

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 617 696**

51 Int. Cl.:

**C22C 16/00** (2006.01)

**G21C 21/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.06.2005 PCT/SE2005/001000**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.01.2006 WO06004499**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.06.2005 E 05753946 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.12.2016 EP 1771591**

54 Título: **Caja de combustible en un reactor nuclear de agua en ebullición**

30 Prioridad:

**06.07.2004 US 585522 P**  
**22.10.2004 SE 0402561**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**19.06.2017**

73 Titular/es:

**WESTINGHOUSE ELECTRIC SWEDEN AB**  
**(100.0%)**  
**721 63 Västerås, SE**

72 Inventor/es:

**HALLSTADIUS, LARS;**  
**DAHLBÄCK, MATS;**  
**LIMBÄCK, MAGNUS;**  
**BATES, JOHN y**  
**DOUGHERTY, JAMES**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 617 696 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**

Caja de combustible en un reactor nuclear de agua en ebullición

**5 Campo técnico**

La presente invención se refiere a cajas de combustible en reactores nucleares de agua en ebullición y a un procedimiento para la fabricación de dichas cajas de combustible que comprenden chapas metálicas.

**10 Descripción de la técnica anterior**

En los reactores nucleares de agua en ebullición el combustible nuclear se dispone en pastillas de combustible que se disponen en barras de combustible que, a su vez, se disponen en una caja de combustible. Un conjunto de distribución y otros elementos diversos conocidos entre las personas especializadas en la técnica. Las cajas de combustible están dispuestas en forma de tuberías alargadas con aberturas en los extremos. Las cajas de combustible se fabrican a partir de chapas metálicas que se doblan y se sueldan juntas, consistiendo dichas chapas metálicas normalmente en una aleación de zirconio. Cuando se exponen las aleaciones de zirconio a irradiación neutrónica, crecen. Durante el funcionamiento de un reactor nuclear de agua en ebullición, las cajas de combustible están expuestas a agua caliente e irradiación neutrónica, lo que ocasionará el crecimiento y la corrosión de las cajas de combustible. La magnitud de este crecimiento inducido por neutrones es diferente según las diferentes aleaciones. Cuando el material de la caja de combustible crece puede ocasionar el doblado de la caja de combustible. La vida útil de una caja de combustible en un reactor nuclear de agua en ebullición depende de la resistencia a la corrosión y la resistencia al doblado.

En la patente de EE.UU. 5.805.656, se describen una caja de combustible y un procedimiento para fabricar dicha caja de combustible. El problema que se pretende resolver consiste en proporcionar una caja de combustible con una mejor resistencia al crecimiento inducido por neutrones y a la corrosión en comparación con las cajas de combustibles conocidas anteriormente. En dicha patente de EE.UU. esto se resuelve uniendo capas de diferentes aleaciones en una capa exterior y una capa interior a una chapa metálica. La capa interior es de una aleación que tiene una resistencia más alta al crecimiento por irradiación y la capa exterior tiene una resistencia más alta a la corrosión.

Aunque una caja de combustible de acuerdo con la Patente de EE.UU. proporciona unas propiedades de resistencia al crecimiento inducido por neutrones favorable y de resistencia a la corrosión favorable, no obstante, resulta complicado fabricar chapas metálicas con varias capas. Por consiguiente, existe necesidad de una alternativa a las cajas de combustible conocidas, que comprenda únicamente una capa y que tenga al menos la misma resistencia favorable al crecimiento inducido por neutrones y a la corrosión que las chapas metálicas conocidas.

El documento US 5838753 describe un proceso para fabricar un tubo de envainado de barra de combustible nuclear que comprende el beta enfriamiento de un tocho de aleación de zirconio que consiste esencialmente en de 0,5 a 3,25 por ciento en peso de niobio, de 0,3 a 1,8 por ciento en peso de estaño, siendo el resto de la aleación esencialmente zirconio de calidad nuclear con impurezas incidentales, por calentamiento a una temperatura en el intervalo beta por encima de 950 °C y enfriamiento rápido del tocho a una temperatura por debajo de la comprendida entre la temperatura alfa más beta y la temperatura de transformación alfa para formar una estructura martensítica; extrusión del tocho beta enfriado a una temperatura por debajo de 600 °C para formar un hueco; recocido del hueco por calentamiento a una temperatura de hasta 590 °C; laminación a paso de peregrino del hueco recocido; y recocido final del hueco recocido laminado a paso de peregrino a una temperatura de hasta 590 °C para formar el tubo de envainado de barra de combustible nuclear que comprende una aleación que tiene una microestructura de precipitados de segunda fase de beta niobio distribuidos uniformemente formando intragranular e intergranularmente precipitados de segunda fase resistentes a la radiación en la matriz de aleación.

El documento US 5230758 describe una aleación que comprende, en porcentaje en peso, de 0,5 a 2,0 de niobio, de 0,7 a 1,5 de estaño, de 0,07 a 0,14 de hierro y de 0,03 a 0,14 de al menos uno entre níquel y cromo, y al menos un total de 0,12 de hierro, níquel y cromo y hasta 220 ppm de C, siendo el resto esencialmente zirconio. La aleación también se somete preferiblemente a recocidos de recristalización intermedios y un recocido de atenuación final, por ejemplo, a 466 °C durante 3 h.

El documento US 4649023 describe que artículos, tales como tuberías, que tienen una excelente resistencia a la corrosión por vapor a temperaturas elevadas y por hidruración, se producen a partir de aleaciones de zirconio que contienen de 0,5 a 2,0 por ciento de niobio, hasta 1,5 por ciento de estaño y hasta 0,25 por ciento de un tercer elemento de aleación, como hierro, cromo, molibdeno, vanadio, cobre, níquel y tungsteno. Los artículos se forman por tratamiento beta de la aleación, deformándolos inicialmente a una temperatura por debajo de 650 °C y deformándolos posteriormente a través de etapas de trabajo en frío también por debajo de 650 °C, recocido del material entre las etapas de trabajo en frío a una temperatura comprendida entre 500 y 650 °C y recocido final de los mismos a una temperatura por debajo de 650 °C para proporcionar artículos que tienen una microestructura de

precipitados finos de menos de aproximadamente 800 ángstroms dispersados homogéneamente en todo el zirconio.

### Sumario de la invención

5 Un objeto de la presente invención consiste en proporcionar una caja de combustible con una chapa metálica homogénea para un reactor nuclear de agua en ebullición y un procedimiento para fabricar dicha caja de combustible, en el que dicha chapa metálica crece en un grado reducido al ser expuesta a irradiación neutrónica en comparación con las chapas metálicas conocidas para reactores nucleares de agua en ebullición.

10 Un objeto más de la presente invención consiste en proporcionar una caja de combustible para un reactor nuclear de agua en ebullición y un procedimiento para fabricar dicha caja de combustible, teniendo dicha caja de combustible una resistencia a la corrosión y al crecimiento inducido por neutrones favorable y fabricándose dicha caja de combustible de un material homogéneo.

15 Estos objetos se satisfacen con un procedimiento y un dispositivo de acuerdo con las reivindicaciones 1 y 9.

Otras ventajas se consiguen con las características que se definen en las reivindicaciones dependientes.

20 Una idea básica asociada a la presente invención consiste en proporcionar una chapa metálica que consiste en una aleación de zirconio que comprende partículas en fase secundaria que contienen niobio que consisten esencialmente solo en partículas  $\beta$ -niobio.

25 En esta solicitud, debe entenderse por partículas en fase secundaria partículas en la aleación que tienen otra composición que la de la parte principal de la aleación. Partículas  $\beta$ -zirconio son partículas en la aleación de zirconio que contienen zirconio y niobio, siendo la mayor parte zirconio. Partículas  $\beta$ -niobio son partículas en la aleación de zirconio que consisten en su mayor parte en niobio. Las partículas  $\beta$ -niobio comprenden más de un 90 por ciento en peso de niobio y, preferiblemente, más de un 99 por ciento en peso de niobio. Cuando está presente niobio en una aleación de zirconio, se forman partículas en fase secundaria que contienen niobio, que son partículas en la aleación de zirconio que contienen niobio o una mezcla de niobio y zirconio. Si está presente el niobio en la aleación de zirconio en una concentración suficientemente alta, pueden estar presentes partículas en fase secundaria, en una primera fase, como una mezcla de partículas  $\beta$ -zirconio y partículas  $\beta$ -niobio y, en una segunda fase, estar presentes como partículas  $\beta$ -niobio solamente. La primera fase es estable a una temperatura más alta que la segunda fase. El límite de fase para partículas de fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio es el límite de fase entre la primera fase y la segunda fase. Si se mantiene la temperatura a cierto nivel por debajo de la temperatura para el límite de fase para partículas de fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio, se transformarán las partículas  $\beta$ -zirconio en partículas  $\beta$ -niobio.

35 En la descripción se utiliza el término material para el objeto que pasa a través de las etapas de tratamiento hasta que el material está listo-tratado para una chapa metálica.

40 De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención, el procedimiento comprende la fabricación de una chapa metálica que comprende la etapa de proporcionar un material de una aleación de zirconio que consiste principalmente en zirconio, en el que los principales materiales de aleación de la aleación comprenden niobio, en el que la aleación comprende niobio que contiene partículas en fase secundaria y en el que ningún material de aleación está presente en un contenido por encima de un 1,6 por ciento en peso. El procedimiento comprende además las etapas de someter el material a al menos una laminación en caliente, someter el material a al menos un primer  $\beta$ -enfriamiento y someter el material laminado en caliente a al menos una laminación en frío. Después de dicho al menos una laminación en frío y después de dicho primer  $\beta$ -enfriamiento, el procedimiento comprende además la etapa del recocido de transformación del material laminado en frío a una temperatura por debajo del límite de fase para las partículas de fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio, durante un período de tiempo suficiente para que esencialmente todas las partículas de fase secundaria que contienen niobio se transformen en partículas  $\beta$ -niobio, que son partículas en la aleación de zirconio con un contenido en niobio por encima de un 90 por ciento en peso.

55 Con este procedimiento, se proporciona una aleación de zirconio que crece solo en grado reducido cuando se expone a irradiación neutrónica y que tiene una resistencia a la corrosión favorable. Naturalmente, se pueden incluir otras etapas en el procedimiento. Asimismo, las diferentes etapas del procedimiento se pueden llevar a cabo en orden diferente.

60 El  $\beta$ -enfriamiento es muy conocido entre las personas especializadas en la técnica e implica calentar la aleación de zirconio a una alta temperatura, de manera que se obtiene una estructura de cristal del tipo cúbica centrada en el cuerpo (bcc por sus siglas en inglés) en la aleación de zirconio, y enfriar rápidamente a continuación la aleación de zirconio para obtener una estructura de cristal de tipo hexagonal compacta (hcp por sus siglas en inglés). A través de este procedimiento la aleación de zirconio adquiere una estructura aleatoria.

65 El primer  $\beta$ -enfriamiento se puede llevar a cabo antes de la laminación en caliente. Siendo este el caso, se puede

lograr en cierto grado la estructura en el material en la siguiente laminación en caliente y en las demás etapas posteriores. Alternativamente, se puede llevar a cabo el primer  $\beta$ -enfriamiento entre dos de dicha al menos una laminación en caliente y dicha al menos una laminación en frío o entre laminaciones en caliente.

5 Para obtener una estructura aleatoria de la aleación, ha de realizarse un segundo  $\beta$ -enfriamiento tras la última laminación en frío.

10 En caso de que el procedimiento comprenda un segundo  $\beta$ -enfriamiento en una última etapa sobre un producto casi acabado, es ventajoso que el procedimiento comprenda una deformación en frío entre el segundo  $\beta$ -enfriamiento y el recocido de transformación, en la que se estira el material para que la deformación remanente sea entre 1% y 7% del tamaño original antes del estirado. Con una deformación en frío antes del recocido de transformación, se consigue más rápidamente el resultado deseado para la composición de partículas en fase secundaria.

15 La temperatura durante el recocido de transformación afecta la velocidad a la que se transforman las partículas  $\beta$ -zirconio en partículas  $\beta$ -niobio. La velocidad depende en parte de la velocidad de difusión a la que se difunde el niobio en el zirconio y en parte de la velocidad de nucleación a la que se forman partículas de niobio en el zirconio. La velocidad de difusión aumenta con la temperatura, al tiempo que la velocidad de nucleación disminuye con la temperatura. El recocido de transformación se lleva a cabo a entre 450 °C y 600 °C, ventajosamente a entre 500 °C y 600 °C, y preferiblemente, a entre 520° C y 580 °C, para que la transformación sea rápida.

20 El período de tiempo durante el cual debe proseguir el recocido de transformación depende de la temperatura. Si se mantiene la temperatura a ente 500 °C y 600 °C, el recocido de transformación se lleva a cabo preferiblemente durante 6 a 10 horas y al menos durante 3 horas o más. A temperaturas más bajas, el recocido de transformación debe proseguir durante más tiempo.

25 Se puede utilizar un grupo de aleaciones para conseguir buenas propiedades en lo que se refiere a la corrosión y el crecimiento inducido por neutrones, en las que el contenido en niobio es de 0,5 a 1,6 por ciento en peso, el contenido en hierro es de 0,3 a 0,6 por ciento en peso y el contenido en estaño es de 0,5 a 0,85 por ciento en peso.

30 Podría haber otros materiales presentes en la aleación, cuyo contenido, no obstante, es inferior a 0,05 por ciento en peso.

35 Otro grupo de aleaciones con propiedades especialmente favorables se denomina Zirlo™, un grupo de aleaciones en el que el contenido en estaño es de 0,7 a 1,1 por ciento en peso, el contenido en hierro es de 0,09 a 0,15 por ciento en peso y el contenido en niobio es de 0,8 a 1,2 por ciento en peso. Podría haber también otros materiales en la aleación, cuyo contenido, no obstante, es inferior a 0,05 por ciento en peso.

40 Ventajosamente, la temperatura tras el recocido de transformación no excede la temperatura del límite de fase para las partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio. En el caso de que la temperatura tras el recocido de transformación exceda la temperatura del límite de fase para las partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio, lo hace como máximo durante el período de tiempo en el que esencialmente todas las partículas en fase secundaria que contienen niobio se mantienen como partículas  $\beta$ -niobio. Para conseguirlo, la temperatura tras el recocido de transformación excede la temperatura del límite de fase para las partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio, adecuadamente, durante no más de 10 minutos, preferiblemente, durante no más de 5 minutos y, ventajosamente, nada en absoluto. El tiempo depende de hasta qué punto se permite que la temperatura exceda la temperatura del límite de fase para las partículas  $\beta$ -zirconio.

50 De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un procedimiento para fabricar una caja de combustible para un reactor nuclear de agua en ebullición, en el que se fabrica una chapa metálica de acuerdo con lo anterior y en el que la chapa metálica se dispone en al menos una de las paredes de la caja de combustible.

De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención, se proporciona una caja de combustible tal como se define en la reivindicación 9.

55 Las características que se han descrito en relación con el procedimiento anterior pueden aplicarse también a una chapa metálica y una caja de combustible de acuerdo con la invención, cuando sea aplicable.

60 Huelga decir que las diferentes características que se han descrito anteriormente se pueden combinar en la misma realización, cuando sea aplicable.

A continuación, se describirán diferentes realizaciones de la invención haciendo referencia a los dibujos adjuntos.

### Breve descripción del dibujo

65 La Figura 1 muestra un conjunto combustible que incluye una caja de combustible de acuerdo con la presente invención.

**Descripción de realizaciones preferentes**

5 La Figura 1 muestra un conjunto combustible 1 de acuerdo con la técnica anterior que está dispuesto para un reactor nuclear de agua en ebullición. El conjunto combustible 1 comprende una caja de combustible 2 de acuerdo con la presente invención. El conjunto combustible también comprende barras de combustible 3 en las que se dispone el combustible nuclear en pastillas de combustible. La caja de combustible 2 tiene un eje longitudinal 4 que está paralelo al eje longitudinal de las barras de combustible 3. La caja de combustible 2 se fabrica normalmente a partir de dos chapas metálicas 5 que se doblan y se sueldan juntas a lo largo de la dirección del eje longitudinal 4 de la caja de combustible 2.

10 A continuación, se dan dos ejemplos de procedimientos de fabricación de una chapa metálica 5 para la caja de combustible 2.

15 Lo que comparten los procedimientos es que se lleva a cabo un recocido de transformación en una etapa posterior con el fin de transformar las partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio en partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -niobio. El recocido se lleva a cabo a una temperatura que está por debajo de la temperatura del límite de fase para las partículas  $\beta$ -zirconio, que es aproximadamente a 610 °C. La fuerza motriz para la transformación de partículas en fase secundaria desde partículas  $\beta$ -zirconio a partículas  $\beta$ -niobio está limitada en parte por la velocidad de difusión del niobio en el zirconio y en parte limitada por la velocidad de nucleación, que es la velocidad a la que se forman partículas en fase secundaria en la aleación. La difusión aumenta al aumentar la temperatura, mientras que la velocidad de nucleación disminuye al aumentar la temperatura. Esto implica que existe una temperatura óptima para una alta velocidad de transformación.

25 Para las aleaciones que se contemplan en la esta solicitud, la temperatura óptima para una rápida transformación es aproximadamente 550 °C. No obstante, es posible conseguir el resultado deseado siempre y cuando la temperatura esté por debajo de la temperatura del límite de fase para las partículas  $\beta$ -zirconio. Un intervalo preferible es de 500 a 600 °C, siendo incluso más preferible el intervalo de 540 a 580 °C.

30 Las aleaciones que son interesantes en primer lugar para la invención son aquellas que tienen un contenido en niobio de 0,5 a 1,6 por ciento en peso.

35 Un primer grupo de aleaciones consiste en aquellas que tienen el contenido en niobio que se ha mencionado anteriormente, un contenido en hierro de 0,3 a 0,6 por ciento en peso y un contenido en estaño de 0,5 a 0,85 por ciento en peso. Pueden estar presentes también otros materiales en la aleación. El contenido de estos otros materiales, no obstante, es inferior a 0,05 por ciento en peso.

40 Un segundo grupo de aleaciones es Zirlo<sup>TM</sup>, que tiene de 0,7 a 1,1 por ciento en peso de estaño, de 0,09 a 0,15 por ciento en peso de hierro, de 0,8 a 1,2 por ciento en peso de niobio. Pueden estar presentes también otros materiales en la aleación, cuyo contenido, no obstante, es inferior a 0,05 por ciento en peso.

Estos grupos de aleaciones proporcionan una resistencia a la corrosión favorable y un bajo crecimiento inducido por neutrones.

**45 Ejemplo 1**

50 Cuando se fabrica la chapa metálica 5 en la caja de combustible 2 de acuerdo con un primer ejemplo, en primer lugar, se fabrica un electrodo de una aleación de zirconio que comprende aproximadamente 1 por ciento en peso de niobio, 0,4 por ciento en peso de hierro y 0,6 por ciento en peso de estaño en función del peso del electrodo, presionando juntas briquetas de zirconio junto con materiales de aleación. A continuación, se funde en vacío el electrodo para obtener una pieza fundida, que se funde en vacío a continuación, al menos una vez, tras lo cual se forja la pieza fundida en un material que tiene de 100 a 125 mm de espesor, que a su vez se trabaja y se acondiciona superficialmente. A continuación, se somete el material a  $\beta$ -enfriamiento, lo que implica que se calienta el material a una temperatura de 1.000 °C a 1.100 °C y se enfría después. Se enfría el material a una velocidad de al menos 10 °C por segundo hasta una temperatura por debajo de 500 °C. Después del  $\beta$ -enfriamiento, se acondiciona superficialmente el material y a continuación se lamina en caliente en varias etapas. El número de etapas y el espesor después de cada laminación en caliente dependen del espesor final que se desea en la chapa metálica 5.

60 Se somete el material a un número de laminaciones en frío. Al someter el material laminado en caliente a recocido antes de la primera laminación en frío se obtiene una estructura de grano en el material favorable. Entre cada una de las laminaciones en frío, se realiza el recocido del material con el fin de restaurar la estructura de grano antes de la siguiente laminación en frío de acuerdo con los procedimientos de fabricación normales. El recocido se lleva a cabo a una temperatura por debajo de la temperatura del  $\beta$ -enfriamiento, es decir por debajo de 900 °C, y preferiblemente, por debajo de aproximadamente 600 °C, por ejemplo, a aproximadamente 560 °C.

65 Tras las laminaciones en frío, se realiza un recocido de transformación calentando el material a una temperatura de

545 °C durante seis horas. Durante el recocido de transformación, se transforman las partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio en partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -niobio, que consisten en partículas con un contenido en niobio que excede el 99 por ciento en peso.

5 Después del recocido de transformación se lamina en frío el material para una dimensión de acabado y se somete a un recocido de acabado con el fin de restaurar la estructura de grano. El recocido de acabado se lleva a cabo a una temperatura que está por debajo de la temperatura del límite de fase para las partículas  $\beta$ -zirconio. De esta forma, queda fabricada la chapa metálica acabada. Finalmente, se cortan los bordes de la chapa metálica 5 acondicionándose superficialmente también la chapa metálica.

10

## Ejemplo 2

15 Cuando se fabrica la chapa metálica 5 en la caja de combustible 2 de acuerdo con un segundo ejemplo, se fabrica un electrodo de aleación de zirconio conocida con el nombre de Zirlo prensando juntas briquetas de zirconio junto con materiales de aleación. A continuación, se funde en vacío el electrodo para obtener una pieza fundida que se vuelve a fundir en vacío al menos una vez, tras lo cual se forja la pieza fundida para obtener un material con un espesor de 100 a 125 mm, que a su vez se trabaja y se acondiciona superficialmente. A continuación, se somete el material a  $\beta$ -enfriamiento, lo que implica que se calienta el material a una temperatura de 1.000 a 1.100 °C y se enfría rápidamente después. Se enfría el material a una velocidad de al menos 10 °C por segundo a una temperatura por debajo de 500 °C. A continuación, se lamina en caliente el material en varias etapas. El número de etapas y el espesor después de cada laminación en caliente depende del espesor final que se desea en la chapa metálica 5.

20

25 Al someter a recocido el material laminado en caliente antes de la primera laminación en frío se obtiene una estructura de grano favorable en el material. Se somete el material a un número de laminaciones en frío. Entre cada una de las laminaciones en frío se somete a recocido el material para restaurar la estructura de grano antes de la siguiente laminación en frío, de acuerdo con los procedimientos de fabricación normales. Se realiza el recocido a una temperatura por debajo de la temperatura del  $\beta$ -enfriamiento, es decir, por debajo de 900 °C, y preferiblemente por debajo de aproximadamente 600 °C, por ejemplo, a aproximadamente 560 °C.

30

A continuación, se somete el material a un segundo  $\beta$ -enfriamiento que implica calentar el material a una temperatura de 1.000 °C a 1.100 °C y después se enfría rápidamente. Se enfría el material a una velocidad de al menos 10 °C por segundo a una temperatura por debajo de 500 °C.

35

Después del segundo  $\beta$ -enfriamiento, se lleva a cabo una deformación en frío, en la que se estira el material para que la deformación remanente constituya el 3% del tamaño original antes del estirado. A continuación, se realiza un recocido de transformación calentando el material a una temperatura de 545 °C durante seis horas. Durante el recocido de transformación se transforman las partículas en fase secundaria  $\beta$ -zirconio en partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -niobio, que consisten en partículas con un contenido en niobio por encima de 99 por ciento en peso. De esta manera, queda fabricada la chapa metálica acabada 5. Finalmente, se recortan los bordes de la chapa metálica 5, acondicionándose superficialmente la chapa metálica también.

40

Después de fabricar la chapa metálica de acuerdo con uno cualquiera de los ejemplos expuestos, se fabrica una caja de combustible 2 doblando dos chapas metálicas 5 y soldándolas juntas a una caja de combustible 2. La manera de fabricar una caja de combustible 2 a partir de chapas metálicas 5 es conocida dentro de la técnica y no se describirá en detalle en el presente documento.

45

Naturalmente, la invención no se limita a las realizaciones que se han descrito anteriormente, sino que se puede modificar de muchas maneras sin alejarse del alcance de la presente invención, limitado únicamente por las reivindicaciones adjuntas.

50

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para fabricar una caja de combustible (2) para un reactor nuclear de agua en ebullición, en el que se fabrica una chapa metálica (5) a través de un procedimiento que comprende las etapas de
- 5 proporcionar un material de una aleación de zirconio, que consiste principalmente en zirconio, en el que los principales materiales de aleación comprenden niobio, en el que no está presente ningún material de aleación en un contenido superior a 1,6 por ciento en peso y en el que la aleación comprende partículas en fase secundaria que contienen niobio, en el que los materiales de aleación principales son niobio, hierro y estaño, en el que el
- 10 contenido de cualquier material adicional está por debajo de 0,05 por ciento en peso, en el que, o bien el contenido en niobio es de 0,5 a 1,6 por ciento en peso, el contenido en hierro es de 0,3 a 0,6 por ciento en peso, y el contenido en estaño es de 0,5 a 0,85 por ciento en peso, o bien el contenido en estaño es de 0,7 a 1,1 por ciento en peso, el contenido en hierro es de 0,09 a 0,15 por ciento en peso y el contenido en niobio es de 0,8 a 1,2 por ciento en peso,
- 15 someter el material a al menos una laminación en caliente, someter el material a al menos un primer  $\beta$ -enfriamiento, someter el material laminado en caliente a al menos una laminación en frío, **caracterizado por** que después de dicha al menos una laminación en frío y después de dicho primer  $\beta$ -enfriamiento, el recocido de transformación del material laminado en frío, a una temperatura por debajo del límite de fase para las partículas
- 20 en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio, durante un tiempo suficiente para que esencialmente todas las partículas en fase secundaria que contienen niobio se transformen en partículas  $\beta$ -niobio, que son partículas en la aleación de zirconio con un contenido en niobio por encima de 90 por ciento en peso, y se dispone la chapa metálica (5) en al menos una de las paredes de la caja de combustible (2).
- 25 2. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el primer  $\beta$ -enfriamiento se lleva a cabo antes de la laminación en caliente.
3. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el primer  $\beta$ -enfriamiento se lleva a cabo entre una de dichas al menos una laminación en caliente y dicha al menos una laminación en frío.
- 30 4. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende también un segundo  $\beta$ -enfriamiento, que se lleva a cabo después de dicha al menos una laminación en frío y antes del recocido de transformación.
5. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, que comprende también una deformación en frío entre el
- 35 segundo  $\beta$ -enfriamiento y el recocido de transformación, en el que se estira el material durante la deformación en frío de manera que la deformación remanente es de 1% a 7% del tamaño original antes del estirado.
6. Un procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el recocido de transformación se lleva a cabo a 450°C-600 °C, ventajosamente a 500 °C-600 °C y preferiblemente a 540 °C-580 °C.
- 40 7. Un procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la temperatura, en el caso de que tras el recocido de transformación exceda la temperatura del límite de fase para las partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio, lo hace como máximo durante el período de tiempo en el que esencialmente todas las partículas en fase secundaria que contienen niobio se mantienen como partículas  $\beta$ -niobio.
- 45 8. Un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 7, en el que la temperatura después del recocido de transformación excede la temperatura del límite de fase para las partículas en fase secundaria en forma de partículas  $\beta$ -zirconio durante no más de 10 minutos, preferiblemente, no más de 5 minutos y ventajosamente nada en absoluto.
- 50 9. Caja de combustible (2) para un reactor nuclear de agua en ebullición que comprende una chapa metálica (5) dispuesta como al menos una de las paredes de la caja de combustible (2), en la que dicha chapa metálica (5) consiste en una aleación de zirconio que consiste principalmente en zirconio, en la que los principales materiales de aleación de la aleación comprenden niobio, en la que no está presente ningún material de aleación en un contenido
- 55 que excede 1,6 por ciento en peso, y en la que la aleación comprende partículas en fase secundaria que contienen niobio, en la que los principales materiales de la aleación son niobio, hierro y estaño y en la que el contenido de cualesquiera materiales adicionales es inferior a 0,05 por ciento en peso, en la que, o bien el contenido en niobio es de 0,5 a 1,6 por ciento en peso, el contenido en hierro es de 0,3 a 0,6 por ciento en peso y el contenido en estaño es de 0,5 a 0,85 por ciento en peso, o bien el contenido en estaño es de 0,7 a 1,1 por ciento en peso, el contenido en hierro es de 0,09 a 0,15 por ciento en peso y el contenido en niobio es de 0,8 a 1,2 por ciento en peso,
- 60 **caracterizado por** que las partículas en fase secundaria que contienen niobio consisten esencialmente solo en partículas  $\beta$ -niobio que son partículas en la aleación de zirconio con un contenido en niobio por encima del 90 por ciento en peso.
- 65

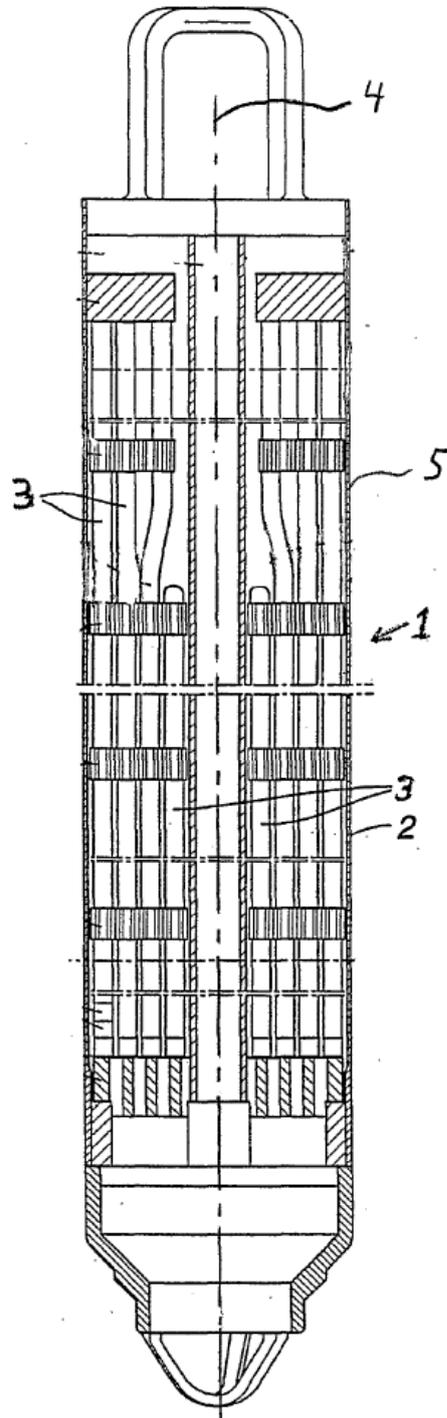


Fig. 1