

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 818 566**

51 Int. Cl.:

C22C 21/00 (2006.01)

C22C 21/06 (2006.01)

C22C 32/00 (2006.01)

C22C 21/08 (2006.01)

C22C 1/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.04.2016 PCT/CA2016/050498**

87 Fecha y número de publicación internacional: **10.11.2016 WO16176766**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.04.2016 E 16788987 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.06.2020 EP 3289108**

54 Título: **Material compuesto que tiene propiedades mecánicas mejoradas a temperaturas elevadas**

30 Prioridad:

01.05.2015 US 201562155556 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

13.04.2021

73 Titular/es:

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
(100.0%)
555 Boul. de l'Université
Chicoutimi, Québec G7H 2B1, CA**

72 Inventor/es:

**LAURIN, JEAN-ALAIN;
PARSON, NICHOLAS C.;
ROUX, MARIO;
CHEN, XIAO-GUANG y
LIU, KUN**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 818 566 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Material compuesto que tiene propiedades mecánicas mejoradas a temperaturas elevadas

Campo tecnológico

5 La presente descripción se refiere generalmente a una aleación de aluminio que tiene propiedades mecánicas mejoradas a temperaturas elevadas, así como a materiales compuestos que incluyen los elementos de la aleación de aluminio como matriz y/o como productos de reacción.

Antecedentes

10 Los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con material particulado de carburo de boro (B_4C) se utilizan ampliamente para la absorción de neutrones durante el almacenamiento de combustible nuclear gastado. Los perfiles extruidos se utilizan en los sistemas de almacenamiento en seco actuales y se ha descubierto que las aleaciones de tipo serie 6XXX son materiales de matriz adecuados que ofrecen compatibilidad con una ruta de producción de metal líquido para el material compuesto junto con el proceso de extrusión. Adicionalmente, la metalurgia de la familia de aleaciones de tipo 6XXX permite que la etapa de tratamiento térmico de la solución se lleve a cabo durante la extrusión, permitiendo que se elimine una etapa del proceso. Además, a temperatura ambiente, la serie de aleaciones tipo 6XXX puede proporcionar propiedades de tracción útiles de hasta un LM de ~ 300 MPa y una RMT de 350 MPa debido a la estructura del precipitado β en Mg-Si de tamaño nanométrico desarrollada durante el tratamiento térmico.

15 Sin embargo, las temperaturas de servicio en el almacenamiento en seco del combustible nuclear gastado pueden acercarse hasta los $250^\circ C$ y los tiempos de servicio previstos pueden ser de 40 años o más. Como ocurre con la mayoría de los materiales metálicos, el aluminio puede ablandarse a temperaturas elevadas, debido al aumento de la movilidad de dislocación. Sin embargo, para el sistema de endurecimiento por precipitación de Al-Mg-Si, puede ocurrir una pérdida adicional y más drástica de las propiedades mecánicas por encima de $\sim 150^\circ C$, debido al aumento de tamaño de grano y disolución de los precipitados de la microestructura endurecida por envejecimiento. Dicha pérdida de propiedades mecánicas puede causar fallos en la estabilidad y/o integridad de los recipientes fabricados utilizando tales aleaciones, cuando se utilizan a temperaturas elevadas durante largos períodos de tiempo.

20 Como se ha indicado en el documento WO2014/201565, el material compuesto que contiene B_4C se puede proporcionar como un producto colado con enfriamiento directo (ED) y extruido que contiene hasta un 20% (p/p) de B_4C que presenta una resistencia mejorada a temperaturas elevadas. En tal material compuesto que contiene B_4C , se utiliza una aleación de aluminio de tipo 6XXX de Al-Mg-Si-Mn-Fe-Cu como material de matriz. Las propiedades finales del material compuesto se basan en poner en solución los elementos de soluto disponibles durante la etapa de extrusión y el posterior templado rápido para retener esos elementos en una solución sólida. Este requisito limita la ventana operativa de extrusión y el requisito de productividad y templado rápido puede inducir una distorsión de la conformación en el perfil, lo que dificulta el cumplimiento de las tolerancias dimensionales requeridas del producto.

25 Un material compuesto alternativo incluye partículas de óxido de tamaño nanométrico dentro de una matriz de aluminio para proporcionar un refuerzo dispersoide eficaz a temperaturas elevadas, tal como se describe en la solicitud de patente estadounidense publicada con el número 2013/0209307. Sin embargo, este material se basa en una ruta de pulvimetalurgia que es cara debido a las múltiples etapas de procesamiento de producción de polvo, consolidación de preformas y extrusión. La capa de óxido que rodea las partículas de polvo se altera durante la consolidación por extrusión para dar la distribución de tamaño nanométrico.

30 Otra alternativa enseña colar un material compuesto agitando las partículas de B_4C y manteniendo la fluidez al añadir 0,5-5% de Ti (p/p) y al limitar Mg a $<0,2\%$ (p/p) hasta que las partículas de B_4C se mezclan (documento WO/2004/038050).

El documento EP 1 956 107 A1 describe un material compuesto de aleación de polvo de aluminio para absorber neutrones. El documento EP 1 632 955 A1 describe un absorbente de neutrones a base de aluminio.

35 Sería muy deseable proporcionar un material compuesto que tenga una resistencia aumentada a temperaturas elevadas durante una exposición a largo plazo. También sería deseable proporcionar una aleación de aluminio que no requiera puesta en solución por prensado, para evitar la distorsión del producto final. También sería deseable que la matriz fuera adecuada para metalurgia líquida a granel convencional, preferiblemente colada con ED y extrusión.

Breve compendio

40 La presente descripción proporciona un material compuesto que tiene propiedades mecánicas aumentadas (tales como límite elástico y/o resistencia a la tracción aumentados) a temperaturas elevadas (tales como temperaturas iguales o superiores a $250^\circ C$). El material compuesto comprende una matriz de una aleación de aluminio (que comprende Mn y Mg), así como partículas de carga dispersas (tales como partículas de B_4C). El material compuesto también puede comprender un producto de reacción que se recubre al menos parcialmente en la superficie del material de carga disperso.

En un primer aspecto, la presente descripción proporciona un material compuesto según la reivindicación 1. En una realización, el aditivo es Ti. En otra realización, el material compuesto se obtiene añadiendo entre 0,20 y 2,00 o aproximadamente 1,0, en porcentaje en peso, de Ti a la matriz antes de la adición de las partículas al material compuesto. En otra realización más, la matriz puede comprender además Mo. En tal realización, el contenido de Mo de la matriz es de 0,25 máximo (en porcentaje en peso). En aún otra realización, el contenido de Si de la matriz es de 0,26 máximo o 0,2, en porcentaje en peso. En otra realización más, el contenido de Fe de la matriz es de 0,40 máximo o 0,4, en porcentaje en peso. La matriz comprende Cu con un contenido, en la matriz, de 0,20 máximo, en porcentaje en peso. En una realización, el contenido de Cu de la matriz es de 0,14 máximo o 0,1, en porcentaje en peso. En aún otra realización, el contenido de Mn de la matriz es superior a 0,90 y/o igual a 1,0, en porcentaje en peso. En una realización adicional, el contenido de Mg de la matriz es superior a 1,00 o igual a 0,9, en porcentaje en peso. En aún otra realización, el material de carga tiene una fracción volumétrica de hasta 20% (tal como, por ejemplo, 10,5%) en el material compuesto.

En otro aspecto, la presente descripción proporciona un método para fabricar el material compuesto descrito en la presente memoria, según la reivindicación 6. En una realización, el método comprende homogeneizar además la palanquilla de bruto de colada para obtener un producto homogeneizado. En aún otra realización, el método también puede comprender extruir además la palanquilla de bruto de colada o el producto homogeneizado para obtener un producto extruido. Opcionalmente, el método puede comprender tratar térmicamente además el producto extruido a una temperatura entre 350°C y 400°C y durante un período de tiempo entre 2 y 30 horas. El material de carga es B₄C y el método comprende, en la etapa (i), añadir un aditivo que se selecciona del grupo que consiste en Ti, Cr, V, Nb, Zr, Sr, Sc y cualquier combinación de los mismos a la aleación de aluminio fundido. En una realización, el aditivo es Ti y, en una realización adicional, el método comprende además añadir entre 0,20 y 2,00, en porcentaje en peso, de Ti a la aleación de aluminio fundido antes de la adición de las partículas al material compuesto. En otra realización más, el método puede comprender además añadir Mo a la aleación de aluminio. Por ejemplo, el método puede comprender añadir un máximo de (p. ej., hasta) 0,25 de Mo (en porcentaje en peso) a la aleación de aluminio fundido. El método comprende, en la etapa (i), añadir 0,20 máximo, en porcentaje en peso, de Cu a la aleación de aluminio fundido. En otra realización más, el método comprende además extruir el material compuesto para formar un producto extruido. En otra realización, el método comprende además, antes de la colada, agitar la mezcla fundida para humedecer la aleación de aluminio con las partículas del material de carga y distribuir las partículas por todo el volumen de la mezcla fundida. En una realización, el método comprende además, en la etapa (ii), añadir una fracción volumétrica del 20% o menos (tal como, por ejemplo, una fracción volumétrica del 10,5%) del material de carga al material compuesto.

En aún otro aspecto, la presente descripción proporciona un material compuesto obtenido por el método descrito en la presente memoria. El material compuesto se puede laminar o extruir. Por ejemplo, el material compuesto puede ser un producto bruto de colada (tal como un producto colado con enfriamiento directo), una palanquilla de extrusión (tal como, por ejemplo, una palanquilla redonda) o un lingote de laminación (tal como, por ejemplo, una palanquilla cuadrada o rectangular, un lingote de laminado, una extrusión, una laminilla, una tira, una placa, así como una chapa).

Breve descripción de los dibujos

Habiendo descrito generalmente de este modo la naturaleza de la invención, se hará ahora referencia a los dibujos adjuntos, que muestran a modo de ilustración, una realización preferida de la misma, y en los que:

La Figura 1 proporciona una representación gráfica del límite elástico (en MPa) como una función de la aleación (A o B), tratamiento de la palanquilla (de izquierda a derecha: 4 h/560°C; ninguno, 4 h/550°C o 24 h/375°C) y exposición a temperaturas durante 100 horas (■: 150°C, •: 200°C, □: 250°C, ◦: 300°C).

La Figura 2 proporciona una representación gráfica de la resistencia a la tracción (en MPa) como una función de la aleación (A o B), tratamiento de la palanquilla (de izquierda a derecha: 4 h/560°C; ninguno, 4 h/550°C o 24 h/375°C) y exposición a temperaturas durante 100 horas (■: 150°C, •: 200°C, □: 250°C, ◦: 300°C).

Descripción detallada

La presente descripción proporciona un material compuesto que presenta propiedades mecánicas aumentadas a temperaturas elevadas en relación con otros materiales compuestos, tales como al menos 250°C o al menos 300°C, incluyendo propiedades mecánicas aumentadas cuando se expone a temperaturas tan elevadas durante un largo período de tiempo (p. ej., 40 años o incluso 100 años). En algunas realizaciones, el material compuesto puede proporcionar propiedades mecánicas aumentadas para una exposición de hasta 350°C durante largos períodos de tiempo. Las composiciones y los materiales compuestos de aleación según las realizaciones descritas en la presente memoria se pueden utilizar en diversas aplicaciones, incluyendo aplicaciones donde es deseable una resistencia a altas temperaturas y/o una capacidad de extrusión. En un ejemplo, la aleación se puede utilizar como matriz para materiales compuestos de B₄C y otros materiales compuestos.

Según una realización, la matriz de aleación de aluminio del material compuesto comprende, esencialmente contiene o contiene, en porcentaje en peso:

	Si	0,05-0,30,
	Fe	0,04-0,6,
	Mn	0,80-1,50, y
	Mg	0,80-1,50, y
5	Cu	0,25 máximo,
		opcionalmente Mo, y si lo hubiera, 0,25 máximo.

El resto de la aleación de aluminio incluye aluminio e impurezas inevitables. Cada una de las impurezas inevitables puede estar presente en un porcentaje en peso máximo de 0,05, y el porcentaje en peso total máximo de las impurezas inevitables puede ser de 0,15, en una realización. La aleación puede incluir adiciones de aleación adicionales en realizaciones adicionales.

Tal como se ha indicado anteriormente, la matriz de aleación de aluminio del material compuesto tiene un contenido de Si (silicio) igual o inferior a (p. ej., hasta) 0,3 (en porcentaje en peso). En una realización, el contenido de Si de la aleación de aluminio puede estar entre aproximadamente 0,05 y aproximadamente 0,30, en porcentaje en peso. En el contexto de la presente descripción, el término "aproximadamente" significa que el valor numérico relacionado es parte de un intervalo que varía dentro del error experimental convencional. Por ejemplo, la matriz de aleación de aluminio de la presente descripción puede comprender al menos aproximadamente 0,05, 0,06, 0,07, 0,08, 0,09, 0,10, 0,11, 0,12, 0,13, 0,14, 0,15, 0,16, 0,17, 0,18, 0,19, 0,20, 0,21, 0,22, 0,23, 0,24, 0,25, 0,26, 0,27, 0,28 o 0,29 y/o como máximo de aproximadamente 0,30, 0,29, 0,28, 0,27, 0,26, 0,25, 0,24, 0,23, 0,22, 0,21, 0,20, 0,19, 0,18, 0,17, 0,16, 0,15, 0,14, 0,13, 0,12, 0,11, 0,10, 0,09, 0,08, 0,07 o 0,06 de Si (en porcentaje en peso). En algunas realizaciones, el contenido de Si de la matriz de aleación de aluminio puede ser igual o inferior a aproximadamente 0,26 (en porcentaje en peso). En otra realización más, el contenido de Si de la matriz de aleación de aluminio puede ser de aproximadamente 0,2 (en porcentaje en peso). Las adiciones deliberadas de Si, en presencia de Mg, pueden aumentar la resistencia del material compuesto a bajas temperaturas (<250°C), tal como por el endurecimiento por precipitación en la formación de precipitados de Mg-Si. Sin embargo, a temperaturas de 250°C o superiores, estas partículas de Mg-Si se vuelven más gruesas y no aportan resistencia. Como tal, en el contexto de la presente descripción, debe establecerse un límite superior en Si de ~0,3 para evitar la formación excesiva de fases de Mg-Si que de otro modo eliminarían el Mg de la solución sólida y disminuirían la resistencia a 250°C o más. El Si también se puede combinar con otras adiciones, tales como Fe y Mg, para formar fases intermetálicas que son térmicamente estables y pueden contribuir a la resistencia a altas temperaturas. Como tal, todavía en el contexto de la presente descripción, se requiere una adición mínima de Si de ~0,05 para promover la formación de estas fases intermetálicas.

La matriz de aleación de aluminio del material compuesto también tiene un contenido de Fe (hierro) igual o inferior a aproximadamente 0,6 (en porcentaje en peso). En una realización, la matriz de aleación de aluminio comprende hasta aproximadamente 0,6, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2, 0,1, 0,09, 0,08, 0,07, 0,06 o 0,05 de Fe (en porcentaje en peso). En una realización adicional, el contenido de Fe de la matriz de aleación de aluminio puede estar entre aproximadamente 0,04 y aproximadamente 0,6, en porcentaje en peso. En otra realización más, la matriz de aleación de aluminio puede comprender al menos aproximadamente 0,04, 0,05, 0,06, 0,07, 0,08, 0,09, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 o 0,5 y/o como máximo aproximadamente 0,6, 0,5, 0,4, 0,3, 0,2, 0,1, 0,09, 0,08, 0,07, 0,06 o 0,05 de Fe (en porcentaje en peso). En algunas realizaciones, el contenido de Fe de la matriz de aleación de aluminio puede ser igual o inferior a (p. ej., hasta) aproximadamente 0,40 (en porcentaje en peso). En otra realización, el contenido de Fe de la matriz de aleación de aluminio es de aproximadamente 0,4 (en porcentaje en peso).

Tal como se ha indicado anteriormente, la matriz de aleación de aluminio del material compuesto tiene un contenido de Mn (manganeso) entre aproximadamente 0,80 y aproximadamente 1,50 (en porcentaje en peso). En una realización, la aleación de aluminio comprende al menos aproximadamente 0,80, 0,85, 0,90, 0,95, 1,00, 1,05, 1,10, 1,15, 1,20, 1,25, 1,30, 1,35, 1,40 o 1,45 y/o como máximo aproximadamente 1,50, 1,45, 1,40, 1,35, 1,30, 1,25, 1,20, 1,15, 1,10, 1,05, 1,00, 0,95, 0,90 o 0,85 de Mn (en porcentaje en peso). En algunas realizaciones, el contenido de Mn de la matriz de aleación de aluminio es superior a aproximadamente 0,90 (en porcentaje en peso) e igual o inferior a aproximadamente 1,50 (en porcentaje en peso). En otra realización, el contenido de Mn de la matriz de aleación de aluminio está entre aproximadamente 1,00 y aproximadamente 1,10 (en porcentaje en peso). En una realización suplementaria, el de Mn de la matriz de aleación de aluminio es de aproximadamente 1,0 (en porcentaje en peso). En algunas realizaciones, se espera que el contenido de Mn disminuya durante la dosificación y que se pueda añadir Mn adicional para lograr un contenido de matriz de Mn entre aproximadamente 0,80 y aproximadamente 1,50.

Tal como se ha indicado anteriormente, el contenido de Mg (magnesio) de la matriz de aleación de aluminio del material compuesto comprende entre aproximadamente 0,80 y aproximadamente 1,50 (en porcentaje en peso). En una realización, la matriz de aleación de aluminio comprende al menos aproximadamente 0,80, 0,85, 0,90, 0,95, 1,00, 1,05, 1,10, 1,15, 1,20, 1,25, 1,30, 1,35, 1,40 o 1,45 y/o como máximo aproximadamente 1,50, 1,45, 1,40, 1,35, 1,30, 1,25, 1,20, 1,15, 1,10, 1,05, 1,00, 0,95, 0,90 o 0,85 de Mg (en porcentaje en peso). En algunas realizaciones, el contenido de Mg de la matriz de aleación de aluminio es superior a aproximadamente 1,00 (en porcentaje en peso) e igual o inferior a aproximadamente 1,50 (en porcentaje en peso). En otras realizaciones, el contenido de Mg de la matriz de

aleación de aluminio está entre aproximadamente 0,90 y aproximadamente 1,00 (en porcentaje en peso). En una realización suplementaria, el contenido de Mg de la matriz de aleación de aluminio es de aproximadamente 0,9 (en porcentaje en peso).

5 Opcionalmente, la matriz de aleación de aluminio del material compuesto puede comprender o incluir además un máximo de (p. ej., hasta) aproximadamente 0,2 de Cu (cobre, en porcentaje en peso). En algunas realizaciones, la presencia de Cu puede aumentar la resistencia de la aleación, tal como por formación de precipitados que contribuye al endurecimiento por precipitación. En otras realizaciones, el contenido de Cu de la matriz de aleación de aluminio es igual o inferior a aproximadamente 0,14 (en porcentaje en peso). En otra realización más, el contenido de Cu de la matriz de aleación de aluminio puede ser de aproximadamente 0,1 (en porcentaje en peso).

10 Opcionalmente, la matriz de aleación de aluminio del material compuesto puede comprender o incluir además un máximo de aproximadamente 0,25 de Mo. En algunas realizaciones, la presencia de Mo puede aumentar la resistencia a temperaturas elevadas de la aleación. En una realización, la matriz de aleación de aluminio del material compuesto comprende hasta aproximadamente 0,25, 0,24, 0,23, 0,22, 0,21, 0,20, 0,19, 0,18, 0,17, 0,16, 0,15, 0,14, 0,13, 0,12, 0,11 o 0,10 de Mo (en porcentaje en peso). En aún otra realización, la matriz de aleación de aluminio del material compuesto comprende hasta aproximadamente 0,25 de Mo (en porcentaje en peso). En algunas realizaciones, Mo puede reaccionar con el material de carga y, en tal realización, se añade hasta 0,25 de Mo a la aleación de aluminio antes del material de carga. Todavía en tal realización, el contenido de Mo en la matriz puede estar por debajo de 0,25. En una realización adicional, el Mo solo se añade a la aleación de aluminio si también se añade Ti u otro aditivo peritético (tal como Cr, V, Nb, Zr, Sr o Sc) a la aleación de aluminio antes de la adición del material de carga.

20 La matriz de aleación de aluminio del material compuesto puede contener otros elementos de aleación. Por ejemplo, en una realización donde la aleación se utiliza como material de matriz para un material compuesto que contiene material de carga de B₄C, se puede añadir al menos aproximadamente 0,20, entre aproximadamente 0,20 y aproximadamente 5,0, entre aproximadamente 0,20 y aproximadamente 1,00 o aproximadamente 1,0 de Ti (titanio - todo en porcentaje en peso) a la aleación líquida, antes de la adición de la carga, para mantener la fluidez (durante una operación de mezcla de líquido, por ejemplo). Cuando se utiliza como una aleación monolítica (p. ej., en ausencia de un material de carga tal como, por ejemplo, B₄C), se puede añadir hasta aproximadamente 0,05 de Ti y/o aproximadamente 0,01 de B (boro - en porcentaje en peso) para su uso como un refinador de granos. En el material compuesto, esta adición deliberada de Ti no está necesariamente presente en la matriz de aleación de aluminio y puede formar productos de reacción que recubren al menos parcialmente las partículas de carga (tales como, por ejemplo, partículas de B₄C). Como tal, en la matriz del material compuesto descrito en la presente memoria, el contenido de Ti puede estar por debajo de aproximadamente 0,05 e incluso por debajo de aproximadamente 0,01 (en porcentaje en peso).

30 En lugar de o en combinación con Ti, según lo indicado en el documento PCT/CA2013/050881 (publicado como el documento WO2014/075194, el 22 de mayo de 2014), se pueden utilizar otros aditivos para reaccionar con las partículas de carga y aumentar la fluidez del material compuesto durante operaciones de colada. Tales aditivos incluyen, pero no se limitan a, Cr (cromo), V (vanadio), Nb (niobio), Zr (circonio), Sr (estroncio), Sc (escandio) y cualquier combinación de los mismos.

40 Los materiales compuestos según las realizaciones descritas en la presente memoria pueden proporcionar una buena resistencia en un amplio intervalo de temperaturas y pueden proporcionar una resistencia aumentada en relación con otras aleaciones a altas temperaturas, particularmente después de una exposición a largo plazo a altas temperaturas. A temperatura ambiente, el endurecimiento por precipitación de Mg-Si es un mecanismo eficaz para reforzar las aleaciones como se describe en la presente memoria, pero su efecto disminuye a temperaturas más altas, debido al aumento de tamaño de grano de las partículas. Otros mecanismos de refuerzo, tales como el refuerzo de la dispersión y el refuerzo de la solución sólida, son más estables térmicamente. Las adiciones de Mn, Fe y Si en las aleaciones de aluminio de la presente descripción pueden producir una fracción volumétrica aumentada de partículas estables en segunda fase tales como Al-Fe-Mn-Si, que proporcionan refuerzo de la dispersión. Adicionalmente, las aleaciones de aluminio de la presente descripción contienen un exceso de Mg, que no está "ligado" a los precipitados de Mg-Si y, en cambio, se encuentra en una solución sólida donde puede proporcionar un refuerzo de la solución sólida. El refuerzo de la dispersión y el refuerzo de la solución sólida pueden lograr las propiedades mecánicas aumentadas a altas temperaturas descritas en la presente memoria, particularmente cuando se combinan sus efectos.

55 El material compuesto descrito en la presente memoria puede utilizarse para formar una variedad de artículos diferentes, y puede producirse inicialmente como una palanquilla. El término "palanquilla", como se emplea en esta memoria, puede referirse a palanquillas redondas para extrusión, así como palanquillas cuadradas o rectangulares para el proceso de laminación. El término "palanquilla" también incluye lingotes y otros productos intermedios que pueden producirse mediante una variedad de técnicas, incluyendo técnicas de colada, tales como colada continua o semicontinua y otras.

60 Los materiales compuestos según las realizaciones descritas en la presente memoria pueden procesarse además para crear productos. Por ejemplo, las palanquillas del material compuesto pueden calentarse a temperaturas entre 350-550°C y luego extruirse en varios perfiles, que generalmente tienen una conformación de sección transversal constante a lo largo de toda su longitud vendible. Las extrusiones de la aleación pueden templarse, tal como, por

templado con aire o agua, después de la extrusión, pero el templado rápido no es un requisito previo para la invención. Pueden utilizarse etapas de procesamiento adicionales en otras realizaciones, incluyendo las etapas de procesamiento conocidas en la técnica, tales como estiramiento para mejorar la rectilineidad. Se entiende que un artículo extruido puede tener una sección transversal constante en una realización, y puede procesarse además para cambiar la conformación o forma del artículo, tal como mediante corte, mecanizado, conexión de otros componentes u otras técnicas. Se pueden utilizar adicional o alternativamente otras técnicas de formación, que incluyen laminación, forjado u otras técnicas de trabajo.

Algunas de estas técnicas también pueden utilizarse para procesar materiales compuestos utilizando la aleación como matriz. Por ejemplo, una palanquilla de tal material compuesto puede colarse a partir de una masa fundida, como se describe a continuación. Un material compuesto resultante también se puede formar en una conformación deseada, tal como por extrusión, laminación, forjado, otros trabajos, mecanizado, etc. La aleación, o un material compuesto que incluye la aleación, también se puede colar por conformación utilizando una variedad de diferentes técnicas de colada por conformación.

Las realizaciones de las aleaciones descritas en la presente memoria se pueden utilizar para producir materiales compuestos, con la aleación como material de matriz, en combinación con un material de carga. Cabe señalar que el uso del término "matriz" no implica que la aleación constituya la mayor parte o la mayor proporción del peso, volumen, etc., del material compuesto, a menos que se especifique lo contrario. En cambio, la matriz es el material en el que está incrustado el material de carga y que une el material de carga entre sí, y la matriz puede ser completamente continua en algunas realizaciones.

En una realización, el material compuesto contiene hasta un 20% de fracción volumétrica del material de carga, y el material de matriz forma un 80% o más de la fracción volumétrica del material compuesto. Por ejemplo, en un material compuesto con un material de carga de B₄C, la fracción volumétrica del material de carga puede ser de aproximadamente 4%, 7%, 10,5%, 12%, 16% o 17,5% en diversas realizaciones. Se entiende que, en una realización, el 20% de la fracción volumétrica del material de carga mencionado anteriormente puede reflejar una fracción volumétrica de agregados de múltiples materiales de carga diferentes, y en otra realización, dicho 20% de fracción volumétrica puede ser una fracción volumétrica para un único tipo de material de carga (p. ej., B₄C) y pueden estar presentes otros tipos de materiales de carga.

El material de carga es B₄C. El material compuesto utiliza una aleación como se describe en la presente memoria como material de matriz y B₄C como material de carga. El B₄C en tal material compuesto puede proporcionar capacidad de absorción de neutrones, mientras que la matriz de aleación puede proporcionar resistencia y permitir que el material compuesto se forme en conformaciones útiles mediante técnicas convencionales de formación de metales, tales como laminación o extrusión. En otras realizaciones se pueden utilizar otros materiales de carga absorbentes de neutrones y/o de protección contra la radiación, y se entiende que el material de carga puede tener mayores capacidades de absorción de neutrones y protección contra la radiación que el material de matriz, en una realización.

Se puede utilizar un material compuesto según la presente realización para el almacenamiento, contención, protección, etc., de combustible nuclear gastado y otros materiales radiactivos. Por ejemplo, el material compuesto se puede utilizar para fabricar recipientes, barreras y/u otros componentes para su uso en tales aplicaciones. Asimismo, se puede utilizar B₄C en el material compuesto para proporcionar otras propiedades beneficiosas, tales como dureza, resistencia al desgaste, resistencia, diferentes propiedades de fricción, diferentes propiedades térmicas o eléctricas, etc.

Los materiales compuestos que utilizan la aleación de aluminio como matriz se pueden producir de diversas maneras. En una realización, la aleación puede mezclarse con el material de carga mientras la aleación está en forma líquida, y luego el material compuesto puede producirse mediante diversas técnicas de colada/moldeo posteriormente. Una de tales técnicas se describe en la patente estadounidense n.º 7.562.692, que utiliza técnicas para mantener la fluidez de la mezcla fundida, tal como al tener al menos 0,2% en peso de titanio presente en la mezcla, u otras técnicas descritas en la misma. Esta técnica es particularmente útil para materiales compuestos que incluyen materiales de carga de B₄C. En una realización, la aleación de matriz fundida incluye al menos 0,2 o 0,2 a 2,0, en porcentaje en peso, de titanio, que puede estar presente en la aleación antes de la fusión o puede añadirse a la propia masa fundida, p. ej., en forma de una aleación maestra de Al-Ti, gránulos o polvos que contienen titanio, etc. El material de carga de B₄C se añade a la masa fundida y el titanio reacciona con el B₄C para formar una capa de productos de reacción que contienen titanio, tales como boruro de titanio (p. ej., TiB₂), en al menos parte de las superficies de las partículas de B₄C. La capa de producto de reacción también puede contener otros elementos, tales como carbono y/o aluminio. La mayoría de los productos de reacción no se dispersan en la matriz y resisten una reacción adicional entre las partículas de B₄C y la matriz de aleación de aluminio. De este modo, el material compuesto fundido se puede mantener durante largos períodos de tiempo sin pérdida de fluidez provocada por la formación gradual de carburos de aluminio y otros compuestos, lo que ayuda a mantener la fluidez de la mezcla fundida. Las partículas de B₄C pueden retener este recubrimiento de producto de reacción después de la solidificación de la matriz. Generalmente, este método se puede realizar preparando una mezcla de una matriz de aleación de aluminio como se describe en la presente memoria, que incluye al menos 0,2 o entre 0,2 y 2, en porcentaje en peso, de Ti, y hasta un 20% en volumen de partículas de B₄C, agitando la mezcla fundida para humedecer la aleación de aluminio con las partículas de B₄C y distribuir las partículas por todo el volumen de la masa fundida, y luego colar la mezcla fundida.

- También pueden utilizarse otros métodos para formar el material compuesto. En otra realización, la aleación puede infiltrarse en el material de carga, tal como proporcionando el material de carga en forma porosa (p. ej., forma de material particulado, preforma porosa, etc.) fundiendo la aleación para crear infiltración. En una realización adicional, se pueden utilizar técnicas de pulvimetalurgia, por combinación de partículas de la aleación con partículas del material de carga (B₄C), y luego calentamiento/sinterización para formar el material compuesto. Pueden utilizarse técnicas diferentes adicionales en otras realizaciones. Se entiende que las técnicas descritas en la presente memoria para producir productos de aleación también se pueden utilizar en la producción de materiales compuestos que utilizan tales aleaciones, tales como templado con agua después de la extrusión, etc. El material de carga se puede proporcionar en forma porosa y/o particulada para algunas o todas estas realizaciones de formación.
- El material compuesto se puede obtener mediante un proceso que incluye en líneas generales proporcionar los elementos de la matriz, añadir las partículas a la matriz y colar el material compuesto resultante. El proceso puede incluir opcionalmente una etapa de extrusión, laminación, homogeneización y/o tratamiento térmico del material compuesto.
- La presente invención se entenderá más fácilmente haciendo referencia al siguiente ejemplo que se da para ilustrar la invención en lugar de limitar su alcance.

Ejemplo I

- La composición a granel A enumerada en la Tabla 1 ("composición inicial") se agrupó a 740°C en un horno eléctrico de 36 kg y se agitó utilizando un impulsor de grafito. Se selló el horno, se aplicó un vacío y se inyectaron las partículas de B₄C con un tamaño promedio de partículas de 17,5 µm en la aleación líquida para producir 10,5% en volumen de material compuesto. Después de 5 minutos de agitación, se rompió el vacío y se abrió el horno. El material compuesto líquido se mantuvo durante 60-120 min a 700-720°C para simular la longitud de un lote de colada con ED comercial y luego el metal se vertió en un molde de acero permanente de 106 mm de diámetro x 500 mm y se solidificó para producir palanquillas individuales. La composición inicial antes de la adición de polvo de B₄C contenía una adición deliberada de Ti de 1,0% de Ti (p/p) para formar una capa protectora de compuestos de reacción que contienen Ti en la superficie de las partículas de B₄C para evitar un ataque adicional entre B₄C y la aleación de matriz de aluminio y para mantener la fluidez. Los resultados del segundo análisis en la Tabla 1 ("Después de la adición de B₄C") es para la matriz de aleación después de la mezcla de B₄C y el mantenimiento y eliminación de las partículas de B₄C en una muestra de metal líquido mediante filtración a través de un disco cerámico poroso (conocido con el nombre comercial de PoDFA). De esta manera, también se elimina cualquier capa de reacción sobre la superficie de las partículas de modo que este análisis es la composición de matriz real. En el material compuesto, el contenido de Ti de la matriz era <0,01% (p/p), lo que indica que prácticamente la totalidad de Ti añadido a la masa fundida inicial había reaccionado con el material particulado. Sin desear quedar ligado a teoría alguna, se estipula que la ligera presencia de boro (B) en la masa fundida inicial se debió a la contaminación en el horno por una pequeña cantidad de B₄C. En este experimento, el contenido inicial de Mg de la aleación antes de la mezcla fue de 0,77% (p/p), lo que resultó en 0,69% de Mg (p/p) en la matriz final. Se podría añadir Mg antes de la adición de partículas y, en tales casos, la fluidez después de su mantenimiento durante 1 h fue suficiente para permitir la colada de lingotes.

Tabla 1. Composición del material A antes y después de la adición y mezcla de partículas de B₄C. Medido por espectroscopia de emisión óptica (todos los valores en porcentaje en peso)

Condición	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	B
Composición inicial	0,71	0,47	0,08	0,73	0,77	<0,01	0,01	0,02	0,42	0,04
Después de la adición de B ₄ C	0,76	0,46	0,08	0,68	0,69	<0,01	0,01	0,02	<0,01	<0,01

- Los lingotes resultantes se mecanizaron en palanquillas con 101,6 mm de diámetro y 200 mm de largo. Las palanquillas se homogeneizaron durante 2 h a 560°C y se enfriaron a 350°C/h. Estas se extruyeron en un perfil de 3 x 42 mm utilizando una temperatura de palanquilla de 480°C y una velocidad de salida de 34 m/min, lo que dio temperaturas de salida en el intervalo de 520-540°C. Las palanquillas se calentaron por inducción (480°C) hasta la temperatura de extrusión en 2 minutos. El perfil se templó con agua y luego se envejeció durante 8 h/170°C. Acto seguido, las muestras se expusieron durante 100 horas a 150, 200, 250 y 300°C y se ensayó la tracción a las temperaturas de exposición correspondientes según la norma ISO 6896-2: 2011 (E).

- La composición del material B se muestra en la Tabla 2. El material B se produjo como un material compuesto que contenía 10,5% en volumen de B₄C de la misma manera que se ha descrito anteriormente para el material A. La Tabla 2 muestra la composición después de la dosificación inicial ("Composición inicial") y después de la adición de las partículas de B₄C, manteniéndose durante 60 min y filtración del material particulado ("Después de la adición de B₄C"). De nuevo, se añadió Mg durante la dosificación inicial antes de la adición de partículas. Las palanquillas de extrusión se produjeron mediante el mismo método que se ha descrito anteriormente. La adición inicial de Ti fue de 1,0% (p/p), la concentración de Ti medida en la masa fundida fue de 0,39% (p/p) y, después de mezclar, este volvió a reaccionar

completamente (contenido calculado de menos de 0,01) para proporcionar una capa protectora de compuesto de Ti alrededor de las partículas. El experto en la técnica comprenderá que la medición precisa de este nivel de Ti resulta difícil con EEO convencional. La adición de Mg se realizó antes de la adición de partículas de B₄C y la mezcla tuvo suficiente fluidez después de 60 min para ser colada en moldes permanentes. Se llevó a cabo un ensayo de fluidez utilizando un molde K convencional (precalentado a 425°C) para moldear una barra en una muestra líquida del material compuesto sacada del horno después de un mantenimiento de 60 m. La aleación B fue capaz de producir una longitud de barra colada de 315 mm. Se aplicaron tres tratamientos térmicos a una palanquilla: (i) de bruto de colada (ninguno), (ii) 4 h/550°C y enfriada a 300°C/h o (iii) 24 h/375°C y enfriada a 300°C/h.

Tabla 2. Composición del material B antes y después de la adición y mezcla de partículas de B₄C. Medido por espectroscopia de emisión óptica (% en peso)

Condición	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	B
Composición inicial	0,24	0,41	0,14	1,1	0,99	<0,01	0,01	0,02	0,39	0,01
Después de la adición de B ₄ C	0,26	0,41	0,14	1,04	0,92	<0,01	0,01	0,02	<0,01	<0,01

Las palanquillas se extruyeron en el mismo perfil que se ha descrito anteriormente, utilizando una temperatura de palanquilla de 430-440°C y una velocidad de salida de 8 m/min. El perfil se templó con aire a la salida de la prensa. Las temperaturas de salida de la boquilla variaron entre 500-540°C. No se aplicó ningún tratamiento térmico adicional.

Tabla 3. Conductividad eléctrica del material B

Material compuesto	Tratamiento	Palanquilla	Extrusión
B	Ninguno	24,3	28,9
B	4 h/550°C	31,8	32,54

La Tabla 3 muestra los valores de conductividad eléctrica del material B para la palanquilla y la extrusión. La conductividad es un indicador del nivel de Mn en solución sólida. La homogeneización convencional y el tratamiento a 375°C dieron valores de conductividad similares e indican que se produjo una precipitación extensa de manganeso durante la homogeneización. Estos números no cambiaron durante la extrusión, lo que sugiere que tuvo lugar una escasa disolución de estas partículas. Aunque la similitud de los valores para los dos tratamientos indica que los niveles de solución sólida de Mn y las fracciones volumétricas de las partículas de Mn eran similares, se esperaría una densidad de partículas más alta y un tamaño de partículas más fino para el tratamiento a temperaturas más bajas. Por el contrario, la palanquilla de bruto de colada tenía una conductividad más baja debido al Mn retenido en la solución sólida, pero este valor aumentó durante la extrusión, lo que indica que tuvo lugar una precipitación significativa durante el recalentamiento por inducción rápida y el ciclo térmico de extrusión.

La Tabla 4 y la Figura 1 comparan los resultados del límite elástico para los materiales A y B con los tres tratamientos a una palanquilla, en función de la exposición y la temperatura de ensayo. Los valores de Δ% representan el aumento o disminución de la resistencia en relación con el material compuesto A. Hasta 200°C, el material A exhibió la mayor resistencia debido, al menos en parte, a los efectos residuales de la estructura del precipitado de Mg-Si formada durante la etapa de envejecimiento artificial. Se espera que las propiedades del material A a 150 y 200°C se deterioren con un mayor tiempo de exposición, tal como 1000 h debido al aumento de tamaño de grano y disolución de esta estructura, que es el comportamiento típico de las aleaciones basadas en 6XXX. A 250°C o más, el material B tenía una mayor resistencia para todas las condiciones de palanquilla, lo que da una mejora (hasta un 18,2%) en el límite elástico en comparación con el material A. El material bruto de colada ("ninguno" en la Tabla 4) en conjunto dio la mayor resistencia en todo el intervalo de temperaturas ensayadas, seguido del tratamiento térmico a 375°C y la homogeneización a 550°C.

Tabla 4. Resultados del límite elástico (MPa)

Mat.	Tratamiento	150°C	Δ%	200°C	Δ%	250°C	Δ%	300°C	Δ%
A	4 h/ 560°C	256,1	0,0	142,9	0,0	64,8	0,0	34,6	0,0
B	Ninguno	161,2	-37,1	112,5	-21,2	76,6	18,2	51,9	50,00

B	4 h/ 550°C	123,7	-51,7	94,8	-33,6	67,3	3,9	46,6	34,7
B	24 h/ 375°C	158,8	-38,0	113,5	-20,6	72,7	12,2	45,4	31,2

Las tendencias de la resistencia a la tracción mostradas en la Tabla 5 y la Figura 2 fueron similares, con variantes del material B que presentan una resistencia mejorada de (hasta un 25%) sobre el material A a 250°C y más. De nuevo, el material bruto de colada dio mayor resistencia que los otros tratamientos a 250°C o más.

Tabla 5. Resultados de la resistencia a la tracción (MPa)

Mat.	Tratamiento	150°C	Δ%	200°C	Δ%	250°C	Δ%	300°C	Δ%
A	4 h/ 560°C	279,9	0,0	165,4	0,0	85,3	0,0	46,9	0,0
B	Ninguno	216,4	-22,7	153,9	-7,0	106,4	24,7	73,3	55,7
B	4 h/ 550°C	199,8	-28,6	141,2	-14,7	96,1	12,7	68,0	45,0
B	24 h/ 375°C	211,3	-24,5	150,3	-9,2	101,8	19,3	70,8	51,0

5 Por lo tanto, el material de matriz del material B para la producción de 10,5% en volumen de un material compuesto de Al-B₄C que, cuando se procesa en una extrusión, tiene propiedades mejoradas a temperaturas elevadas a 250°C o superiores en comparación con los materiales tipo 6XXX disponibles actualmente. Cuando se utiliza con una adición inicial de Ti de 0,5-5,0% (p/p) o una concentración de masa fundida inicial de 0,2 a 1,0% de Ti (p/p, balance de masa), el material mantiene una excelente fluidez en escalas de tiempo de producción comercial y puede, por lo tanto, producirse comercialmente mediante una ruta de colada con ED. El Mg se puede añadir con éxito antes de la adición de partículas de B₄C. La palanquilla colada se puede procesar con un ciclo de homogeneización de 550°C o menos para producir una microestructura adecuada para resistencia a temperaturas elevadas o, alternativamente, para una resistencia óptima a 250°C o superior, la palanquilla de bruto de colada se puede extruir en combinación con una inducción o precalentamiento alimentado por gas a una temperatura de palanquilla en el intervalo de 350-550°C.

15 Ejemplo II

El material compuesto de composición a granel C enumerado en la Tabla 6 con una adición de 10,5% en volumen de B₄C se produjo según el procedimiento descrito en el Ejemplo I. La composición inicial antes de la inyección de polvo de B₄C contenía una adición deliberada de Mo. Hubo una cierta disminución en el contenido de Mo entre el valor de adición previa a B₄C y posterior a B₄C y el valor de filtración, lo que sugiere que hubo una cierta pérdida de este elemento en las fases primarias que contenían Mo. Esto fue confirmado por metalografía óptica posterior. El material compuesto líquido después de su mantenimiento durante 60 min fue capaz de producir una longitud de barra colada de 315 mm en el ensayo de molde K convencional descrito en el Ejemplo I.

25 Tabla 6. Composición del material compuesto C antes y después de la adición y mezcla de partículas de B₄C. Medido por EEO (todos los valores en % en peso). Después de añadir las partículas de B₄C, el material compuesto se mezcló, se filtró y se mantuvo durante 60 min.

Condición	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	B	Mo
Composición inicial	0,26	0,33	<,01	1,09	1,01	<,01	0,01	0,01	0,29	0,02	0,24
Después de la adición de B ₄ C	0,29	0,32	<,01	0,97	0,95	<,01	0,01	0,01	<,01	0,02	0,18

El material compuesto se coló en palanquillas de 101 mm de diámetro en un molde permanente precalentado. Se aplicaron los siguientes tratamientos térmicos a las palanquillas:

- "Bruto de colada", es decir, sin tratamiento térmico;
- 24 h/375°C; o
- 12 h/250°C y 24 h/375°C.

5 Las palanquillas de control y tratadas térmicamente se extruyeron en un perfil de 7 x 25 mm utilizando una temperatura de palanquilla de ~ 500°C y una velocidad de salida de 20 m/min. Las temperaturas de salida de la boquilla fueron de aproximadamente 550°C. Las longitudes de la extrusión se expusieron a 300°C durante 100 h y luego se ensayó la tracción a 300°C. Las propiedades de tracción se enumeran en la Tabla 7 en comparación con el material compuesto B (descrito en el Ejemplo I).

Tabla 7. Propiedades de tracción a 300°C (LE = límite elástico; RMT = resistencia máxima a la tracción, ambos en MPa) del material compuesto C en comparación con el material compuesto B en productos de colada de control y tratados térmicamente.

	LE de C	LE de B	RMT de C	RMT de B
24/375°C	53,2	45,4	73,3	70,8
Colada	48,3	51,9	68,5	73,3
12/250°C + 24/375°C	53,3		75,1	

10 La adición de Mo dio un aumento útil del límite elástico a 300°C de aproximadamente 2% en comparación con el material compuesto B pero solo para las palanquillas homogeneizadas durante 24 h a 375°C. En el caso de las palanquillas donde no se aplicó ningún tratamiento antes de la extrusión, el material que contenía Mo era ligeramente más blando. Las razones de este comportamiento no se comprenden actualmente pero, sin desear quedar ligado a teoría alguna, el Mo tiene una difusividad muy baja en aluminio y se cree que sería posible que se requiera el tratamiento prolongado a 375°C para provocar la precipitación de dispersoides que contienen Mo. El tratamiento de
 15 homogeneización híbrido donde se aplicó un remojo de 12 h/250°C antes de su mantenimiento a 375°C no proporcionó ninguna mejora adicional significativa en la resistencia.

Si bien invención se ha descrito en relación con realizaciones preferentes de la misma, se entenderá que la invención se define por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un material compuesto que comprende:
- (i) una matriz de una aleación de aluminio que comprende, en porcentaje en peso:
- Si 0,05-0,30,
- 5 Fe 0,04-0,6,
- Mn 0,80-1,50,
- Mg 0,80-1,50,
- Cu 0,20 máximo,
- opcionalmente Mo, y si lo hubiera, 0,25 máximo, y
- 10 siendo el resto aluminio e impurezas inevitables; y
- (ii) partículas de un material de carga dispersas en la matriz, en donde el material de carga es B₄C, las partículas están al menos parcialmente recubiertas con un producto de reacción entre un aditivo y B y el aditivo se selecciona del grupo que consiste en Ti, Cr, V, Nb, Zr, Sr, Sc y cualquier combinación de los mismos.
2. El material compuesto de la reivindicación 1, en donde el aditivo es Ti.
- 15 3. El material compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, en donde la matriz comprende además Mo.
4. El material compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en donde:
- el contenido de Si de la matriz es de 0,26 máximo, en porcentaje en peso;
 - el contenido de Fe de la matriz es de 0,40 máximo, en porcentaje en peso;
 - el contenido de Mn de la matriz es superior a 0,90, en porcentaje en peso; y/o
- 20 • el contenido de Mg en la matriz es superior a 1,00, en porcentaje en peso.
5. El material compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde el material de carga tiene una fracción volumétrica de hasta el 20% en el material compuesto.
6. Un método para fabricar el material compuesto de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, comprendiendo dicho método:
- 25 (i) preparar una aleación de aluminio fundido combinando, en porcentaje en peso:
- Si 0,05-0,30,
- Fe 0,04-0,6,
- Mn 0,80-1,50,
- Mg 0,80-1,50,
- 30 Cu 0,20 máximo,
- opcionalmente Mo, y si lo hubiera, 0,25 máximo,
- un aditivo seleccionado del grupo que consiste en Ti, Cr, V, Nb, Zr, Sr, Sc y cualquier combinación de los mismos, y
- siendo el resto aluminio e impurezas inevitables;
- 35 (ii) añadir partículas de un material de carga a la aleación de aluminio fundido para formar una mezcla fundida que tiene el material de carga disperso por toda la aleación de aluminio fundido, en donde el material de carga es B₄C y las partículas están al menos parcialmente recubiertas con un producto de reacción entre el aditivo y B; y
- (iii) colar la mezcla fundida para formar el material compuesto para obtener una palanquilla de bruto de colada.
7. El método de la reivindicación 6, en donde el aditivo es Ti y en donde el material compuesto se obtiene añadiendo entre el 0,20 y el 2,00 por ciento en peso de Ti a la aleación de aluminio antes de la adición de las partículas al material compuesto.
- 40

8. El método de la reivindicación 6 o la reivindicación 7, que comprende además extruir o laminar la palanquilla de bruto de colada para obtener un producto extruido o laminado.
9. El método de la reivindicación 6 o la reivindicación 7, que comprende además homogeneizar la palanquilla de bruto de colada para obtener un producto homogeneizado.
- 5 10. El método de la reivindicación 9, que comprende además extruir o laminar el producto homogeneizado para obtener un producto extruido o laminado.
11. El método de la reivindicación 8 o 10, que comprende tratar térmicamente de manera adicional el producto extruido a una temperatura de entre 350°C y 400°C y durante un período de tiempo de entre 2 y 30 horas.
- 10 12. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 6 a 11, que comprende además, antes de la etapa (iii), agitar la mezcla fundida para humedecer la aleación de aluminio con las partículas del material de carga y distribuir las partículas por todo el volumen de la mezcla fundida.

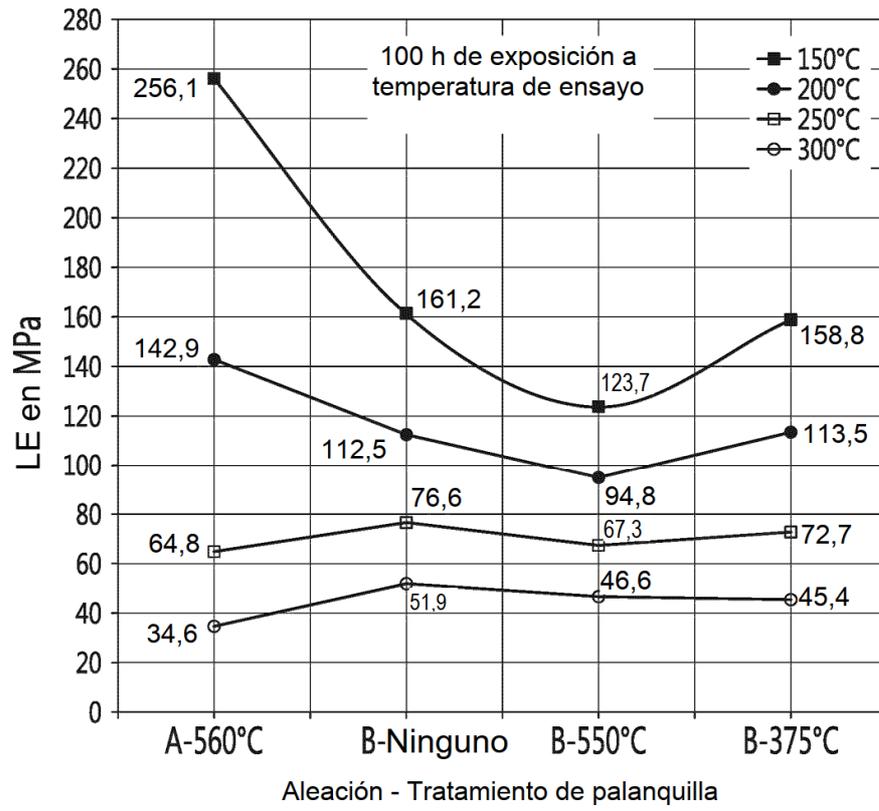


Figura 1

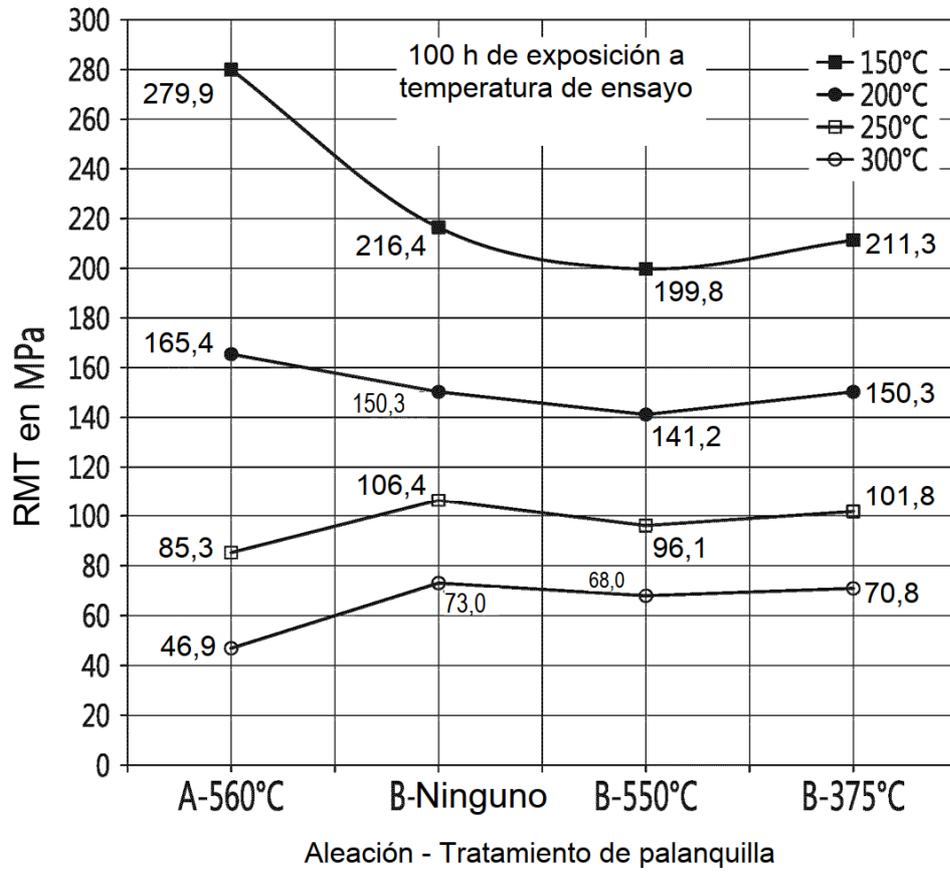


Figura 2