

# EFECTO DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6082 T6 EN EL CRECIMIENTO DE GRIETA Y VIDA A FATIGA

E. Calvo-García<sup>1,2\*</sup>, M. González-Longueira<sup>1,2</sup>, A. Riveiro<sup>1,2</sup>, R. Comesaña<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Dpto. Ingeniería de Materiales, Mecánica Aplicada y Construcción, EEI, Universidad de Vigo, 36310 Vigo, España

<sup>2</sup>CINTECX, Universidad de Vigo, LaserON, 36310 Vigo, España

\* Persona de contacto: [erik.calvo@uvigo.gal](mailto:erik.calvo@uvigo.gal)

## RESUMEN

Las aleaciones de aluminio de la serie 6000 son cada vez más populares en la fabricación de componentes forjados para la industria automotriz debido a su alta relación resistencia-peso. Estos componentes están sometidos a cargas cíclicas a lo largo de su vida útil. Una forma de modificar el comportamiento a fatiga y fractura de estas aleaciones de aluminio consiste en alterar las condiciones de solubilización y envejecimiento de su tratamiento térmico. En este trabajo se propone determinar de la influencia de diferentes tratamientos térmicos T6 en el comportamiento a fatiga, la velocidad de crecimiento de grieta y la tenacidad a la fractura de la aleación 6082. Para ello, se han realizado ensayos de fatiga axial según ISO 1099 y ensayos de fractura según ASTM E1820 sobre probetas extraídas a partir de piezas forjadas. Los resultados mostraron que reducir la temperatura de solubilización de 560°C a 520°C da lugar a menores vidas a fatiga y velocidades de propagación de grieta mayores, si bien la tenacidad a la fractura no se vio afectada. Esto se debe a que temperaturas de solubilización bajas no permiten alcanzar una precipitación óptima de intermetálicos finos y dispersos.

**PALABRAS CLAVE:** Aluminio, Tratamiento térmico, Fatiga, Crecimiento de grieta, Tenacidad a la fractura

## ABSTRACT

Aluminum alloys of the 6000 series are increasingly used in the manufacture of forged automotive components due to their high strength-to-weight ratio. These components are subjected to cyclic loading throughout their service life. One way to modify the fatigue and fracture behavior of these alloys is by altering the solution and aging conditions of their heat treatment. This study aims to determine the influence of different T6 heat treatments on the fatigue behavior, crack growth rate, and fracture toughness of aluminum alloy 6082. To this end, axial fatigue tests according to ISO 1099 and fracture tests according to ASTM E1820 were performed on specimens extracted from forged components. The results showed that reducing the solution temperature from 560 °C to 520 °C leads to shorter fatigue lives and higher crack growth rates, although fracture toughness was not affected. This behavior is attributed to the fact that lower solution temperatures do not allow optimal precipitation of fine and dispersed intermetallic particles.

**KEYWORDS:** Aluminum, Heat treatment, Fatigue, Crack growth, Fracture toughness

## 1. INTRODUCCIÓN

El aluminio es el metal más abundante de la corteza terrestre y el segundo más empleado en aplicaciones estructurales debido a su elevada relación resistencia/peso. Entre las diferentes aleaciones de aluminio, la serie 6000 (Al-Mg-Si) presenta ventajas adicionales, como su elevada resistencia a la corrosión y su excelente forjabilidad y soldabilidad. Dentro de esta familia, la aleación 6082 es una de las de mayor dureza y más demandadas comercialmente [1]. Los productos forjados obtenidos a partir de esta aleación se emplean con frecuencia en el sector de la automoción o el aeroespacial, donde se requiere elevada resistencia específica, tenacidad a la fractura y buen comportamiento a fatiga [2,3].

Las aleaciones de aluminio de la serie 6000 son tratables térmicamente. En general, la condición para ser tratable térmicamente se basa en que los elementos de aleación tengan menor solubilidad en la matriz a bajas temperaturas que a altas. Este tratamiento térmico consta

de las etapas de solubilización, temple y envejecimiento. Es posible obtener distintos valores de las propiedades mecánicas en las aleaciones de aluminio en función de su tratamiento térmico [4], y modificar así sus mecanismos de fallo por fatiga [5].

La solubilización de estas aleaciones de aluminio se lleva a cabo habitualmente en un rango de temperaturas comprendido entre 500 °C y 600 °C [6,7]. Sin embargo, un exceso en la temperatura o en el tiempo de solubilización puede provocar un crecimiento de grano excesivo o incluso recristalización, lo que puede resultar perjudicial para la resistencia del material. Por otra parte, una solubilización insuficiente impide la disolución total de los elementos de aleación, reduciendo de forma notable el incremento de resistencia mecánica que se obtiene durante la precipitación de fases intermetálicas del envejecimiento posterior [8]. Tras la solubilización, el material se enfría rápidamente hasta temperatura ambiente, de modo que la solubilidad de los elementos de aleación disminuye sin que se produzca su

precipitación, dando lugar a la formación de una solución sólida sobresaturada [2].

Las condiciones de envejecimiento, en particular la temperatura y la duración del tratamiento, afectan directamente al tamaño y a la distribución de los precipitados, lo que repercute en las propiedades mecánicas finales del material. Tanto la resistencia mecánica como la dureza máxima dependen significativamente de la temperatura y el tiempo de envejecimiento. Cuando el envejecimiento se extiende más allá del punto óptimo de dureza, ésta comienza a reducirse, lo cual se conoce como sobre-envejecimiento. Del mismo modo, la tenacidad a la fractura tiende a disminuir a medida que aumenta la temperatura de envejecimiento [9].

Las temperaturas y tiempos de los tratamientos térmicos no solamente juegan un papel fundamental en las propiedades mecánicas resultantes del aluminio, sino que también afectan a los tiempos de producción y al consumo energético demandado por el proceso de fabricación, lo cual repercute en los costes finales de pieza. Por lo tanto, resulta de interés conocer en profundidad los efectos de los tratamientos térmicos de los aluminios en su comportamiento mecánico, especialmente en aplicaciones que involucran la presencia de cargas cíclicas. En este trabajo se propone llevar a cabo un estudio de las propiedades mecánicas de una aleación 6082 con tratamiento térmico T6 sometida a diferentes temperaturas de solubilización y envejecimiento. Para ello, se han llevado a cabo ensayos de fatiga axial según la norma ISO 1099, ensayos de crecimiento de grieta y la determinación de la tenacidad a la fractura según ASTM E1820.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material a estudiar es una aleación de aluminio 6082 con tratamiento térmico de envejecimiento artificial T6. La composición química es Mg: 0,83%, Si: 1,22%, Mn: 0,58%, Fe: 0,27%, Cu: 0,08%, Cr: 0,17%, Zn: 0,03%, otros: 0,03% y Al: balance. Esta aleación ha sido sometida a los tratamientos térmicos que se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Tratamientos térmicos efectuados en la aleación 6082 T6.

Muestras	Solubilización	Envejecimiento
#TT560_185	560°C – 20 min	185°C – 3,5 h
#TT520_180	520°C – 20 min	180°C – 2,0 h

Para caracterizar la microestructura, las piezas han desbastadas y posteriormente pulidas utilizando paños con suspensión de diamante de 9 y 3  $\mu\text{m}$ , y finalmente sílice coloidal 50 nm. A continuación, estas piezas han sido atacadas con agente Keller (95%  $\text{H}_2\text{O}$ , 2,5%  $\text{HNO}_3$ , 1,5%  $\text{HCl}$  y 1,0%  $\text{HF}$ ) durante 25 s. La observación de

las muestras se ha llevado a cabo mediante SEM con un equipo JEOL JSM-6010-LA. Las medidas de dureza han sido realizadas con un microdurómetro Vickers HMV-G21 de Shimadzu. Los ensayos de caracterización mecánica se han ejecutado con una máquina servohidráulica Walter-Bai LFV-25.

Los ensayos de fatiga han sido realizados según la norma ISO 1099 utilizando probetas como se muestra en la Figura 1. Todos los ensayos se han controlado por carga senoidal utilizando una relación de tensiones  $R = 0$  y una frecuencia de 10 Hz. Se estableció un valor límite de  $10^7$  ciclos (*run out*) para determinar la resistencia a la fatiga.

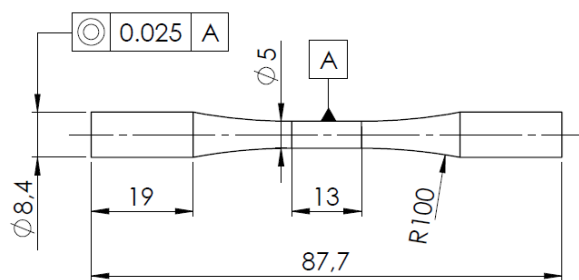


Figura 1. Probeta para ensayo de fatiga axial.

Por otra parte, los ensayos de fractura han sido realizados según la norma ASTM E1820 utilizando probetas SE(B) sometidas a flexión 3-puntos como se muestra en la Figura 2. El desplazamiento de la boca de la entalla fue registrado con un extensómetro Epsilon 3541.

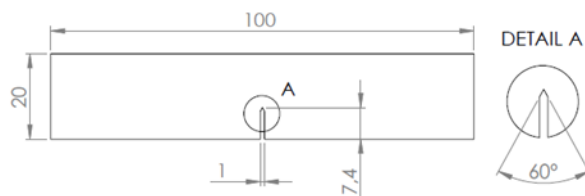


Figura 2. Probeta SE(B) para ensayo de fractura.

Durante la etapa de crecimiento de grieta, se ha aplicado un perfil de carga senoidal con  $R = 0,1$  y se ha ajustado la zona de propagación estable de grieta a la ley de Paris indicada en la ecuación (1), donde  $da/dN$  es la velocidad de propagación de grieta por ciclo,  $\Delta K$  es el rango del factor de intensidad de tensiones, y  $C$  y  $m$  son constantes de cada tratamiento.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (1)$$

Una vez finalizada esta etapa, el ensayo pasó a ser controlado por desplazamiento, aplicando una carga creciente con pequeñas descargas periódicas. En el punto de avance inestable de grieta, se determinó un valor de tenacidad a la fractura en términos del factor de intensidad de tensiones crítico  $K_{Ic}$ .

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Microestructura

La Figura 3 muestra comparativamente las microestructuras obtenidas para cada tratamiento térmico. Puede verse que en ambos casos los precipitados intermetálicos se distribuyen principalmente en los límites de grano. El aluminio con temperatura de solubilización 560 °C presenta los límites de grano mejor definidos y con una red de precipitados más finos y homogéneos, si bien el tamaño de grano se intuye superior al solubilizado a 520 °C. Esto puede deberse a que temperaturas de solubilización mayores tienden a provocar el crecimiento de grano.

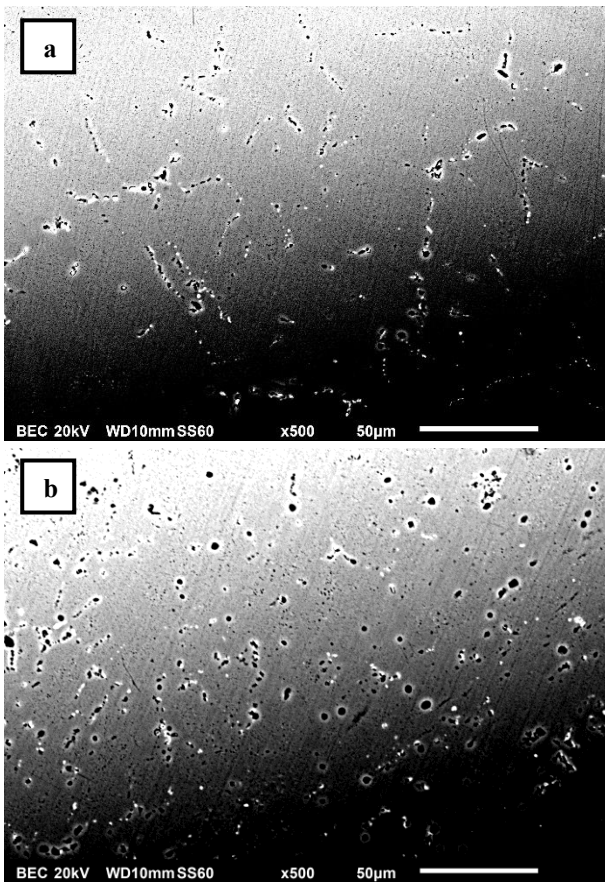


Figura 3. Microestructura SEM de muestras (a) TT560\_185 y (b) TT520\_180.

#### 3.2. Durezas

En la Figura 4 se presentan los diagramas de cajas de las medidas de durezas efectuadas para cada tratamiento térmico. Si bien el material con temperatura de solubilización 560 °C solamente presenta un 9% más dureza que el de 520 °C, esta diferencia es claramente significativa.

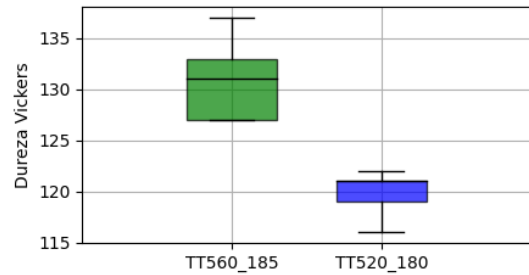


Figura 4. Durezas Vickers en aluminios 6082 T6.

#### 3.3. Resistencia a la tracción

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de tracción para cada tratamiento térmico. En este caso, no se observan diferencias significativas en el límite elástico, pero sí en la resistencia a la tracción. El aluminio con temperatura de solubilización 560 °C presentó una resistencia mecánica un 8% superior al de 520 °C.

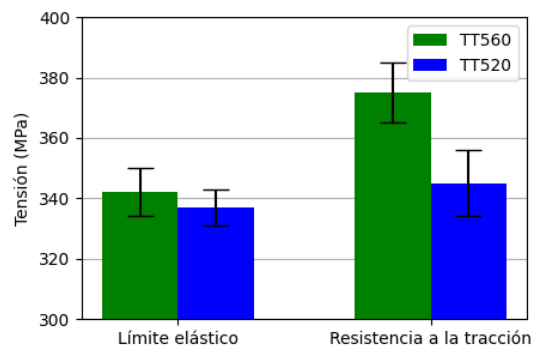


Figura 5. Resistencia mecánica de aluminios 6082 T6.

#### 3.4. Crecimiento de grieta y tenacidad a la fractura

En la Figura 6 se representa la velocidad de propagación de grieta por cada ciclo de carga en función del rango de intensidad de tensiones para los aluminios estudiados en este trabajo. Nótese que se han evaluado tres probetas por cada tratamiento térmico. Se puede observar claramente que, para rangos de intensidad de tensiones iguales, las velocidades de propagación de grieta son superiores en el aluminio con temperatura de solubilización menor en todos los casos. Este peor comportamiento mecánico del aluminio solubilizado a 520 °C ante la presencia de grietas, junto con su dureza y resistencia a la tracción inferiores, puede achacarse a que este tratamiento térmico no dio lugar a una solubilización completa de los elementos de aleación que precipitarían posteriormente en la etapa de envejecimiento, alejándose así de las propiedades mecánicas óptimas.

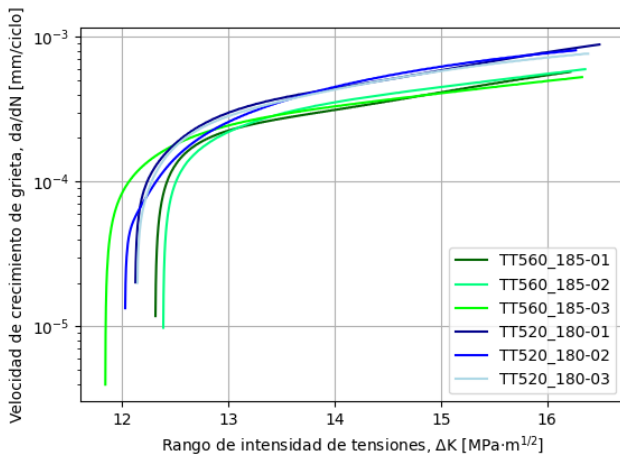


Figura 6. Curvas de propagación de grieta en aluminios 6082 T6.

Por otra parte, la Figura 7 muestra los valores de tenacidad a la fractura  $K_c$  obtenidos para ambos tratamientos térmicos. En este caso, no se han observado diferencias significativas, siendo este valor de  $32,4 \pm 3,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  para las muestras TT560\_185 y  $32,3 \pm 3,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  para las TT520\_180.

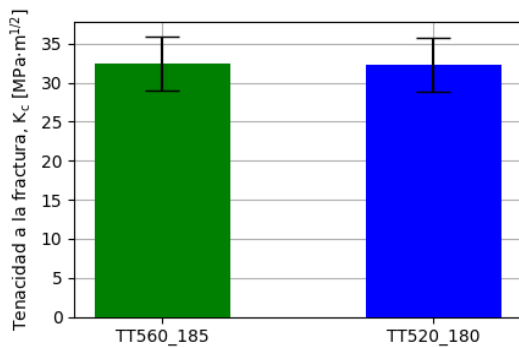


Figura 7. Tenacidad a la fractura en aluminios 6082 T6.

### 3.5. Vida a fatiga

Los resultados de vida a fatiga para ambos tratamientos térmicos vienen representados en la Figura 8. En general, el aluminio con mayor temperatura de solubilización exhibe vidas a fatiga mayores. Esto guarda coherencia con los resultados obtenidos en los ensayos de propagación de grieta, ya que el aluminio con menor temperatura de solubilización presentó velocidades de crecimiento de grieta mayores, lo cual repercute negativamente en la vida a fatiga. No obstante, las resistencias a fatiga a  $10^7$  ciclos son iguales para ambos aluminios, con un valor de 209 MPa.

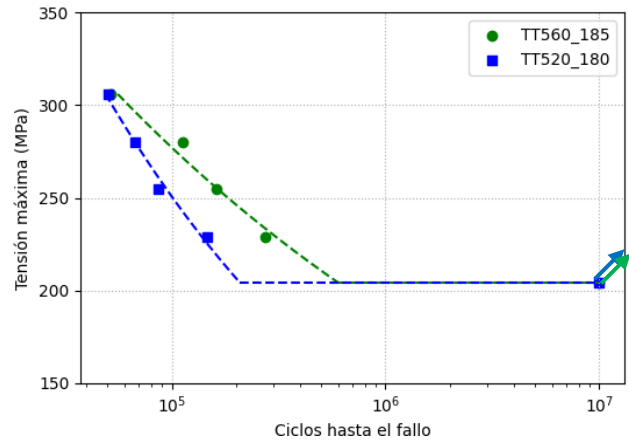


Figura 8. Curvas de Wöhler para aluminios 6082 T6.

La Figura 9 presenta imágenes de microscopía electrónica de las superficies de fractura obtenidas para cada tratamiento térmico. En general, todas las probetas ensayadas presentaron inicios de grieta en la superficie. Además, en ambos tratamientos térmicos la propagación de grieta por fatiga fue fundamentalmente transgranular, mostrando la presencia de estrías en las zonas más alejadas de los inicios de grieta, como puede verse a mayor número de aumentos en la Figura 10.

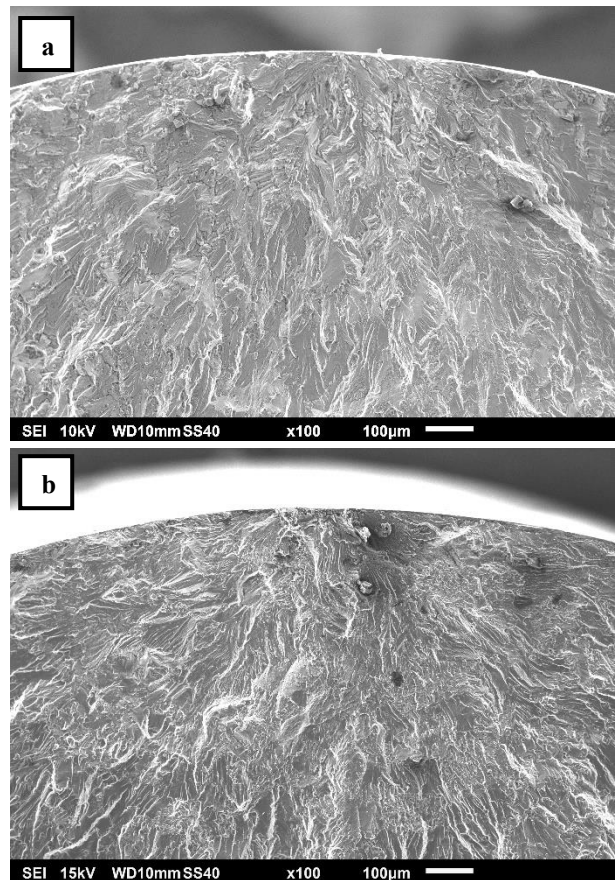


Figura 9. Superficies de fractura de muestras (a) TT560\_185 y (b) TT520\_180, ensayadas a tensión máxima de 280 MPa.

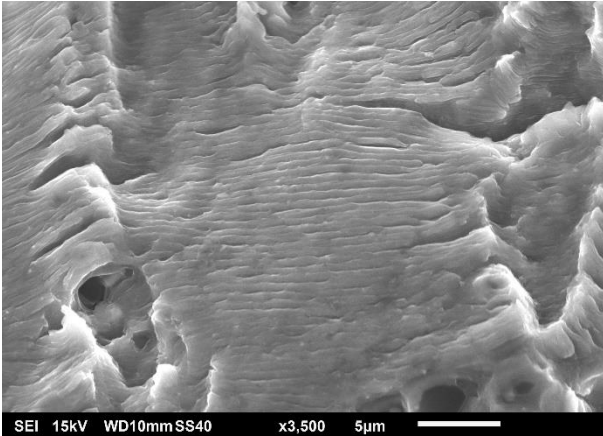


Figura 10. Estrías en zona de propagación de grieta por fatiga.

#### 4. CONCLUSIONES

El presente estudio muestra que las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6082 T6 dependen de manera significativa de las condiciones de tratamiento térmico. La solubilización a 560 °C seguida de envejecimiento a 185 °C permitió obtener una microestructura con distribución de precipitados más fina y homogénea. Este tratamiento favorece la solubilización completa de los elementos de aleación, lo que optimiza la precipitación durante el envejecimiento y se traduce en un aumento de dureza del 9 % y resistencia a la tracción del 8 % con respecto al aluminio solubilizado a 520 °C y envejecido a 180 °C. Consecuentemente, las velocidades de propagación de grieta fueron menores en el aluminio solubilizado a 560 °C, reflejando un mejor desempeño mecánico ante la presencia de defectos, mientras que la tenacidad a la fractura se mantuvo prácticamente inalterada entre ambos tratamientos, con un valor de  $\sim 32,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ . Asimismo, la vida a fatiga mostró una tendencia superior para la solubilización a 560 °C, coherente con la reducción de la velocidad de crecimiento de grietas, si bien la resistencia a fatiga a  $10^7$  ciclos fue en ambos casos de  $\sim 209 \text{ MPa}$ .

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el uso de los servicios científicos y técnicos del Centro de Apoyo Científico e Tecnológico a Investigación (CACTI-Universidade de Vigo).

#### REFERENCIAS

[1] T. Khelfa, J.A. Muñoz-Bolaños, F. Li, J.M. Cabrera-Marrero, M. Khitouni, Microstructure and Mechanical Properties of AA6082-T6 by ECAP Under Warm Processing, *Met. Mater. Int.* 26 (2020) 1247–1261. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00388-y>.

[2] I. Polmear, D. St. John, J.F. Nie, M. Qian, *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*, 5th ed., Elsevier, 2017.

[3] E. Calvo-García, J. del Val, A. Riveiro, S. Valverde-Pérez, D. Álvarez, M. Román, C. Magdalena, A. Badaoui, P. Pou-Álvarez, R. Comesaña, The Influence of Shot Peening Media on Surface Properties and Fatigue Behaviour of Aluminium Alloy 6082 T6, *J. Manuf. Mater. Process.* 8 (2024). <https://doi.org/doi.org/10.3390/jmmp8050192>.

[4] B.S. Gong, Z.J. Zhang, Z. Qu, J.P. Hou, H.J. Yang, X.H. Shao, Z.F. Zhang, Effect of aging state on fatigue property of wrought aluminum alloys, *Int. J. Fatigue.* 156 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106682>.

[5] J. Bach, H.W. Höppel, M. Prell, M. Göken, Crack initiation mechanisms in AA6082 fatigued in the VHCF-regime, *Int. J. Fatigue.* 60 (2014) 23–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.08.018>.

[6] H. jung Kang, H. sung Jang, S. hyo Oh, P. hwan Yoon, G. heun Lee, J. young Park, E. soo Kim, Y. suk Choi, Effects of solution treatment temperature and time on the porosities and mechanical properties of vacuum die-casted and T6 heat-treated Al–Si–Mg alloy, *Vacuum.* 193 (2021) 110536. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110536>.

[7] N.M.S. Kumar, G.K. Pramod, P. Samrat, M. Sadashiva, A Critical Review on Heat Treatment of Aluminium Alloys, *Mater. Today Proc.* 58 (2022) 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.586>.

[8] I. Guzmán-Flores, E.E. Granda-Gutiérrez, C.E. Cruz-González, H.M. Hernández-García, J.C. Díaz-Guillén, L. Flores-González, R.J. Praga-Alejo, D.I. Martínez-Delgado, Enhancing the Mechanical Properties of a 6061 Aluminum Alloy by Heat Treatment from the Perspective of Taguchi Design-of-Experiments, *Appl. Sci.* 14 (2024). <https://doi.org/10.3390/app14135407>.

[9] G. Mrówka-Nowotnik, J. Sieniawski, A. Nowotnik, Effect of heat treatment on tensile and fracture toughness properties of 6082 alloy, *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 32 (2009) 162–170.