

# Obtención de MMC superficial en AA5052-H32 empleando el proceso FSP

## Superficial metal matrix composite of AA5052-H32/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> manufactured by friction stir processing

María Zuluaga-Posada<sup>1a</sup>, Elizabeth Hoyos-Pulgarín<sup>1b</sup>, Yesid Montoya-Gómez<sup>2</sup>, Diana María López-Ochoa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad EIA, Colombia. Correos electrónicos:

<sup>a</sup> maria.zuluaga@eia.edu.co, <sup>b</sup> elizabeth.hoyos@eia.edu.co. Orcid: <sup>b</sup> 0000-0002-7448-2466.

<sup>2</sup>Escuela de Ciencias de la Vida, Universidad EIA, Colombia. Correo electrónico: yesid.montoya@eia.edu.co

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia. Correo electrónico: dmlopez3@unal.edu.co

Recibido: 16 julio, 2018. Aceptado: 12 marzo, 2019. Versión final: 22 marzo, 2019.

### Resumen

En este trabajo se empleó el proceso *friction stir procesing* (FSP), para obtener un material compuesto de matriz metálica (MMC por sus siglas en inglés) en la superficie de una lámina de aluminio AA5052-H32, empleando partículas de alúmina fase gamma como material de refuerzo. El proceso FSP es una tecnología nacida del proceso FSW con la finalidad de modificar las propiedades superficiales de un material. A diferencia de los MMC fabricados por métodos convencionales y volumétricos, el FSP permite obtener materiales que, al ser modificados solo superficialmente, mejoran las propiedades tribológicas de la pieza en regiones de interés. Estos materiales o piezas pueden ser sometidos a procesamiento posterior, es decir, el procesamiento superficial permite que características como la soldabilidad del material base se mantengan, a diferencia de algunos MMC obtenidos por fundición.

Para la fabricación de los MMC superficiales se emplearon dos herramientas, una para introducir las partículas en la superficie del material y otra herramienta para distribuir las partículas en la región procesada. Se fijaron los parámetros de velocidad de giro, velocidad de avance y número de pasadas de inserción: 1000 rpm, 100 mm/min y dos pasadas respectivamente. Se fabricaron tres grupos de muestras: sin partículas, con micropartículas de tamaño 5 µm y con nanopartículas de tamaño 50 nm, variando el número de pasadas de distribución para cada grupo. El valor teórico de la dureza del aluminio 5052-H32 es de 68 HV. Los resultados mostraron que el material procesado sin partículas presentó una disminución de dureza aproximada del 13 % en los casos evaluados; mientras que el procesado con partículas de alúmina, tanto micro como nano, generó un incremento en la dureza superficial del material del 6 y el 24 % respectivamente, con dos pasadas de distribución. Al incrementar a cuatro las pasadas de distribución, la dureza se redujo alcanzando valores cercanos al material base. Los resultados obtenidos indican que es posible modificar favorablemente las propiedades superficiales de un material empleando FSP.

**Palabras clave:** aleación de aluminio; alúmina; compuesto de matriz metálica (MMC); *friction stir processing* (FSP); dureza.

### Abstract

In the present work, the Friction Stir Processing (FSP) procedure was used to manufacture a metal matrix composite (MMC) on the surface of an aluminum alloy AA5052-H32, using gamma-phase alumina particles as reinforcement.

FSP is a technology based on FSW process with the purpose of modifying and enhancing material properties. It allows to obtain materials modified only superficially, improving tribological properties only in regions of interest, unlike MMC made by conventional methods. These processed parts can be subjected to further processing; as an example, surface processing allows characteristics such as the weldability of the base material to be maintained, unlike some MMC obtained by casting.

For the manufacture of MMC two tools were used. Tool 1 was used to introduce the particles in the base metal and Tool 2 was used to distribute the particles in the processed region. MMC beads were fabricated at 1000 rpm, 100 mm/min, and two insertion passes. Three groups of samples were obtained: processed without particles, with micro particles (5 $\mu$ m) and with nano particles (50nm). For each group the number of distribution passes varied. Base material hardness value was 68 HV. The results show that, the processed material without particles presented a decrease in hardness of 13 %. Processed material with micro and nano particles, with two distribution passes, showed increased hardness values between 6 and 20% respectively. Increasing the distribution passes up to four, caused a hardness reduction to values close to the base material. The results indicate that it is possible to modify favorably the surface properties of a material using FSP.

**Keywords:** metal matrix composite (MMC); friction stir processing (FSP); aluminum alloy; alumina; hardness.

## 1. Introducción

Un material compuesto surge de la unión macroscópica de dos o más materiales que resultan en un nuevo material con propiedades específicas superiores a los anteriores [1]; está conformado por una matriz y un refuerzo. Dicho esto, un compuesto de matriz metálica (MMC) está formado por una aleación que actúa como matriz (o material base) y partículas que actúan como refuerzo. En el caso de las aleaciones de aluminio, estas partículas de refuerzo pueden incrementar de forma considerable las propiedades mecánicas: dureza, módulo de elasticidad, límite de cedencia, resistencia última y particularmente se reporta el uso de MMC en aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste [2]–[4].

Existen numerosos procesos para obtener materiales compuestos de matriz metálica, algunos de los métodos que implican paso por el estado líquido son *casting*, *rapid casting*, *high-energy laser*, *high-energy electron beam irradiation* y *plasma spray*; sin embargo, los procesos en estado líquido conllevan algunos problemas como interfaces con baja resistencia, pobre mojabilidad de las partículas de refuerzo, posible reacción química entre las partículas y el fundido y formación de *fases indeseadas* [2].

Los problemas asociados al cambio de estado motivan la búsqueda de alternativas en estado sólido. *Friction stir processing* (FSP) es una tecnología nacida del proceso FSW, con la finalidad de modificar las propiedades superficiales de un material, mediante la eliminación de defectos puntuales de fundición y el refinamiento de la microestructura local [5], [6]. De acuerdo con Sharma *et al.*, el proceso FSP consiste en el uso de una herramienta rotatoria no consumible que se introduce en una pieza de

trabajo y avanza en una dirección de interés [3]. En la figura 1 se presenta un esquema con las etapas generales del proceso.

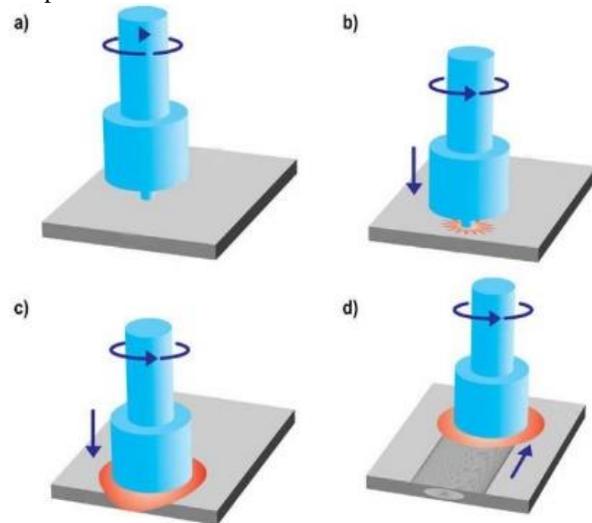


Figura 1. Esquema y etapas para FSP: a) herramienta giratoria antes del contacto con la placa; b) pin de la herramienta hace contacto con la placa, y se genera calentamiento; c) el hombro hace contacto, restringiendo la penetración adicional; y d) movimiento relativo, creando una microestructura de grano fino completamente recristalizada [5]

El proceso FSP sirve como alternativa para fabricar MMC superficiales localizados en regiones donde se requiera un incremento en la resistencia al desgaste, o una respuesta superior a fenómenos tribológicos o de contacto. De esta manera el procesamiento posterior de una pieza con MMC superficiales localizados, respecto a una pieza completamente fabricada en un MMC se facilita, y se mantienen las propiedades del metal base en

regiones donde no se requieren cambios para cumplir la función, y se reduce la cantidad de material de refuerzo requerido.

**2. Materiales y métodos**

Se describen los procesos y equipos empleados para la obtención de los compuestos de matriz metálica superficiales, y su posterior caracterización.

**2.1. Preparación de placas y partículas**

Se emplearon platinas de aluminio AA5052-H32 como material base para la fabricación de los MMC superficiales por FSP. Esta aleación de aluminio no es tratable térmicamente, y su composición química nominal se encuentra en la Tabla 1 [7]. Se prepararon 3 placas de aluminio de 3/16” de espesor, 150 mm de longitud y 50 mm de ancho, además, se maquinaron dos ranuras en cada una de ellas de 110 mm de longitud, 20 mm de ancho y 0.1 mm de profundidad, como se muestra en la Figura 2.

Como material de refuerzo se emplearon dos tamaños de partículas de alúmina fase gamma de forma independiente: micro (5µm) y nano (50nm). En la Figura

3 se presentan algunas imágenes de micrografías SEM (SE) de las partículas. En la Figura 3a y la Figura 3b se observa distribución de micropartículas a 900x y 15000x respectivamente. En la fFigura 3c presenta la distribución de nanopartículas a 820x, donde es posible observar cúmulos que se distribuyen de forma relativamente uniforme.

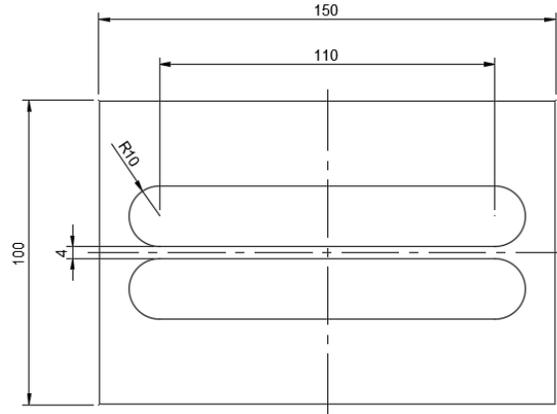
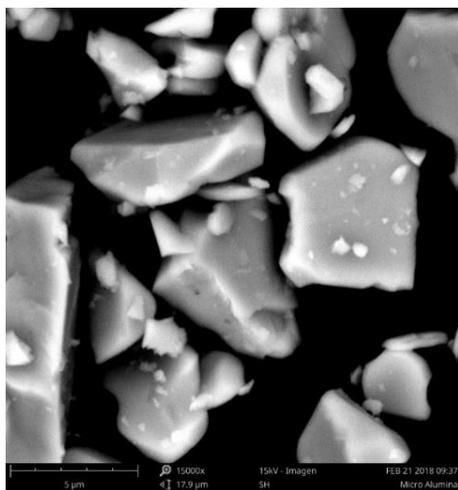


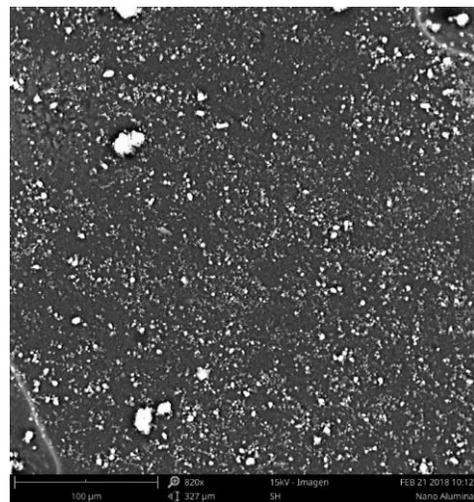
Figura 2. Material base preparado para la fabricación del MMC, todas las cotas están dadas en milímetros.

Tabla 1. Composición Química nominal del AA5052 [7].

| Elemento - % en peso |         |       |       |       |        |       |           |           |
|----------------------|---------|-------|-------|-------|--------|-------|-----------|-----------|
| Al                   | Mg      | Zn    | Cu    | Fe    | Si     | Mn    | Cr        | Otros     |
| Val.                 | 2.2-2.8 | ≤ 0.1 | ≤ 0.1 | ≤ 0.4 | ≤ 0.25 | ≤ 0.1 | 0.15-0.35 | 0.15-0.35 |



a



b

Figura 3. Micrografías SEM, (a) micropartículas a 15.000x, la barra de escala representa 5µm, tamaño promedio de las partículas de la imagen y (b) nanopartículas a 820x, la barra de escala representa 100µm, por la escala se pueden observar clusters de partículas.

Para garantizar una distribución de las partículas a lo largo de las platinas de aluminio se preparó una solución con lauril éter sulfato de sodio, la cual se sometió a sonicación durante una hora en un equipo SONICS@ VCX500. La solución se aplicó sobre las placas de aluminio previamente preparado y en un ambiente controlado, y se dejó secar durante un día.

Para ambos tamaños de partícula se prepararon soluciones en las siguientes cantidades:

- 25 ml de agua destilada.
- 10 g de lauril éter en solución al 70 %.
- 0.4 g de partículas de alúmina.

Los parámetros de sonicación de la solución fueron los siguientes:

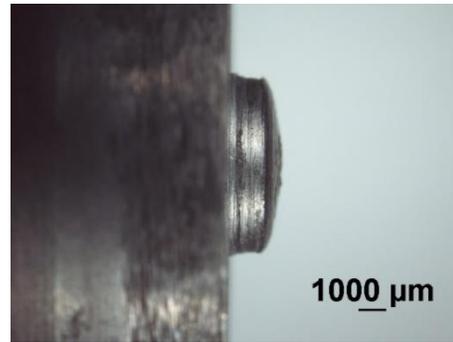
- 25KJ de energía.
- Período de agitación de 15 s por 10 s de descanso.
- Una hora el tiempo total de agitación.
- 60 % de amplitud del movimiento.

Luego de obtener la solución de material particulado se procedió a agregar la solución de nanopartículas a una platina preparada (2 cordones) y la solución de micropartículas a otra platina preparada (2 cordones). De esta manera quedaron tres platinas para procesar: una sin partículas, una con nanopartículas y una con micropartículas.

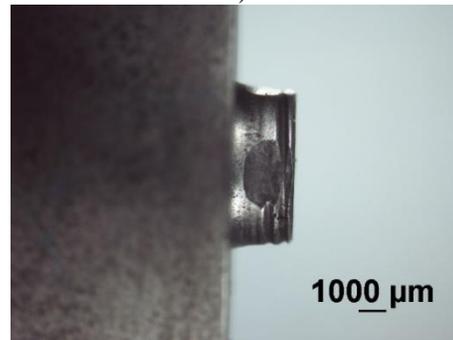
## 2.2. Obtención de MMC

Para el proceso de fabricación de MMC superficial se empleó un centro de mecanizado FIRST MCV1100 y dos herramientas de hombro cóncavo de 20 mm y pin de 5 mm de diámetro y 2 mm de longitud. La herramienta 1 cuenta con un pin cilíndrico roscado. La herramienta 2 cuenta con un pin cilíndrico roscado con 4 lados facetados. La función de la herramienta 1 es introducir el material particulado, mientras que la herramienta 2 tiene la función de distribuir las partículas la superficie. En la Figura 4 se pueden observar imágenes tomadas con el estereoscopio Nikon SMZ1000 de los pines de las herramientas.

Cada platina se procesó a 1000 rpm de velocidad de giro, 100 mm/min de velocidad de avance, 30 mm/min de velocidad de ingreso de cada herramienta, 15 s de *dwell time*, y se realizaron dos pasadas de inserción (herramienta 1). Se definió como parámetro diferenciador el número de pasadas de distribución (herramienta 2). En la tabla 2 se pueden observar la nomenclatura de los cordones y los parámetros usados. El montaje empleado se observa en la Figura 5.



a)



b)

Figura 4. Fotos tomadas en el estereoscopio con un aumento de 0.8X de (a) Herramienta 1 y (b) Herramienta 2.

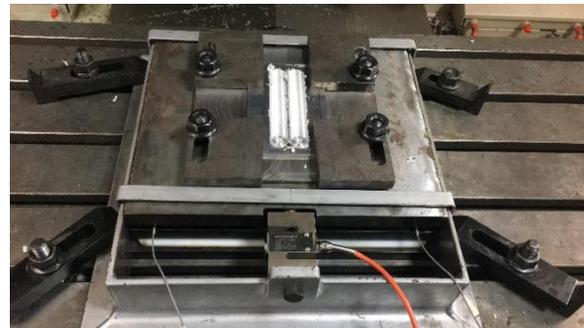


Figura 5. Montaje empleado para la obtención de MMC.

Tabla 2. Cordones fabricados por FSP y su descripción.

| Nomenclatura | Descripción de la muestra procesada | Número de pasadas con herramienta 2 |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| P1           | Sin partículas                      | 2                                   |
| P2           | Sin partículas                      | 4                                   |
| M1           | Con micropartículas de alúmina      | 2                                   |
| M2           | Con micropartículas de alúmina      | 4                                   |
| N1           | Con nanopartículas de alúmina       | 2                                   |
| N2           | Con nanopartículas de alúmina       | 4                                   |

### 2.3. Caracterización

Mediante la técnica de corte por chorro de agua se obtuvieron muestras de las regiones procesadas, denominadas P1, P2, M1, M2, N1 y N2 y muestras del material base tanto transversal (T) como longitudinal (L) a la dirección de laminación. Se fabricó un molde en silicona para el montaje de muestras en parejas (M1 y M2, N1 y N2, P1 y P2, L y T) en probetas de una pulgada de diámetro por una pulgada de altura (Figura 6a).

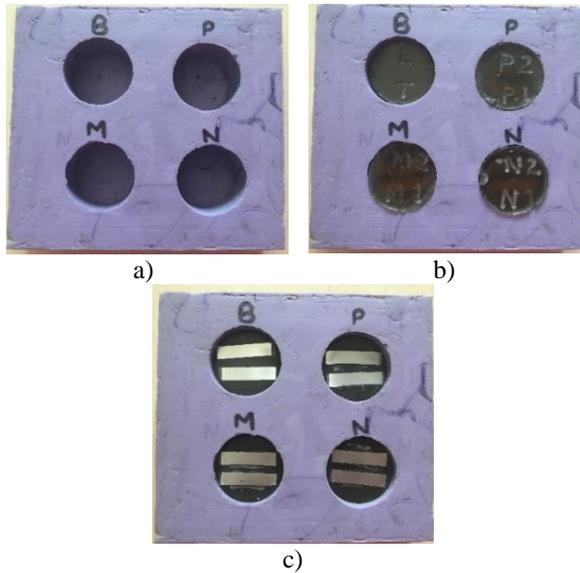


Figura 6. (a) Molde en silicona para montaje de probetas, (b) montaje de probetas y (c) muestras de aluminio montadas en resina.

Se realizaron pulidos gruesos en una lijadora de banda para garantizar una superficie plana de las caras a examinar y eliminar el material deformado plásticamente por el corte; luego se realizaron pulidos finos a mano con una progresiva reducción de la rugosidad del material abrasivo, rotando la pieza 90° para determinar cuándo el conjunto anterior de rayas ha sido removido.

Después de pulidas las muestras se procedió a realizar toma de durezas en la zona central de la sección transversal, dentro del *nugget*, lo más cerca posible de la zona de contacto con el hombro. Las durezas de las muestras P1 y P2 se tomaron con el equipo Wolpert Diatestor 2RC, aplicando una carga de 10 kg por un período de 10 a 15 s. Y las microdurezas tomadas en las muestras M1, M2, N1, y N2 se hicieron con el microdurómetro Indenter ZHμ aplicando una carga de 100 g por un período de 10 s.

### 3. Resultados

El material base presenta una dureza alrededor de 68 HV[8], [9], consistente con reportes encontrados en otras publicaciones [7]–[9]. Como se puede observar en la Tabla 3, las muestras procesadas presentaron una disminución en la dureza respecto al material base entre el 11 y el 16 %, mientras que las muestras M1 y N1 (ambas con 2 pasadas de distribución) presentaron un incremento en la dureza 6 y el 20 % respectivamente. Sin embargo, al incrementar a 4 pasadas con la herramienta 2 (muestras M2 y N2) la dureza medida se redujo hasta alcanzar resultados cercanos al material base, para poder concluir al respecto, es necesario realizar pruebas de caracterización microestructural más detalladas; esta disminución puede asociarse a procesos de recristalización por aumento de temperatura durante el procesamiento. Además, se puede observar que las muestras procesadas con partículas (M1, M2, N1 y N2) obtuvieron un aumento de la dureza del 8 % al 47 % respecto a las muestras procesadas sin partículas respectivamente, lo que permite inferir que en la zona del *nugget* de estas cuatro muestras se encuentran partículas de alúmina.

En cuanto a la ubicación de las partículas es necesario realizar caracterización microestructural para confirmar si se presentó algún tipo de distribución. Estos resultados son consistentes con reportes de otros autores que agregan otros tipos de materiales de refuerzo sobre matrices AA5052 mediante FSP. Xiong *et al.* [8] usaron fibras de carbono sobre una matriz de AA 5052 H32, sus resultados mostraron que la dureza del material base es de 69 HV; sin embargo, tras realizar entre cuatro y cinco pasadas la dureza bajó hasta los 56 HV. La adición de fibras de carbono mostró una dureza entre los 95 y 101 HV. Esta tendencia es consistente con los resultados obtenidos en este estudio.

Tabla 3. Resultados de durezas del material procesado y variaciones.

| Muestra          | Dureza (HV) | Variación respecto a material base (MB) | Variación respecto a material procesado sin partículas (P1 y P2 respectivamente) |
|------------------|-------------|---|--|
| Material base MB | 68          | -                                       | -  |
| P1               | 57.1        | -16 %                                   | --   |
| P2               | 60.2        | -11 %                                   | --   |
| M1               | 72          | 6 %                                     | 26 %   |
| M2               | 65          | -4 %                                    | 8 %  |
| N1               | 84          | 24 %                                    | 47 %   |
| N2               | 70          | 3 %                                     | 16 %   |

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que es posible generar materiales compuestos de matriz metálica superficial empleando el proceso FSP y máquinas herramientas convencionales, las cuales pueden ser fácilmente encontradas en el medio nacional.

Los MMC superficiales obtenidos cuentan con una dureza superior al material base y al material procesado con FSP sin emplear partículas de refuerzo. El efecto de los parámetros de proceso empleados aún es objeto de estudio, como es el caso del efecto de la geometría de las herramientas.

El uso de micro- y nanopartículas en este estudio permitió establecer un comportamiento superior, en términos del incremento de dureza, de las nanopartículas. Por lo cual se espera realizar trabajos posteriores especialmente con este tipo de refuerzo.

Uno de los parámetros de interés es el número de pasadas de distribución realizadas con la herramienta 2; en este trabajo es posible concluir que los resultados con dos pasadas son superiores en términos del incremento de dureza a los obtenidos con cuatro pasadas.

Se debe realizar caracterización microestructural para comprender y comparar el efecto de la cantidad de pasadas con la distribución de las partículas y los resultados de dureza obtenidos.

#### Referencias

- [1] H. G. Rana, V. J. Badheka, and A. Kumar, "Fabrication of Al7075 / B4C Surface Composite by Novel Friction Stir Processing (FSP) and Investigation on Wear Properties," *Procedia Technol.*, vol. 23, pp. 519–528, 2016. doi: 10.1016/J.PROTCY.2016.03.058
- [2] M. Sarkari Khorrami, S. Samadi, Z. Janghorban, and M. Movahedi, "In-situ aluminum matrix composite produced by friction stir processing using FE particles," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 641, pp. 380–390, Aug. 2015. doi: 10.1016/J.MSEA.2015.06.071
- [3] V. Sharma, U. Prakash, and B. V. M. Kumar, "Surface composites by friction stir processing: A review," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 224, pp. 117–134, 2015. doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2015.04.019
- [4] E. Martínez, O. A. González-Estrada, and A. Martínez, "Evaluación de las propiedades tribológicas de materiales compuestos de matriz metálica (MMC) procesados por técnicas de fabricación aditiva con haz

láser (SLM)," *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 1, pp. 101–114, 2107. doi: 10.18273/revuin.v16n1-2017010

[5] M. W. Mahoney and S. P. Lynch, "Friction-Stir Processing," Thousand Oaks, Ca, 2006.

[6] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1–78, 2005. doi: 10.1016/J.MSER.2005.07.001

[7] Material Property Data "Matweb - Aluminum 5052-H32.", [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=96d768abc51e4157a1b8f95856c49028&ckck=1>. [Accessed: 26-Apr-2017].

[8] X. Cao, Q. Shi, D. Liu, Z. Feng, Q. Liu, and G. Chen, "Fabrication of in situ carbon fiber/aluminum composites via friction stir processing: Evaluation of microstructural, mechanical and tribological behaviors," *Compos. Part B Eng.*, vol. 139, pp. 97–105, 2018. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.12.001

[9] R. Moshwan, F. Yusof, M. A. Hassan, and S. M. Rahmat, "Effect of tool rotational speed on force generation, microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al–Mg–Cr–Mn (AA 5052-O) alloy," *Mater. Des.*, vol. 66, pp. 118–128, 2015. doi: 10.1016/J.MATDES.2014.10.043