

NUEVAS ALEACIONES DE ALUMINIO ANODIZABLES PARA LÁMPARAS: FABRICACIÓN Y ESTUDIO A CORROSIÓN

A. Méndez de la Peña, J. Bedmar, J. P. Fernández-Hernán, S. García-Rodríguez, B. Torres, J. Rams

Department of Applied Mathematics, Materials Science and Engineering and Electronic Technology, Universidad Rey Juan Carlos (URJC), 28933 Móstoles, Spain, Andrea.m81113@gmail.com

Resumen: La lámpara es un dispositivo fundamental utilizado en prácticamente todas las industrias para proporcionar iluminación. En su fabricación se pueden emplear aleaciones de aluminio y silicio, destacando la aleación AA6082 modificada con aleantes en diferentes proporciones para encontrar la mejor combinación de colabilidad y capacidad de ser anodizada. A través de ensayos de corrosión, se determinó que la muestra 7 (Si, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn, Ti, Sr, Cr) era la más adecuada para la fabricación de lámparas. Aunque presenta propiedades mecánicas inferiores en algunos aspectos, su alto contenido de aleantes le otorga una mejor fluidez. Además, se ha desarrollado un diseño de la lámpara a través de un enfoque innovador, que permite una producción eficiente de hasta 220 unidades por hora, donde cada lámpara tiene un coste estimado de 19 €, siempre y cuando se fabriquen lotes de al menos 10000 lámparas.

Palabras clave: AA6082, lámpara, anodizado, corrosión.

1. INTRODUCCIÓN.

El aluminio es un metal cuyas principales propiedades son la buena conductividad térmica y eléctrica, su maleabilidad y su baja dureza. Además, tiene otras ventajas, que son su baja densidad, su capacidad de reflejar en el espectro visible la radiación electromagnética y su alta resistencia a la corrosión [1]. Las aleaciones de aluminio-silicio son de las más empleadas a nivel industrial en procesos de fabricación por fundición debido a su elevada capacidad de ser coladas.

Al añadir silicio a las aleaciones de aluminio, aumenta su dureza, su resistencia mecánica y su resistencia al desgaste. Sin embargo, se reduce su coeficiente de expansión térmica y su conductividad eléctrica. El principal problema es que el aluminio y el silicio están divorciados en la microestructura, de manera que el aluminio se puede anodizar para decorarse y protegerse frente a la corrosión, mientras que el silicio no se puede anodizar. Esto implica que la presencia del silicio, aunque mejora la fluidez, imposibilita el anodizado, que es lo que hace que se mejore su resistencia a la corrosión y le ofrece la posibilidad de ser decorado. Debido a este problema es preciso a nivel industrial buscar nuevas alternativas para encontrar aleaciones que, fluyendo bien, puedan ser anodizadas [2].

Como se observa en la Figura 1, la aleación de aluminio y silicio presenta dos fases inmiscibles, una formada por el aluminio y la otra por el silicio. El silicio ayuda al aluminio a fluir, ya que su punto eutéctico se encuentra a un 12,5% de silicio, disminuyendo su punto de fusión. Esto implica que la composición de las aleaciones debe estar en torno a ese punto.

En dicho diagrama se observan tres campos bifásicos. El primero de ellos, a baja temperatura, con la aleación en estado sólido, está formado por aluminio y silicio, que

son inmiscibles entre sí, como se ha comentado en el párrafo anterior. Los otros dos, a temperaturas superiores, están formados por fases líquidas y sólidas de aluminio y silicio, correspondientemente.

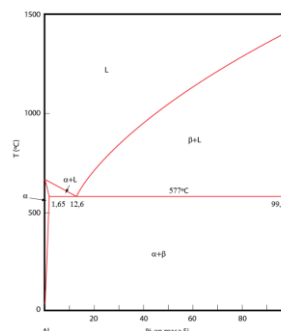


Figura 1. Diagrama de equilibrio Al-Si [3].

Para comprender las propiedades de estas aleaciones, es preciso conocer su microestructura. En la Figura 2 se muestra la microestructura de una aleación de Al-Si fabricada por colada y posteriormente refinada. En ella puede observarse que hay dendritas de aluminio (fases blancas) rodeadas de una fase eutéctica de aluminio y silicio (parte más oscura). Observando el diagrama de fases de estas aleaciones, que suelen tener menos silicio que el del punto eutéctico, puede entenderse el proceso que da lugar a esta microestructura: primero se pasa del estado líquido al campo bifásico L + Al. En este punto se forman las dendritas citadas de aluminio primario. Posteriormente, al enfriar más, se da la reacción eutéctica, en la que el líquido restante se transforma en sólidos de aluminio y silicio eutécticos, que rodean a las dendritas primarias de aluminio previamente formadas.

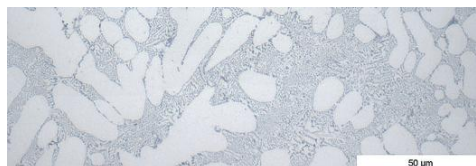


Figura 2. Microestructura Al-Si [4].

Por lo tanto, es de especial importancia realizar nuevas aleaciones de aluminio que puedan ser tanto coladas como anodizadas.

2. OBJETIVOS.

Una vez analizada la situación industrial de las aleaciones de aluminio para colar y anodizar, se planteó el estudio de nuevas aleaciones que combinen estos dos propósitos. Para ello se partió de una aleación de forja AA6082 a la que se añadieron diferentes elementos aleantes para estudiar las nuevas composiciones.

Los objetivos principales fueron: el estudio de nuevas aleaciones que combinen capacidad para ser coladas y anodizadas; y el estudio de costes a nivel industrial de la aleación seleccionada proponiendo como caso a estudiar la fabricación de una lámpara.

3. METODOLOGÍA.

Lo primero que se aborda en este estudio es la fabricación por colada, donde se funden los materiales a 700 °C para poder introducirlos en el molde en estado líquido, donde se solidifican para adquirir las dimensiones deseadas. En la Tabla 1 se muestran las composiciones de las muestras de estudio obtenidas, donde la muestra referencia es la AA6082 sin modificar, y el resto de las muestras son modificaciones de la AA6082. Además, en todas las muestras se mantuvo constante la composición del Mn con un 0,70 y del Cr con un 0,20.

Tabla 1. Composición de las muestras de estudio.

6082	Si	Mg	Zn	Cu	Fe	Ti	Sr
Ref.	1,30	1,00	0,20	0,10	0,50	0,10	0,00
1	2,00	2,60	0,20	0,10	0,50	0,10	0,00
2	1,30	1,00	0,20	0,20	1,00	0,10	0,00
3	1,30	1,00	0,25	0,10	0,50	0,15	0,00
4	2,00	2,60	0,25	0,10	0,50	0,15	0,00
5	2,00	2,60	0,25	0,10	1,00	0,15	0,00
6	2,00	2,60	0,25	0,20	1,00	0,15	0,00
7	2,00	2,60	0,25	0,20	1,00	0,15	0,02

Una vez obtenidas las muestras se realizó un pulido superficial para su preparación metalográfica. Por último, se hizo un ataque químico para revelar la microestructura a través de una disolución Kellers.

Para el estudio de las muestras se usaron los siguientes equipos: el microscopio óptico Leica/DMR para observar la microestructura y determinar el tamaño de grano; un sistema de fluorescencia de rayos X (EDS) acoplado al microscopio electrónico de barrido (SEM) para estudiar la composición; el durómetro para medir la dureza; el potenciómetro para evaluar el comportamiento a corrosión, mediante el LPR, EIS y Polarización anódica-catódica.

Dado que el objetivo es que las nuevas aleaciones combinasen capacidad de ser coladas y anodizadas, también se anodizaron las muestras. Para finalizar se estableció la relación entre el coste por unidad de pieza y el tamaño de lote mediante el programa *Granta EduPack*.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Microscopía óptica.

Mediante este equipo se observó la microestructura a tres aumentos (50x, 100x, 200x). Dado que las distintas muestras presentan composiciones similares, en la Figura 3 se ilustran la muestra 1 y la muestra 7. Se observan granos de aluminio con forma dendrítica, encontrándose el silicio en los bordes, ya que se forman eutécticos divorciados. Cabe destacar que la muestra 7 presenta un grano más refinado por ser la única que contiene estroncio.

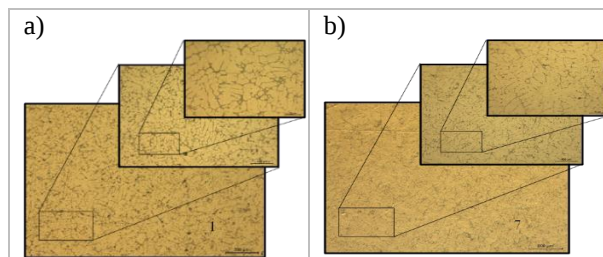


Figura 3. Micrografías de la microestructura: a) Muestra 1; b) Muestra 7.

A partir de estas imágenes se puede determinar el tamaño de grano que se relaciona con la dureza de cada muestra. Para determinar el tamaño de grano se usan las reglas de conteo, en especial el método de Heyn. Los resultados se muestran en la Tabla 2. De acuerdo con el efecto Hall-Petch, cuanto más pequeño sea el tamaño de grano, menor dureza presenta el material, debido al deslizamiento de un grano al próximo en los límites de grano [5].

Tabla 2. Índice de tamaño de grano.

Muestra	G	Muestra	G
Ref.	2,95	4	1,87
1	1,58	5	2,83
2	2,05	6	1,98
3	2,40	7	2,35

4.2. Análisis composicional (SEM-EDS).

En todas las muestras la composición es similar por lo que se ilustra en la Figura 4 la muestra 7, donde se observa cómo el aluminio y el silicio son inmiscibles. El aluminio tiene una estructura FCC, de manera que en los intersticios del aluminio están la mayoría de los aleantes. En las dendritas está el aluminio, en los espacios interdendríticos está el silicio y el magnesio, y el resto de aleantes están dispersados.

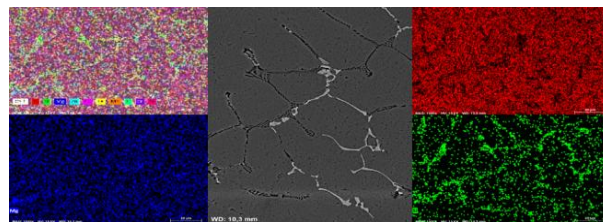


Figura 4. Muestra 7 en el microscopio SEM.

4.3. Microdureza Vickers.

Se estudia la dureza mediante el durómetro. En la Tabla 3 se muestran los resultados de microdureza, en los que

se concluye que siguen el mismo patrón de dureza que el observado a través del microscopio.

La muestra referencia es la más dura, ya que a pesar de que los aleantes que la forman son blandos, es la muestra que menor contenido de ellos presenta, mientras que la más blanda es la muestra 1, al tener gran cantidad de magnesio y poco titanio [6].

Tabla 3. Resultados de la microdureza.

Muestra	HV ₁	Muestra	HV ₁
Ref.	91,81	4	76,87
1	74,27	5	86,78
2	81,26	6	79,69
3	83,74	7	82,84

4.4. Estudio OCP y Rp.

Para iniciar el análisis de la corrosión, se realiza el estudio del potencial en circuito abierto (OCP) para evaluar la nobleza de las muestras. En la Figura 5a se muestra la evolución del OCP con el tiempo. A medida que pasa el tiempo el potencial se hace más positivo, lo cual indica que la muestra se está pasivando, haciéndose menos reactiva. Esto se debe a que la capa pasiva crece haciendo que se proteja el material. La presencia de picaduras, por otro lado, hace que el OCP sea más negativo, perjudicando al material. A pesar de eso, se estabiliza con el tiempo. La diferencia de potencial entre las muestras analizadas no es muy elevada, siendo una diferencia no significativa.

Una vez evaluada la estabilidad del sistema electroquímico, se estudia la resistencia a la corrosión. En la Figura 5b se observa que hay picos máximos por la formación de productos de corrosión, que hace que suba la resistencia a la polarización (Rp), debido a que los óxidos cerámicos son estables a corrosión. Luego esos productos de corrosión se agrietan haciendo que la Rp baje al entrar en contacto el líquido con el metal. Al final del ensayo no hay mucha diferencia entre las muestras, salvo la muestra 4 y la muestra 6, que son las que mejor se comportan a tiempos mayores. Y la muestra 7 es la que peor resiste con el paso del tiempo, asociando su comportamiento a la presencia de granos finos que se corroen antes, porque tiene más límite de grano, es decir, desorden atómico y, además, presenta una capa de óxido pasiva más estable [7].

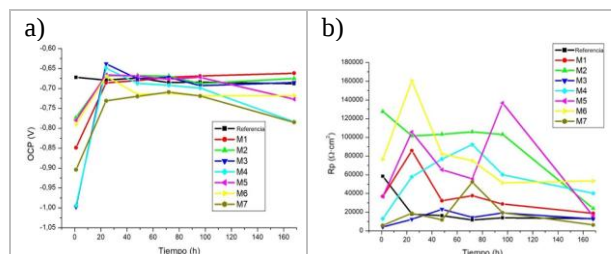


Figura 5. Evolución con el tiempo: a) OCP; b) Rp.

4.5. Polarización Anódica-Catódica.

En este estudio se determina el potencial y la densidad de corriente a dos tiempos de inmersión, 1 hora y 168 horas. Las conclusiones obtenidas en este estudio son: cuanto mayor es el tiempo de inmersión, más noble se hace la

muestra 3, relacionando este comportamiento con su bajo contenido de magnesio. Sin embargo, la muestra 7 es la menos noble en términos generales al estar presente el estroncio, que es muy reactivo.

En ambos casos concuerda con el estudio de OCP en términos de nobleza del material. Sin embargo, en el caso de polarización A-C se obtienen también los valores de densidad de corriente al aplicar a las muestras un rango de potencial amplio, obteniendo una visión del comportamiento a corrosión, ya que mayores densidades de corriente implican mayor degradación por corrosión.

4.6. Estudio EIS.

Este estudio determina los circuitos equivalentes de las muestras para cada tiempo de inmersión. Hay dos circuitos, un R(RC) que representa ataques generalizados y un R(RC)(RQ) que además de ataques generalizados, representa ataques localizados, que son las picaduras [5]. Por lo tanto, en la Figura 6 se representan ambos circuitos, destacando que en el caso de la Figura 6a es una capa pasiva homogénea y en el caso de la Figura 6b es una capa pasiva heterogénea.

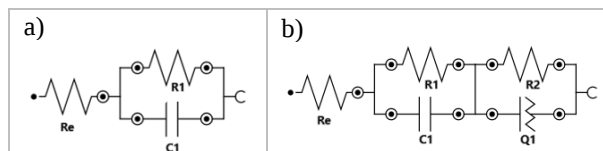


Figura 6. Circuitos eléctricos: a) Circuito R(RC); b) Circuito R(RC)(RQ).

Se concluye que la muestra referencia y la muestra 3 solo presentan ataques generalizados, mientras que la muestra 2 y la muestra 5, además de ataques generalizados, presentan picaduras. Destacando que el resto de las muestras no se asocian a un único circuito equivalente, ya que sus circuitos cambian con el tiempo.

4.7. Efectos de realizar anodizado.

Tras la fabricación de muestras y su estudio preliminar, las muestras se anodizan. Para ello se selecciona la muestra 7, ya que, a pesar de tener peores propiedades, al tener un mayor número de aleantes, la muestra fluye mejor y tiene mayor margen de mejora. Teniendo un buen acabado tras el anodizado, demostrando que son anodizables.

En la Tabla 4 se aprecia que al realizar el anodizado, la muestra se hace más resistente a la corrosión, al formarse capas de óxido gruesas, haciendo la muestra más noble al conseguir un potencial más positivo. Además, disminuye la densidad de corriente, permitiendo que la muestra se degrade menos [8].

Tabla 4. Estudios de la muestra con y sin anodizado.

Estudio	OCP	Rp	Polarización A-C	
Medida	OCP (V)	Rp (Ω·cm²)	V (V)	i (A/cm²)
Sin anodizar	-1,05	5057	-0,89	2,56E-08
Anodizada	-0,37	5235346	-0,64	1,06E-10

Para finalizar, en la Figura 7 se muestra cómo han quedado las piezas. Al aplicarle el anodizado no se aprecia cambio de tono, mientras que, si no se anodiza, se ve un cambio de tonalidad, ya que se forman productos de corrosión al no presentar una capa protectora [8].

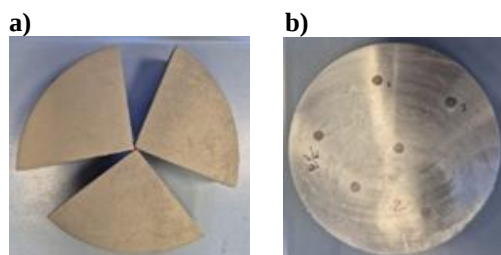


Figura 7. Muestra 7: a) Anodizada; b) Sin anodizar.

4.8. Diseño de la lámpara.

Una vez que se ha realizado el estudio técnico, se propone el diseño de una lámpara para analizar su implantación industrial. Para ello, se usa el programa de diseño 3D *Tinkercad*. En la Figura 8 se muestra el diseño, la parte azul oscura es la estructura y la parte gris es la luz.

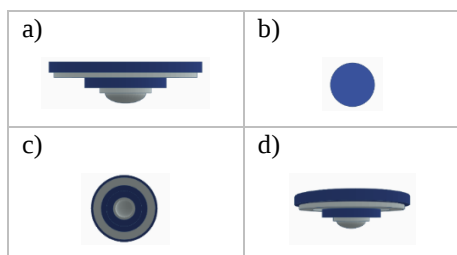


Figura 8. Diseño de la lámpara con vista: a) Lateral; b) Superior; c) Inferior; d) Ortogonal.

A continuación, se presentan las dimensiones de la lámpara creada. La estructura cuenta con dos cilindros, uno superior y otro inferior, ambos de 2 cm de altura, cuyos diámetros son de 30 cm y 16 cm, respectivamente.

Además, es importante saber cuánto se tarda en fabricar cada pieza, para ello se estima mediante la regla de Chorinov que se representa mediante la ecuación (1):

$$t = B \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (1)$$

donde B es la constante del molde que es 0,2 min/cm² para el molde usado; V es el volumen en cm³; A es el área en contacto con el molde en cm² y n es una constante que es 2.

A la hora de calcular el volumen se debe tener en cuenta el volumen de ambos cilindros, obteniendo un valor de 1815,84 cm³. Y en cuanto al área se deben considerar solo las caras que están en contacto con el molde, dando un valor de 1702,74 cm². Por lo tanto, se tarda 13,65 segundos en fabricar una lámpara mediante inyección a alta presión. Esto quiere decir que en una hora efectiva de trabajo se podrían fabricar 220 lámparas.

4.9. Costes de fabricación.

Una vez presentado el diseño de la lámpara, es clave estudiar los costes de fabricación para ver si el proceso es viable económicamente. Mediante el programa *Granta*

EduPack se estudia la relación entre el coste por unidad de pieza y el tamaño de lote, llegando a la conclusión de que a medida que aumenta el tamaño de lote, disminuye ese coste, lo cual se debe a que siempre hay unos costes fijos que son constantes y unos costes variables que al fabricar por lotes disminuyen. De manera que interesa más fabricar más lotes, ya que con pocas piezas no se compensa el capital inicial. Por lo tanto, se deben fabricar lotes de al menos 10000 lámparas para que el coste total por lámpara sea de 19 €. Dicho valor está cercano al coste de los materiales, ya que el coste del equipo de inyección a alta presión se amortigua al fabricar un número elevado de lámparas.

5. CONCLUSIONES.

Tras el estudio de las muestras para buscar aleaciones de aluminio y silicio que combinen colabilidad y capacidad para ser anodizadas se concluye que el aluminio está en forma de dendritas en cuyos bordes se encuentra el silicio, ya que son eutécticos divorciados. La muestra 7 es la seleccionada, ya que, a pesar de tener peores propiedades, al tener un mayor número de aleantes, la muestra fluye mejor.

Además, mediante la realización del anodizado, se mejoran esas propiedades al crear una capa pasiva sobre el material, cuya función es proteger la muestra. Empleando el diseño seleccionado se pueden fabricar 220 lámparas en una hora si se trabajase de manera efectiva. Donde el coste total para lotes superiores a 10000 lámparas es de 19 € por lámpara.

6. REFERENCIAS.

- [1] Héctor Rodríguez, "Propiedades del aluminio (Al)," *National Geographic España*, Jan. 15, 2024.
- [2] G. Barona López and E. Velasteguí López, "Materiales de aleación aluminio-silicio aplicados en la fabricación de partes de motores de combustión interna alternativos Parte II," *ConcienciaDigital*, vol. 3, no. 2, pp. 6–16, Apr. 2020, doi: 10.33262/concienciadigital.v3i2.1203.
- [3] "Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico," *Universidad Complutense*.
- [4] Xiuping Jiang, "Información metalográfica sobre el aluminio," *Struers Ensuring Certainty*.
- [5] J. Bedmar, S. García-Rodríguez, M. Roldán, B. Torres, and J. Rams, "Effects of the heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of 316 L stainless steel manufactured by Laser Powder Bed Fusion," *Corros Sci*, vol. 209, p. 110777, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.corsci.2022.110777.
- [6] W. Callister and D. Rethwisch, "Materials Science and Engineering An Introduction by William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch (z-lib.org)," 2018.
- [7] E. Otero Huerta, *Corrosión y degradación de materiales*, 2nd ed., vol. 4. 2001.
- [8] A. Mauricio Beltrán Martínez, "Estudio sobre el proceso de anodizado de aluminio y de una aleación Al-Mg-Si," *Universidad Nacional Autónoma de México, México Ciudad Universitaria*, 2014.