

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 737 689**

51 Int. Cl.:

G21C 3/07 (2006.01)

G21C 3/20 (2006.01)

G21C 21/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.02.2015 PCT/US2015/015351**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.11.2015 WO15175035**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.02.2015 E 15792311 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2019 EP 3117439**

54 Título: **Vaina de combustible nuclear con aleación de circonio reforzada con cerámica con una capa intermedia resistente a la oxidación**

30 Prioridad:
12.03.2014 US 201414205967

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.01.2020

73 Titular/es:
**WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC
(100.0%)
1000 Westinghouse Drive, Suite 141
Cranberry Township, PA 16066, US**

72 Inventor/es:
LAHODA, EDWARD J.

74 Agente/Representante:
CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 737 689 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

Vaina de combustible nuclear con aleación de circonio reforzada con cerámica con una capa intermedia resistente a la oxidación

Antecedentes5 1. Campo

La invención se refiere a procedimientos de fabricación de una vaina de aleación de circonio que tiene un revestimiento que contiene cerámica formado sobre la misma que incluye una capa resistente a la oxidación para su uso en un reactor nuclear de agua y, en particular, una capacidad mejorada para que la vaina de aleación de circonio soporte condiciones normales y de accidente a las que se ve expuesta en el reactor nuclear de agua.

10 2. Descripción de la técnica relacionada

En un reactor nuclear de agua típico, tal como un reactor de agua a presión (PWR), un reactor de agua pesada (por ejemplo, un reactor CANDU) o un reactor de agua en ebullición (BWR), el núcleo del reactor incluye un gran número de conjuntos de combustible, cada uno de los cuales está compuesto por múltiples elementos de combustible alargados o barras de combustible. Los conjuntos de combustible varían en tamaño y diseño dependiendo del tamaño deseado del núcleo y del tamaño del reactor. Cada barra de combustible contiene material de combustible nuclear fisiónable, tal como al menos uno de entre dióxido de uranio (UO_2), dióxido de plutonio (PuO_2), dióxido de torio (ThO_2), nitruro de uranio (UN) y siliciuro de uranio (U_3Si_2) y mezclas de los mismos. Al menos una parte de las barras de combustible puede incluir también un material absorbente de neutrones, tal como boro o compuestos de boro, gadolinio o compuestos de gadolinio, erbio o compuestos de erbio y similares. El material absorbente de neutrones puede estar presente sobre o en pastillas en forma de una pila de pastillas de combustible nuclear. Pueden usarse también formas anulares o de partícula de combustible.

Cada una de las barras de combustible tiene una vaina que actúa como contención para retener el material fisible. Las barras de combustible se agrupan entre sí en una matriz que está organizada para proporcionar un flujo de neutrones en el núcleo suficiente para proporcionar una alta tasa de fisión nuclear y, de esta manera, la liberación de una gran cantidad de energía en forma de calor. Se bombea un refrigerante, tal como agua, a través del núcleo del reactor para extraer el calor generado en el núcleo del reactor para la producción de trabajo útil, tal como electricidad.

La vaina sobre las barras de combustible puede estar compuesta de circonio (Zr) y puede incluir hasta aproximadamente el dos por ciento en peso de otros metales, tales como niobio (Nb), estaño (Sn), hierro (Fe) y cromo (Cr). Recientes desarrollos en la técnica han proporcionado una vaina de barra de combustible compuesta de un material que contiene cerámica, tal como el carburo de silicio (SiC). El SiC ha mostrado que exhibe propiedades deseables en accidentes más graves que los tenidos en cuenta en el diseño, por ejemplo, una temperatura superior a $1.200^{\circ}C$ y, por lo tanto, puede considerarse un material de construcción adecuado para revestimientos de barras de combustible nuclear. Sin embargo, el mantenimiento de la impermeabilidad al gas de fisión durante la flexión inducida por la manipulación o por accidentes o fenómenos naturales, tales como terremotos, es difícil debido a la inelasticidad natural de los materiales cerámicos en general. La sujeción de tapones de extremo en los tubos de SiC de manera rentable y económica, proporcionando un sello hermético a temperaturas superiores a $1.200^{\circ}C$ es también difícil. Se ha intentado el uso de un manguito interior compuesto de una aleación de Zr envuelto con fibras de SiC, pero no ha proporcionado un resultado satisfactorio debido a la excesiva corrosión encontrada durante la infiltración química de vapor (CVI) cuando se deposita SiC en el interior y sobre las fibras de SiC para mantenerlas juntas. De esta manera, siguen existiendo problemas relacionados con la vaina de las barras de combustible nuclear, incluyendo la corrosión del tubo de Zr a temperaturas asociadas con un núcleo de reactor nuclear de agua, por ejemplo, de aproximadamente 800 a aproximadamente $1.200^{\circ}C$, y en las condiciones químicas, por ejemplo, gas que contiene H_2 , Cl_2 y HCl, encontradas durante el proceso CVI.

Se ha intentado también hacer el enrollado de SiC por separado, someterlo a CVI y a continuación colocarlo sobre el tubo de Zr. Sin embargo, también existen problemas con este enfoque. Por ejemplo, el espacio entre el tubo de Zr y la matriz de material compuesto de SiC forma una barrera de transferencia térmica adicional en el interior de la capa de vaina, lo que podría causar la fusión de la línea central del combustible a las tasas de generación de calor lineales, muy elevadas, encontradas por el combustible nuclear (normalmente, más de $0,16 \text{ kw/cm}$ (5 kw/pie)). Debido a que los extremos del tubo no están cubiertos, existe la posibilidad de que el tubo Zr se deslice desde el manguito de material compuesto de SiC y proporcione una vía para que el vapor a alta temperatura y otros gases se infiltren debajo del material compuesto de SiC y ataquen al tubo de aleación de Zr.

Cada una de las barras de combustible/vaina tiene un tapón o tapa posicionado en cada extremo. Además, se proporciona un dispositivo de retención, tal como un muelle metálico, en la barra de combustible/vaina para mantener la configuración de la pila de pastillas de combustible nuclear.

La Fig. 1 ilustra un diseño de la técnica anterior que muestra una pila de pastillas 10 de combustible, una vaina 12 basada en circonio, un dispositivo 14 de retención de tipo muelle y tapones 16 de extremo. Uno de los tapones de extremo, es decir, el posicionado más cerca del dispositivo 14 de retención, es conocido típicamente como el tapón de extremo superior.

5 Puede encontrarse técnica anterior adicional en el documento WO 2013/017 621 A1 que describe dos capas de un material compuesto de matriz cerámica que cubre una superficie interior y una superficie exterior, respectivamente, de un cuerpo metálico tubular, y en el documento WO 2012/174 548 A1 relacionado con un elemento de combustible nuclear que incluye un tubo de vaina de carburo de silicio multicapa.

10 Es necesario sellar los tapones de extremo de la vaina para aislar el combustible contenido en el mismo con relación al entorno del núcleo del reactor. Existen tecnologías de sellado conocidas que emplean diversos materiales, tales como composiciones basadas en Ti o Al-Si, así como soldadura fuerte y otros procedimientos convencionales para sellar la vaina de SiC y los tapones de extremo.

15 Un objeto de la presente invención es proporcionar procedimientos para fabricar una vaina de combustible nuclear de aleación de Zr reforzada con SiC usando una capa de revestimiento intermedia que contenga un material resistente a la oxidación y a la corrosión, tal como, pero sin limitarse a, Al_2O_3 , Cr_2O_3 y mezclas de los mismos, con el fin de proteger el tubo de circonio subyacente contra la oxidación o la corrosión durante el proceso CVI. Con el fin de que el combustible mantenga su geometría y proporcione resistencia a la pérdida de combustible desde el núcleo a través de la fusión, debe formarse una cubierta o un revestimiento que sea capaz de soportar altas temperaturas sobre al menos una parte de la superficie exterior de una vaina de barra de combustible nuclear compuesta de aleación de circonio.

20 **Sumario de la invención**

En un aspecto, la invención proporciona un procedimiento para recubrir una vaina de barra de combustible nuclear que contiene cerámica para un reactor nuclear de agua según la reivindicación 1. La vaina incluye una pared tubular que tiene una superficie interior y una superficie exterior, en la que la pared tubular forma una cavidad en la misma y tiene un primer extremo abierto y un segundo extremo abierto. El procedimiento incluye además proporcionar un primer tapón de extremo, insertar y sellar el primer tapón de extremo en el primer extremo abierto de la vaina, llenar la vaina de barra de combustible con combustible nuclear y un dispositivo de retención, insertar y sellar el segundo tapón de extremo en el segundo extremo abierto de la vaina, presurizar la cavidad, proporcionar una primera composición que incluye un material resistente a la oxidación, proporcionar una segunda composición que incluye carburo de silicio, aplicar la primera composición a al menos una parte de la superficie exterior de la vaina para formar un primer revestimiento exterior, y aplicar la segunda composición a al menos una parte del primer revestimiento exterior para formar un segundo revestimiento exterior. El segundo revestimiento exterior incluye el depósito de fibras reforzadas con SiC que tienen huecos formados entre al menos una parte de las fibras reforzadas con SiC; y depositar un material de SiC para llenar al menos parcialmente los huecos formados entre al menos una parte de las fibras reforzadas con SiC. El segundo revestimiento exterior encapsula sustancialmente la superficie exterior de la vaina.

35 En ciertas realizaciones, el procedimiento incluye además aplicar la primera composición sobre la superficie interior de la vaina para formar un primer revestimiento interior sobre la misma. La aplicación del primer revestimiento interior y del primer revestimiento exterior puede realizarse mediante deposición por capas atómicas. El primer revestimiento interior y el primer revestimiento exterior pueden tener un espesor de 10 nanómetros a 10 micrómetros.

40 Puede posicionarse un tapón de extremo en cada uno de entre el primer extremo y el segundo extremo de la vaina. El depósito del primer revestimiento interior puede ocurrir cuando ninguno o uno de entre el primer tapón de extremo y el segundo tapón de extremo está posicionado en el interior del primer extremo abierto o del segundo extremo abierto de la vaina.

45 El depósito de las fibras reforzadas con SiC en el segundo revestimiento exterior puede realizarse mediante enrollado o trenzado. El segundo revestimiento exterior puede tener un espesor de 0,25 mm (10 milésimas de pulgada) a 1,02 mm (40 milésimas de pulgada).

En ciertas realizaciones, el segundo revestimiento exterior tiene una densidad de aproximadamente 3,22 gramos/cm³.

La primera composición puede incluir Al_2O_3 , Cr_2O_3 y mezclas de los mismos.

50 En ciertas realizaciones, el depósito del segundo revestimiento exterior incluye el revestimiento de una superficie expuesta de cada uno de entre el primer tapón de extremo y el segundo tapón de extremo posicionados en el interior del primer extremo y del segundo extremo de la vaina.

En otro aspecto, la invención proporciona una vaina de barras de combustible nuclear, que contiene cerámica, revestida de material compuesto para un reactor nuclear de agua según la reivindicación 12. El material compuesto incluye una

vaina que contiene cerámica. La vaina incluye una pared tubular de aleación de circonio que tiene una superficie interior y una superficie exterior, una cavidad formada por la pared tubular, en el que la cavidad tiene combustible nuclear dispuesto en la misma, un primer extremo abierto y un segundo extremo abierto, un primer tapón de extremo y un segundo tapón de extremo, el primer extremo abierto sellado con el primer tapón de extremo y el segundo extremo abierto sellado con el segundo tapón de extremo. En ciertas realizaciones, cada uno de los tapones de extremo primero y segundo es un tapón de metal. La primera composición se deposita en al menos una parte de al menos la superficie exterior de la vaina para formar un primer revestimiento exterior. La primera composición incluye un material resistente a la oxidación. Una segunda composición se deposita en al menos una parte del primer revestimiento exterior para formar un segundo revestimiento exterior. La segunda composición de revestimiento incluye múltiples fibras reforzadas con SiC enrolladas o trenzadas para formar una capa de fibra. Las fibras tienen huecos formados entre las mismas. Además, la segunda composición de revestimiento incluye un material de SiC aplicado al menos parcialmente a la capa de fibra para llenar al menos parcialmente los huecos.

Breve descripción de los dibujos

Puede obtenerse una comprensión adicional de la invención a partir de la siguiente descripción de las realizaciones preferidas, cuando se considera junto con los dibujos adjuntos, en los que:

La Fig. 1 es una vista en sección longitudinal ampliada de una barra de combustible de aleación de circonio de la técnica anterior que contiene pastillas de combustible, muelle de retención y tapas de extremo;

La Fig. 2 es una vista en sección transversal de un sustrato de vaina de barras de combustible que tiene un primer revestimiento depositado sobre la superficie interior, según ciertas realizaciones de la invención;

La Fig. 3 es una vista en sección transversal de un sustrato de vaina de barras de combustible que tiene un primer revestimiento y un segundo revestimiento depositado sobre la superficie exterior, según ciertas realizaciones de la invención;

La Fig. 4 es una vista detallada en sección transversal del segundo revestimiento mostrado en la Fig. 3, según ciertas realizaciones de la invención; y

La Fig. 5 es una vista en sección transversal de un sustrato que tiene un primer revestimiento sobre ambas superficies interior y exterior y un segundo revestimiento sobre la superficie exterior, según ciertas realizaciones de la invención.

Descripción de la realización preferente

La presente invención se refiere, en general, a una vaina de barras de combustible, al depósito de una composición sobre una superficie exterior de la vaina para formar un revestimiento sobre la misma, y a procedimientos de fabricación de una vaina de combustible nuclear de aleación de circonio que tiene la capacidad de soportar condiciones normales y de accidente en un reactor nuclear de agua. En ciertas realizaciones, la vaina fabricada según la invención es capaz de soportar temperaturas comprendidas en un intervalo de aproximadamente 800°C a aproximadamente 1.200°C. Además, la vaina es capaz de soportar accidentes más graves que en los que se basa el diseño en un reactor nuclear de agua.

En general, la invención incluye depositar un material resistente a la oxidación sobre, por ejemplo, directamente sobre, la superficie interior y/o la superficie exterior de la vaina para formar un primer revestimiento interior y/o un primer revestimiento exterior, respectivamente, y posteriormente depositar una composición de SiC, por ejemplo, un material compuesto, sobre el primer revestimiento exterior para formar un segundo revestimiento exterior sobre el mismo.

La vaina puede estar compuesta y construida a partir de una diversidad de materiales convencionales conocidos en la técnica. Tal como se ha descrito anteriormente en la presente memoria, es conocida la construcción de una vaina de barras de combustible para un reactor nuclear de agua a partir de una aleación de circonio que contiene una cantidad mayoritaria de circonio y una cantidad minoritaria, por ejemplo, hasta aproximadamente el 2% en peso en base al peso total de la composición, de otros metales. Además, se conoce en la técnica que la vaina esté compuesta de cerámica. Debido a la fragilidad conocida asociada con la cerámica, típicamente, el material de vaina es una combinación de cerámica y otro material, por ejemplo, materiales que contienen cerámica, tales como, pero sin limitarse a, carburo de silicio (SiC).

Los ejemplos no limitativos de materiales de vaina adecuados para su uso en la invención incluyen materiales compuestos reforzados con fibra de carburo de silicio (SiC). Estos materiales compuestos pueden tener dos o tres capas. El material compuesto de dos capas incluye una vaina de SiC estequiométrico de fase beta o alfa de alta pureza revestida al menos parcialmente por una capa de fibras de SiC estequiométricas de fase beta, continuas, infiltradas con SiC de fase beta. El material compuesto de tres capas incluye una capa protectora exterior adicional de SiC de fase beta de grano fino. En ciertos casos, es típico pretensar el componente de fibra que forma las fibras en estopas y superponer las estopas enrolladas inversamente, donde las fibras se revisten con menos de un micrómetro de carbono o grafito o nitruro de boro

para proporcionar una interfaz débil que permita el deslizamiento de las fibras. Este proceso puede realizarse para mejorar la resistencia a la propagación de grietas. La publicación de patente US N° 2006/0039524 A1 de Feinroth et al. describe dichos tubos de combustible nuclear y densificación de matriz usando procesos bien conocidos de infiltración química de vapor (CVI) o impregnación de polímeros y pirólisis (PIP).

5 La invención es aplicable a una amplia diversidad de composiciones de vaina y diseños conocidos en la técnica, tales como, pero sin limitarse a, monolíticos, dúplex con SiC monolítico en el interior y un material compuesto realizado con fibras de SiC y matriz de SiC en el exterior, o dúplex con un material compuesto realizado con fibras de SiC y matriz de SiC en el interior y con un monolito en el exterior.

10 Típicamente, la vaina de barras de combustible tiene la forma de un tubo alargado que tiene una cavidad formada en su interior y dos extremos abiertos opuestos. El espesor de la pared del tubo puede variar. En ciertas realizaciones, el espesor de la pared del tubo es de aproximadamente 100 a aproximadamente 1.000 micrómetros o de aproximadamente 200 a 400 micrómetros. La cavidad tiene pastillas de combustible contenidas en su interior y típicamente un dispositivo de retención, tal como un muelle, para mantener la configuración, por ejemplo, una pila, de las pastillas de combustible. Un capuchón o tapón de extremo se posiciona en o en cada extremo abierto de la vaina para proporcionar un sello y prevenir que el refrigerante del reactor que circula en el núcleo entre a la cavidad de la vaina de la barra de combustible. La vaina de la barra de combustible se posiciona en el núcleo de un reactor nuclear de agua.

15 En ciertas realizaciones de la invención, los tapones de extremo están contruidos en el mismo material o en un material/composición diferente que la vaina. Cada uno de los dos tapones de extremo puede insertarse en los extremos abiertos opuestos de la vaina al mismo tiempo o un tapón extremo puede insertarse antes que el otro. Cada uno de los tapones de extremo tiene una superficie superior y una superficie inferior. Cuando cada uno de los tapones de extremo se inserta en un extremo abierto de la vaina, la superficie inferior se posiciona en el interior de la cavidad y la superficie superior forma un extremo cerrado de la vaina. En un proceso de carga de combustible convencional, un tapón de extremo se inserta y se fija a un extremo abierto de la vaina para sellar el extremo, las pastillas de combustible y el muelle de retención de la pila se cargan en la cavidad de la vaina y a continuación se carga, el otro extremo se inserta y se fija al otro extremo abierto de la vaina. Como alternativa, las pastillas de combustible y la retención de la pila pueden cargarse en la vaina y, posteriormente, ambos tapones de extremo pueden insertarse y conectarse a los extremos abiertos de la vaina.

20 Los tapones de extremo pueden fijarse o sellarse a los extremos abiertos de la vaina usando una diversidad de composiciones, por ejemplo, material de unión, y procedimientos. Los ejemplos adecuados se divulgan en la solicitud de patente US con número de serie 14/205.823. Los tapones de metal pueden soldarse también en los extremos del tubo de aleación de circonio, bien solos o bien juntos al mismo tiempo.

25 En la invención, el material resistente a la oxidación puede incluir una amplia diversidad de dichos materiales compuestos conocidos en la técnica. Los ejemplos no limitativos para su uso en la invención incluyen Al_2O_3 , Cr_2O_3 y mezclas de los mismos. El material resistente a la oxidación se deposita sobre al menos una parte de las superficies interior y/o exterior de la vaina, por ejemplo, una vaina de aleación de Zr, para formar un primer revestimiento interior y/o un primer revestimiento exterior. Según la invención, el material resistente a la oxidación se deposita solo sobre la superficie exterior o, según una realización específica, tanto sobre la superficie interior como sobre la superficie exterior de la vaina. Se contempla que el revestimiento de la superficie interior permita que el material de aleación de Zr sea resistente al ataque corrosivo sobre el interior del tubo en el caso de rotura de un tubo.

30 Preferiblemente, el tubo se carga con pastillas de combustible y un muelle de retención, y se fijan los tapones de extremo. La superficie exterior está al menos sustancialmente cubierta o completamente cubierta con el material resistente a la oxidación. El material resistente a la oxidación puede depositarse usando un aparato y procedimientos convencionales conocidos en la técnica. En ciertas realizaciones, el material resistente a la oxidación se deposita usando deposición por capas atómicas. El revestimiento o capa formada por deposición del material resistente a la oxidación está típicamente en forma de una nanocapa que tiene un espesor de aproximadamente 10 nanómetros a aproximadamente 10 micrómetros o de aproximadamente 50 nanómetros a aproximadamente 1 micrómetro.

35 En ciertas realizaciones, en las que el material resistente a la oxidación se deposita sobre la superficie interior del tubo de vaina para formar un primer revestimiento interior, dicho depósito se realiza antes de cargar el combustible y el dispositivo de retención en la cavidad, y de la inserción de los tapones de extremo en los extremos abiertos de la vaina. En ciertas otras realizaciones, en las que el material resistente a la oxidación se deposita sobre la superficie exterior del tubo de vaina para formar un primer revestimiento exterior, dicho depósito puede realizarse antes o después de cargar el combustible y el dispositivo de retención en la cavidad, y de la inserción de los tapones de extremo en los extremos abiertos de la vaina.

40 Un primer tapón de extremo puede insertarse y asegurarse, por ejemplo, soldarse o unirse, en o a un primer extremo del tubo de vaina. Puede seleccionarse un material de unión de manera que tenga suficiente resistencia y capacidad de alta temperatura para garantizar la integridad de la unión durante un proceso de CVI o CVD que se realiza posteriormente para

5 formar el segundo revestimiento. Además, el material de unión puede ser capaz o no de exhibir suficiente resistencia a la corrosión en un entorno de reactor nuclear. El material de unión puede depositarse sobre al menos una parte de la superficie exterior del primer tapón de extremo para formar un revestimiento sobre la misma y el primer tapón de extremo revestido se inserta en el primer extremo abierto del tubo de vaina para formar un sello entre el primer tapón de extremo. y la superficie interior y/o la cara extrema del tubo de vaina.

10 A continuación, el combustible, por ejemplo, una pila de pastillas, y el dispositivo de retención, por ejemplo, el muelle, pueden insertarse y posicionarse en el interior de la cavidad de la vaina tubular. Posteriormente, el tubo de vaina puede presurizarse con un gas inerte, tal como helio (He), como en los diseños convencionales u otro gas de relleno, por ejemplo, un gas que tenga una conductividad térmica similar o mejorada, tal como hidrógeno. Es decir, la cavidad de la vaina tubular se llena con el gas a una presión deseada. La presión puede variar y, en ciertas realizaciones, es de 5 a 50 atmósferas o de 10 a 20 atmósferas. Después de cargar el combustible y presurizar el tubo, a continuación, el segundo tapón de extremo puede insertarse y asegurarse en el segundo extremo abierto del tubo de vaina, según el procedimiento descrito anteriormente para el primer tapón de extremo.

15 De manera alternativa, puede formarse un orificio central o abertura en el segundo tapón de extremo para permitir la entrada del gas a través del mismo para presurizar la barra. Posteriormente, el orificio o la abertura puede llenarse y sellarse, al menos parcialmente, con el material de unión, tal como se ha descrito anteriormente.

En realizaciones alternativas, el combustible y el dispositivo de retención pueden posicionarse en el interior de la cavidad de la vaina tubular antes de insertar y asegurar cualquiera de los tapones de extremo primero y segundo.

20 La invención incluye un material compuesto o revestimiento de matriz dual o de doble capa sobre la superficie exterior de la vaina de barra de combustible que se aplica mediante un procedimiento de dos etapas. Además, puede depositarse una única capa o revestimiento de material resistente a la oxidación sobre la superficie interior del tubo de vaina. La primera etapa en el procedimiento de dos etapas incluye el depósito del material resistente a la oxidación sobre, por ejemplo, directamente sobre, las superficies interior y/o exterior de la vaina para formar el primer revestimiento interior y/o el primer revestimiento exterior, tal como se ha descrito anteriormente, y la segunda etapa incluye el depósito de una composición de SiC, por ejemplo, un material compuesto, sobre el primer revestimiento exterior que se deposita sobre la superficie exterior de la vaina para formar el segundo revestimiento exterior sobre la vaina. El segundo revestimiento exterior incluye un primer componente y un segundo componente. El primer componente incluye fibras de SiC. De esta manera, después de soldar o unir los tapones de extremo primero y segundo para sellar el tubo de vaina, el tubo cerrado se enrolla o trenza con fibras de SiC. El enrollado o trenzado se realiza típicamente de manera que el proceso se inicie en el primer tapón de extremo del tubo de vaina y se complete en el segundo tapón de extremo opuesto del tubo de vaina. El espesor de las fibras de SiC depositadas puede variar y, en ciertas realizaciones, las fibras de SiC se depositan para formar una capa que es de aproximadamente 100 micrómetros a aproximadamente 1.000 micrómetros de espesor o de aproximadamente 200 micrómetros a aproximadamente 600 micrómetros de espesor. Típicamente, existen vacíos entre las fibras de SiC individuales o los grupos de fibras de SiC. Tras esta etapa de enrollado o trenzado, se aplica el segundo componente. El segundo componente incluye un material de SiC que es efectivo para llenar al menos parcialmente los huecos formados entre las fibras de SiC en el primer componente. El segundo componente se deposita o aplica empleando tecnología de infiltración de vapor químico (CVI) o deposición de vapor químico (CVD). En ciertas realizaciones, la aplicación CVI o CVD forma una segunda capa o revestimiento de componente sobre la primera capa o revestimiento de componente. Tal como se usa en la presente memoria y en las reivindicaciones, CVI se refiere al depósito de material de matriz cerámica en poros usando precursores de matriz cerámica gaseosos descompuestos y CVD se refiere al depósito de material de matriz cerámica sobre superficies usando precursores de matriz cerámica gaseosos descompuestos. La densidad del segundo revestimiento exterior puede variar y, en ciertas realizaciones, es de aproximadamente el 50% a aproximadamente el 100% de la densidad de SiC teórica de aproximadamente 3,22 gramos/cm³, o de aproximadamente el 75% a aproximadamente el 95% de la densidad teórica. Además, como resultado del llenado de los huecos entre las fibras con el proceso CVI o CVD, el segundo revestimiento exterior puede cubrir al menos sustancialmente y preferiblemente, completamente, la estructura de vaina de aleación tubular de Zr, incluyendo los tapones de extremo primero y segundo. En ciertas realizaciones, la estructura de vaina de aleación de Zr está encerrada al menos en un 99% en el segundo revestimiento exterior.

50 En ciertas realizaciones, el CVI se realiza a temperaturas de aproximadamente 300°C a aproximadamente 1.100°C, dependiendo del proceso y del aparato de CVI particular empleado. El CVI tradicional basado en la descomposición ocurre desde aproximadamente 900°C a aproximadamente 1.100°C. En ciertas realizaciones, el depósito de SiC basado en el depósito de capas atómicas, se realiza a temperaturas de aproximadamente 300°C a aproximadamente 500°C.

55 El segundo componente, por ejemplo, material de SiC, en el segundo revestimiento exterior que se aplica mediante CVI o CVD para llenar los huecos, puede incluir una diversidad de composiciones. Los ejemplos adecuados se divulgan en la solicitud de patente US con número de serie 14/205.799.

El espesor total de la pared del tubo de una vaina de aleación de Zr con revestimiento según la invención es

significativamente menor que el espesor de un tubo de 100% de SiC que exhibe las mismas hermeticidad y resistencia o similares en ausencia de un revestimiento.

5 La vaina revestida de la invención proporciona una capa protectora de SiC que es capaz de mantener unido el tubo de vaina, incluyendo los tapones de extremo y de mantener el aumento de temperatura debido al autocalentamiento generado por la corrosión a temperaturas superiores a 1.800°C, que son significativamente más altas que las temperaturas a las que comienza a aumentar la corrosión de otras aleaciones metálicas y, en particular, significativamente más altas que las aleaciones Zr solas, es decir, en ausencia de una capa protectora de SiC.

10 Además, la sección transversal de neutrones total del tubo de vaina fabricado según la invención puede ser menor que la de un tubo de aleación de Zr convencional solo, ya que el espesor de la pared está soportado por una capa de SiC. De esta manera, puede usarse una pared significativamente más gruesa, ya que el SiC tiene una sección transversal de solo el 25% de la de las aleaciones de Zr.

15 La Fig. 2 ilustra una vaina 22 de barra de combustible según la invención. La vaina 22 incluye una pared 21 de tubo alargada que tiene una superficie 23 interior, una superficie 25 exterior, y que forma una cavidad 27. Una composición de revestimiento resistente a la oxidación puede depositarse sobre la superficie 23 interior y, según la invención, se deposita sobre la superficie 25 exterior de la vaina 22 para formar un primer revestimiento 29 sobre la superficie 23 interior y un primer revestimiento 33 sobre la superficie 25 exterior.

20 La Fig. 3 ilustra una vaina 22 de barra de combustible según ciertas realizaciones de la invención. La Fig. 3 incluye la pared 21 de tubo alargada, la superficie 23 interior, la superficie 25 exterior y la cavidad 27, tal como se muestra en la Fig. 2. Además, la Fig. 3 muestra una pila de pastillas 20 de combustible y un dispositivo 24 de retención posicionados en el interior de la cavidad 27, y un primer extremo 31a y un segundo extremo 31b. Un primer tapón 26a extremo está posicionado y asegurado en el primer extremo 31a y un segundo tapón 26b extremo está posicionado y asegurado en el segundo extremo 31b. El mecanismo para asegurar los tapones extremos 26a, b primero y segundo puede incluir un sello que incluye una junta de material 30 de soldadura fuerte. En ciertas realizaciones, el sello puede formarse mediante una soldadura de los tapones 26a, b de extremo a los extremos 31a, b. Tal como se muestra en la Fig. 3, se deposita una composición resistente a la oxidación sobre las superficies 25 exteriores del tubo 22 de vaina para formar un primer revestimiento 33. Tal como se describe en la presente memoria, se contempla que puede depositarse un primer revestimiento sobre la superficie 23 interior (por ejemplo, el revestimiento 29, tal como se muestra en la Fig. 2) y la superficie 25 exterior (por ejemplo, el revestimiento 33 tal como se muestra en la Fig. 3). La Fig. 3 muestra también un segundo revestimiento 51 formado sobre una superficie exterior del primer revestimiento 33 sobre la superficie 25 exterior del tubo 22 de vaina y las superficies de los tapones 26a, b de extremo primero y segundo. El segundo revestimiento 51 es efectivo para encerrar o encapsular completamente el tubo 22 de vaina, incluyendo los tapones 26a, b de extremo.

30 Tal como se muestra en la Fig. 4, el segundo revestimiento 51 (mostrado en la Fig. 3) incluye una capa 60 de fibras 62 de refuerzo de SiC depositada sobre la superficie exterior del primer revestimiento 33 (mostrado en las Figs. 2 y 3). Entre las fibras 62 se muestran los huecos 64. Se aplica un revestimiento 66 de SiC mediante CVI o CVD a la capa 60 de las fibras 62 de refuerzo de SiC para llenar los huecos 64.

40 La Fig. 5 muestra un sustrato 65 que es representativo de una superficie de vaina de barra de combustible revestida. Tal como se muestra en la Fig. 5, el sustrato 65 incluye la pared 21 de tubo alargada y sus superficies 23, 25 interior y exterior. El primer revestimiento 29 se deposita opcionalmente sobre la superficie 23 interior y el primer revestimiento 33 se deposita sobre la superficie 25 exterior. El segundo revestimiento 51 se deposita sobre el primer revestimiento 33. El segundo revestimiento 51 incluye la capa 60 de fibras de SiC y el revestimiento 66 de SiC.

45 Aunque las realizaciones específicas de la invención se han descrito en detalle, las persona con conocimientos en la técnica apreciarán que pueden desarrollarse diversas modificaciones y alternativas a esos detalles a la luz de las enseñanzas generales de la divulgación. Por consiguiente, se pretende que las realizaciones particulares divulgadas sean solo ilustrativas y no limitativas en lo que se refiere al alcance de la invención, a la cual debe darse toda la extensión según las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para revestir una vaina (22) de barra de combustible nuclear que contiene cerámica para un reactor nuclear de agua, que comprende:

proporcionar la vaina (22), que comprende:

- 5 una pared (21) tubular que tiene una superficie (23) interior y una superficie (25) exterior;
- una cavidad (27) formada por la pared (21) tubular;
- un primer extremo (31a) abierto; y
- un segundo extremo (31b) abierto;

proporcionar un primer tapón (26a) de extremo y un segundo tapón (26b) de extremo;

- 10 insertar el primer tapón (26a) de extremo en el primer extremo (31a) abierto de la vaina (22);

sellar el primer tapón (26a) de extremo;

llenar la vaina (22) de barra de combustible con combustible (20) nuclear y un dispositivo (24) de retención;

insertar el segundo tapón (26b) de extremo en el segundo extremo (31b) abierto de la vaina (22);

sellar el segundo tapón (26b) de extremo;

- 15 presurizar la cavidad (27);

proporcionar una primera composición que comprende un material resistente a la oxidación;

proporcionar una segunda composición que comprende carburo de silicio;

aplicar la primera composición a al menos una parte de la superficie (25) exterior de la vaina (22) para formar un primer revestimiento (33) exterior; y

- 20 aplicar la segunda composición a al menos una parte del primer revestimiento (33) exterior para formar un segundo revestimiento (51) exterior, que comprende:

depositar fibras (62) reforzadas con SiC que tienen huecos (64) formados entre al menos una parte de las fibras (62) reforzadas con SiC; y

- 25 depositar un material (66) de SiC para llenar al menos parcialmente los huecos (64) formados entre al menos una parte de las fibras (62) reforzadas con SiC;

en el que el segundo revestimiento (51) exterior encapsula sustancialmente la superficie exterior de la vaina (22).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además aplicar la primera composición sobre la superficie (23) interior de la vaina para formar un primer revestimiento (29) interior sobre la misma.

- 30 3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la aplicación del primer revestimiento (29) interior y la aplicación del primer revestimiento (33) exterior se realizan mediante depósito de capas atómicas.

4. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que el primer revestimiento (29) interior y el primer revestimiento (33) exterior tienen un espesor comprendido en un intervalo de 10 nanómetros a 10 micrómetros.

- 35 5. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la aplicación del primer revestimiento (29) interior se realiza cuando ninguno de entre el primer tapón (26a) de extremo y el segundo tapón (26b) de extremo está posicionado en el interior del primer extremo (31a) abierto y el segundo extremo (31b) abierto, o cuando uno de entre el primer tapón (26a) de extremo y el segundo tapón (26b) de extremo está posicionado en el interior del primer extremo (31a) abierto y el segundo extremo (31b) abierto, respectivamente, de la vaina (22).

- 40 6. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la aplicación del primer revestimiento (33) exterior y del segundo revestimiento (51) exterior se realiza cuando los tapones (26a, b) de extremo primero y segundo están posicionados en cada uno de los extremos (31a, b) primero y segundo de la vaina (22).

7. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el depósito de las fibras (62) reforzadas con SiC se realiza mediante enrollado o trenzado.

8. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que las fibras (62) reforzadas con SiC forman una capa (60) que tiene un espesor de aproximadamente 0,25 mm a aproximadamente 1,02 mm .
9. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el segundo revestimiento (51) exterior tiene una densidad de aproximadamente 2,5 a aproximadamente 3,22 gramos/cm³.
- 5 10. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la primera composición se selecciona de entre el grupo que consiste en Al₂O₃, Cr₂O₃ y mezclas de los mismos.
11. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el depósito del segundo revestimiento (51) exterior abarca una superficie expuesta de cada uno de los tapones (26a, b) de extremo primero y segundo posicionados en el interior de los extremos (31a, b) abiertos primero y segundo de la vaina (22).
- 10 12. Vaina (22) de barra de combustible nuclear que contiene cerámica, revestida con material compuesto, para un reactor nuclear de agua, en la que la vaina (22) comprende:
- una pared (21) tubular de aleación de circonio que tiene una superficie (23) interior y una superficie (25) exterior;
 - una cavidad (27) formada por la pared (21) tubular de aleación de circonio, en la que la cavidad (27) tiene combustible (20) nuclear dispuesto en la misma;
 - 15 un primer extremo (31a) abierto; y
 - un segundo extremo (31b) abierto;
- un revestimiento de material compuesto, que comprende:
- una primera composición depositada sobre al menos una parte de la superficie (25) exterior de la pared (21) tubular de aleación de circonio de la vaina (22) para formar un primer revestimiento (33) exterior, en el que dicha primera composición comprende un material resistente a la oxidación; y una segunda composición depositada sobre al menos una parte del primer revestimiento (33) exterior para formar un segundo revestimiento (51) exterior, en el que dicha segunda composición comprende:
 - 20 múltiples fibras (62) reforzadas con SiC enrolladas o trenzadas para formar una capa (60) de fibras, en el que dichas fibras (62) tienen huecos (64) formados entre las mismas; y
 - 25 un material (66) de SiC para llenar al menos parcialmente los huecos (64) formados entre dichas fibras (62) de la capa (60) de fibras.
13. Vaina según la reivindicación 12, que comprende además la primera composición depositada sobre la superficie (23) interior de la vaina (22) para formar un primer revestimiento (29) interior sobre la misma.
14. Vaina según la reivindicación 12, que comprende además tapones (26a, b) de extremo primero y segundo posicionados en los extremos (31a, b) primero y segundo, respectivamente, de la vaina (22), teniendo cada uno de entre los tapones (26a, b) de extremo primero y segundo una superficie superior que forma un primer extremo cerrado y un segundo extremo cerrado, respectivamente, de la vaina (22).
15. Vaina según la reivindicación 14, en la que el revestimiento de material compuesto se deposita sobre la superficie superior de cada uno de los tapones (26a, b) de extremo primero y segundo.

35

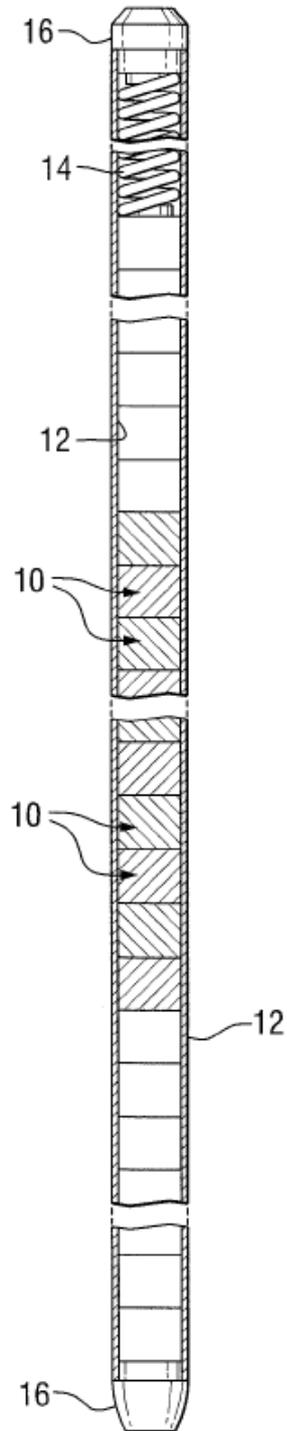


FIG. 1
TÉCNICA ANTERIOR

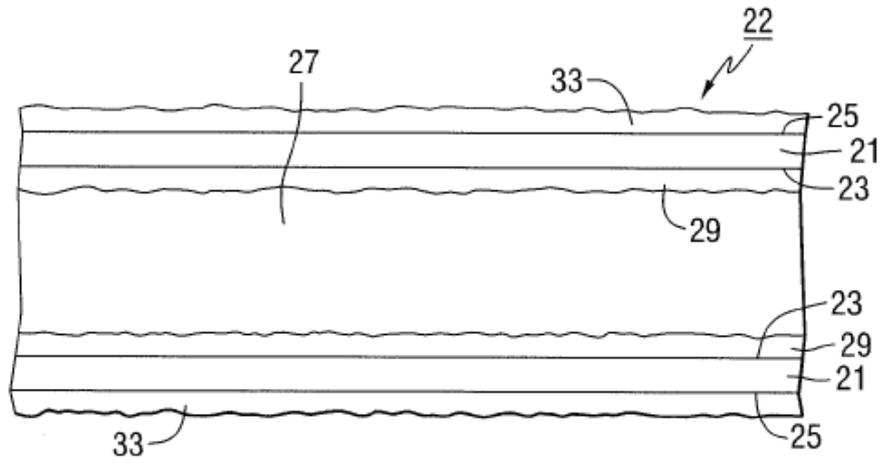


FIG. 2

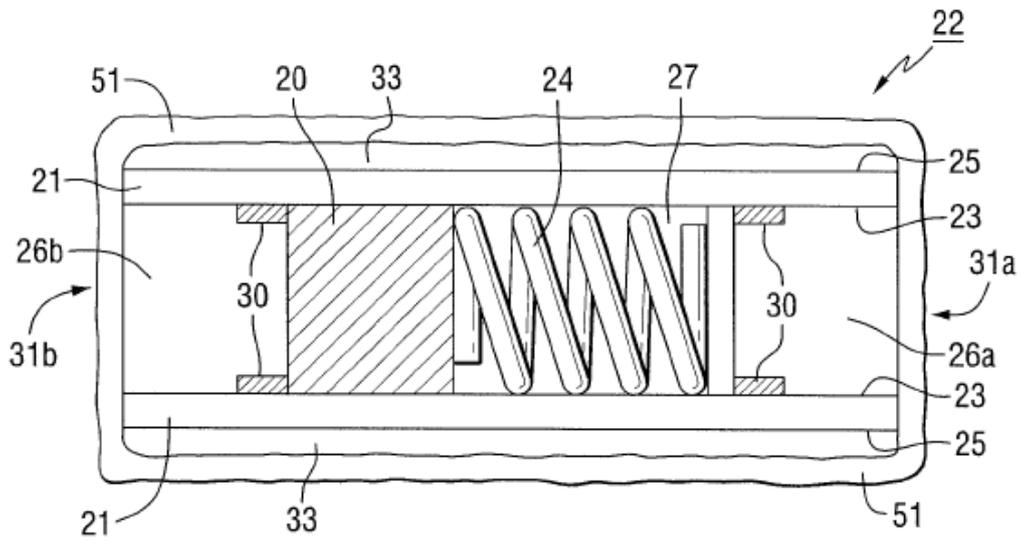


FIG. 3

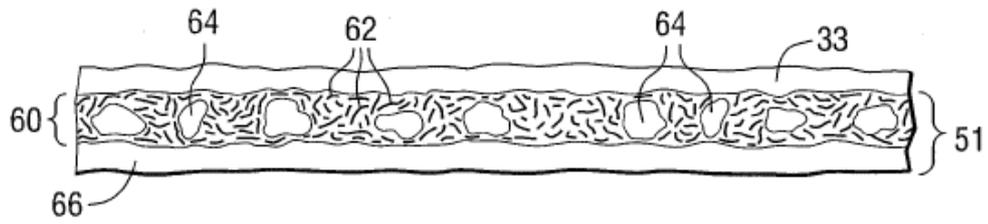


FIG. 4

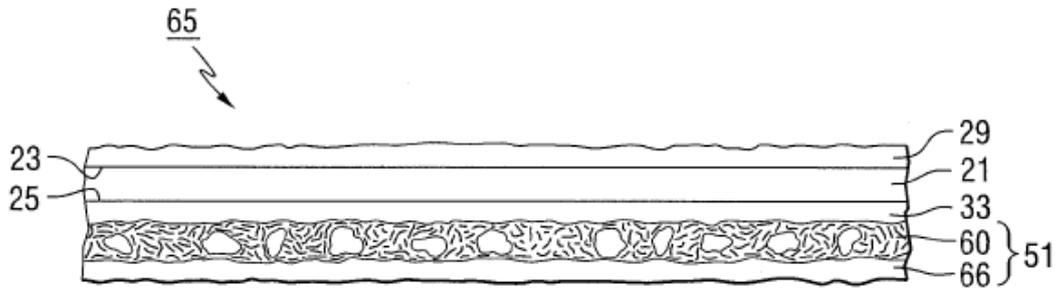


FIG. 5