

Caracterización del compuesto de matriz metálica AZ91E/AlN fabricado por infiltración espontánea

Egberto Bedolla y José Lemus-Ruiz

Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH

Resumen

Este trabajo se enfoca en el procesamiento y caracterización de un material compuesto de matriz de magnesio AZ91E con alto contenido de refuerzo (~49% vol.) de nitruro de aluminio (AlN). La fabricación se realizó por el método de infiltración sin usar presión externa, partiendo de preformas de AlN pre-sinterizadas a 1450°C. Preformas con porosidades de ~51% vol. fueron infiltradas con la aleación de magnesio AZ91E líquida a 900°C durante 10 minutos en una atmósfera de argón. Técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) y transmisión (MET), así como difracción de rayos X (DR-X) fueron empleadas para caracterizar los compuestos AZ91E/AlN producidos, evaluando la distribución del refuerzo, porosidad y productos de reacción. Los resultados obtenidos por MEB muestran una distribución homogénea del refuerzo y la matriz, determinándose por DR-X las fases AlN, Mg y $Mg_{17}Al_{12}$. Resultados de MET revelan una interfase, entre la matriz y el refuerzo, libre de productos de reacción, sin embargo se observaron pequeños precipitados de Mg_2Al_3 y MgO. Resultados de la caracterización mecánica de los compuestos indican valores promedio del módulo de elasticidad de 133 GPa, así como una dureza de 24 HRC (260HV). El coeficiente de expansión térmica lineal fue $9.53 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ en el rango de temperatura en-

tre 27 y 227°C (300 y 500 K). La resistividad eléctrica fue alrededor de $45.9 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ a 25°C.

Palabras clave: Compuestos, AlN, infiltración, aleación AZ91E.

Abstract

Characterization of the AZ91E/AlN metal matrix composite manufactured by spontaneous infiltration

This work focuses on processing and characterization of metal matrix composites of magnesium alloy AZ91E reinforced with high amount (~49 vol.%) of aluminum nitride (AlN). Fabrication was made by the infiltration technique without external pressure, using AlN preforms pre-sintered at 1450°C. Preforms with porosities around 51 vol.% were infiltrated with molten AZ91E magnesium alloy at 900°C during 10 minutes in argon atmosphere. The produced AZ91E/AlN composites were characterized through scanning (SEM) and transmission (TEM) electron microscopy, as well as X ray diffraction (XRD). Reinforcement distribution, porosity, and reaction products were evaluated. SEM results show homogeneous distribution of reinforcement within the matrix. AlN, Mg and $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ were detected by XRD. TEM results revealed a matrix/reinforcement interface free of reactions products, however small precipitates of Mg_2Al_3 and MgO were observed. Results of the mechanical characterization indicate average values of elastic modulus of 133 GPa, as well as a hardness of 24 HRC (260HV). The linear thermal expansion coefficient was $9.53 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ in the range of temperature between 27 and 227°C (300 and 500K). The electric resistivity was around $45.9 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ at 25°C.

Keywords: Composites, AlN, infiltration, AZ91E alloy.

1. Introducción

Los materiales compuestos se obtienen al unir en forma macroscópica dos materiales para conseguir una combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Están formados por una fase continua llamada matriz que puede ser metálica, cerámica u orgánica, así como una fase de refuerzo dispersa en la matriz y que puede ser en forma de fibra o partículas (Askeland 1998). Generalmente los componentes son significativamente distintos en propiedades, siendo uno ligero, fuerte y frágil y el otro suele ser tenaz y dúctil. Las combinaciones en materiales compuestos pueden ser metal/metal, metal/cerámico, metal/polímero, cerámico/polímero, cerámico/cerámico o polímero/polímero (Askeland 1998). La unión de estos materiales disímiles dará lugar a materiales con propiedades poco usuales como: rigidez, resistencia, densidad, rendimiento a elevada temperatura, resistencia a la corrosión, dureza, o conductividad eléctrica y térmica. En el caso de los com-

puestos de matriz metálica, de los que hablaremos en particular en el presente trabajo, los tipos de refuerzo se pueden clasificar en tres categorías: fibras, whiskers o partículas. El uso de partículas como refuerzo tiene una mayor acogida en los materiales compuestos de matriz metálica (CMM), ya que asocian menores costos y permiten obtener una mayor isotropía de propiedades en el producto. Sin embargo, para tener éxito en el desarrollo de CMM se debe tener un estricto control del tamaño y la pureza de las partículas utilizadas. Los refuerzos típicos de mayor uso en forma de partículas son: carburos (TiC, B₄C), óxidos (SiO₂, TiO₂, ZrO₂, MgO) y nitruros (AlN, Si₃N₄). Así, en los últimos años se han empezado a utilizar partículas de intermetálicos, principalmente de los sistemas Ni-Al y Fe-Al (Da Costa et al. 2000, Sahin y Acilar 2003).

Se ha reportado en la literatura la elaboración de CMM usando como refuerzo AlN utilizando diferentes rutas (Ye et al. 2005, Swaminathan et al 2002, Liia et al. 2002, Zhang et al 2003, Chedru et al. 1999). Sin embargo, en estos estudios se ha empleado muy poco el magnesio y sus aleaciones, no obstante que el uso de éstas se ha venido incrementando en los últimos años en la industria automotriz debido a su peso ligero. La densidad del Mg es alrededor de (2/3) de la del Al, (1/4) de la del Zn y (1/5) de la del acero. Como resultado, las aleaciones de magnesio ofrecen una resistencia específica alta comparada con las aleaciones convencionales de aluminio, además éstas aleaciones tienen buena capacidad de amortiguamiento, excelente colada y muy buena maquinabilidad (Ye y Liu 2004). Por otro lado, el AlN poli-cristalino tiene una conductividad térmica de 80 a 200 Kw/m.K, un coeficiente de expansión térmica de $4.4 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (valor muy cercano al del carburo de silicio $3.2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Estas dos propiedades hacen al AlN un excelente material para circuitos eléctricos de alta densidad comparado con otros sustratos cerámicos que por lo general tienen bajos coeficientes de conductividad térmica y altos coeficientes de expansión térmica. Como resultado, la combinación de las propiedades mecánicas del AlN con las del Mg y sus aleaciones dan origen a un compuesto muy atractivo para aplicaciones electrónicas y estructurales. Las propiedades de los compuestos están determinadas por factores, tales como las propiedades individuales de los materiales que constituyen la matriz y el refuerzo, así como de su interacción interfacial, además de la morfología, orientación y distribución de la fase reforzante y de la técnica de fabricación (Contreras et al. 2003). La reacción interfasial entre la matriz y el refuerzo requiere de un riguroso estudio, ya que puede cambiar la composición de la matriz y el refuerzo, no obstante alguna de estas reacciones interfaciales contribuyen al aumento de las propiedades mecánicas, otras lo harán en detrimento (Muscat et al. 1992); por lo tanto su análisis resulta ser de gran importancia. Una interfase adherida fuertemente es un requisito para una buena resistencia en un compuesto. La naturaleza y calidad de la interfase (morfología, composición química, resistencia y adhesión) son determinadas por factores intrínsecos, tanto del material de refuerzo como de la matriz (composición química, cristalografía y contenido de defectos) así como también factores extrínsecos (tiempo, temperatura, presión y atmósfera) relacionados con la fabricación del material.

En los CMM una cantidad moderada de interacciones químicas entre el refuerzo y la matriz mejoran la mojabilidad y la resistencia de la interfase. Tales interacciones frecuente-

mente resultan en la formación de fases intermedias que no están en equilibrio, debido a que las interfases son termodinámicamente inestables y las transformaciones morfológicas y estructurales continúan durante todo el proceso de fabricación. Sin embargo, excesiva reacción química degrada el refuerzo y la resistencia del compuesto (Asthana 1998, Asthana 1998a). Por tanto, disminuir el tiempo de procesamiento o utilizar elementos de aleación puede ser una práctica que reduzca la extensión de la reacción interfaseal. La zona de la interfase es una región de composición química variable, donde tiene lugar la unión entre la matriz y el refuerzo, que asegura la transferencia de las cargas aplicadas entre ambos y condiciona las propiedades mecánicas finales de los compuestos. Durante la producción de CMM usando una ruta de procesamiento en estado líquido, la matriz líquida está en contacto con los refuerzos sólidos, esto incrementa la interacción interfaseal, aunado al contacto prolongado entre ambos componentes del compuesto. Las zonas de reacción usualmente son frágiles y podrían estar fuerte o débilmente unidas al refuerzo. Los materiales metálicos de uso más común en CMM son las aleaciones ligeras de Al, Ti y Mg. La naturaleza de la técnica en la fabricación de materiales compuestos tiene un efecto marcado sobre las propiedades del material. En el caso de procesamiento en estado líquido para fabricación de materiales compuestos, la mayor dificultad que se presenta es la no mojabilidad de la fase cerámica por los metales líquidos. Por lo tanto, es de gran importancia obtener una buena mojabilidad para lograr una unión fuerte entre la matriz y el refuerzo (Contreras et al. 2003). La infiltración por capilaridad sin presión externa de preformas cerámicas es una técnica atractiva para la fabricación de materiales compuestos, debido a que permite manufacturar materiales con alto contenido de cerámico (Muscat et al. 1992, Contreras et al. 2003). Sin embargo, las temperaturas altas que se requieren para fabricar el compuesto por esta técnica, pueden generar una cantidad considerable de productos de reacción en la interfase. El objetivo de este trabajo fue elaborar un material compuesto usando como matriz la aleación de magnesio AZ91E y como refuerzo cerámico partículas de AlN, utilizando la técnica de infiltración por capilaridad.

2. Metodología experimental

En la Tabla 1 se presenta la composición química de la aleación de magnesio AZ91E (*Thomson Aluminum Casting Co. USA*) usada en la fabricación del material compuesto. El material de refuerzo utilizado fue polvo de AlN (*Aldrich Chemical Co. USA*) con un tamaño de partícula promedio de 1.38 μm .

TABLA 1							
Composición química de la aleación AZ91E (% peso)							
Mg	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni
90	8.1 - 9.3	0.4 - 1	0.17 - 0.35	0.20 max	0.005 max	0.015 max	0.001 max

La fabricación del compuesto se realizó mediante la técnica de infiltración sin presión externa, para lo cual se fabricaron preformados con dimensiones de 6.5x1x1 cm en un dado rectangular de acero. En el dado se colocaron y prensaron uniaxialmente 12 gramos de AlN sin uso de ligantes, utilizando una presión de 15 MPa. Posteriormente los preformados fueron pre-sinterizados a una temperatura de 1450°C durante 60 minutos en una atmósfera de nitrógeno de alta pureza (99.997%). A los preformados sinterizados se les evaluó la densidad y porosidad de acuerdo a la norma ASTM C20-00. Finalmente, las preformas pre-sinterizadas porosas se colocaron en contacto con trozos pequeños de la aleación AZ91E dentro de un crisol de grafito en un horno tubular horizontal a una temperatura de 900°C durante 10 minutos en una atmósfera de argón. Una vez que la aleación se funde, ésta se infiltra en el preformado obteniendo así el material compuesto.

Los compuestos obtenidos fueron caracterizados microestructuralmente por medio de DR-X, MEB y MET. En la caracterización mecánica se evaluó el módulo de elasticidad, dureza, coeficiente de expansión térmica y resistividad eléctrica. Las características estructurales y morfológicas, así como los productos de reacción en la interfase fueron investigadas usando un microscopio ESEM XL-30 Philips acoplado a un sistema de espectroscopía dispersiva de energía (EDS). Los productos de reacción en la interfase fueron analizados por medio de un microscopio electrónico de transmisión JEOL JSM-2200 FS operado a 200 kV equipado con un sistema de espectroscopía dispersiva de energía (EDS) para realizar microanálisis. Las muestras observadas por medio de MET fueron preparadas a partir de pequeñas laminillas obtenidas de los compuestos (300 µm de espesor), siguiendo un procedimiento de preparación convencional, el cual consiste en desbaste manual hasta aproximadamente 100 µm, desbaste mecánico en un equipo DIMPLER D500i (*VCR Group Incorporated*) donde se obtuvieron muestras con diámetro de 3 mm y finalmente se llevó a cabo un electro-pulido usando el equipo STRUERS TENOPOL-5 con un electrolito de ácido perclórico al 10%, voltaje de 40 Volts, temperatura de -10 °C por un tiempo promedio de 15 minutos. Las imágenes obtenidas por MET fueron digitalizadas para llevar a cabo su análisis y procesamiento. Los análisis de DR-X se realizaron en un difractómetro SIEMMENS D5000 en un rango de barrido de 15 a 80 grados. La caracterización mecánica y electrónica consistió en la evaluación del módulo de elasticidad por medio de un equipo Grindo Sonic MK5 JV Lemmens, para lo cual se prepararon 3 barras del compuesto AZ91E/AlN producidas en diferentes corridas, a las cuales se les realizó la medición en cada una de las 4 caras para obtener un valor promedio. Por otro lado, se evaluó de manera teórica el módulo de elasticidad por medio de la ecuación de las mezclas y la ecuación de Halpin Tsai 1992. La dureza de los materiales se determinó en un Indentador Vickers NANOVELTA utilizando una carga de 50 kg. La prueba se efectuó en 3 puntos de la probeta para obtener un valor promedio de las lecturas. Para medir la resistividad eléctrica, se utilizó un equipo de 4 puntas ALESSI empleando una corriente de salida de 1 mA, para tal efecto, las muestras se ajustaron a las medidas de 1x10x10 mm y se pulieron usando lijas de SiC en forma consecutiva hasta el grado 1000. Las pruebas para determinar el coeficiente de expansión térmica (CET) se realizaron en un analizador termo-mecánico T.A. Instruments 2940, usando una rampa de calentamiento de

100°C/min en una atmósfera de nitrógeno en el rango de temperatura entre 27 y 227°C (300 y 500 K).

3. Resultados y discusión

La Figura 1 muestra dos micrografías de los materiales compuestos AZ91E/AlN donde se puede observar una distribución uniforme del material de refuerzo en la matriz metálica. Los compuestos fabricados tienen un 51% de la aleación AZ91E y un 49% de AlN. Como se puede observar en la Figura 1, aparentemente no existe reacción entre el refuerzo y la matriz.

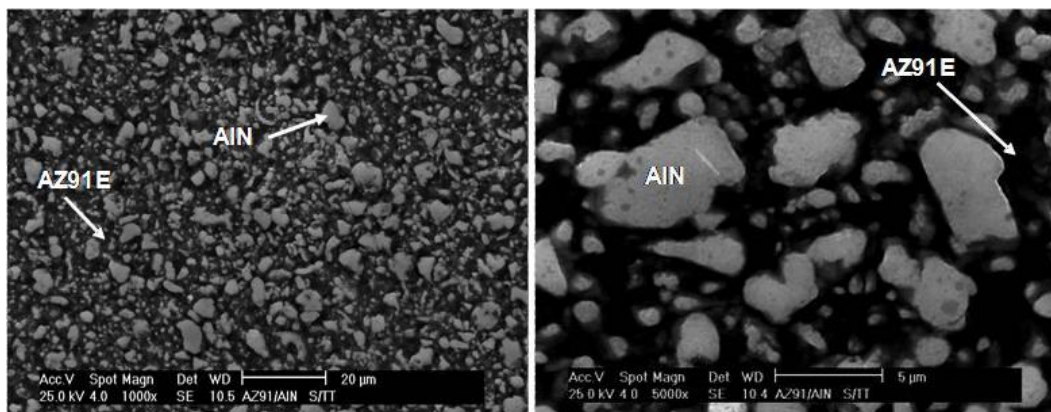


Figura 1. Imágenes obtenidas por MEB del compuesto AZ91E/AlN donde se aprecia una distribución homogénea del material de refuerzo en la matriz metálica.

Con el propósito de identificar las fases presentes en el compuesto AZ91E/AlN fabricado a 900°C se realizaron análisis de DR-X. La Figura 2 presenta un difractograma de los compuestos en el que se pueden identificar las fases de AlN, Mg y una fase de $Mg_{17}Al_{12}$. Por medio de esta técnica no se detectaron otras fases que pueden ser origen del producto de reacción entre el refuerzo y la matriz al estar en contacto durante el proceso de infiltración ya que la fase $Mg_{17}Al_{12}$ es un precipitado de la aleación AZ91E en la matriz. Aun cuando termodinámicamente es factible la formación de otras fases como el MgO y la espinela $MgAl_2O_4$ estas no fueron detectadas por medio de la técnica de DR-X, lo cual puede atribuirse a la poca cantidad de productos de reacción que se podría formar.

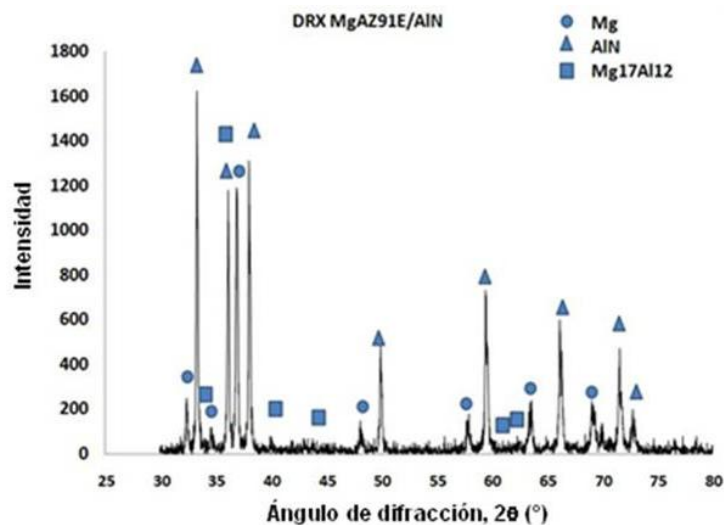


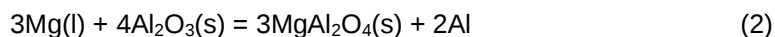
Figura 2. Espectro obtenido por DR-X de los compuestos AZ91E/AlN.

3.1. Análisis termodinámico

En acorde con la termodinámica, es factible la formación de varios productos de reacción durante la fabricación del compuesto AZ91E/AlN a 900°C. La formación de MgO y de la espinela MgAl_2O_4 puede darse a la temperatura de infiltración por las siguientes reacciones (1) y (2):

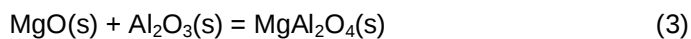


$$\Delta G_{(900^\circ\text{C})} = -473 \text{ kJ}$$



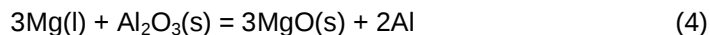
$$\Delta G_{(900^\circ\text{C})} = -256 \text{ kJ}$$

La formación de la espinela MgAl_2O_4 puede darse aún en estado sólido de acuerdo a la siguiente reacción (3):



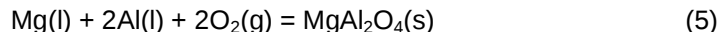
$$\Delta G_{(900^\circ\text{C})} = -44 \text{ kJ}$$

Por otro lado, termodinámicamente el MgO es más estable que la Al_2O_3 , por tanto, el Mg puede reducir la Al_2O_3 de acuerdo a la siguiente reacción (4):



$$\Delta G(900^\circ\text{C}) = -123 \text{ kJ}$$

Como puede observarse, termodinámicamente las reacciones (2) y (3) que dan origen a la formación de espinelas son factibles de ocurrir, sin embargo, el grado de reacción para que se lleve a cabo una u otra dependerá de la temperatura, el tiempo de exposición (cinética) y la composición química de la aleación. El Al_2O_3 es termodinámicamente estable en contacto con Al puro, sin embargo, tratándose de una aleación de Mg tiende a formarse MgO de acuerdo a las ecuaciones (1) y (4) o la espinela MgAl_2O_4 de acuerdo a las ecuaciones (2) y (3) y en un sistema que se tenga suficiente oxígeno esta espinela puede formarse de acuerdo a la siguiente reacción (5):



$$\Delta G(900^\circ\text{C}) = -1808 \text{ kJ}$$

De acuerdo a investigaciones realizadas por Lloyd 1994, McLeod et al. 1992 y Lloyd et al. 1990, contenidos de Mg altos y temperaturas bajas favorecen la formación del MgO, mientras que la formación de la espinela es más factible a contenidos de Mg bajos, misma que en nuestro sistema AZ91E/AlN no fue detectada.

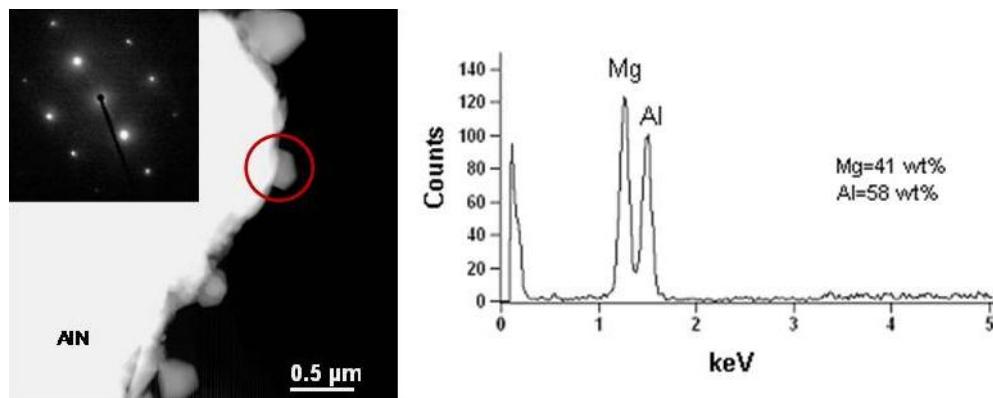


Figura 3. Imagen obtenida por MET y EDS del compuesto AZ91E/AlN donde se aprecia la formación de algunos precipitados correspondientes a la fase Mg_2Al_3 .

3.2. Caracterización microestructural

Las observaciones en muestras del compuesto AZ91E/AlN analizadas por medio de MEB a altas magnificaciones muestran que aparentemente no existen productos de reacción en la interfase. Sin embargo, para corroborar la ausencia de reacción entre la matriz y el refuerzo se observaron muestras por medio del MET. En la Figura 3 se presenta una imagen obtenida por MET del compuesto AZ91E/AlN y su correspondiente análisis de EDS. En esta

Figura 3 es factible apreciar la presencia de algunos precipitados, sobre todo de Al_3Mg_2 . Es clara la formación de precipitados de varios tamaños, los cuales preferencialmente precipitan en los límites de grano del AlN. De los microanálisis realizados a estos precipitados y considerando su estequiometría se puede inferir que esta composición química es consistente con la fase Al_3Mg_2 .

Por otro lado, durante la preparación de las muestras para analizarlas por microscopía electrónica tanto de barrido como de transmisión, no se detectó desprendimiento de partículas, por lo que se puede decir que existe una buena adhesión entre el cerámico y la matriz. Para evaluar el grado de adhesión entre refuerzo y matriz se utiliza el trabajo de adhesión, el cual es una medida que refleja el grado de unión entre la superficie sólida y líquida. Una interfase adherida fuertemente es un requisito para tener un buen comportamiento mecánico y estructural en un compuesto. La naturaleza y calidad de la interfase (morfología, composición química, resistencia y adhesión) son determinadas por factores intrínsecos tanto del material de refuerzo como de la matriz (composición química, cristalografía y contenido de defectos) así como también por factores intrínsecos relacionados con el proceso de fabricación (tiempo, temperatura, presión, atmósfera, entre otros). En los materiales compuestos, reacciones moderadas entre el refuerzo y la matriz en ocasiones mejoran la resistencia de la interfase y la transferencia de carga. Estas pueden manifestarse en una gran variedad de formas, por ejemplo, interdifusión, segregación, disolución, precipitación, adsorción, etc. Sin embargo, excesiva reacción química degrada el refuerzo y la resistencia del compuesto (Asthana 1998, Asthana 1998a). Para controlar la extensión de la reacción interfacial, es práctico reducir el tiempo de procesamiento de los compuestos, aplicar recubrimientos metálicos y adicionar elementos de aleación en la matriz. La Figura 4 muestra una imagen del compuesto AZ91E/AlN con su respectivo análisis de EDS donde se pone de manifiesto que, adicionalmente a la fase Al_3Mg_2 , se observaron algunos precipitados de MgO.

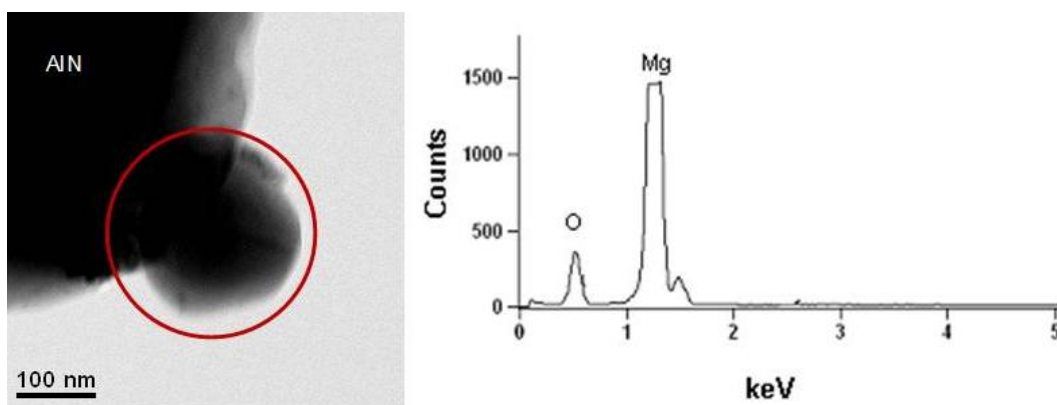


Figura 4. Imagen obtenida por MET y EDS del compuesto AZ91E/AlN donde se aprecia la formación de algunos precipitados de MgO.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la presencia de la espinela MgAl_2O_4 no se ha detectado en los compuestos procesados a 900°C , no obstante, se están realizando tratamientos térmicos a los compuestos AZ91E/AlN a diferentes temperaturas y tiempos con el propósito de analizar los productos de reacción entre la matriz y el refuerzo ya que la formación de esta espinela puede darse aun en estado sólido, como se muestra termodinámicamente de acuerdo a la ecuación (3).

3.3. Caracterización mecánica

Al compuesto AZ91E/AlN fabricado se le evaluaron algunas propiedades mecánicas como es el módulo de elasticidad y la dureza ya que éstas están directamente relacionadas con el volumen de refuerzo en la matriz metálica. El módulo de elasticidad evaluado en el material por medio del equipo Grindo Sonic registró un valor promedio de 133 GPa, lo que significa un gran incremento, cercano a tres veces, comparado con el valor del módulo de elasticidad de la aleación de magnesio AZ91E que es de aproximadamente 45 GPa. El valor del módulo de elasticidad obtenido en el compuesto AZ91E/AlN fabricado en este trabajo concuerda con el estudio reportado por Lai y Chung 1994, quienes fabricaron un compuesto de Al/AlN con 58% de refuerzo, obteniendo un módulo de elasticidad de 144 GPa, sin embargo, el porcentaje de refuerzo que ellos usaron fue mayor al que aquí se reporta y el módulo de elasticidad del aluminio es mayor que el de la aleación AZ91E.

De forma análoga, se realizaron cálculos del módulo de elasticidad por medio de la ecuación de la regla de las mezclas (ecuación 6) y empleando la ecuación de Halpin Tsai (ecuación 7) (Halpin Tsai 1992) como se describe a continuación:

$$E_c = V_m E_m + V_r E_r \quad (6)$$

$$E_c = \frac{E_m (1 + 2SqV_r)}{1 - qV_r} \quad (7)$$

q se calcula de la ecuación 8:

$$q = \frac{(E_r / E_m) - 1}{(E_r / E_m) + 2S} \quad (8)$$

Donde:

E_c = Módulo del compuesto.

V_m = Fracción volumétrica de la matriz.

V_r = Fracción volumétrica del refuerzo.

E_m = Módulo de la matriz.

E_r = Módulo del refuerzo

S = Relación de aspecto

Se obtuvieron cálculos de los valores del módulo de elasticidad del material compuesto de 184 GPa y 150 GPa empleando la regla de las mezclas y la ecuación de Halpin Tsai, respectivamente. Como se puede observar, el valor del módulo de elasticidad del compuesto AZ91E/AlN fabricado en el presente trabajo es cercano al valor obtenido por el modelo de Halpin Tsai. La diferencia entre ambos valores se puede atribuir a que éste modelo no toma en cuenta la porosidad remanente del compuesto. La dureza del compuesto fue medida en diversos puntos a lo largo de las cuatro superficies de la barra infiltrada obteniendo una dureza promedio de 24 HRC (260 HV). Es importante señalar que no se observaron variaciones significativas de dureza en las diferentes posiciones lo que confirma la homogeneidad y distribución de fases del compuesto.

3.4. Caracterización termoeléctrica

Las aplicaciones de los materiales compuestos pueden ser empleados como materiales estructurales o funcionales, dependiendo de las propiedades que presentan. De este modo, el compuesto AZ91E/AlN podría ser utilizado como material de empaquetamiento electrónico en donde se requieren materiales con coeficientes de expansión térmica (CET) baja y conductividad térmica alta. El compuesto AZ91E/AlN presenta un CET de $9.53 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ en el rango de temperatura entre 27 y 227°C (300 y 500 K). Zhang et al. 2003 reportan valores de $11.2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para un compuesto de Al/AlN con 50% de refuerzo, así mismo, Lai y Chung 1994, reportan un valor de $10.16 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para un compuesto de Al/AlN con 54.6% de refuerzo. La resistividad eléctrica medida en el compuesto AZ91E/AlN fue de $45.9 \times 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ a 25 °C, este valor es un poco elevado y se atribuye al tamaño de partícula promedio de 1.38 μm del AlN empleado en este trabajo, el cual disminuye la conectividad de la aleación, esto podría solventarse al incrementar el tamaño de la partícula (Clyne 2000).

4. Conclusiones

En el presente trabajo se llevó a cabo la fabricación y caracterización de un material compuesto AZ91E/AlN por la técnica de infiltración sin presión externa. Se partió de preformas de AlN pre-sinterizadas a 1450°C, obteniendo porosidades de ~51%. Las preformas fueron infiltradas con la aleación de magnesio AZ91E a 900°C. Los estudios de MEB muestran que el refuerzo y la matriz están homogéneamente distribuidos y las fases presentes detectadas mediante DR-X fueron AlN, Mg y $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$. Resultados de MET revelan una interfase sin productos de reacción entre la matriz y el refuerzo, observándose pequeños precipitados de Mg_2Al_3 y MgO. Resultados de la caracterización mecánica indican valores promedio del módulo de elasticidad de 133 GPa y una dureza de 24 HRC (260HV). El coeficiente de expansión térmica lineal es de $9.53 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ en el rango de temperatura entre 27 y 227°C (300 y 500 K) y la resistividad eléctrica de $45.9 \times 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Bibliografía

- Askeland, D.R. 1998. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3ra Edición Thomson International Thomson. España.
- Asthana, R. 1998. Reinforced cast metal part I: Solidification and microstructure. J. Mater. Sci. 33, 7: 1679-1698.
- Asthana, R. 1998a. Reinforced cast metal part II: Evolution of interface. J. Mater. Sci. 33, 8: 1959-1980.
- ASTM C20-00. Standard test method for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity and bulk density by boiling water.
- Chedru, M., Vicens, J., Chermant, L., Mordike B.L. 1999. Aluminium-aluminium nitride composites fabricated by melt infiltration under pressure. J. Micros. 196: 103-112.
- Contreras, A., León, C.A, Drew, R.A.L., Bedolla, E. 2003. Wettability and spreading kinetics of Al and Mg on TiC. Scrip. Mater. 48: 1625-1630.
- Clyne, T.W. 2000. Thermal and electrical conduction in MMCs. In Comprehensive composite materials. Eds. Amsterdam Elsevier Science Publishing Co., Inc.3: 1-22 pp.
- Da Costa, C.E., López, F.V., Castello, J.M.T. 2000. Materiales compuestos de matriz metálica: Parte I. Tipos, propiedades, aplicaciones. Revista de Metalurgia 36, 3: 179-192.
- Halpin Tsai, J.C. 1992. Primer on Composite Materials Analysis. 2da Edición. 165-191.
- Lai, S.W., Chung, D.D. 1994. Fabrication of particulate aluminum matrix composites by liquid metal infiltration. J. Mater. Sci. 29: 3128-3150.
- Liia, D.-F., Huang, J.-L., Chang, S.-T. 2002. The mechanical properties of AlN/Al composite fabricated by squeeze casting. J. Eur. Cer. Soc. 22: 253-261.
- Lloyd, D.J. 1994. Particle reinforcement aluminum and magnesium matrix composites. Intern. Mater. Rev. 39, 1: 1-23.
- Lloyd, D.J., Lagacé, H.P., McLeod, A.D. 1990. Interfacial phenomena in metal matrix composites: Controlled interfaces in composite materials. Edited by Hatsuo Ishida, Elsevier Science Publishing Co., Inc. 359-376 pp.
- McLeod, A.D., Gabryel, C.M. 1992. Kinetics of growth of spinel $MgAl_2O_4$ on alumina particulate in aluminum alloys containing magnesium. Metall. Trans. A 23: 1279-1283.
- Muscat, D., Shanker, K., Drew, R.A.L. 1992. Al/TiC composites produced by melt infiltration. Mat. Sci. & Tech. 8: 971-976.

- Sahin, Y., Acilar, M. 2003. Production and properties of SiCp-reinforced aluminium alloy composites. *Composites: Part A* 34: 709–718.
- Swaminathan, S., Srinivasa Rao, B., Jayaram, V. 2002. The production of AlN-rich matrix composites by the reactive infiltration of Al alloys in nitrogen. *Acta Mater.* 50: 3093-3104.
- Ye, H.Z., Liu, X.Y. 2004. Review of recent studies in magnesium matrix composites. *J. Mater. Sci.* 39: 6153-6171.
- Ye, H.Z., Liu, X.Y., Luan, B. 2005. In-situ synthesis of AlN in Mg-Al alloy by liquid nitridation. *J. Mater. Proc. Tech.* 166: 79-85.
- Zhang, Q., Chen, G., Wu, G., Xiu, Z., Luan, B. 2003. Property characteristics of AlN/Al composite fabricated by squeeze casting technology. *Mat. Lett.* 57: 1453-1458.