

Desgasificación con NaCl: Un método para incrementar las propiedades mecánicas de una aleación de aluminio A 319

Degassing with NaCl: A method for increasing the mechanical properties of an aluminum alloy A 319

Rubin Ortega-De la Rosa*✉, J. Edgardo Estrada-De la Torre*, Marco Alonso García-Romero*, Omar Rocha-Echavarría*, Pedro Antonio Bañuelos-Ruiz*

Ortega-De la Rosa, R., Estrada-De la Torre, J. E., García-Romero, M. A., Rocha-Echavarría, O., & Bañuelos-Ruiz, P. A. (2020). Desgasificación con NaCl: Un método para incrementar las propiedades mecánicas de una aleación de aluminio A 319. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 28(81), 50-57.

RESUMEN

Se analizó el efecto de desgasificación con NaCl tipo Halita sobre la morfología del Si eutéctico, la porosidad y las propiedades mecánicas de una aleación de Al A 319. La fusión del aluminio con la sal encapsulada se realizó en un horno eléctrico marca A/SS S. FREDERIKSEN a una temperatura de 760 °C durante 30 min, con el objetivo de lograr una homogeneización adecuada de la sal en la aleación de Al se hizo una agitación suave del metal líquido. Las cargas empleadas fueron trozos con dimensiones de 5 cm de largo por 8 cm de espesor para introducirlos en el crisol. Con los porcentajes de NaCl utilizados (1.2 y 3% del peso de la aleación) en el baño metálico la modificación más favorable se logró con 3% y un tamaño de partícula menor a 100 µm, la disociación del ion Cl permitió la eliminación del H, la porosidad

Palabras clave: desgasificación; morfología; porosidad; homogeneización; aleación; disociación.

Keywords: degassing; morphology; porosity; homogenization; alloy; dissociation.

Recibido: 14 de octubre de 2019, aceptado: 24 de septiembre de 2020

* Departamento de Metal-Mecánica, Instituto Tecnológico de Zacatecas, Tecnológico Nacional de México. Carretera Panamericana entronque a Guadalajara s/n, La escondida, C. P. 98000, Zacatecas, Zac., México. Correo electrónico: rubin.or@itz.edu.mx; edgardo.estrada@itz.edu.mx; marco.garcia@itz.edu.mx; rochaechavarría@hotmail.com; pedro_anbr@outlook.es ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9357-924X>; <http://orcid.org/0000-0002-9488-0736>; <http://orcid.org/0000-0002-9551-5204>; <http://orcid.org/0000-0003-4794-2727>; <http://orcid.org/0000-0002-4851-1198>

✉ Autor para correspondencia

disminuyó, produciendo una mejora en las principales propiedades mecánicas como dureza y resistencia a la tensión.

ABSTRACT

The effect of degassing with Halita-type NaCl on the morphology of the eutectic Si, the porosity and the mechanical properties of an A 319 Al alloy was analyzed. The fusion of the Al with the encapsulated salt was performed in an A/SS electric oven S. FREDERIKSEN at a temperature of 760 °C, for 30 minutes, in order to achieve an adequate homogenization of the salt in the Al alloy, gentle agitation of the liquid metal was made. The loads were pieces with dimensions of 5 cm long and 8 cm thick to introduce them into the melting pot.

With the percentages of NaCl used (1, 2 and 3% of the weight of the alloy) in the metal bath, the most favorable modification was achieved with 3% and a particle size of less than 100 µm, the dissociation of the chlorine ion allowed the removal of H, the porosity decreased, producing an improvement in the main mechanical properties such as hardness and tensile strength.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de Al (aluminio) son generalmente utilizadas en la industria automotriz y aeroespacial. Constituyen en términos de tonelaje el segundo grupo más grande de consumo de metales después de las

aleaciones de hierro vaciado (Chiesa & Baril, 2016) y, en particular, las tipo Al-Si son ampliamente utilizadas en la industria automotriz (Hirsch, 2014), estructuras aeroespaciales y aplicaciones militares debido a sus buenas propiedades mecánicas, bajo peso, buena soldabilidad, buena conductibilidad térmica, relativamente alta resistencia a alta temperatura, excelente resistencia a la corrosión, así como excelente fluidez al vaciado (Ravi, Pillai, Amaranathan, Pai, & Chakraborty, 2008). El H (hidrógeno) es el único gas que tiene una solubilidad apreciable en el Al y sus aleaciones, su solubilidad varía directamente con la temperatura y la raíz cuadrada de la presión.

En el punto de fusión del Al puro hay un incremento de solubilidad de H de 0.68 ml/100 g de Al (Miller et al., 2000), al transformar del estado sólido (0.02 ml/100 g de Al) al estado líquido (0.7 ml/100 g de Al). En el estado líquido también se observa una fuerte dependencia con la temperatura. En la solidificación (Mo, He, Hu, Liu, & Zhang, 2010) casi todo el H disuelto en el líquido es rechazado por el enfriamiento; también se ha reportado (Tenekedjiev, Mulazimoglu, Closset, & Gruzleski, 1995) que la porosidad se debe a dos factores: por el efecto de burbujas de H y por contracción (rechupes). Debido a la evolución de las microestructuras durante el proceso de solidificación la microestructura no solamente determina las propiedades mecánicas, también define los límites del diseño de vaciado, la colabilidad de la aleación y la susceptibilidad a la formación de defectos.

La forma del Si (silicio) eutéctico juega un papel muy importante en las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Si, particularmente en su resistencia a la elongación, lo que incrementa su ductilidad mediante el refinamiento estructural del Si eutéctico (Sun, Pang, Liu, Yang, & Sun, 2011), cuya fase es inherentemente frágil; sin embargo, su morfología se modifica de placas aciculares gruesas a una estructura fibrosa (similar a una alga marina) o laminar fina, mediante la adición de pequeñas cantidades de los elementos de la familia IA, IIA y tierras raras de la tabla periódica, o bien, con velocidades de enfriamiento altas (Martínez, Cisneros, Valtierra, & Lacaze, 2005). El Sr (estroncio), Na (sodio) y Sb (antimonio) son los tres elementos modificadores más utilizados comercialmente para tratar las aleaciones fundidas de Al-Si (Nampoothiri, Balasundar, Raj, Murty, & Ravi, 2018).

Han reportado la modificación del eutéctico Al-Si con Ba (bario), Ca (calcio), Y (itrio) e Yb (iterbio), proponiendo sus mecanismos de solidificación. Por ello es necesario manipular la morfología del eutéctico formado con elementos tales como Sr o el Na y, dado que el único gas susceptible a disolverse en estas aleaciones es el H, su eliminación (Uribe Pérez, Velosa Pacheco, & Zabala Capacho, 2011) se hace normalmente por tres medios con la inyección de gases inertes con la finalidad de disminuir la presión parcial del H en el baño metálico, por otro lado, también se han utilizado compuestos químicos base F (flúor) para eliminar el H mediante nitruración química, una práctica como es utilizar Cl en forma gaseosa; sin embargo, estas prácticas van en contra de las políticas del cuidado del medio ambiente. Martínez, Lacaze, Cisneros y Valtierra (2004) reportaron resultados favorables de desgasificación y modificación de aleaciones de Al utilizando sal común (o Halita), proponiendo este compuesto como nueva alternativa para esta finalidad; sin embargo, no presentan estudios de propiedades mecánicas.

Se encontró que el Na y el Sr reaccionan con el Sb formando una serie de precipitados en el material fundido. El efecto de la adición combinada del Na y el Sr es prácticamente el mismo que el del Na al inicio; es decir, el cambio morfológico obtenido en ambos casos (Sr-Na y Na) fue el mismo; no obstante, ellos encontraron que después de un tiempo de mantenimiento a 730 °C hay una interacción negativa entre estos dos modificadores, lo cual se debe a una pérdida por evaporación de estos elementos.

De todos los elementos modificadores el Na es el más poderoso, produce estructuras modificadas más uniformes a más bajas concentraciones que las que se producen con los demás; sin embargo, debido a que es un elemento muy reactivo se ha limitado su uso en la industria debido a que se ha reportado que esta fuerte reacción origina absorción de hidrógeno de atmósfera y daño estructural en los aceros (Onyia, Okorie, Neife, & Obayi, 2013). Bäck-erud, Chai y Tamminen (1990) reportan que después de dos fundiciones la acción modificadora del Na prácticamente desaparece, lo cual no ha sido observado respecto al Sr.

En este trabajo se pretendió demostrar que la incorporación del NaCl durante el proceso de fusión y su permanencia a temperatura de 760 °C durante 30 min favorece la disociación del NaCl y permite

que sus derivados actúen de manera individual; el Cl como agente desgasificador y el Na como modificador. Además, la disociación de NaCl en el metal líquido reducirá la porosidad y modificará el eutéctico Al-Si, lo que producirá una mejora en las propiedades mecánicas de la aleación Al-Si hipoeutéctica. Cabe mencionar que la sal que se utilizó en este trabajo fue obtenida en los yacimientos de la región, que se ubican en Salinas de Santo Domingo, Unidad Santa María, S. A. de C. V. en el km 73 de la carretera Zacatecas-Salttillo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación y análisis granulométrico de NaCl

La preparación de las materias primas, antes de su caracterización, comprendió las siguientes etapas:

- Homogeneización
- Cuarteo
- Muestreo

La homogeneización de aproximadamente 18 kg de la materia prima se realizó mecánicamente. El cuarteo se llevó a cabo hasta llegar a 2 kg de muestra. Se utilizó un mortero para reducir el tamaño de partícula, se hizo pasar el NaCl por una malla de apertura de $> 35 \mu\text{m}$. Una vez preparado el NaCl se tomó una muestra de 150 g y se realizó un análisis químico para determinar su pureza y granulometría. La pureza de la materia prima mineral fue determinada por difracción de rayos X, lo que dio como resultado 99.95% de pureza.

Cálculo de las cargas y preparación de las mismas para la fusión

El peso de la aleación A 319 fue de 1,400 gr y, de acuerdo con las tres condiciones experimentales de 1, 2 y 3% en peso del NaCl, corresponden a 14, 28 y 42 g de cada muestra. Para la preparación de las cargas se utilizó un lingote de Al de aleación A 319 con dimensiones de 80 cm de largo por 8 cm de espesor y se obtuvieron trozos del mismo con dimensiones de 5 cm de largo por 8 cm de espesor para ser introducidos en el crisol, se utilizó una segueta industrial para cortar los trozos. Estos se pesaron para introducir la carga de 1,400 g. En la figura 1 se encuentra un diagrama con el diseño experimental.

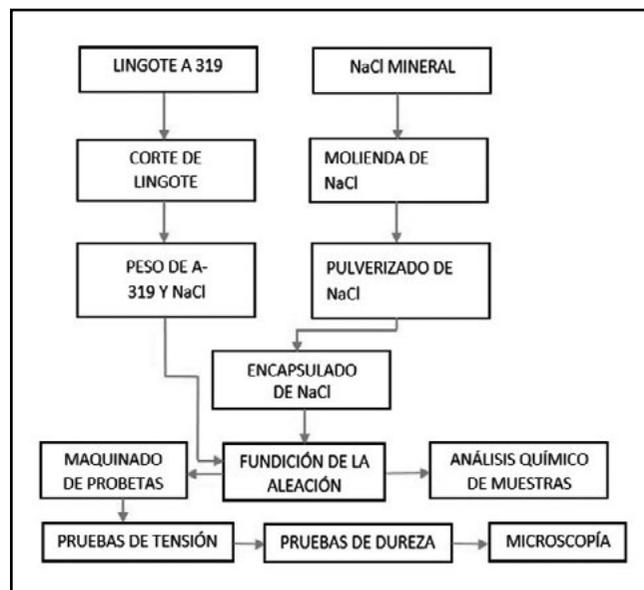


Figura 1. Diseño experimental.
Elaboración propia.

Encapsulado de la sal y fundición con Al

Los trozos de lingote y la sal se pesaron en una báscula analítica para la obtención de las cargas. Los fragmentos ya pesados fueron barrenados para la encapsulación de la sal con una broca de acero rápido de 31/64", se perforaron de uno a dos barrenos con un taladro de columna. La fusión del Al con la sal encapsulada se realizó en un horno eléctrico marca A/SS S. FREDERIKSEN OLGOD MODELO GPC 12/131 a 760 °C durante 30 min, con el objetivo de lograr una homogeneización adecuada de la sal en la aleación de Al y además de romper las cápsulas de sal con cubierta de Al que se forman se hizo una agitación suave del metal líquido.

Vaciado de la aleación

Una vez que se alcanzó la temperatura de fusión y el tiempo de homogeneización se descorificó la aleación de Al-Si y se vació en los moldes de grafito. Los moldes de grafito se precalentaron previamente a 150 °C para eliminar la humedad y permitir una solidificación adecuada. Una vez vaciado el Al en los moldes se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Preparación y maquinado de las probetas

Las probetas para ensayo de tensión se maquinaron en el torno ICA 120NRT de acuerdo con la norma estándar ASTM E8. Los radios y cuellos se pulieron para eliminar ralladuras y, con ello, las posibles concentraciones de esfuerzos; esto se logró utilizando papel de SiC de granulometría 240, 320, 400, 480, 500 y 600.

Análisis químico de las condiciones tratadas con NaCl

El análisis químico de las condiciones MB, C1, C2 y C3 (metal base, espécimen con 1% en peso de NaCl, 2% en peso de NaCl y 3% en peso de NaCl) se llevó a cabo por medio de análisis de chispa en el laboratorio de la empresa fundición JV, S. A. de C. V. en Ramos Arizpe, Coahuila. Las muestras fueron careadas para posteriormente desbastar con papel de SiC de granulometría 240 (tabla 1).

Pruebas de tensión y dureza

Las pruebas de tensión se realizaron en una máquina universal SHIMADZU MG-1, de 100KN de capacidad, con un avance 1mm/min. Las pruebas de dureza se realizaron en un durómetro O.M.A.G Brevetti AFFRI 206 RT con un penetrador de bola 1/16", carga de 100 Kgf y 980 Newton en la escala de Rockwell B. Las probetas utilizadas se carearon y desbastaron utilizando papel de SiC con granulometría 400.

Microscopía metalográfica

Las muestras obtenidas se analizaron por microscopía óptica con el fin de observar los cambios microestructurales presentes en las diferentes composiciones. Los resultados obtenidos se muestran posteriormente.

RESULTADOS

Análisis granulométrico del NaCl

El objetivo de esta prueba fue encontrar la distribución de tamaño de grano de sal para determinar el tamaño de partícula más factible para el ensayo.

Análisis espectrométrico

Se realizó un análisis químico por el método de espectrometría de emisión de arco eléctrico (chispa).

Tabla 1

Composición química de las aleaciones

Nº Lote	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe	Cr	Ni	Na	Al
MB	6.37	2.54	0.405	0.327	0.548	0.550	-----	0.02	-----	87.03
C1	6.39	2.5	0.303	0.358	0.537	0.449	0.033	0.022	0.0009	87.27
C2	6.51	2.43	0.579	0.238	0.495	0.460	0.093	0.025	0.0018	86.67
C3	6.61	2.26	0.278	0.319	0.449	0.453	0.039	0.03	0.0027	87.42

Nota: Elaboración propia.

La cantidad de Na disociado en el metal líquido proveniente de NaCl en diferentes porcentajes observó un aumento lineal en su concentración conforme se añade sal.

Microscopía

En el inciso a de la figura 2 se presentan las microfotografías de las composiciones analizadas por microscopía óptica, donde se observa la modificación de la microestructura.

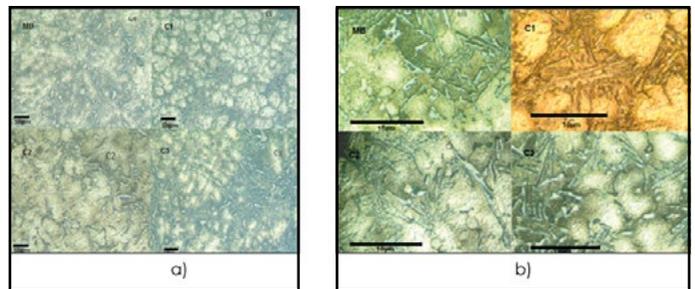


Figura 2. Fotomicrografías a 500X y 1000X de las composiciones MB sin adición y, C1, C2 y C3 modificadas con adición de Na. Imágenes del equipo de investigación.

En el inciso b de la figura 2 se presentan las microfotografías de las composiciones, donde se puede observar con mayor detalle la modificación de las agujas de Si eutéctico.

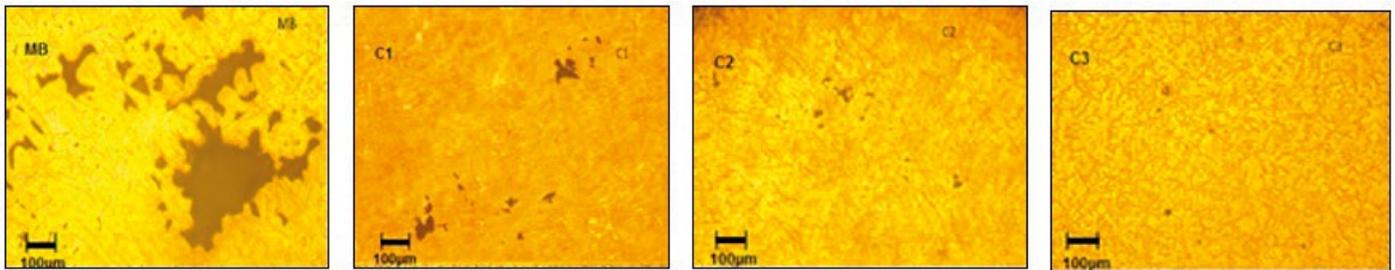


Figura 3. Fotomicrográficas a 10X de las composiciones MB, C1, C2 y C3 donde se muestra la presencia de porosidad. Imágenes del equipo de investigación.

Porosidad

Se realizó un mapeo superficial para detectar las zonas críticas con mayor porosidad, las cuales se ilustran en la figura 3.

Medición de la microestructura

Para evaluar la variación de tamaño de la microestructura se realizó una medición mediante

un analizador de imágenes con el software ImageJ, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4. Se realizó una medición del Espacio Dendrítico primario, cuyos resultados se reportan en el inciso c de la figura 4, en donde se pudo notar una tendencia a la disminución de dicho parámetro conforme aumentó la sal disociada.

Finalmente se realizó una medición de la longitud de las agujas de eutéctico con el analizador de imágenes ImageJ, cuyos resultados se muestran en el inciso d de la figura 4.

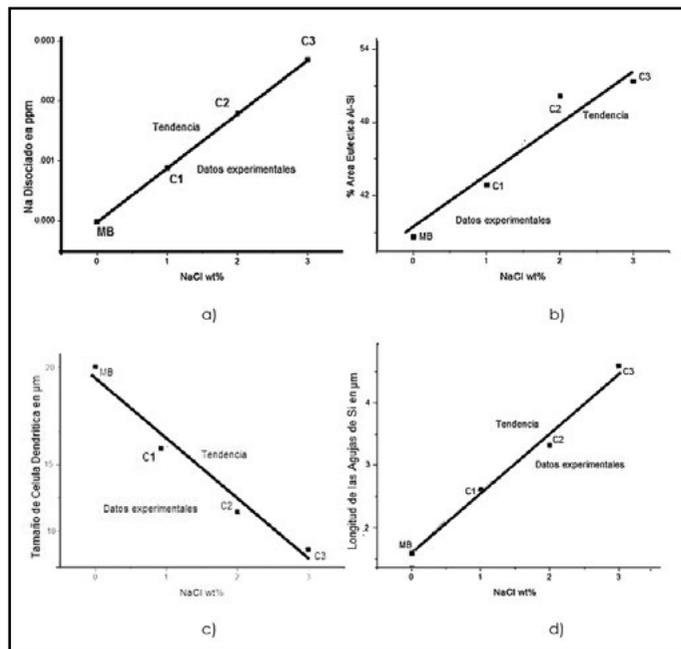


Figura 4. Pruebas mecánicas. a) Porcentajes de Na presentes en las aleaciones como función de la disociación. b) Resultados de la medición del porcentaje de área eutéctica Al-Si en función del contenido de sal. c) Resultados de la medición del tamaño de espacio dendrítico secundario en función del contenido de sal. d) Resultados de la medición de longitud de agujas de eutéctico Al-Si en función del contenido de sal. Elaboración propia.

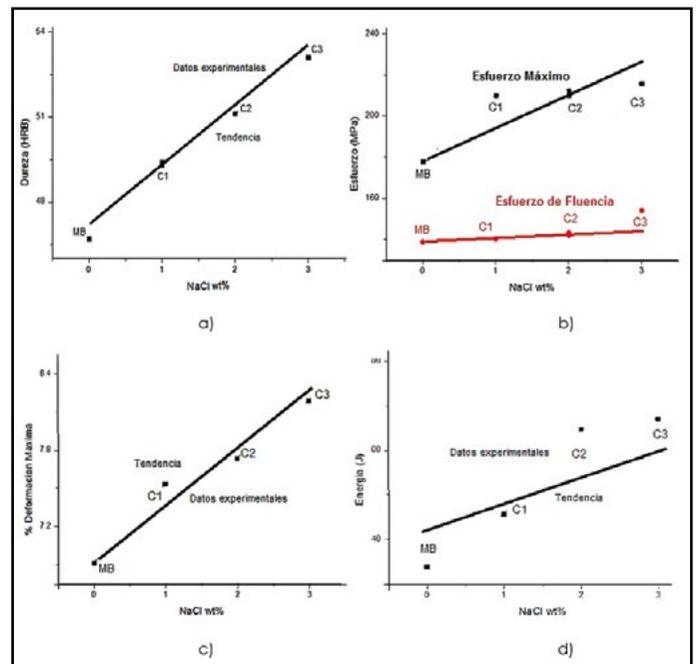


Figura 5. Pruebas mecánicas (continuación). a) Resultados de la prueba de dureza de las muestras analizadas en función del contenido de NaCl. b) Resultados de las pruebas de esfuerzo máximo en función del porcentaje de NaCl. c) Resultados de la prueba de deformación máxima de las muestras analizadas en función del contenido de NaCl. d) Resultados de la prueba de energía de ruptura de las muestras analizadas en función del contenido de NaCl. Elaboración propia.

Medición de las propiedades mecánicas: Dureza, esfuerzo máximo y de fluencia, porcentaje de deformación y energía

En el inciso a de la figura 5 pueden observarse los resultados obtenidos en cuanto a los ensayos de dureza. En el inciso b de la figura 5 se reportan los resultados de las pruebas de esfuerzo máximo en función del porcentaje de NaCl. Para este caso se consideró analizar 20 muestras, cinco por cada concentración de porcentaje de NaCl más el metal

base. En cuanto a deformación máxima, en el inciso c de la figura 5 se presentan los resultados de la prueba. Al añadir mayor cantidad de NaCl se tiene una mayor cantidad de deformación, puesto que el esfuerzo soportado es mayor. Otro de los efectos de la modificación microestructural es un aumento en la energía de ruptura, la cual se observa en el inciso d de la figura 5. Los resultados de la medición de las propiedades mecánicas, así como la medición de la microestructura se concentran en la tabla 2.

Tabla 2
Resultados de las pruebas mecánicas realizadas en las muestras analizadas

Condición	% de Área de Eutéctico	EDS (μm)	Dureza (HRB)	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Energía (J)
MB	39.45	21.69	46.7	177.74	138.58	42.13
C1	43.7	17.02	49.4	193.87	140.24	48.04
C2	47.95	12.35	52.1	210	141.90	53.95
C3	52.2	7.68	54.8	226.13	143.56	59.86

Nota: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Análisis Granulométrico del NaCl

En el proceso de molienda 99.99% de la sal sufrió una reducción de la granulometría por debajo de las 100 μm , lo cual resulta favorable en el sentido de que, según la literatura, conforme disminuye el tamaño de grano las partículas se vuelven más reactivas al aumentar su área de contacto, con lo cual se puede predecir una mayor disociación de la sal. Para el caso del análisis químico por el método de espectrometría de emisión de arco eléctrico puede observarse en la tabla 2 la cantidad de Na que permanece en la aleación presenta un aumento al incrementar el porcentaje de sal, lo cual indica que efectivamente se ha producido una disociación de NaCl.

En el análisis de la microestructura del inciso a de la figura 2 se aprecia una reducción del tamaño de las agujas al haber mayor disociación, también reducción del espacio dendrítico secundario (EDS) y una distribución más uniforme del eutéctico sobre la matriz; así como la reducción del espacio interdendrítico. Del mismo modo, en el inciso b de la figura 2 se muestra que disminuyeron su longitud al lograr una morfología de hojuelas; también se observa una reducción del espaciamiento entre ellas, lo cual da el efecto de la disminución de los espaciamientos dendríticos primarios.

En el caso de la porosidad se produjo una disminución significativa en la cantidad y tamaño de los poros presentes y concuerda con Martínez et al. (2004), quienes reportan que es debido a la disociación del NaCl y posterior reacción del cloro con el hidrógeno del baño metálico formando HCl en forma gaseosa.

Para la medición de la microestructura representada en el inciso b de la figura 4 se observa una tendencia lineal de aumento del porcentaje de área eutéctica conforme aumenta el porcentaje de sal añadido, consecuentemente se presenta una disminución del área ocupada por la matriz. En el inciso c de la figura 4 se observa una disminución del espacio dendrítico primario; esto se debe a un proceso de inoculación, la sal actúa como superficie de baja energía que favorece la solidificación a una velocidad más elevada y produce refinamiento del grano; con ello se espera un aumento en las propiedades mecánicas de la aleación. En el inciso d de la figura 4 se pudo observar una tendencia lineal de aumento de longitud de las agujas al añadir mayor porcentaje de NaCl. En el inciso a de la figura 5 se observa que al aumentar la cantidad de sal se incrementa linealmente la dureza como consecuencia del refinamiento de grano.

En cuanto al esfuerzo máximo y esfuerzo de fluencia se observa que al evaluar el esfuerzo máximo soportado por la aleación se produce un aumento de este conforme aumenta la cantidad

de sodio presente, lo cual indica (Haro-Rodríguez et al., 2011) que la modificación microestructural sí está relacionada al aumento de las propiedades mecánicas. Durante la fluencia la modificación de la microestructura reforzada por el eutéctico y refinada por la disminución del EDS trae como consecuencia un aumento en la resistencia mecánica. Al igual que en el esfuerzo máximo, la resistencia a la fluencia se ve aumentada con el incremento en la cantidad de sodio.

En el aumento de la energía de ruptura la disociación de sal favorece la modificación microestructural y, por consecuencia, se produce un aumento de la energía de ruptura mediante la refinación de la microestructura y aumento del eutéctico. Dado lo anterior es factible decir que una mayor cantidad de sal añadida implica una mayor disociación de la misma y, por tanto, un mayor porcentaje de eutéctico presente, así como una disminución del EDS, los cuales están acompañados de un aumento general de las propiedades mecánicas de la aleación.

CONCLUSIONES

Además de incrementar el porcentaje de sal en el baño metálico se requiere un tamaño de partícula pequeño para favorecer la disociación del NaCl; de este modo, al analizar el efecto de una adición de 1, 2 y 3% de NaCl la modificación más favorable se logró con 3% y un tamaño de partícula menor a 100 μm , con lo que se obtienen 270 p. p. m. de Na dentro de la aleación.

La disociación del ion Cl permitió la eliminación del H disuelto en el baño metálico, la porosidad disminuyó de forma considerable, por lo que se afirma que la desgasificación con NaCl en todas las muestras fue muy favorable; con lo cual también se aumentaron las propiedades mecánicas. Los mejores resultados se obtuvieron con 3% de NaCl.

El Si eutéctico sufrió un cambio de tamaño en todos los porcentajes añadidos de NaCl, debido al efecto del ion Na. Además del cambio morfológico se logró la disminución del tamaño del espacio dendrítico primario y el mejor efecto de modificación se obtuvo con 3% de NaCl.

En todos los casos la modificación con 3% de NaCl coincidió con el valor máximo alcanzado por las propiedades mecánicas, así como con el mejor refinamiento de la microestructura de la aleación.

El NaCl actúa simultáneamente sobre la aleación de Al A-319 como desgasificante al interactuar el ion Cl disociado con el H, modificador al interactuar el ion Na disociado con el Si eutéctico, refinador.

La modificación microestructural del Si eutéctico condujo a un aumento de las propiedades mecánicas como dureza, esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia, porcentaje de deformación y energía de ruptura, en donde se obtuvieron los valores máximos en la adición de 3% de NaCl según la tendencia.

Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio, con el uso de 2 a 3% de NaCl es posible desgasificar y modificar el silicio eutéctico de la aleación A 319, dichos efectos quedan de manifiesto al valorar el índice de calidad de la aleación, con lo que se nota una mejora significativa.

La disociación del ion Cl permitió la eliminación del H disuelto en el baño metálico, la porosidad disminuyó de forma considerable por lo que se afirma que la desgasificación con NaCl en todas las muestras fue muy favorable, con lo cual también se aumentaron las propiedades mecánicas. De igual manera los mejores resultados se obtuvieron con 3% de NaCl.

El NaCl actúa simultáneamente sobre la aleación de Al A-319 como desgasificante al interactuar el ion Cl disociado con el H, modificador

al interactuar el ion Na disociado con el Si eutéctico, refinador.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatecas por el apoyo proporcionado para la realización de esta investigación; así como a la Unidad Académica de Ingeniería, Maestría en Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad Autónoma de Zacatecas por el apoyo a nuestros alumnos en la asesoría y experimentación en sus laboratorios.

REFERENCIAS

- Bäckerud, L., Chai, G., & Tamminen, J. (1990). Foundry alloys. En *Solidification characteristics of aluminum alloys* (Vol. 2, 266 pp.). Norway: Skanaluminium.
- Chiesa, F., & Baril, J. (2016). A case for low pressure sand casting of aluminum. *Metal Casting Design & Purchasing*, 18(1), 36-40. Recuperado de <http://content.yudu.com/web/y5b2/0A1snzj/MCDP.JanFeb.2016/html/index.html?page=38>
- Haro-Rodríguez, S., Goytia-Reyes, R. E., Dwivedi, D. K., Baltazar-Hernández, V. H., Flores-Zúñiga, H., & Pérez-López, M. J. (2011). On influence of Ti and Sr on microstructure, mechanical properties and quality index of cast eutectic Al-Si-Mg alloy. *Materials & Design*, 32(4), 1865-1871. doi: 10.1016/j.matdes.2010.12.012
- Hirsch, J. (2014). Recent development in aluminium for automotive applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(7), 1995-2002. doi: 10.1016/S1003-6326(14)63305-7
- Martínez D., E. J., Cisneros G., M. A., Valtierra, S., & Lacaze, J. (2005). Effect of strontium and cooling rate upon eutectic temperatures of A319 aluminum alloy. *Scripta Materialia*, 52(6), 439-443. doi: 10.1016/j.scriptamat.2004.11.012
- Martínez, E., Lacaze, J., Cisneros, M., & Valtierra, S. (2004). Efecto del estroncio en las temperaturas de reacción eutécticas y microestructuras de solidificación de una aleación Al-Si tipo A319. *Revista Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá*, 12(2), 21-26. doi: 10.4067/s0718-13372004000200004
- Miller, W. S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A. J., De Smet, P., Haszler, A., & Vierendeel, A. (2000). Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials Science and Engineering: A*, 280(1), 37-49. doi: 10.1016/S0921-5093(99)00653-x
- Mo, D.-F., He, G.-Q., Hu, Z.-F., Liu, X.-S., & Zhang, W.-H. (2010). Effect of microstructural features on fatigue behavior in A319-T6 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(15), 3420-3426. doi: 10.1016/j.msea.2010.02.055
- Nampoothiri, J., Balasundar, I., Raj, B., Murty, B. S., & Ravi, K. R. (2018). Porosity alleviation and mechanical property improvement of strontium modified A356 alloy by ultrasonic treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 724, 586-593. doi: 10.1016/j.msea.2018.03.069
- Onyia, C. W., Okorie, B. A., Neife, S. I., & Obayi, C. S. (2013). Structural modification of sand cast eutectic Al-Si alloys with sulfur/sodium and its effect on mechanical properties. *World Journal of Engineering and Technology*, 1(2), 9-16. doi: 10.4236/wjet.2013.12002
- Ravi, K. R., Pillai, R. M., Amaranathan, K. R., Pai, B. C., & Chakraborty, M. (2008). Fluidity of aluminum alloys and composites: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 456(1-2), 201-210. doi: 10.1016/j.jallcom.2007.02.038
- Sun, Y., Pang, S., Liu, X., Yang, Z., & Sun, G. (2011). Nucleation and growth of eutectic cell in hypoeutectic Al-Si alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(10), 2186-2191. doi: 10.1016/S1003-6326(11)60993-x
- Tenekedjiev, N., Mulazimoglu, H., Closset, B., & Gruzleski, J. (1995). *Microstructures and thermal analysis of strontium-treated aluminum-silicon alloys*. US: American Foundrymen's Society.
- Uribe Pérez, I., Velosa Pacheco, A. B., & Zabala Capacho, L. E. (2011). Fundamentos del daño por hidrógeno en los aceros. *El hombre y la Máquina*, 36, 123-142.