el modelado del proceso de soldadura por fricción radial en la unión entre el acero inoxidable AISI 316L y el cobre Cu-DHP se realizó en barras de 12 milímetros de diámetro con una longitud aproximada de 100 mm, con 1 200 r/min y una presión de 30 MPa. Se consideró que rotara el primero, por lo que se instaló en el plato autocentrante de tres muelas, el segundo se fijó en un portabroca, acoplado al carro móvil.

Modelación por el método de los elementos finitos

Para la modelización con el método de los elementos finitos se empleó el software ANSYS R14.5. El programa facilitó la simulación de los tratamientos de temperaturas al construir, a partir de los datos de la unión soldada, un modelo numérico (malla y cargas). En la figura 2 se muestra el mallado del modelo para la unión soldada por fricción entre en acero inoxidable AISI 316L y el cobre Cu-DHP.

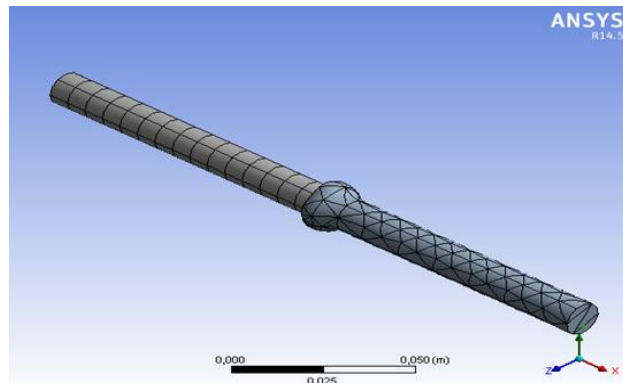


Figura 2. Mallado del modelo.

Se reticuló una geometría ortoédrica con una malla métrica de 4 milímetro de arista. Como malla adaptativa se emplearon diez celdas de 0,2 mm en la dirección del eje Z (paralelo al haz) y para el resto se emplearon elementos de 2 mm de altura. Esta región más densamente discretizada fue desplazándose en Z, desde las proximidades de la superficie hasta los 1,5 mm de profundidad. El mallado se estructuró con 1 358 nodos y 473 mallas.

En las condiciones de frontera se limitaron las restricciones, se suprimió el movimiento en las direcciones "X", dirección transversal a la longitud del cordón de soldadura, "Y", dirección saliente del plano de la unión soldada y "Z", dirección paralela a la longitud del cordón de soldadura, más no el giro, lo que se conoce como embridar la pieza a soldar. Entre estas condiciones se encuentran: Presión: 30 MPa; Velocidad de rotación: 1 200 r/min; Momento: 4,47 Nm; Temperatura inicial: 32°C.

En la figura 3 se muestran las condiciones de fronteras para la soldadura.

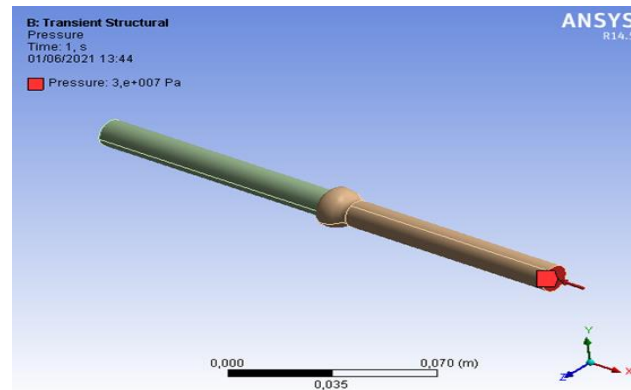


Figura 3. Condiciones de frontera.

La presión (position "A" marcada con la flecha) es considerada en los nodos de contacto desde que la generación de calor se realiza durante el proceso de la soldadura basado en el poder de calor generado en las dos barras a partir de una temperatura ambiente de 32 °C. Como condiciones de fronteras: la transferencia de calor por convección y por radiación. Fue aplicada una presión de 30 MPa con el fin de imponer al AISI 316L (espécimen estacionario, barra verde) una velocidad de rotación de 1 200 r/min, en la parte conectada con la generación del calor. Se conservó el movimiento en la dirección de Y y Z en la superficie de contacto de las dos barras. El movimiento en el eje X se estimó fuera al final del nodo de agarre de la barra en rotación.

Para determinar el análisis estructural estático se consideró acoplado al térmico al estructural estático, donde la barra que rota es la del acero AISI 316L y la estática la del Cu-DHP y la presión de forja aplicada en el acero inoxidable fue a todo lo largo del eje longitudinal. La figura 4 se corresponde con el análisis estructural considerado.

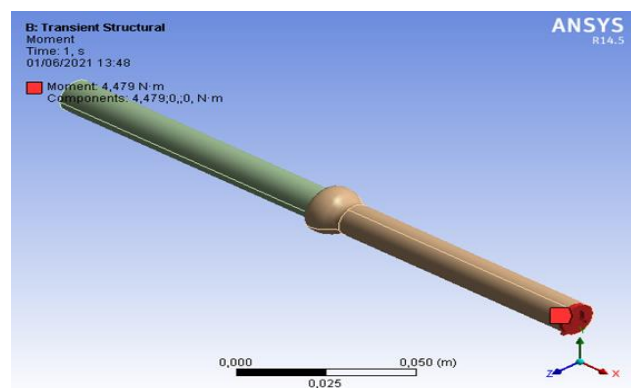


Figura 4. Análisis estructural estático.

Se fundamentó en la pérdida de estabilidad de la configuración de equilibrio, sin fractura o separación de material o al menos antes de que ocurra. Se ejecutó mediante un análisis de equilibrio "estático" en los que se leen las tensiones nodales de cada paso de tiempo, generadas por la corrida y se aplican como cargas nodales en la estructural. De esta manera cada análisis estructural estático parte del estado final de deformaciones y tensiones previamente concluido.

Resultados de la temperatura por el método de los elementos finitos

Uno de los aspectos esenciales de una unión soldada radica en que el calentamiento desigual de las diferentes zonas que la componen y las condiciones mecánicas de borde, provocan la aparición de tensiones residuales. El análisis paramétrico térmico se muestra en la figura 5, donde para los modelos tridimensionales, el paso del tiempo es la constante para cada número de elementos en la dirección circunferencial durante el calentamiento.

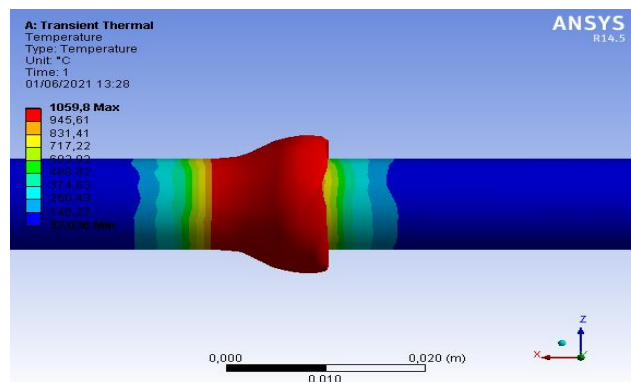


Figura 5. Resultados de la temperatura.

Según el análisis de la temperatura, esta ocurre en la unión del cobre Cu-DHP y el acero AISI 316L desde un valor mínimo de 32 °C (ambiente) hasta un pico de 1 059 °C, donde la ocurrencia de la misma es en la barra de cobre. En la interfase del cobre hay un comportamiento de 945,61 °C con mayor deformación y en el acero AISI 316L, de 831,41 °C, luego para cada una de ellas va existiendo un descenso. La distribución del campo se hace más prolongada en el lado del cobre. Por otro lado, la temperatura máxima va decreciendo de acuerdo a la transferencia de calor que existe con el ambiente. Este comportamiento se asocia a la conductividad térmica y el punto de fusión de cada material.

Reportan Ambroziak *et al.* (2011); Schmicker *et al.* (2014) que, a una distancia de la línea central de la soldadura, producto del incremento de la temperatura, existe mayor plasticidad, mientras en el resto de material existen otras deformaciones, las cuales aumentan el nivel de tensiones.

Resultados del flujo de calor

Para que se genere la soldadura por fricción, se debe aprovechar el calor generado por la fricción mecánica entre las dos piezas en movimiento. Cuando la cantidad de calor producida por rozamiento debe ser suficiente para llevar las piezas a la temperatura de soldadura. En la figura 6 se muestra el comportamiento del flujo de calor.

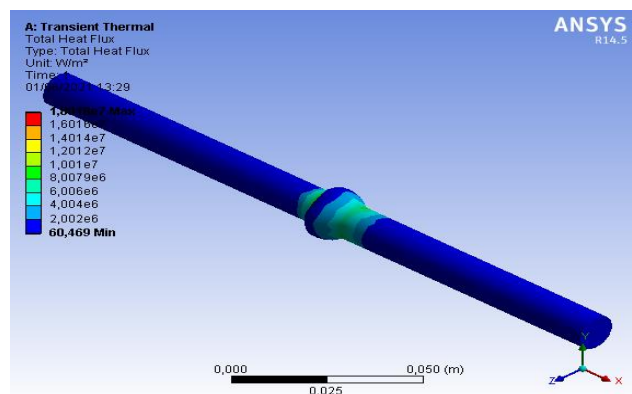


Figura 6. Comportamiento del flujo de calor.

La influencia de la velocidad rotación y la presión originó una zona afectada por el calor prolongada en la barra del cobre Cu-DHP por ser la tasa de enfriamiento de moderada a lenta, sin embargo, en el AISI 316L, la misma es más angosta. El máximo flujo de calor ocurrido entre las dos áreas en contacto, la máxima condición fue de $1,8018e+007 \text{ Wm}^2$, luego de forma gradual descende hasta un mínimo de $2,002e+006 \text{ Wm}^2$. Se observa que, este flujo de calor aportado en ambos materiales ha plastificado la línea central de la soldadura, el cual es modificado con los incrementos consecutivos de tiempo en la solución numérica por cambio de presión constante en la superficie en contacto.

El calor empleado para unir los materiales no es lo suficientemente elevado como para fundir los elementos a soldar, por lo cual para lograr la coalescencia las superficies de contacto deben estar íntimamente cercanas para que la fuerza de atracción atómica de un material atraiga a los átomos contenidos en la otra superficie y viceversa, según lo reporta Moarrefzadeh (2012). El calor producido y su variación se pueden determinar con

respecto a las características operativas y las dimensiones de la pieza, criterio de Alavala (2016).

Se modeló la influencia de la presión en el comportamiento de la temperatura que se obtiene en ambas barras. En la figura 8 se muestra los resultados obtenidos.

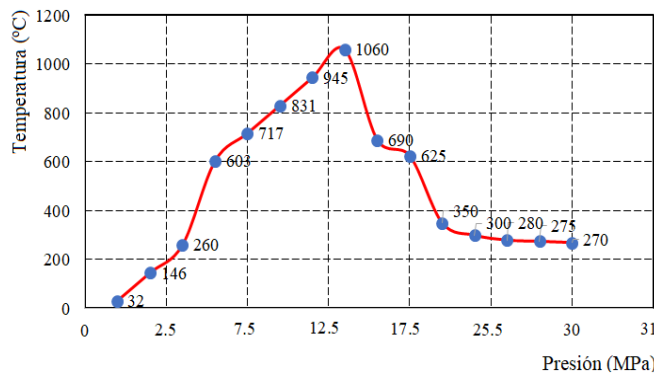


Figura 8. Comportamiento de la presión vs la temperatura.

En la medida que se incrementa la presión en el proceso, existe un aumento de la temperatura en las barras, se observa que, el pico máximo se alcanza aproximadamente a los 1 053 °C, lo cual debe ocurrir con un mayor calentamiento en el cobre por presentar menor punto de fusión y mejor conductividad térmica.

Se modeló la influencia de las variables temperatura, presión y tiempo para determinar cómo influyen en el proceso de soldadura del cobre Cu-DHP y el AISI 316L. En la figura 9 se muestran los resultados.

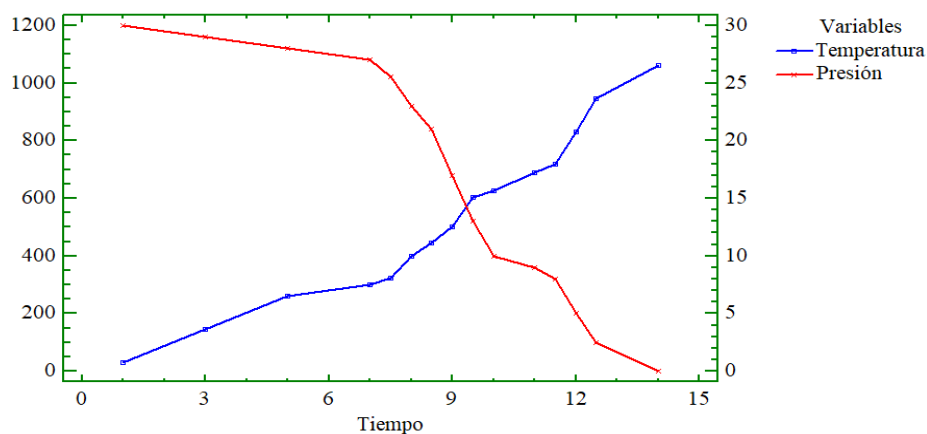


Figura 9. Comportamiento de las variables.

El evaluar el comportamiento de esta variable se observa que, en la medida que transcurre el tiempo para realizar la soldadura, la temperatura se incrementa por

efecto de la fricción, sin embargo, hay un descenso de la presión, atribuible a la plastificación de ambas barras.

Conclusiones

La temperatura en la unión cobre Cu-DHP-AISI 316L desde 32 °C se eleva hasta 1 059 °C en la barra de cobre y en la interfase de este es de 945,61 °C con mayor deformación y en el acero AISI 316L; de 831,41 °C, pero con tendencia al descenso en las mismas.

El máximo flujo de calor ocurre entre las dos áreas en contacto con un valor máximo de 1,8018e+007 W/m², luego de forma gradual desciende hasta un mínimo de 2,002e+006 W/m², donde el mismo logra la plastificación de ambas aleaciones en la línea central de la soldadura.

Al aplicar presión a ambas barras, el pico máximo de temperatura se alcanza a los 1 053 °C, con un mayor calentamiento en el cobre Cu-DHP que presenta menor punto de fusión y mejor conductividad térmica del AISI 316L.

Referencias bibliográficas

- ALAVALA, C. 2016. Weldability of Friction Welding Process for AA2024 Alloy and SS304 Stainless Steel using Finite Element Analysis. *Int. Journal of Engineering Research and Application* 6(3): 53-57.
- AMBROZIAK, A.; WINNICKI, M.; LASKA, P. & LACHOWICZ, M.; ZWIERZCHOWSKI, M.; LESNIEWSKI, J. 2011. Examination of friction coefficient in friction welding process of tubular steel elements. *Archives of metallurgy and materials* 56(4): 975-980.
- ARUN, P.; NITHIN, R.; YADHU, V. & SANALKUMAR, C. 2017. To design and construct a friction welding attachment on lathe, conduct experiment and to study about mechanical behavior of friction welded joints of aluminum rods. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 6(07): 150-158.
- 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.

- KIMURA, M.; INOUE, H.; KUSAKA, M.; KAIZU, K. & FUJI, A. 2010. Analysis method of friction torque and weld interface temperature during friction process of steel friction welding. *J. Solid Mech. Mater. Eng* 4(3): 401-413.
- MISHRA, R.; DE, P. S. & KUMAR, N. 2014. Friction stir processing. In *Friction Stir Welding and Processing. Springer International Publishing*. pp. 259-296.
- MOARREFZADEH, A. 2012. Study of heat affected zone (HAZ) in friction welding process. *Journal of Mechanical Engineering* 1(1): 11-18.
- MUMIN, S. 2016. Optimizing the parameters for friction welding stainless steel to copper Parts. *Materiali in tehnologije / Materials and technology* 50(1): 109-115.
- PEEL, M.; STEUWER, A. & WITHERS, P. 2006. Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082. Part I: process parameter effects on thermal history and weld properties. *Metallurgical and Materials Transactions A* 37(7): 2183-2193.
- REN, S.; MA, Z. & CHEN, L. 2007. Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy. *Scripta Materialia* 56(6): 69-72.
- 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.
- SCHMICKER, D.; PERSSON, P. & STRACKELJAN, J. 2014. Implicit geometry meshing for the simulation of rotary friction welding. *Journal of Computational Physics* 270(115): 478-489.
- SUTTON, M.; REYNOLDS, P.; WANG, D. & HUBBARD, C. 2002. Study of residual stresses and microstructure in 2024-T3 aluminum friction stir butt welds. *Journal of Engineering Materials and Technology* 124(2): 215.