

Capítulo 4 Síntesis por molienda mecánica de aleaciones nanoestructuradas Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu para su evaluación en la generación de hidrógeno.

Chapter 4 Synthesis by mechanical milling of Sn-Al-Cu and Zn-Al-Cu nanostructured alloys for their evaluation in the hydrogen generation

GARCÍA-MARTÍNEZ, Judith Andrea, SANTOS-RAMOS, Ismael y ROSAS-TREJO, Gerardo Antonio

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, México

ID 1^{er} Autor: *Judith Andrea, García-Martínez* / **CVU CONACYT ID:** 1078215

ID 1^{er} Coautor: *Isamel, Santos-Ramos* / **ORC ID:** 0000-0001-7886-7788, **CVU CONACYT ID:** 629511

ID 2^{do} Coautor: *Gerardo Antonio, Rosas-Trejo* / **ORC ID:** 0000-0002-6120-8222, **CVU CONACYT ID:** 19459

DOI: 10.35429/H.2021.13.28.35

J. García, I. Santos y G. Rosas

J. Sierra, H. Mandujano, F. Anguebes y A. Mohamed (VV. AA.). Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Handbooks-TII-©ECORFAN-Mexico, 2021.

Resumen

En el presente estudio, aleaciones nanoestructuradas fueron propuestas como materiales para la generación de hidrógeno, como alternativa para disminuir las emisiones de gases contaminantes generadas por el uso de combustibles fósiles. Las aleaciones de Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu, fueron sintetizadas por molienda mecánica a partir de polvos elementales, posteriormente se hicieron reaccionar a temperatura ambiente para determinar la cantidad de hidrógeno liberado, usando agua destilada y en presencia de aditivos como NaCl, NaBH₄, CeO₂, FeO₃ y NaOH. Las muestras se analizaron mediante difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis químico EDS. Los estudios XRD mostraron la disminución de las fases soluto (Al, Cu) sin la formación de segundas fases. Los resultados obtenidos por MEB, mostraron la formación de estructuras tubulares de materiales nanoestructurados de las aleaciones previo a la formación de la solución sólida. Se realizaron las pruebas correspondientes para la generación de hidrógeno mediante aditivos y utilizando el método del tubo de ensayo invertido. A partir de los resultados obtenidos, se determinó que los sistemas Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu favorecen la reacción de generación de hidrógeno, con un tiempo de inducción mínimo al utilizar NaBH₄ y NaCl.

Aleaciones Nanoestructuradas, Molienda Mecánica, Generación de Hidrógeno

Abstract

In the present study, nanostructured alloys were proposed as materials for hydrogen generation as an alternative to reduce the emissions of polluting gases generated by the use of fossil fuels. The Sn-Al-Cu and Zn-Al-Cu alloys were synthesized by mechanical milling from elemental powders. Subsequently, they were reacted at room temperature to determine the amount of hydrogen released, using distilled water and in the presence of additives such as NaCl, NaBH₄, CeO₂, FeO₃, and NaOH. The samples were analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and EDS chemical analysis. The XRD studies showed the decrease of the solute phases (Al, Cu) without second phases. The results obtained by SEM showed the formation of tubular structures of nanostructured materials of the alloys before forming the solid solution. The corresponding tests were carried out for hydrogen generation employing additives and using the inverted test tube method. The results obtained determined that the Sn-Al-Cu and Zn-Al-Cu systems improve the hydrogen generation reaction, with a minimum induction time when using NaBH₄ and NaCl.

Nanostructured alloys, Mechanical milling, Hydrogen generation

1. Introducción

La tecnología de hidrógeno limpia y renovable ha atraído considerable atención debido al agotamiento de los recursos y las preocupaciones ambientales derivadas del uso generalizado de combustibles fósiles. El hidrógeno (H₂) tiene un alto poder calorífico, y su subproducto de reacción es benigno para el medio ambiente, por lo que es reconocido como un combustible potencial para aplicaciones en la industria automotriz libre de emisiones (Reyes, G., *et al* 2018). El uso del H₂ tiene sus desafíos como su almacenamiento y transporte. No obstante, la generación de H₂ in situ y el suministro directo a una pila de combustible se han convertido en una atractiva propuesta a esta problemática. La generación de hidrógeno puede llevarse a cabo de diferentes maneras siendo la más empleada la hidrólisis del agua, donde se requieren materiales que reaccionen con el agua.

En ese contexto, el aluminio se ha planteado como material que promueve el hidrólisis del agua, sin embargo, el Al puro no reacciona tan eficientemente con el agua debido a la formación de la capa pasiva de Al₂O₃ que lo protege e impide su corrosión. Para eliminar esta capa se han sugerido alea al Al con metales de menor punto de fusión como Cu, Sn, Zn y metales de bajo punto de fusión como Bi, Ga, Mg y In (Du, S. P., & Bessarabov, D. G. 2018, Guan, X., *et al.* 2019), así como adicionarle aditivos como NaOH (Acar, C., *et al.* 2019), KOH (Ho, C. Y., & Huang, C. H., 2016) y NaCl (Du Preez, *et al.* 2018) y sustratos ricos en carbohidratos (Montoya-Pérez, L., & Durán-Herrera, J. E., 2017). Para la fabricación de las aleaciones de Al se han utilizado ampliamente la fundición dando buenos resultados en la generación de hidrógeno (Qiao, D., *et al.*, 2019).

Recientemente se ha implementado la molienda mecánica (MM), que nos permite obtener materiales nanométricos y nanoestructurados a partir de la generación de una gran cantidad de defectos cristalinos, que acumulan una gran cantidad de energía y que ayudan a la difusión de los reactivos para la generación de hidrógeno (Lopez-Miranda, J. L., & Rosas, G., 2016). La MM es proceso con enfoque 2632 arriba-abajo (top-down) (Pedroza, J. P., 2019), que permite obtener materiales con tamaño nanométricos 2633 y una gran área superficial, esta característica es de gran importancia cuando se desea combinar materiales a escala nanométrica, lo que conlleva al aumento en la reactividad del material y a obtener un incremento en las propiedades mecánicas y químicas del material (Suryanarayana, C., 2001). Cabe mencionar que los metales Sn y Zn son también abundantes en la naturaleza, lo que implica un bajo costo en su uso, además, estos han sido poco estudiados con los propósitos de generación de hidrógeno. Por 2638 otro lado, tanto el Al como el Cu y sus aleaciones se han probado como materiales generadores de hidrógeno, lo que permite explorar nuevos materiales útiles para su combinación e implementación en la tecnología del hidrógeno. Por lo tanto, en este estudio se presentan los resultados obtenidos de la reacción de las aleaciones Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu, fabricadas a partir de polvos elementales por molienda mecánica de baja energía, con agua destilada para la generación de hidrógeno, así mismo, se analizaron las 2643 aleaciones con la adición de aditivos NaCl o NaBH₄ para obtener menores tiempos de inducción y una 2644 mayor generación de hidrógeno.

2. Metodología a desarrollar

En este apartado se mencionan las etapas llevadas a cabo para la evaluación de la generación de hidrógeno en aleaciones Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu. Partiendo de polvos elementales y sometidos a molienda mecánica, para posteriormente, ser analizados en agua del grifo y con la adición de aditivos. En cada etapa del proceso se caracterizaron los materiales para conocer los cambios estructurales.

2.1 Mecano-síntesis de las aleaciones Zn-Al-Cu y Sn-Al-Cu

La fabricación de las aleaciones de Zn-Al-Cu y Sn-Al-Cu, fueron empleando polvos con tamaños micrométricos mayores a 1mm. La mecano-síntesis se realizó en un molino de atrición mecánica horizontal, con una relación peso de bola-polvo (RPB) de 100:1 así como 3% en peso de ácido esteárico, un agente controlador de proceso para evitar la aglomeración de los polvos en los medios de molienda y promover la soldadura en frío. Las moliendas se monitorearon cada 19 h hasta la formación de la solución sólida en las aleaciones.

2.2 Evaluación de la generación de hidrógeno.

Las mediciones de la generación de hidrogeno se realizaron empleando el método de la probeta invertida, 2662 similar a lo reportado por (López-Miranda 2016). Las partículas de las aleaciones Sn- Al-Cu y Zn-Al-Cu 2663 y las aleaciones con los aditivos (NaCl y NaBH₄) reaccionaron con agua del grifo dentro de un tubo de 2664 ensayo conectado mediante un tubo a una probeta de 1000 mL, colocado de manera invertida y llenó de 2665 agua. La formación de la primera burbuja dentro del matraz de destilación indica el tiempo inicial para la generación de H₂. Para cada experimento, se midió el tiempo de inducción, el tiempo de la reacción y la cantidad total de hidrógeno liberado.

2.3 Caracterización estructural

La caracterización microestructural de partículas antes y después de la molienda mecánica, así como con y sin aditivos para la generación de H₂, se realizó mediante difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, además, se realizó un análisis de espectroscopía de dispersión de energía (EDS) en cada una de las muestras.

3. Resultados

A continuación, se muestran los resultados de las diferentes condiciones de molienda de la mezcla de polvos Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu, después de emplear distintas técnicas de caracterización. Y finalmente se 2678 muestran los resultados obtenidos de las pruebas de generación de hidrógeno en las aleaciones. Todos los procesos involucrados producen cambios estructurales los cuales se presentan con mayor detalle a continuación.

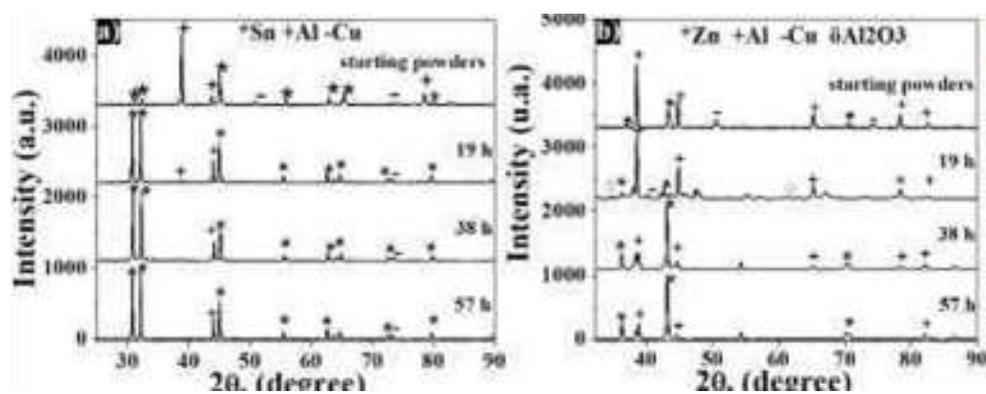
3.1 Análisis DRX de las aleaciones nanoestructurada

La molienda se efectuó bajo a diferentes tiempos de molienda. En el gráfico 4.1a se presenta el patrón de DRX para la aleación Sn-Al-Cu a diferentes tiempos de molienda, donde se observa la presencia del 2685 estaño el cual tiene una red tetragonal con parámetros de red; $a=5.8318 \text{ \AA}$ y $c=3.1819 \text{ \AA}$. También puede identificarse la estructura FCC del Al con un parámetro de red de 4.055 \AA y el Cu FCC con parámetro de red 3.615 \AA . Se aprecia que, a medida que incrementa el tiempo de molienda a 19 h, las fases soluto (Al, Cu) se disuelven en la estructura del Sn, esto es atribuido a la clara reducción de las intensidades en los picos de difracción pertenecientes a esas fases.

A medida que el tiempo avanzó a 38 y 57 h, la solubilidad sólida de las especies procedió, indicando el ingreso de la fase soluto a la red cristalina del Sn, sin la formación de segundas fases. El gráfico 4.1b muestra el patrón DRX para la aleación Zn-Al-Cu a diferencia de la anterior aleación la presencia de los planos cristalográficos de la red hexagonal del Zn con parámetros de red; $a=2.6594 \text{ \AA}$ y $c=4.9368 \text{ \AA}$. Se aprecia un comportamiento similar al descrito en la anterior aleación, que después de 19 h hay una disminución en las intensidades del Al y Cu, indicando su ingreso a la red cristalina del Zn, mientras que, para 38 h las intensidades del Zn incrementan producto de la solubilidad de los solutos. Es importante señalar que en la medida que el tiempo del proceso avanzó las fases de Al y Cu se reducen considerablemente en sus picos con respecto a un tiempo inferior del proceso e incluso con respecto a aquellas reflexiones de los polvos antes de la molienda.

Finalmente, a 56 h se aprecia que los picos del Al casi desaparecen y los picos del Zn se ensanchan en señal de la reducción del tamaño de partícula. Este comportamiento puede atribuirse a la solubilidad sólida de los elementos soluto (Al, Cu) en Zn. Estos resultados son similares a los reportados por (Dong, Z., *et al.* & Khan, A. R., *et al.* 2019) Es bien sabido que la molienda de bolas tiene diversas etapas en donde los polvos se unen por soldadura en frío y posteriormente se llenan de defectos cristalinos los cuales causan tensiones en la red provocando la fractura de los polvos, este proceso genera una estructura interna en forma de capas la cual se refina conforme avanza el tiempo de proceso y a través de la cual se presenta la difusión entre las diversas especies participantes. Así la solubilidad de las muestras se alcanza a través del refinamiento de esa estructura interna repetitivamente con el tiempo (Krajewski, P. K., *et al.* 2019).

Gráfico 4.1 Patrones de DRX correspondiente a la mecano-síntesis de las aleaciones a) Sn-Al-Cu y b) Zn- Al-Cu a diferentes tiempos de molienda



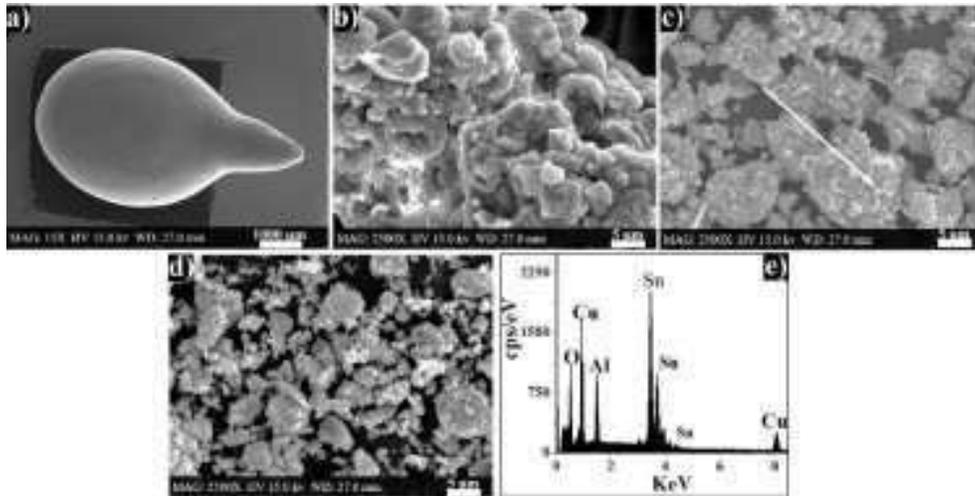
Fuente de Consulta: Elaboración Propia

3.2 Análisis de MEB de la aleación Sn-Al-Cu

Las aleaciones fueron sintetizadas a partir de molienda mecánica de baja energía o convencional que produce cambios estructurales en los polvos elementales. La figura 4.1 muestra micrografías de MEB de la evolución de la aleación Sn-Al-Cu. En la Figura 4.1a se muestra una partícula de los polvos de partida, la cual, tiene una forma esférica con un tamaño aproximado de $1 \mu\text{m}$. En la micrografía correspondiente a 19 h de molienda (Fig. 4.1b), se observa que el tamaño de partícula ha disminuido a alrededor de $10 \mu\text{m}$ abruptamente menor con respecto al tamaño original de $1 \mu\text{m}$. En la muestra correspondiente a 37 h (Fig. 4.1c) presenta agregados de partículas con tamaños promedio inferior, indicando que a este tiempo prevaleció la unión entre las misma.

En la figura 4.1d se presentan una micrografía para la muestra a 56 h que contiene menor presencia de agregados y partículas más pequeñas, por lo que su tamaño promedio es inferior a las demás muestras. Esta variación en el tamaño y distribución de tamaño es precisamente la consecuencia de eventos repetitivos de soldadura y fractura que prevalecen durante el aleado mecánico (Molnárová, O., *et al.* 2018). Finalmente, en la figura 4.2e se muestra el espectrograma del análisis químico EDS, donde se observa la presencia de los elementos de los polvos de partida, así como O proveniente de una pequeña película que recubre al estaño.

Figura 4.1 Análisis mediante MEB de la aleación Sn-Al-Cu a diferentes tiempos de molienda, a) polvos de partida, b) 19 h, c) 38 h, d) 57 h) y e) análisis químico EDS



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

3.2.1 Análisis MEB de la formación de estructuras tubulares de Sn-Al-Cu

Durante la mecano-síntesis se suministra energía suficiente para la unión de las partículas. En la figura 4.2a se muestra una micrografía de MEB a 2500X de la aleación después de 38 h de molienda, se observa una aglomeración de partículas con la presencia de formaciones tubulares, con tamaños mayores a 20 μm , el cual es relativamente grande considerando el tamaño inferior de los agregados de partículas y que se encuentran formadas por la soldadura de las partículas de la aleación. En la figura 4.2b se observa un mapeo químico de la muestra donde se aprecia que las estructuras tubulares están formadas de Sn, en la figura 4.2c correspondiente a 38 h de molienda, se presenta con mayor detalle la estructura tubular, con un diámetro promedio de 500 nm. Estas estructuras son formadas principalmente por la energía suministrada por la molienda, la cual genera una reacción exotérmica al entrar en contacto con el aire, desprendiendo calor permitiendo la difusión entre las partículas de Sn y formando las estructuras tubulares (Page, M. A. M., 2019).

Figura 4.2 Análisis mediante MEB de las estructuras tubulares de Sn-Al-Cu, a) imagen SEI del aglomerado de partículas, b) imagen de mapeo químico y c) estructura tubular

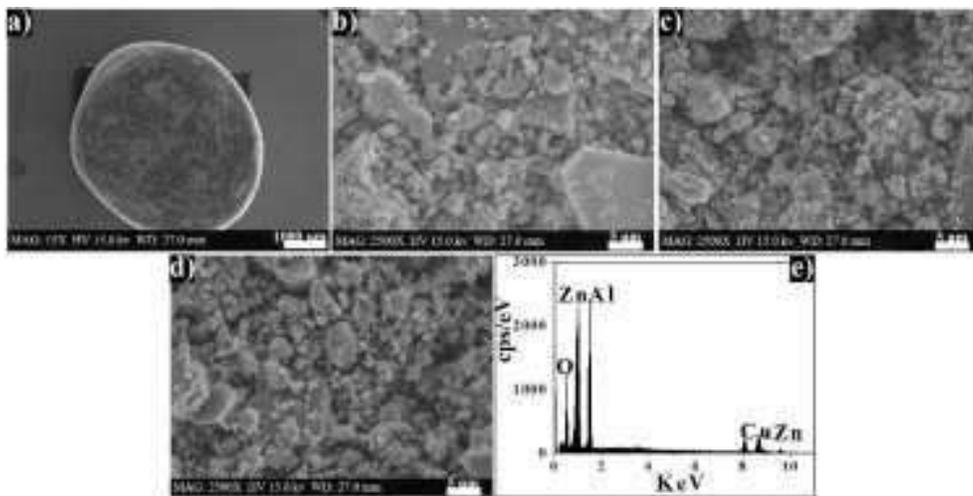


Fuente de Consulta: Elaboración Propia

3.3 Análisis de MEB de la aleación Zn-Al-Cu

Al igual que el sistema anterior las partículas de los principales elementos de esta aleación, fueron analizados mediante MEB para conocer su evolución. La figura 4.3a presenta que las partículas de Zn tienen una morfología esférica y un tamaño de aproximadamente 1mm mientras que después de 19 h (Fig. 4.3b) ocurre una disminución en el tamaño de partícula, producto de la fractura constante ocasionada por la molienda. De igual manera, para los tiempos de molienda de 38 h y 56 h (Fig. 4.3c-d) el tamaño de partícula sigue disminuyendo hasta alcanzar 1 μm , producido por la unión de las partículas que permite que se vayan endureciendo por los defectos suministrados y posteriormente se produzca su fractura y por lo tanto la reducción de tamaño. En el análisis químico EDS, los elementos presentes corresponden a la aleación, mientras que el O es proveniente de la oxidación superficial de las partículas.

Figura 4.3 Análisis mediante MEB de la aleación Sn-Al-Cu a diferentes tiempos de molienda, a) polvos de partida, b) 19 h, c) 38 h, d) 57 h) y e) análisis químico EDS

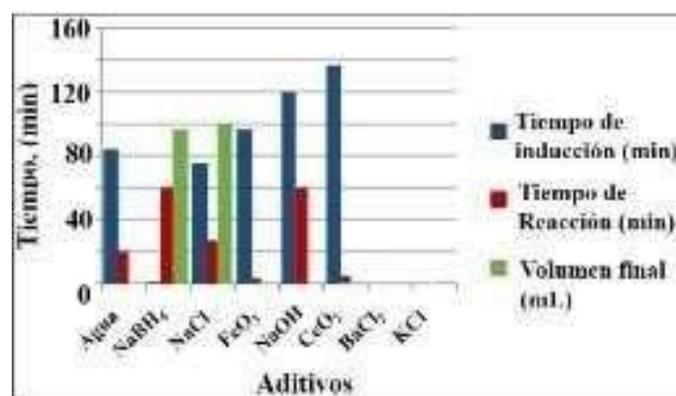


Fuente de Consulta: Elaboración Propia

3.4 Generación de hidrógeno en las aleaciones nanoestructuradas Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu.

La generación de hidrógeno de la aleación Sn-Al-Cu se evaluó con diferentes aditivos para encontrar el adecuado que permita obtener una generación con menor tiempo de inducción. El gráfico 4.2 corresponde a la gráfica de barras de las pruebas de generación de hidrógeno con la adición de aditivos. La primera columna corresponde al uso de agua destilada y aleación sin aditivo, se observa que el tiempo de inducción es 80 seg y de reacción no son buenos indicando que esta aleación, aunque genera H_2 lo hace muy lentamente. Se reporta que, a temperatura ambiente, solo un pequeño porcentaje de la cantidad teórica de H_2 se libera por reacción de hidrólisis del H_2O (Hernández-Torres, *et al*, 2020), pero la hidrólisis se acelera mediante el uso de catalizadores. De esta forma, la reacción mejora considerablemente cuando se utilizó cualquiera de los aditivos empleados, a excepción de KCl y BaCl_2 .

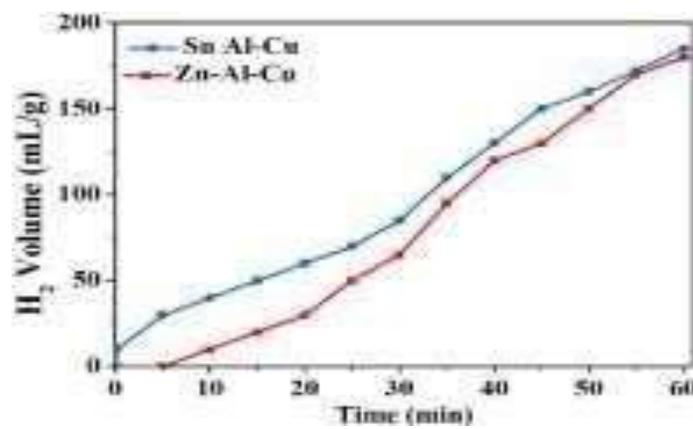
Gráfico 4.2 Gráfica de barras correspondiente a las pruebas de generación de hidrógeno en la aleación SnAl-Cu, con la adición de diferentes aditivos



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

De los resultados anteriores se observó que el mejor aditivo es el NaBH_4 , por lo que se analizaron las aleaciones con la adición de este aditivo. En el gráfico 4.3 se presenta la generación de hidrógeno para las dos aleaciones con NaBH_4 , se observa que para la aleación Sn-Al-Cu el tiempo de inducción es menor en comparación con la aleación Zn-Al-Cu, ya que la reacción procede casi inmediatamente, es decir con un pequeño tiempo de inducción de 1 min, igual forma, la generación de hidrógeno es mayor para la aleación que contiene Sn, mientras que, el tiempo de generación se prolongó hasta por 60 min. El borohidruro de sodio se ha usado como fuente de hidrógeno, debido a que es altamente soluble en agua, al entrar en contacto con agua se disocia en iones borano los cuales promueven la movilidad de iones y la transferencia de cargas eléctricas, además que promueven la corrosión de las partículas haciendo que la reacción de generación continúe y se lleve a cabo (Jiang, H., & Caro, J. 2017). Estos resultados sugieren la efectividad de las aleaciones para generar hidrógeno pues presentan una mayor generación que trabajos previos (Rin, T., *et al.* 2021) y menores que a los repostados por (Hernández-Torres 2019). Cabe mencionar que estos resultados obtenidos se encuentran en la fase de análisis para hacer más eficiente el proceso.

Gráfico 4.3 Grafica de generación de hidrógeno en las aleaciones Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu con la adición de NaBH_4 como aditivo catalizador de la reacción



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

4. Conclusiones

En resumen, en esta investigación aleaciones de Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu fueron obtenidas por molienda mecánica de baja energía y se logró la generación de hidrógeno. Los estudios XRD mostraron que después de 57 h disminuyeron las fases soluto (Al, Cu) ya que la solubilidad de las especies aumenta, esto asociado a la reducción de las intensidades en los picos de difracción pertenecientes a esas fases, además no se obtuvieron la presencia de segundas fases, por la técnica de MEB, se observó la formación de estructuras tubulares a 38 h de molienda con tamaño de $20 \mu\text{m}$ y diámetro de 580 nm , mientras que a 56 h se observó la formación de materiales nanoestructurados de las aleaciones con tamaños de $1 \mu\text{m}$ como consecuencia de eventos repetitivos de soldadura y fractura que prevalecen durante el proceso de molienda mecánica. En la generación de hidrógeno fue evidente a simple vista pequeñas burbujas que se generan como consecuencia de la liberación de H_2 , al usar en ambas aleaciones Sn-Al-Cu y Zn-Al-Cu, el agua destilada, y los aditivos como NaCl , NaBH_4 , CeO_2 , FeO_3 y NaOH . Siendo los aditivos NaCl y NaBH_4 los que produjeron 180 mL de hidrógeno.

5. Referencias

- Acar, C., & Dincer, I. (2019). Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of cleaner production*.
- Cañones Castellano, M. (2017). Reforzamiento de piezas de Al pulvimetalúrgico mediante la incorporación de pequeñas cantidades de NH_3 al proceso de molienda.
- Dong, Z., Zhang, S., & Xiong, Z. (2019). Surface integrity under diamond tool wear effects in ultraprecision raster milling of a Zn-Al-Cu alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(4), 1111-1118.

- Du Preez, S. P., & Bessarabov, D. G. (2018). Hydrogen generation by the hydrolysis of mechanochemically activated aluminum-tin-indium composites in pure water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(46), 21398-21413.
- Du, B. D., He, T. T., Liu, G. L., Chen, W., Wang, Y. M., Wang, W., & Chen, D. M. (2018). Al-water reactivity of AlMgGaInSn alloys used for hydraulic fracturing tools. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(15), 7201-7215.
- Guan, X., Zhou, Z., Luo, P., Wu, F., & Dong, S. (2019). Hydrogen generation from the reaction of Al-based composites activated by low-melting-point metals/oxides/salts with water. *Energy*, 188, 116107.
- Hernández-Torres, A. G., López-Miranda, J. L., Santos-Ramos, I., & Rosas, G. (2020). Hydrogen generation performance of Al-20at% Ca alloy synthesized by mechanical alloying. *AIMS Materials Science*, 7(2), 144-156.
- Ho, C. Y., & Huang, C. H. (2016). Enhancement of hydrogen generation using waste aluminum cans hydrolysis in low alkaline de-ionized water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(6), 37413747.
- Jiang, H., & Caro, J. (2017). Interfacial Au/MoC catalyst for low-temperature water-gas shift reaction. *Chem*, 3(2), 209-210. & Caro, J. (2017). Interfacial Au/MoC catalyst for low-temperature water-gas shift reaction. *Chem*, 3(2), 209-210.
- Khan, A. R., Ahmed, T., Islam, M. K., Dhar, S. A., & Qadir, M. R. (2019). Effect of copper content on thermal and mechanical properties of eutectoid Zn-Al alloy. arXiv preprint arXiv:1901.01519.
- Krajewski, P. K., Greer, A. L., & Krajewski, W. K. (2019). Main directions of recent works on Al-Zn-based alloys for foundry engineering. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(7), 39863993.
- Lopez-Miranda, J. L., & Rosas, G. (2016). Hydrogen generation by aluminum hydrolysis using the Fe₂Al₅ intermetallic compound. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(6), 4054-4059.
- Molnárová, O., Málek, P., Veselý, J., Minárik, P., Lukáč, F., Chráska, T., ... & Průša, F. (2018). The influence of milling and spark plasma sintering on the microstructure and properties of the Al7075 alloy. *Materials*, 11(4), 547.
- Montoya-Pérez, L., & Durán-Herrera, J. E. (2017). Producción de Hidrógeno a partir de la fermentación de residuos agroindustriales de la piña. *Revista Tecnológica en Marcha*, 30(3), 106-118.
- Page, M. A. M., Weidenfeller, B., & Hartmann, S. (2019). Influence of temperature and aging on the thermal diffusivity, thermal conductivity and heat capacity of a zinc die casting alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 786, 1060-1067.
- Pedroza, J. P. R. (2019). Nanobiocatalizador de platino soportado en titanía funcionalizada (NPt/fibrosis), para la destrucción de tejido fibrótico pulmonar.
- Qiao, D., Lu, Y., Tang, Z., Fan, X., Wang, T., Li, T., & Liaw, P. K. (2019). The superior hydrogen generation performance of multi-component Al alloys by the hydrolysis reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(7), 3527-3537.
- Reyes, G., Izquierdo, J. I., Pupiales, W., Soria, C., & Yépez, J. (2018). Estudio de emisiones contaminantes utilizando mezcla de gasolina e hidrógeno como combustible en un motor de combustión interna a 2800 MSNM. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 5(1), 19-28.
- Rin, T., Sangwichien, C., Yamsaengsung, R., & Reungpeerakul, T. (2021). Hydrogen generation from the hydrolysis of aluminum promoted by Ni-Li-B catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(56), 28450-28461.
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in materials science*, 46(1-2), 1184.