

Obtención de aleaciones eutécticas PbLi mediante procesos de fusión^(*)

M. I. Barrena*, J. M. Gómez de Salazar*, J. Quiñones**, L. Pascual* y A. Soria*

Resumen

El desarrollo del reactor experimental termonuclear (ITER), cuyo objetivo es la producción de energía a partir de la fusión nuclear, ha suscitado el estudio de las aleaciones eutécticas Pb-Li, ya que éstas han sido seleccionadas para la fabricación de las envolturas regeneradoras del reactor (TBM). Sin embargo, durante el proceso de fabricación de las aleaciones Pb-Li se produce una pérdida de litio, que inhibe la formación de estructuras eutécticas. En el presente trabajo se han realizado fusiones partiendo de plomo y litio puros evaluando diferentes parámetros de proceso para la obtención de aleaciones eutécticas Pb-Li (17 % at.). Las aleaciones obtenidas fueron caracterizadas mediante calorimetría diferencial de barrido, microscopía SEM-EDX y microdureza. De estos estudios podemos señalar, que la utilización de hornos de inducción y los parámetros de proceso optimizados para la obtención de la aleación Pb-Li, permiten obtener lingotes completamente eutécticos y con gran homogeneidad química y microestructural.

Palabras clave

Eutéctico Pb-17Li; Fusión; Composición química; Microestructura; Análisis calorimétrico (DSC).

Fusion technology for the production of PbLi eutectic alloys

Abstract

The development of thermonuclear experimental reactor (ITER), whose objective is to produce energy from nuclear fusion, has raised the study of Pb-Li eutectic alloys, as they have been selected for the manufacture of test blanket modules (TBM). However, during the manufacturing process of the Pb-Li alloys, thermal conditions used result in a loss of lithium element, which inhibits the formation of eutectic structures. In this work we have done fusion of pure lead and lithium, evaluating different process parameters to obtain Pb-Li (17 at. %) eutectic alloys. The alloys manufactured were characterized by DSC, SEM-EDX and microhardness tests. From these studies we noted that the used of an induction reactor and the process parameters optimized to obtain Pb-Li alloy allow for completely eutectic ingots and high chemical homogeneity and microstructural.

Keywords

Eutectic Pb-17Li; Fusion process; Chemical composition; Microstructure; Calorimetric análisis (DSC).

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de la fusión nuclear se viene estudiando desde la década de los 80, y se plantea como una futura fuente masiva de energía. Los proyectos de investigación realizados en este campo han permitido el desarrollo de distintas instalaciones experimentales, y han sido la base de la creación de un programa internacional de fusión, en el que se desarrollará un reactor experimental termonuclear (ITER “*The International Thermonuclear Experimental Reactor*”). Su objetivo es la producción de energía a partir de la fusión nuclear. Se trata de un proyecto conjunto de la Unión

Europea, Estados Unidos, Corea, China, India, Rusia y Japón.

Centrándonos en el proyecto ITER, uno de los elementos importantes a ensayar son las envolturas regeneradoras “Test Blanket Modules”. Existen investigaciones de diversos países, que están tratando de optimizar esta parte fundamental del reactor^[1] que es de vital importancia ya que debe ser capaz de captar los neutrones y el tritio generado en la reacción nuclear, además de refrigerar los materiales que confinan el plasma. El elemento que se ha propuesto para la generación del ³H en el proyecto ITER es el isótopo Li⁶. Cada país ha propuesto distintos modelos de

^(*) Trabajo recibido el día 1 de febrero de 2012 y aceptado en su forma final el día 3 de mayo de 2012.

* Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense de Madrid. 28040 Madrid. España.

** CIEMAT. Avda. Complutense 22. 28040 Madrid. España.

envolturas regeneradoras, que pueden resumirse en dos tipos diferentes: las envolturas de sólidos cerámicos de litio y las de metal líquido^[2]. En el diseño inicial de estas envolturas regeneradoras se consideró la utilización de materiales de diversa naturaleza^[3]. Sin embargo, después de una selección previa, en función de los requerimientos de diseño exigidos, se puede destacar la consideración de sales como el FLiBe o materiales de naturaleza metálica como el Li (l) o la aleación eutéctica Pb-17 % at. Li. Esta última es el material elegido para la envoltura regeneradora en la mayoría de las propuestas presentadas por los integrantes del proyecto ITER.

Para la producción de la aleación eutéctica, es de vital importancia asegurar una mezcla eficaz, dificultada por la elevada diferencia de densidad de los dos componentes y la alta reactividad del litio frente al oxígeno. Además, es necesario minimizar la presencia de intermetálicos que poseen mayores temperaturas de fusión^[3]. La solución al primer problema fue utilizar el sistema de mezcla MHD (MagnetoHydroDynamic)^[3 y 4]. En él se utiliza un campo magnético para mezclar los elementos fundidos. En cuanto a la formación de intermetálicos, su aparición va a poder ser controlada en función de la cantidad de litio fundido, en una atmósfera de argón, que se inyecta frente a la cantidad de plomo requerida. Las aleaciones obtenidas en forma

de lingotes, presentan zonas ricas en litio, debido a los procesos de segregación durante la etapa de enfriamiento^[5].

En trabajos previos^[6 y 7], fue estudiada la posibilidad de obtener aleaciones eutécticas Pb-Li a partir de aleaciones hipo o hipereutécticas, utilizando diferentes condiciones de proceso. En el presente trabajo se evalúan los parámetros del proceso de fusión utilizado en la obtención de aleaciones eutécticas Pb-Li, empleando como materias primas plomo y litio sin alear.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se pretende obtener aleaciones eutécticas Pb-Li (17 % at.) a partir de litio y plomo puros. El proceso se ha llevado a cabo utilizando dos tipos de horno, uno de resistencia y otro de inducción, teniendo en cuenta para el diseño de los ciclos térmicos aplicados el diagrama de equilibrio del sistema Li-Pb (Fig. 1).

En ambos casos los crisoles empleados fueron de carburo de silicio. Como gas protector siempre ha sido utilizado Ar (BIP) (suministrado por Carburos Metálicos). Tanto los crisoles como el gas protector han sido elegidos en base a estudios previos^[6 y 7],

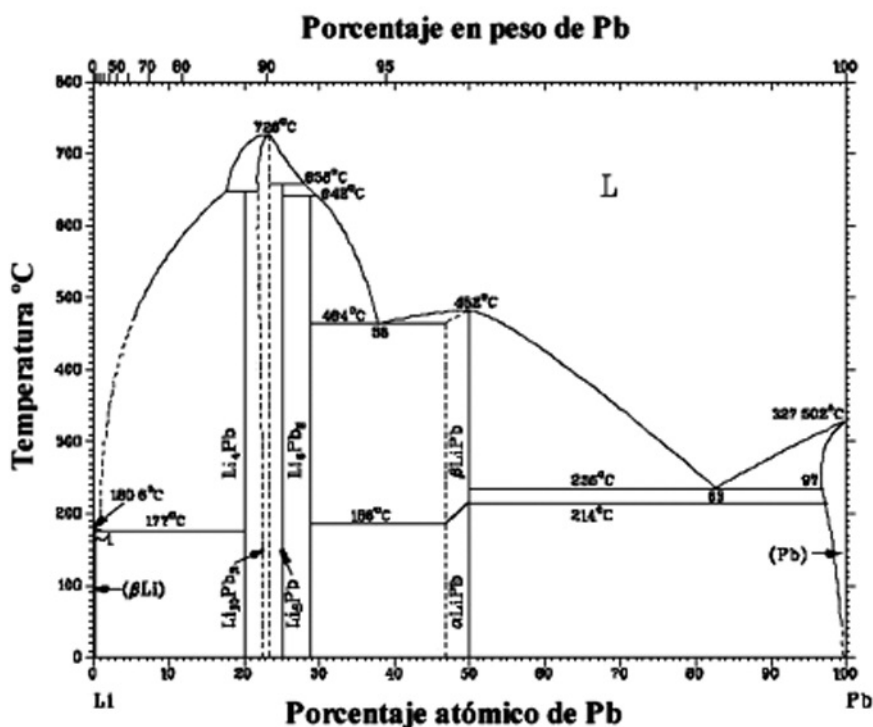


Figura 1. Diagrama del sistema Pb-Li^[8].

Figure 1. Li-Pb system diagram.

donde se comprobó que la utilización de crisoles de grafito provoca una reactividad excesiva con la aleación Pb-Li y los de SiO₂ no soportaban los ciclos térmicos utilizados, fracturándose con gran facilidad y pudiendo incorporar impurezas a la composición de la aleación obtenida. En cuanto al grado de protección del gas empleado, se comprobó que si bien la utilización de nitrógeno es adecuada hasta los 600 °C, la respuesta en protección tanto a bajas como a altas temperaturas es mejor cuando es utilizado argón, ya que en ningún caso se detectaba la presencia de óxidos o nitruros, cosa que sí sucedía en el caso de utilizar nitrógeno.

Una variable significativa dentro del proceso de obtención de estas aleaciones es definir la geometría que se le va a dar a los materiales de partida (plomo y litio). La posibilidad de realizar el proceso en crisol abierto donde el plomo y el litio son fundidos, fue desestimada^{6 y 7} ya que se observó que durante el proceso de fusión se perdía prácticamente la totalidad del litio de partida y las aleaciones que se obtenían eran composicional y microestructuralmente ligeramente hipoeutéticas o constituidas únicamente por plomo.

La alternativa para evitar las pérdidas de litio por oxidación fue llevar a cabo el proceso en estado sólido (200 °C), además de diseñar una disposición inicial para los materiales de partida. La geometría de los lingotes utilizados para realizar el proceso de obtención de la aleación eutéctica, se muestra en el esquema de la figura 2.

Se trata de cilindros huecos de plomo con tapa y en su interior se introduce la cantidad de litio puro necesario, que irá siendo modificado en ensayos posteriores, teniendo en cuenta las posibles pérdidas durante el proceso. Este dispositivo se introduce en un crisol de SiC que mantenga la integridad estructural en caso de superar temperaturas que provoquen

la fusión total o parcial del dispositivo. Con este dispositivo se evita que el litio entre en contacto con el aire del horno y se produzca su oxidación. Posteriormente, fueron llevados a cabo ensayos de fusión en un horno de inducción con posibilidad de aplicar agitación sobre el caldo metálico y de utilizar una mezcla de sales formada por KCl y LiCl con composición eutéctica. La composición eutéctica de esta mezcla de sales corresponde a un 42 % de KCl + 58 % de LiCl. La aplicación de las mismas se lleva a cabo por llenado completo del espacio entre el crisol de SiC y el dispositivo Pb-Li. Una vez llevado a cabo el proceso de fusión y tras enfriamiento de los mismos, las sales protectoras son eliminadas por martillado y el lingote de la aleación obtenida se lava en agua a 60 °C, con lo que se elimina cualquier residuo de las mismas.

Las condiciones para cada tipo de proceso llevado a cabo (Tabla I) son función del tipo de horno empleado, de los distintos contenidos de litio de partida, de los tiempos y las temperaturas de proceso utilizadas, así como de la ausencia o presencia de sales eutécticas protectoras en el proceso.

En todas las aleaciones Pb-Li obtenidas, se han realizado análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) con objeto de determinar las entalpías y las temperaturas de transformación de las fases obtenidas. El equipo utilizado fue DSC 1 STARE SYSTEM Mettler Toledo. Las cápsulas utilizadas fueron de aluminio y los barridos se efectuaron desde 40 °C hasta 450 °C con velocidades de calentamiento de 10 °C/min, y de enfriamiento de 5 °C/min.

El estudio microestructural fue realizado mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis EDX con detección de ligeros, con el objeto de evaluar las variaciones microestructurales que tienen lugar, en función de los parámetros de proceso utilizados. Para ello, se emplearon técnicas convencio-

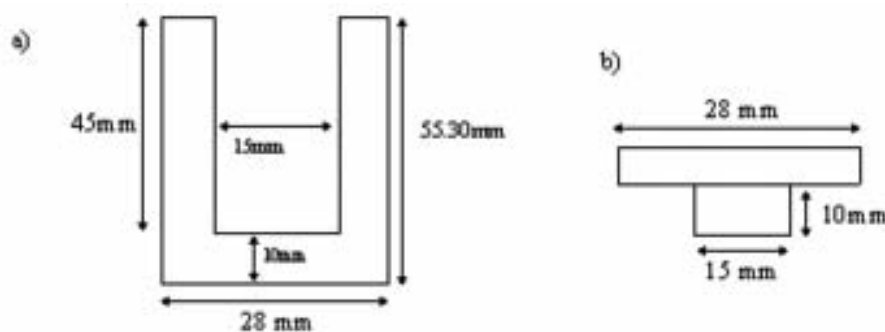


Figura 2. Esquema del dispositivo de plomo utilizado en el proceso de obtención de la aleación Pb-Li. a) Crisol b) Tapa.

Figure 2. Schematic device of the lead used in the process to obtain the Pb-Li alloy. a) Crucible b) Crucible cover.

Tabla I. Condiciones de proceso para la obtención de la aleación Pb-Li (17 % at.)*Table I. Process conditions to obtain Pb-Li (17 at. %)*

Horno	Proceso	Li (% at)	T (°C)	Tiempo (min)	Sales protectoras
Resistencia	Estado Sólido	17	200	1.440	—
		25	200	1.440 - 7.200	—
	Fusión	17	375	60 - 30	—
		25	375	60 - 5	—
Inducción	Fusión	17	450	5	KCl 42 % / LiCl 58 %
		25	450	5	KCl 42 % / LiCl 58 %
		20	450	5	KCl 42 % / LiCl 58 %

nales de preparación metalográfica consistentes en embutición en resina de poliéster, desbaste con papel de SiC hasta granulometría 4.000, pulido con Masterpolish Buheler y ataque con Nital al 2 %. El microscopio electrónico utilizado en este estudio fue un JEOL 6400 con analizador Link Oxford (programa INCA).

Así mismo, se realizó una caracterización mecánica de las fases presentes en las aleaciones obtenidas mediante medidas de microdureza Vickers, con un equipo Future-tech FM-700 y una carga de 10 g.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis microestructural de las diferentes zonas que presentan los lingotes de las aleaciones Pb-Li, obtenidas utilizando el horno de resistencia y llevando

a cabo el proceso en estado sólido a 200 °C durante 24 h, con un 17 % atómico de litio en plomo, muestra un elevado grado de heterogeneidad, dentro de las diferentes zonas del lingote. La zona interna del lingote (Fig. 3 a)) presenta una microestructura hipoeutéctica con dendritas primarias de α -Pb, con un valor de microdureza asociado de 9,5 HV, en una microestructura laminar eutéctica β -LiPb + α -Pb, con una microdureza media de 15 HV, lo que demuestra que el proceso de difusión en estado sólido ha tenido lugar empobreciendo en litio la zona interna del lingote (Fig. 3 b)).

Sin embargo, el litio no sólo ha llegado a las zonas periféricas del lingote sino que ha sufrido un proceso de oxidación, provocando la aparición en estas zonas externas de una microestructura (Fig. 4 a)) constituida exclusivamente por plomo (Fig. 4 b)), con un valor medio de microdureza de 7,1 HV, una tempe-

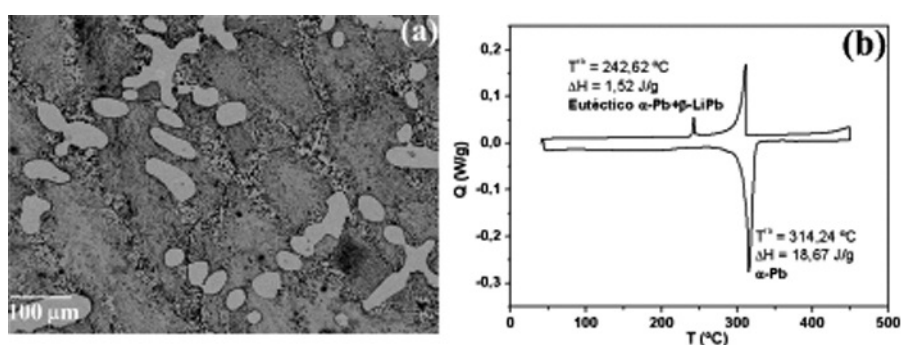


Figura 3. Proceso en estado sólido a 200 °C durante 24 h, con un 17 % atómico de Li. a) Microestructura hipoeutéctica de la zona interna del lingote constituida por dendritas primarias de α -Pb en matriz eutéctica α -Pb+ β -LiPb. b) Curva DSC.

Figure 3. Solid state process at 200 °C for 24 h, with 17 atomic % Li. a) Hypoeutectic microstructure of the inner zone of the ingot consisting of α -Pb primary dendrites in eutectic matrix α -Pb+ β -LiPb. b) DSC curve.

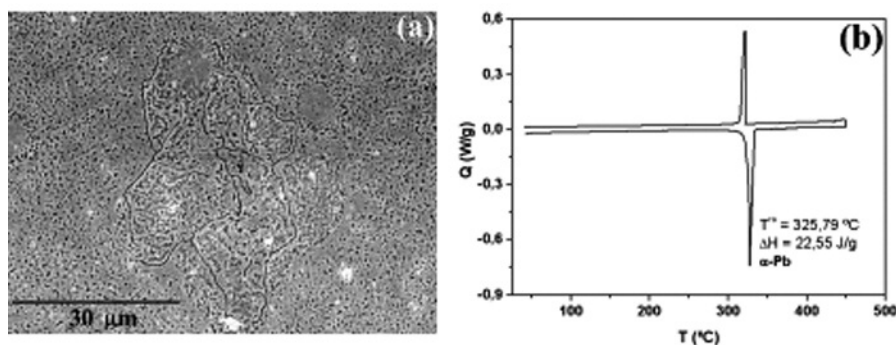


Figura 4. Proceso en estado sólido a 200 °C durante 24 h, con un 17 % atómico de Li. a) Imagen SEM de la zona externa del lingote constituida por plomo. b) Curva DSC.

Figure 4. Solid state process at 200 °C for 24 hours, with 17 atomic % Li. a) SEM image of the outer zone of the ingot consisting of lead. b) DSC curve.

ratura de fusión de 325,79 °C próxima al valor bibliográfico^[9 y 10] y una entalpía de 22,55 J/g comprendida entre los valores tabulados^[11].

Con el fin de contrarrestar las pérdidas por oxidación de este elemento se incrementó el porcentaje atómico en litio de partida hasta un 25 %, manteniendo constante la temperatura utilizada en el ensayo anterior y aumentando el tiempo de la isoterma en un intervalo desde las 24 hasta las 120 h. Se comprobó la variación microestructural de los lingotes obtenidos en función del tiempo. Tras las 24 h se observan dos tipos de microestructuras bien diferenciadas: una hipereutética en la zona interna del lingote (Fig. 5 a)), formada por dendritas del inter-

metálico β -LiPb, asociada a un valor de microdureza de 22,5 HV y un valor entálpico de 5,88 J/g, en una matriz eutética β -LiPb+ α -Pb (Fig. 5 b)), y otra hipoeutética en la periferia del mismo, constituida como ya se ha comentado, por dendritas de α -Pb primario en una matriz eutética.

Luego el incremento en el porcentaje de litio es suficiente para contrarrestar las pérdidas por oxidación, sin embargo el tiempo utilizado para la isoterma no es suficiente para la distribución homogénea del litio en todo el volumen del lingote.

La microestructura 100 % eutética buscada (β -LiPb+ α -Pb) no fue observada hasta el tiempo de tratamiento de 3 días. Esta microestructura fue loca-

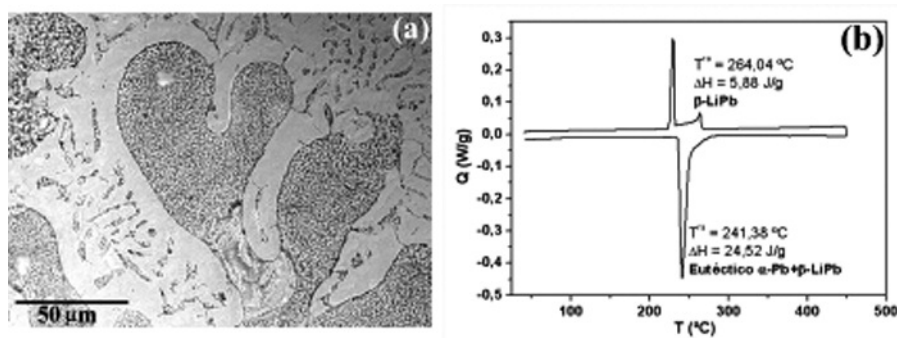


Figura 5. Proceso en estado sólido a 200 °C durante 24 h, con un 25 % atómico de Li. a) Microestructura hipereutética de la zona interna del lingote constituida por dendritas primarias de β -LiPb en matriz eutética α -Pb+ β -LiPb. b) Curva DSC.

Figure 5. Solid state process at 200 °C for 24 h, with 25 atomic % Li. a) Hypereutectic microstructure of the inner zone of the ingot consisting of β -LiPb primary dendrites in eutectic matrix α -Pb+ β -LiPb. b) DSC curve.

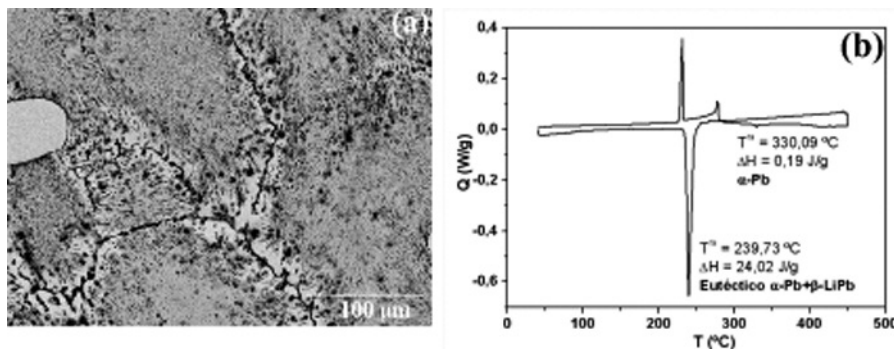


Figura 6. Proceso en estado sólido a 200 °C durante 3 días, con un 25 % atómico de Li. a) Microestructura eutéctica de la zona interna del lingote constituida por α -Pb+ β -LiPb, rodeada de zonas hipoeutécticas. b) Curva DSC.

Figure 6. Solid state process at 200 °C for 3 days, with 25 atomic % Li. a) Eutectic microstructure of the inner zone of the ingot consisting of α -Pb+ β -LiPb, hypoeutectic areas surrounded. b) DSC curve.

lizada en las zonas internas del lingote (Fig. 6), con un valor de entalpía algo inferior a 23 J/g determinado a partir del DSC, pero siempre rodeada de una microestructura hipoeutéctica hasta la periferia del lingote.

En los ensayos llevados a cabo a mayores tiempos (5 días) las microestructuras observadas son nuevamente monofásica de plomo en el centro del lingote e hipoeutéctica en la periferia, por lo que se deduce que el tiempo de tratamiento en estos casos es excesivo y las pérdidas de litio son muy grandes. Luego es posible concluir que mediante procesos de difusión en estado sólido se puede obtener una microestructura eutéctica partiendo de un exceso del litio, si bien no se logra una homogeneidad composicional y estructural.

Es por ello que fueron diseñados ensayos utilizando procesos de fusión incrementando la temperatura de proceso por encima de la de fusión del plomo (328 °C) hasta 375 °C. Este incremento de la temperatura obligó a rediseñar el ciclo térmico utilizado y se llevaron a cabo ensayos con tiempos no superiores a 1 h.

Utilizando el proceso de fusión y partiendo del 17 % de litio en plomo se comprueba que la zona interna del lingote donde en un principio estaba dispuesto el litio de partida, queda totalmente empobrecida en este elemento, observándose sólo la presencia de una microestructura monofásica de α -Pb, cuya extensión es directamente proporcional al tiempo del ciclo aplicado. El resto del lingote hasta la periferia presenta una microestructura hipoeutéctica (Fig. 7), por lo que nuevamente se intuye la pérdida de litio incluso para tiempos de permanencia cortos de 30 min.

Esta pérdida será una constante en los ensayos posteriores, llevados a cabo mediante procesos de fusión pero incrementando el porcentaje atómico del litio hasta el 25 % y disminuyendo el tiempo de la isoterma hasta 5 min. Las microestructuras observadas en estos casos corresponden a zonas periféricas hipoeutécticas y zonas aisladas en el interior del lingote que presentan microestructura eutéctica. Podría concluirse que incrementando la temperatura hasta 375 °C, un tiempo de isoterma de 5 min sería suficiente para que mediante procesos de fusión pudieran ser obtenidas microestructuras eutécticas β -LiPb+ α -Pb. Sin embargo, las pérdidas de litio, así como la heterogeneidad composicional y microestructural nuevamente prevalecen en toda esta serie de ensayos.

Con el fin de minimizar los problemas encontrados en los ensayos llevados a cabo en el horno de resistencia, fue seleccionado un horno de inducción para obtener aleaciones mediante procesos de fusión de los materiales de partida, plomo y litio puros, y que posibilite llevar a cabo el proceso con agitación magnética, lo que favorecería la homogeneidad composicional y estructural buscada. Además, la utilización de una mezcla de sales KCl-LiCl protectoras, permitiría la disminución del porcentaje de litio perdido en la aleación. La temperatura utilizada en estos casos fue de 450 °C, ya que el valor de la isoterma tiene que ser superior al de fusión de la mezcla de sales. En las fusiones llevadas a cabo en estas condiciones, se comprueba que los resultados son excelentes tanto por la utilización de sales eutécticas, como por la posibilidad de condiciones de agitación del caldo metálico. Con estos ensayos pudo ser determinada la pérdida de litio por disolución en la mezcla de sales en

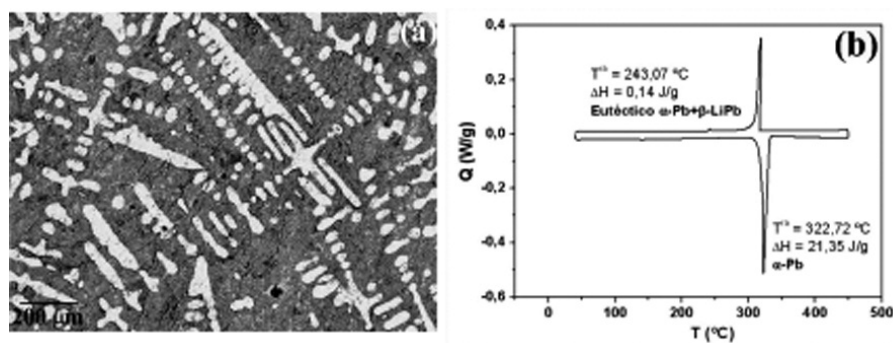


Figura 7. Proceso llevado a cabo por fusión a 375 °C durante 30 min, con un 17 % atómico de Li. a) Microestructura hipoeutéctica de la zona externa del lingote constituida por dendritas primarias de α -Pb en matriz eutéctica α -Pb+ β -LiPb. b) Curva DSC.

Figure 7. Process carried out by melting at 375 °C for 30 min, with 17 % atomic Li. a) Hypoeutectic microstructure of the outer zone of the ingot consisting of α -Pb primary dendrites in eutectic matrix α -Pb+ β -LiPb. b) DSC curve.

torno a un 3 % atómico, por lo que para obtener la aleación con una estructura totalmente eutéctica y homogénea en todo el lingote fue necesario partir de un 20 % at. de litio en plomo (Fig. 8 a)). Mediante los análisis DSC de las diferentes zonas dentro de estos lingotes se comprueba la única existencia del eutéctico β -LiPb+ α -Pb (Fig. 8 b)) con valores entálpicos de 29,08 J/g y puntos de fusión 241 °C, próximos a los recogidos en la bibliografía existente y sin detectarse en ningún caso mezcla de fases y microestructuras, como sucedía cuando era utilizado un horno de resistencia.

4. CONCLUSIONES

- El estudio de los lingotes PbLi eutécticos obtenidos, utilizando diferentes hornos de fusión ha permitido determinar las condiciones óptimas de proceso, la selección del tipo de horno, composición de partida, sales eutécticas, tiempos y temperaturas de fusión.
- En cuanto al tipo de horno, se ha de utilizar uno que permita una buena agitación del caldo metálico (hornos de inducción), para favorecer la homogeneización de la aleación y garantizar una

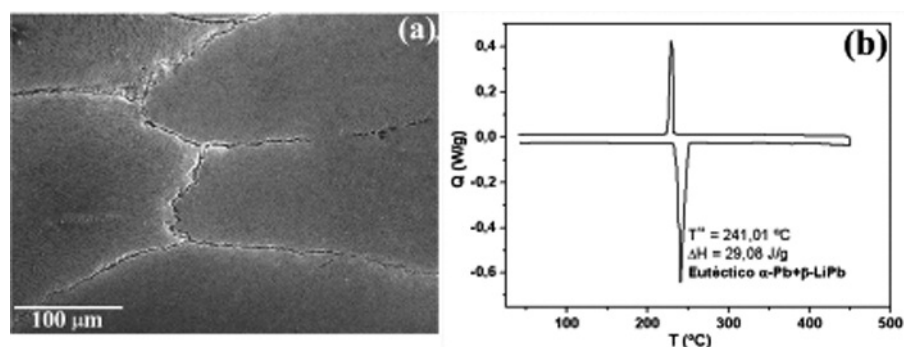


Figura 8. Proceso llevado a cabo por fusión a 450 °C durante 5 min, con un 20 % atómico de litio, usando agitación y sales protectoras (58 % LiCl y 42 % KCl). a) Microestructura eutéctica α -Pb+ β -LiPb. b) Curva DSC.

Figure 8. Process carried out by melting at 450 °C for 5 min, with 20 % atomic lithium, using agitation and protective salts (58 % LiCl and 42 % KCl). a) Eutectic microstructure α -Pb+ β -LiPb. b) DSC curve.

mezcla correcta entre el plomo y el litio de partida.

- La geometría diseñada y utilizada en los materiales de partida, cilindro hueco de plomo y litio confinado en su interior, es la más acertada, ya que evita pérdidas superficiales excesivas de litio.
- La mezcla de sales de composición eutéctica va a producir una protección adicional frente a la oxidación, siendo potencialmente capaces de retirar posibles impurezas presentes en el caldo metálico. Estas sales protectoras retiran en torno a un 3 % atómico en litio, por lo que es necesario incorporar un exceso de litio de partida para evitar la producción de aleaciones hipoeutécticas. La determinación del porcentaje de litio retirado en la mezcla de sales permite la reproducibilidad del proceso.
- En cuanto al tiempo de fusión necesario para conseguir una correcta aleación eutéctica (β -LiPb+ α -Pb), éste debe estar en torno a 5 min, ya que a mayores tiempos se produce un mayor grado de oxidación y una elevada pérdida de litio, y a tiempos menores, no se puede producir una fusión completa y homogénea de los materiales de partida.
- Por lo tanto, las condiciones óptimas de fusión que se han logrado para la producción de las aleaciones Pb-Li eutécticas, se basan en la utilización de una mezcla de sales de composición eutéctica 58 % LiCl y 42 % KCl, en presencia de Ar BIP a una temperatura de 450 °C durante 5 min.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto Consolider, Ingenio 2010 "TECNO-FUS" por la financiación recibida.

REFERENCIAS

- [1] P. Chiovaro, P. A. Di Maio, E. Oliveri y G. Vella, *Fusion Eng. Des.* 69 (2003) 469-477.
- [2] C. P. C. Wong, J. P. Salavy, Y. Kim, I. Kirillov, E. Rajendra-Kumar, N. B. Morley, S. Tanaka y Y. C. Wu, *Fusion Eng. Des.* 83 (2008) 850-857.
- [3] J. Freibergs, J. Klavins, O. Lielausis, A. Mikelsons y J. Zandarts, *The 15th Riga and 6th Parmir conference on fundamental and applied MHD*, A. Alemany, A. Gailitis, G. Gerbeth (eds.), MHD Parmir, Rigas Jurmala, Latvia, 2005, pp. 259-262.
- [4] S. Zheng y W. Yican, *Plasma Sci. Technol.* 5 (2003) 1.995-2.000.
- [5] A. Aiello, L. Bühler, A. Ciampichetti, D. Demange, L. Dörr, J. F. Freibergs, B. Ghidersa, M. Llic, G. Laffont, G. Messemer, I. Platnieks y G. Rampal, *Fusion Eng. Des.* 85 (2010) 2.012-2.021.
- [6] C. Palomo, L. Serrano, S. Durán, J. Quiñones, M. Fernández, I. Barrena, E. Conde, A. Quejido, J. M. Gómez de Salazar y L. Sedano, *Fusion Eng. Des.* 86 (2011) 2.620-2.623.
- [7] J. Quiñones, M. I. Barrena, A. Soria, J. M. Gómez de Salazar, L. Serrano, S. Durán, E. Conde, A. I. Barrado, M. Fernández y L. Sedano, *36ª Reunión anual de la SNE*, Senda editorial, S.A, Madrid, España, 2010, p. 44.
- [8] ASM Handbook Vol. 2: *Binary alloy phase diagrams*, T. B. Massalski (Ed.), Metals Park Ohio, USA, 1986, p. 1.495.
- [9] ASM Handbook Vol. 3: *Alloy Phase Diagrams*, H. Baker (Ed.), Metals Park Ohio, USA, 1992, p. 1.085.
- [10] M. Hansen y K. Anderko, *Constitution of Binary Alloys*, McGraw-Hill (Ed.), New York, USA, 1958.
- [11] B. Schulz, *Fusion Eng. Des.* 14 (1991) 199-205.