

Sinterización de composites de óxido de magnesio (MgO) con adiciones de nanopartículas de óxido de hierro (Fe₂O₃) mediante láser pulsado

GARCÍA-QUIÑONEZ, Linda Viviana^{1*†}, GOMÉZ-RODRÍGUEZ, Cristian², GARCÍA-GUILLEN, Grisel¹, CASTILLO-RODRÍGUEZ, Guadalupe Alan²

¹Universidad Politécnica de García, Calle Porfirio Díaz 100, Cabecera Municipal, 66000, García Nuevo León, México.

²Universidad Politécnica de Apodaca, Av. Politécnica 2331, El Barretal, 6610, Cd. Apodaca Nuevo León, México.

Recibido 04 Abril 2017; Aceptado 25 Junio, 2017

Resumen

El presente artículo muestra los resultados obtenidos en el proceso de sinterización utilizando como fuente de calentamiento un láser pulsado Nd:YAG con dos diferentes longitudes de onda 532 y 1064 nm, con parámetros entre los que destacan la concentración de las nanopartículas, fluencia de energía y velocidad de traslación. A lo largo de las distintas caracterizaciones se obtuvieron que los mejores resultados para llevar a cabo el proceso de sinterización están relacionados principalmente con la concentración de nanopartículas y la fluencia de energía. Donde el 7 % en peso de las nanopartículas en la longitud de onda de 532 nm con 1.7 J/cm² y 110 μm/s presenta la formación de granos y amplias zonas sinterizadas presentando en ellas la formación de la espinela magnesioferrita, por otro lado con respecto a la longitud de onda de 1064 nm los mejores resultados se presentan con una concentración de 10 % en peso, fluencia de energía de 3.0 J/cm², velocidad de traslación de 250 μm/s, donde se obtuvieron un mayor crecimiento en los granos que los obtenidos en la longitud anterior obteniendo una mayor presencia de espinela magnesioferrita.

Sinterización, láser, nanopartículas, espinela

Abstract

The present paper shows the results obtained in the sintering process using as a heating source a Nd:YAG pulsed laser with two different wavelengths 532 and 1064 nm, with parameters such as nanoparticle concentration, energy flux and Speed of translation. Throughout the different characterization, it was obtained that the best results to carry out the sintering process are mainly related to the concentration of nanoparticles and the emission of energy. Where 7% by weight of the nanoparticles in the wavelength of 532 nm with 1.7 J / cm² and 110 μm / s presents the formation of grains and large sintered zones presenting in this the formation of the magnesiumferrite spinel, on the other hand With respect to the wavelength of 1064 nm, the best results are presented with a concentration of 10% by weight, energy emission of 4.0 J / cm², a speed of translation of 250 μm / s, where a higher grain growth and more present of magnesium-ferrite spinel.

Sintering, laser, nanoparticles, spinel

Citación: GARCÍA-QUIÑONEZ, Linda Viviana, GOMÉZ-RODRÍGUEZ, Cristian, GARCÍA-GUILLEN, Grisel, CASTILLO-RODRÍGUEZ, Guadalupe Alan. Sinterización de composites de óxido de magnesio (MgO) con adiciones de nanopartículas de óxido de hierro (Fe₂O₃) mediante láser pulsado. Revista de Simulación y Laboratorio. 2017, 4-11: 34-42.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: linda.garcia@upg.com.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor

1. Introducción

En la actualidad, existen diversas técnicas para la sinterización de materiales entre las cuales podemos mencionar: El calentamiento con un horno eléctrico o de gas, alta temperatura que utiliza una resistencia, también conocido como horno por inducción (Allen et al., 2008), por descarga eléctrica (Allen et al., 2008), por una fuente de microondas (Agrawal, 1998; Lewis et al., 1997; P. Figiel, 2011) y el uso del láser (Fischer, Romano, Weber, & Kolossov, 2004; Kruth, Wang, Laoui, & Froyen, 2003; Qian & Shen, 2013; Rapp, Ailuno, Alloncle, & Delaporte, 2011; Song & Koenig, 1997; Taku Saiki, 2014).

Esta última técnica presenta diversas ventajas con respecto a las técnicas anteriores, una de ellas es que permite el calentamiento local, es decir, en una zona determinada, esto permite modificar las propiedades ópticas, crear cambios estructurales, inducir procesos de cristalización, endurecimiento de materiales y sinterización, en menor tiempo que los métodos convencionales.

Los parámetros o variables que se pueden controlar en el proceso de sinterización empleando un láser como fuente de calentamiento son: la longitud de onda, la potencia incidente del láser, la absorción del material, la selección del área y el tiempo de interacción (Mireles et al., 2013; Sanyal, Datta, & Hazra, 2002; Son et al., 2011; Yadroitsev, Bertrand, & Smurov, 2007), la forma del dopante y tamaño del mismo, lo que hace posible procesar los materiales y modificar la composición química.

1.1 Justificación

En años recientes se ha buscado generar nuevos sistemas para el tratamiento de superficies, con el objetivo de promover cambios en la estructura, morfología y propiedades de materiales con altos puntos de fusión como son los cerámicos a los cuales se pueden adicionar algún tipo de dopante para generar fases que contribuyan con los puntos antes mencionados.

Entre los dopantes que se pueden utilizar son las nanopartículas que por sus características de tamaño, distribución y forma (Durán Botia, 1999; Sanyal et al., 2002), permite alterar sus propiedades, permitiendo el diseño de la capa interfacial de materiales nanoestructurados. Por lo que con la adición de nanopartículas a diferentes concentraciones se fomentó la formación de la espinela en las diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de hierro.

1.2 Problema

La sinterización de compuestos cerámicos se lleva generalmente en hornos de convección, con un tiempo de sinterización largo y alta carga térmica para lograr que este proceso se lleve a cabo. Algunos métodos alternativos para la sinterización son densificación química, eléctricos, presión, láser y microondas. Analizando dichas técnicas, en este trabajo se utilizo un láser pulsado como medio de calentamiento, el cual produce pulsos cortos con gran intensidad y estos tienen mejor penetración en el material que los láseres de onda continua.

La sinterización utilizando láser depende de la potencia incidente, la absorción del material y el tiempo de interacción. La sinterización por láseres es un método de sinterización selectiva, lo que hace posible procesar áreas locales seleccionadas dentro del material.

1.3 Hipótesis

Los diferentes parámetros tales como el porcentaje en peso, el tamaño y forma de las nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3), así como las condiciones del láser pulsado Q switch Nd:YAG; la longitud de onda, fluencia de energía y velocidad de traslación sobre la matriz de Óxido de Magnesio cáustico (MgO) hacen posible modificar la estructura y morfología de refractarios base (MgO).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar los efectos de la sinterización con láser pulsado en muestras de Óxido de Magnesio (MgO) adicionando diferentes contenidos de nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3).

1.4.2 Objetivos específicos

- Sintetizar muestras de óxido de magnesio cáustico activo (MgO) con diferentes concentraciones de nanopartículas.
- Determinar los parámetros óptimos de longitud de onda y fluencia de energía para provocar la sinterización de las muestras de MgO con diferentes concentraciones de nanopartículas de óxido de hierro.
- Determinar parámetros óptimos de: porcentaje en peso de las nanopartículas, configuración de escaneo y tiempo de irradiación.
- Caracterización microestructural de las muestras sinterizadas, mediante: DRX, SEM y XPS.

2. Marco Teórico

En el estado del arte sobre la investigación de este tema podemos mencionar las siguientes investigaciones.

Azhari (Azhari, Golestani-Fard, & Sarpoolaky, 2009) incorporó nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3) a una matriz refractaria magnesia-cromo, las muestras fueron calentadas a 1350, 1450, 1550 y 1650 ° C por dos horas, dando como resultado la formación de la espinela magnesioferrita, la migración iónica del óxido de hierro (Fe_2O_3) mejoró el proceso de sinterización.

D. K. Agrawal (Agrawal, 1998) realizó una experimentación con nanocompositos de carburo de tungsteno (WC) y Cobre (Cu) como material ligante, los cuales fueron sinterizados mediante la técnica de microondas en el cual observaron mejores propiedades mecánicas que las partes producidas por métodos convencionales, también observaron una fina y uniforme microestructura y una mayor densificación; estos nanocompositos fueron sinterizados a 1250 °C- 1320 °C por 10 y 30 minutos. M. Zenou y colaboradores (Zenou, 2014) utilizaron dos láseres, el primero fue un láser continuo con una potencia máxima de 2 W, el segundo un láser Q-Switch Nd:YAG, los láseres fueron combinados para irradiar nanopartículas de Cu en sustratos de vidrio, el tamaño de las nanopartículas fue de ~ 50 nm, los resultados mostraron que se llevó a cabo el proceso de sinterización de las nanopartículas de Cu, en condiciones ambientales, evitando la oxidación y lograron valores de resistividad más bajos que el valor del cobre, los cuales son similares a valores obtenidos en atmósferas no oxidantes, esto en pocos milisegundos con fluencias de energía de 30 a 50 J/cm².

3. Metodología de Investigación

El primer paso a realizar, es la dispersión en húmedo de las nanopartículas utilizando como agente dispersor el Zephyrym PD 3315 y como medio líquido acetona, la mezcla fue sometida a ultrasonido durante 25 min y posteriormente agregada a la matriz de óxido de magnesio (MgO) y mezclada de manera homogénea.

Posteriormente los polvos fueron colocados dentro de un molde, el cual fue colocado en una prensa hidráulica tipo H de 20 toneladas, Dogotuls y sometidos a 100 MPa durante 2 min, lo anterior para obtener muestras cilíndricas con diámetro de 1 cm y una altura de 0.5 cm. Las muestras fueron colocadas en un actuador ver figura 1, el cual controla las diferentes velocidades de traslación.



Figura 1 Actuador utilizado para escanear muestras de MgO con la adición de nanopartículas de óxido de hierro

Las muestras fueron irradiadas utilizando para ello un láser pulsado Nd: YAG (Solar Laser System, LQ 929), el cual cuenta con cuatro diferentes armónicos con longitudes de onda de 266, 355, 532 y el fundamental 1064 nm, el cual es mostrado en la figura 2. En este trabajo se analizaron las longitudes de onda correspondientes a 532 y 1064 nm, en base a los análisis previos de absorbancia realizados a las nanopartículas de óxido de hierro.

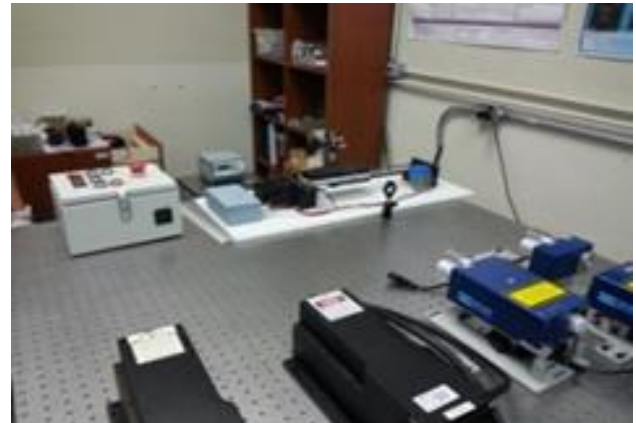


Figura 2 Láser pulsado Nd: YAG con sus diferentes armónicos

A continuación, se presenta el análisis para identificar las fases cristalinas y la morfología utilizando diversas técnicas como Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), por su parte el análisis de los estados químicos que presentaron las muestras se realizó con la técnica de fotoelectrones emitidos por Rayos X (XPS) para corroborar las distintas fases obtenidas con DRX y establecer los distintos enlaces presentes en las muestras irradiadas

4. Resultados

Una vez establecidos los parámetros de trabajo del láser y realizadas las pruebas se analizaron los resultados obtenidos que son presentados a continuación.

4.1 Difracción de Rayos (DRX)

El gráfico 1 muestra una comparativa entre las tres diferentes concentraciones 3, 5 y 7 % en peso, empleando la longitud de onda de 532 nm, fluencia de energía de 1.7 J/cm^2 , velocidad de traslación de $110 \mu\text{m/s}$, en la cual se observan el incremento en la intensidad de los picos que presentan una formación de la fase magnesioferrita para el 7 % en peso de nanopartículas, con respecto a las otras concentraciones.

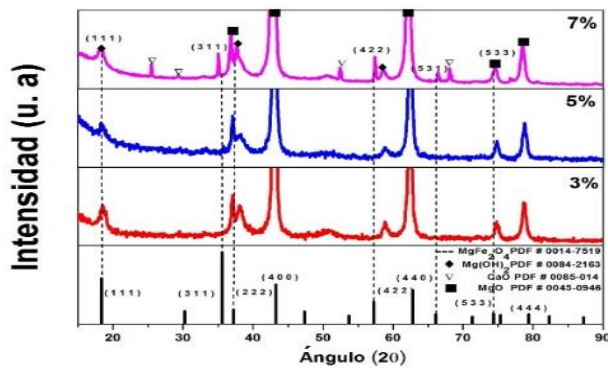


Gráfico 1 Comparativa entre las distintas concentraciones de nanopartículas (3, 5 y 7 % en peso) con la longitud de onda de 532 nm a fluencia de energía de 1.7 J/cm², empleando la velocidad de traslación de 110 μm/s

El gráfico 2 muestra una comparativa entre las concentraciones de 5, 7 y 10 % en peso de las nanopartículas de óxido de hierro (Fe₂O₃), empleando la longitud de onda de 1064 nm, fluencia de energía de 3.0 J/cm², velocidad de traslación de 250 μm/s. Donde se presentan una mayor formación de la espinela magnesioferrita en la concentración de 10 % en peso aunado a una disminución de la presencia del hidróxido de magnesio con respecto a lo presentado en la longitud de onda de 532 nm, se detectó la presencia de óxido de calcio en esta concentración. La velocidad de traslación contribuyó a que el proceso de sinterización se llevara a cabo mediante la interacción de las nanopartículas con la matriz de MgO.

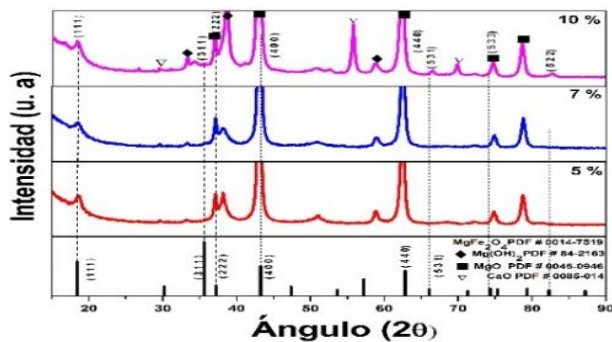


Figura 2 Comparativa entre las distintas concentraciones de nanopartículas (5, 7 y 10 % en peso) con la longitud de onda de 1064 nm a fluencia de energía de 3.0 J/cm², empleando la velocidad de traslación de 250 μm/s.

4.2 Microscopia Electronica de Barrido (SEM)

Realizados los análisis de Difracción de Rayos X (DRX), se continuó con los análisis correspondientes a la morfología de las muestras y los resultados son los siguientes.

La Figura 3 muestra un análisis comparativo con respecto a la morfología de las tres concentraciones (3, 5 y 7 % en peso) empleando la longitud de onda de 532 nm, fluencia de energía de 1.7 J/cm², velocidad de traslación de 110 μm/s. Donde se observa la formación de cuellos entre los granos, se formación de enlaces sinterizados entre las partículas sin densificación, esto es usualmente debido al transporte de sitios en la superficie a otros sitios por difusión superficial (German, 1996), los tamaños de los granos están en un promedio de 10 μm. La profundidad de interacción del láser con la matriz es notoria, no hay presencia de polvo suelto, existe formación de microgrietas con respecto a la evolución en las concentraciones.

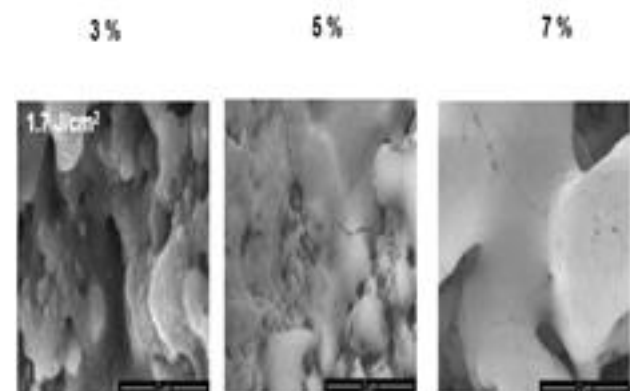


Figura 3 Micrografías de muestras irradiadas con láser Nd: YAG, a magnificaciones de 5000 x con las diferentes concentraciones 3, 5 y 7 % de nanopartículas de Fe₂O₃ utilizando la longitud de 532 nm, fluencia de energía de 1.7 J/cm² y velocidad de traslación de 110 μm/s.

La figura 4 muestra la evolución morfológica de las concentraciones de 5, 7 y 10 % en peso para la longitud de onda de 1064 nm, fluencia de energía de 3.0 J/cm^2 , velocidad de traslación de $250 \text{ }\mu\text{m/s}$, donde se observa aglomerados sinterizados, microgrietas, pequeñas porosidades así como crecimiento de los granos debido principalmente a la difusión superficial que involucra el movimiento de los átomos entre los sitios (vacancias, rebordes, dobleces y adatoms). Es importante mencionar que estos cambios sólo se dieron en la superficie de las muestras donde la incidencia del láser tuvo lugar con las nanopartículas adicionadas y el óxido de magnesio (MgO) correspondiente a la matriz.

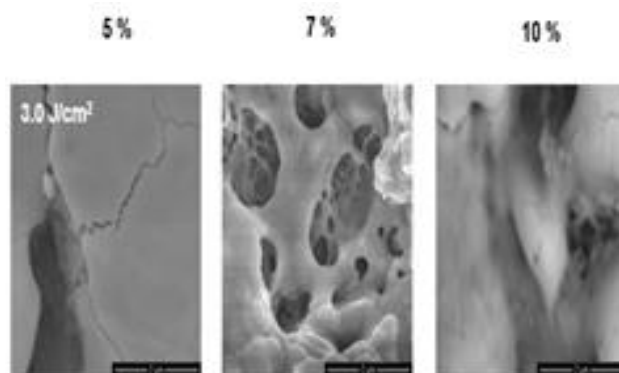


Figura 4 Micrografías de las zonas irradiadas, a magnificaciones de $2 \text{ }\mu\text{m}$ con las diferentes concentraciones de nanopartículas de Fe_2O_3 , con la longitud de onda de 1064 nm y dos fluencias de energía, utilizando la velocidad de traslación de $250 \text{ }\mu\text{m/s}$

4.3 Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por Rayos X (XPS)

Los espectros de los polvos de MgO; y las nanopartículas de óxido de hierro (material de partida) son mostrados en la figura 7 a-c. Los espectros correspondientes a las muestras refractarias irradiadas (3, 5 y 7 % en peso) son mostrados en la figura 7 d-l para los niveles de Mg1s, O1s y Fe2p.

Todas las muestras, tienen presencia de $\text{Mg}(\text{OH})_2$, el cual fue detectado como una impureza que se presentó en los análisis de DRX; la presencia del hidróxido puede ser debido el magnesio es caustico activo y este puede absorber agua por lo que el $\text{Mg}(\text{OH})_2$, pudo haberse producido durante la irradiación llevada a cabo en condiciones atmosféricas o en su manejo. La deconvolución de los espectros de las muestras elaboradas con óxido de magnesio MgO y las nanopartículas con las diferentes concentraciones muestran un corrimiento en las energías de enlace del MgO por la formación de la espinela magnesioferrita MgFe_2O_4 debido a la irradiación láser. La formación de la espinela, así como su evidencia espectral no está presente para todas las áreas de análisis en el material, debido a que la sinterización por láser es una técnica puntual.

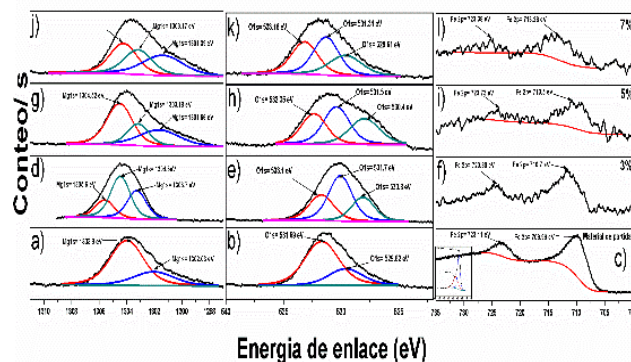


Grafico 3 Espectros de alta resolución (XPS) de a) Mg1s, b) O1s y c) Fe2p de las muestras sin irradiar y de las nanopartículas empleadas como material de partida. La imagen insertada en c) corresponde a O1s de las NPs, (d-f, g-i, j-l) espectros de Mg1s, O1s y Fe2p para muestras irradiadas con concentraciones de 3, 5 y 7 % en peso, utilizando para ello la longitud de onda de 532 nm, con la fluencia de energía de 1.7 J/cm^2 , velocidad de traslación de $110 \text{ }\mu\text{m/s}$.

Los espectros correspondientes a las muestras refractarias irradiadas con 5, 7 y 10 % en peso son mostrados en la figura 8 d-l para los niveles de Mg 1s, O 1s y Fe 2p.

Todas las muestras, tienen presencia de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ similar a lo obtenido en los análisis de Difracción de Rayos X (DRX). La deconvolución de los espectros de las muestras elaborados con óxido de magnesio MgO y las nanopartículas con las diferentes concentraciones muestran un corrimiento en las energías de enlace del MgO por la formación de la espinela magnesioferrita (MgFe_2O_4) debido al proceso de sinterización.

La deconvolución de los espectros de oxígeno $\text{O}1s$ correspondientes a las nanopartículas, en la grafico 4 c) son resultado de los picos de energía de enlace de 529.65 y 531.02 eV asociados a las nanopartículas y a la cinta de carbón. El estado químico de las nanopartículas de óxido de hierro y de las muestras refractarias en $\text{MgO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ para las distintas concentraciones es mostrado en la Grafico 4 c, f, i y l. La curvatura de los espectros de hierro $\text{Fe}2p$ son localizados en energías de enlace de 709.96 y 723.11 eV que corresponden al doblete de los picos de hierro $\text{Fe}(\text{III}) \text{Fe}2p_{3/2}$ y $\text{Fe}2p_{1/2}$ para el compuesto de óxido de hierro (Fe_2O_3).

Los espectros correspondientes a $\text{Fe}2p$ para las muestras refractarias irradiadas con 5 % en peso corresponde a energías de enlace de 709.96 y 723.23 eV, mientras que para la concentración de 7 % en peso resulta en dos picos cuyas energías de enlace son 712.4 y 724.29 eV. Mientras que para el 10 % en peso se obtuvieron energías de enlace de 710.11 y 723.28 eV. Lo cual corresponde con valores reportados de la espinela magnesioferrita (MgFe_2O_4).

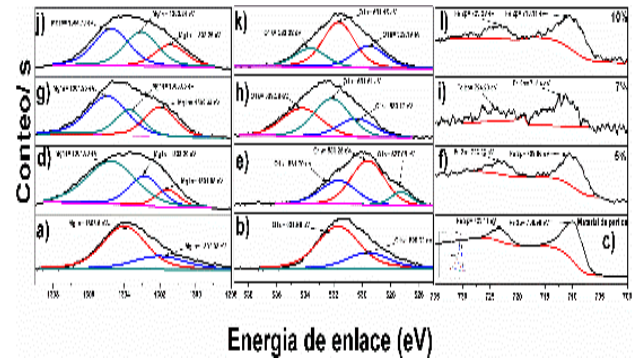


Grafico 4 Espectros de alta resolución (XPS) de **a)** $\text{Mg} 1s$, **b)** $\text{O}1s$ y **c)** $\text{Fe}2p$ de las muestras sin irradiar y de las nanopartículas empleadas como material de partida. La imagen insertada en c) corresponde a $\text{O}1s$ de las NPs, **(d-f, g-i, j-l)** espectros de $\text{Mg}1s$, $\text{O}1s$ y $\text{Fe}2p$ para muestras irradiadas con concentraciones de 5, 7 y 10 % en peso, la longitud de onda empleada fue de 1064 nm con una fluencia de energía de 3.0 J/cm^2 , velocidad de traslación de $250 \mu\text{m/s}$

5. Conclusiones

Una vez que se han finalizado los análisis con las diferentes técnicas de caracterización a las cuales fueron sometidas las muestras de óxido de magnesio (MgO) y nanopartículas de óxido de hierro (Fe_2O_3), los parámetros que favorecieron para obtener el proceso de sinterizado fueron: la concentración de nanopartículas de 7 % en peso, fluencia de energía en el caso de la longitud de onda de 532 nm corresponde a 1.7 J/cm^2 , velocidad de traslación de $110 \mu\text{m/s}$. Estos parámetros permitieron a la matriz de óxido de magnesio (MgO) y las nanopartículas interactuar en el proceso de sinterizado y presentar la formación de nuevas fases así como cambios en la morfología.

En la longitud de onda de 1064 nm, se observó que los parámetros adecuados correspondientes a la concentración de nanopartículas es 7 y 10 % en peso, fluencia de energía de 3.0 J/cm^2 , velocidad de traslación de $250 \mu\text{m/s}$.

Los resultados muestran que el proceso de sinterización se realizó de manera uniforme en las zonas irradiadas, esto debido a la sinterización en estado sólido, llevada a cabo por la difusión superficial como mecanismo de transporte de masa, la cual es atribuible a los parámetros utilizados por el láser. Otro punto importante son las propiedades de las nanopartículas de óxido de hierro, que favorecieron la formación de cuellos, límites de grano y disminución de los tamaños de las porosidades.

6. Referencias

- Agrawal, D. K. (1998). Microwave processing of ceramics. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 3(5), 480-485. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-0286\(98\)80011-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-0286(98)80011-9)
- Agrawal, D. K. (1998). Microwave processing of ceramics. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 3(5), 480-485. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-0286\(98\)80011-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-0286(98)80011-9)
- Allen, M. L., Aronniemi, M., Mattila, T., Alastalo, A., Ojanpera, K., Suhonen, M., & Seppa, H. (2008). Electrical sintering of nanoparticle structures. *Nanotechnology*, 19(17), 175201. doi: 10.1088/0957-4484/19/17/175201
- Azhari, A., Golestani-Fard, F., & Sarpoolaky, H. (2009). Effect of nano iron oxide as an additive on phase and microstructural evolution of Mag-Chrome refractory matrix. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(13), 2679-2684. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.03.032>
- Durán Botia, P. (1999). El procesado de polvos cerámicos manoparticulados. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 38(5), 403-415.
- Fischer, P., Romano, V., Weber, H. P., & Kolossov, S. (2004). Pulsed laser sintering of metallic powders. *Thin Solid Films*, 453-454(0), 139-144. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2003.11.152>
- German, R. M. (1996). *Sintering Theory and Practice* (Vol. 1). Estados Unidos
- Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., & Froyen, L. (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), 357-371. doi: doi:10.1108/01445150310698652
- Lewis, D., Rayne, R. J., Bender, B. A., Kurihara, L. K., Chow, G. M., Fliflet, A., . . . Bruce, R. (1997). Conventional and high frequency microwave processing of nanophase ceramic materials. *Nanostructured Materials*, 9(1-8), 97-100. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0965-9773\(97\)00027-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0965-9773(97)00027-5)
- P. Figiel, M. R., B. Smuk. (2011). Properties of alumina ceramics obtained by conventional and non-conventional by method for sintering ceramics. *journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 48(1), p. 29.
- Qian, B., & Shen, Z. (2013). Laser sintering of ceramics. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 1(4), 315-321. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jascers.2013.08.004>
- Rapp, L., Ailuno, J., Alloncle, A. P., & Delaporte, P. (2011). Pulsed-laser printing of silver nanoparticles ink: control of morphological properties. *Optics express*, 19(22), 21563-21574.
- Sanyal, M. K., Datta, A., & Hazra, S. (2002). Morphology of nanostructured materials *Pure and Applied Chemistry* (Vol. 74, pp. 1553).

Son, Y., Yeo, J., Moon, H., Lim, T. W., Hong, S., Nam, K. H., . . . Ko, S. H. (2011). Nanoscale Electronics: Digital Fabrication by Direct Femtosecond Laser Processing of Metal Nanoparticles. *Advanced Materials*, 23(28), 3176-3181. doi: 10.1002/adma.201100717

Song, Y.-A., & Koenig, W. (1997). Experimental Study of the Basic Process Mechanism for Direct Selective Laser Sintering of Low-Melting Metallic Powder. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 46(1), 127-130. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S00078506\(07\)60790-2](http://dx.doi.org/10.1016/S00078506(07)60790-2)

Taku Saiki, Y. I., Kennan Ri, Marina Yoshida, Yuuki Koga. (2014). Electrical Property of Laser-Sintered Nanopastes with Reduced Metal Nanoparticles Prepared by Laser Ablation in Liquids. *Advances in Materials*, 3(6), 8. doi: 10.11648/j.am.20140306.13

Yadroitsev, I., Bertrand, P., & Smurov, I. (2007). Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied Surface Science*, 253(19), 8064-8069. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.02.088>

Zenou, M. (2014). Laser sintering of copper nanoparticles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(025501), 11. doi: doi:10.1088/0022-3727/47/2/025501

Agradecimiento

Los autores agradecen a SEP- CONACYT-MEXICO con número de proyecto 106955, PROMEP-MEXICO y PAICYT 2013 UANL por la asistencia financiera y el autor Linda García, agradece a CONACYT por el otorgamiento de beca para la investigación.