

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 748 151**

51 Int. Cl.:

G21C 3/10 (2006.01)

G21C 3/06 (2006.01)

G21C 3/07 (2006.01)

G21C 21/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.08.2014 PCT/US2014/051472**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.03.2015 WO15038286**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.08.2014 E 14844134 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.07.2019 EP 3047489**

54 Título: **Tubo de revestimiento de combustible de matriz de SiC con obturadores terminales de sinterización por plasma de chispa**

30 Prioridad:

16.09.2013 US 201314027299

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

13.03.2020

73 Titular/es:

**WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC
(50.0%)**

**1000 Westinghouse Drive, Suite 141
Cranberry Township, PA 16066, US y
TOSHIBA ENERGY SYSTEMS & SOLUTIONS
CORPORATION (50.0%)**

72 Inventor/es:

**XU, PENG;
LAHODA, EDWARD J.;
HALLSTADIUS, LARS;
CHOI, JOON HYUNG;
HIGUCHI, SHINICHI y
KANO, FUMIHISA**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 748 151 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

Tubo de revestimiento de combustible de matriz de SiC con obturadores terminales de sinterización por plasma de chispa

Antecedentes5 **1. Campo**

La invención se refiere a un tubo de revestimiento de varilla de combustible compuesto por carburo de silicio (en lo sucesivo designado como SiC), con independencia de la arquitectura del diseño del revestimiento (monolítico, dúplex con SiC monolítico sobre el interior y un material composite con fibras de SiC y una matriz de SiC sobre el exterior, etc.) con un obturador terminal cerrado herméticamente de sinterización por plasma de chispa.

10 **2. Descripción de la técnica relacionada**

En un típico reactor nuclear, como por ejemplo un reactor con agua a presión (PWR) de agua pesada (por ejemplo un CANDU) o un reactor con agua en ebullición (BWR), el núcleo del reactor incluye un gran número de conjuntos combustible, cada uno de los cuales está compuesto por una pluralidad de elementos combustible alargados o de varillas de combustible. Cada una de las varillas de combustible contiene material fisible de combustible nuclear como por ejemplo al menos uno entre el dióxido de uranio (UO₂), dióxido de plutonio (PuO₂), nitruro de uranio (UN) y / o siliciuro de uranio (U₃Si₂) con posibles adiciones de, por ejemplo, boro o compuestos de boro, gadolinio o compuestos de gadolinio y uno u otro sobre o en unas pellas, generalmente en forma de una pila de pellas de combustible nuclear, aunque también se utilizan formas anulares o particuladas de combustible. Las varillas de combustible presentan un revestimiento que actúa como confinamiento del material hendible. Las varillas de combustible están agrupadas conjuntamente en una formación organizada para proporcionar un flujo de neutrones en el núcleo para soportar un índice elevado de fisión nuclear y de esta manera liberar una gran cantidad de energía en forma de calor. Un líquido refrigerante, por ejemplo agua, es bombeado a través del núcleo para extraer el calor generado dentro del núcleo para la generación de trabajo útil. Los conjuntos combustible varían de tamaño y de diseño dependiendo del tamaño deseado del núcleo y del tamaño del reactor.

El revestimiento aplicado sobre las varillas de combustible está generalmente compuesto por circonio (Zr) con hasta aproximadamente un 2% en peso de otros metales como por ejemplo Nb, Sn, Fe y Cr. Dichos tubos de revestimiento de aleación de circonio se conocen, por ejemplo, por el documento de *Biancheria et al., Kapil y Lahoda* (Patentes estadounidenses Nos. 3,427,222; 5,075,075; y 7,139,360, respectivamente). Las varillas / revestimiento de combustible presentan una tapa terminal en cada extremo y un dispositivo de soporte superior de retención por ejemplo un muelle de metal para mantener en posición la pila de pellas de combustible nuclear. La FIG. 1 ilustra el tipo de diseño de la técnica anterior que muestra un cordón de pellas 10 de combustible, un revestimiento 12 a base circonio, un dispositivo 14 de soporte superior de retención y unas tapas 16 terminales.

Existen problemas asociados con las varillas de combustible de revestimiento metálico. Pueden desgastarse en contacto con los residuos que puedan estar presentes en el agua de refrigeración anteriormente mencionada. Bajo condiciones extremas, por ejemplo accidentes "más allá de la base del diseño"; el revestimiento metálico puede reaccionar exotérmicamente con el vapor por encima de 1093° C. Estos metales de revestimiento de circonio que protegen el combustible nuclear pueden perder resistencia durante un accidente de "pérdida de líquido refrigerante", en la que las temperaturas del reactor pueden alcanzar hasta los 1204° C y expandirse debido a los gases de fisión internos dentro de la varilla de combustible. Así mismo, las demandas continuas de la industria de los servicios públicos han empujado las temperaturas operativas de los reactores y la exposición a la radiación de los revestimientos hasta límites extremos.

Todo ello ha promovido la consideración de la utilización de materiales de tipo cerámico experimentales como por ejemplo carburo de silicio (SiC) monolítico, fibras y sus combinaciones como se da a conocer en los documentos de Maruyama et al. (Patente estadounidense No. 6,246,740), Zender (Patente estadounidense No. 5,391,428), Hanzawa et al. (Patente estadounidense No. 5,338,576); Feinroth (Patente estadounidense No. 5,182,077 y Publicación de Patente estadounidense No. 2006/0039524 A1), Easler et al. (Publicación de Patente estadounidense No. 2007/0189952 A1); y tangencialmente Korton, (Patente estadounidense No. 6,697,448) como sustitutos completos o parciales de varillas de combustible metálicas.

Debe buscarse en la industria nuclear la combinación absolutamente correcta para conseguir una cerámica generalmente quebradiza, mucho más flexible, para aliviar el esfuerzo / temperatura / presión en situación de fallo total. Una posibilidad es utilizar una fibra de SiC experimental reforzada con composites de SiC; un tubo de dos o tres capas de carburo de silicio estequiométrico en fase beta o alfa de gran pureza cubierto por una capa de composite central de fibras de carburo de silicio estequiométricas en fase beta continuas infiltradas con SiC de fase beta y, en el caso de tres capas, una capa exterior protectora de carburo de silicio de fase beta de grano fino. Se ha propuesto predeformar el componente de fibras, que forman las fibras en matas y en la superposición del devanado inverso de las matas; donde las fibras son revestidas con una capa inferior a un micrómetro de SiC o de carbono o de grafito o de nitruro de boro para proporcionar una superficie de contacto débil que permita el deslizamiento, todo ello para conseguir una mayor resistencia a la deformación y mayor flexibilidad. Feinroth et al. en la Publicación de

Patente estadounidense No. 2006/0039524 A1 describe dichos tubos de combustible nuclear y una densificación de matriz que utiliza procedimientos conocidos de infiltración de vapor químico (CVI), también se han propuesto como sustituto la impregnación polimérica y pirolisis (PIP). Fibras de alúmina (Al_2O_3) en una matriz de aluminio.

5 Según se utiliza en la presente memoria el término "Composite Cerámico" significa y se define como todas las estructuras de tipo composite anteriormente descritas incluyendo el SiC y la Al_2O_3 .

Sorprendentemente, muy poco se dice acerca de los obturadores terminales para dichos composites cerámicos. De hecho, ha sido hasta ahora una tarea muy etérea el encontrar una tecnología de hermeticidad que fije un obturador terminal y asegure la hermeticidad para un revestimiento de Composite Cerámico, como por ejemplo un revestimiento de las varillas de combustible de carburo de silicio, debido a los diversos condicionamientos aplicados sobre una junta de una superficie de contacto cuya finalidad sea:

- asegurar la resistencia mecánica durante y después de los episodios operativos anticipados, accidentes infrecuentes y fallos limitativos, en el funcionamiento normal;
- asegurar la hermeticidad del obturador terminal con respecto a la junta de revestimiento sometida a la irradiación y al entorno corrosivo específico de un reactor nuclear;
- 15 - permitir que el proceso de unión se adapte al revestimiento completamente cargado (con las pellas de combustible y un dispositivo de soporte superior de retención). Así mismo, la tecnología del obturador terminal y de estanqueidad debe permitir la presurización de la varilla de combustible con Helio u otro gas de relleno térmicamente conductor a presiones típicamente de hasta 2070 kPa; y
- permitir que el proceso de unión se adapte a la economía de escala para ser rentable.

20 Diversas tecnologías de estanqueidad se han explotado en el pasado reciente; pero hasta la fecha ninguna de ellas demostró ser satisfactoria en un entorno nuclear, que aquí es esencial.

Así, se han propuesto diversas tecnologías de estanqueidad que utilizan diversos compuestos (distintos del SiC) para cerrar herméticamente las partes de SiC (formulaciones a base de Ti, formulaciones a base Al-Si), incluyendo soldadura fuerte y otras técnicas, por ejemplo: V. Chaumat et al., Publicación de Patente estadounidense No. 2013/0004325 A1; A. Gasse, Publicación de Patente estadounidense No. 2003/0038166; A. Gasse et al., Patente estadounidense No. 5,975,407; F. Montgomery et al., (Patente estadounidense No. 5,447,683); G. A. Rossi et al. (Patente estadounidense No. 4,925,608); y McDermid, "Diseño de Aleación de Soldadura Fuerte Termodinámica para unir Carburo de Silicio," J. Am. Ceram. Soc., \ Vol. 74, No. 8, pp. 1855 -1860, 1991.

30 Se ha producido una explosión investigadora de la tecnología de unión de SiC desde 2007: por ejemplo: CH Henager, Jr. et al. "Revestimientos y Unión para SiC y Composites de SiC para Sistemas de Energía Nuclear", Journal of Nuclear Materials, 367, 370 (2007) 1139 - 1143; AL Ferraris et al., "Unión de SiC / Composites SiC Mecanizados para Reactores de Fusión Termonuclear," Journal of Nuclear Material, 375 (2008) 410 - 415; J. Li et al., "Soldadura fuerte eutéctica de Ti - Si de alta temperatura para unir SiC", Materials Letters, 62 (2008), 3135 - 3138; W. Tian, "Unión de reacción de materiales cerámicos de SiC utilizando composites a base de TiB_2 ," Journal de la European Ceramic Society, 30 (2010) 3203 - 3208 and M. Ferraris et al., "Unión de materiales a base de SiC para aplicaciones de energía nuclear" Journal of Nuclear Materials, 417 (2011) 379 - 382. Estos artículos intentan valorar funcionalidades, de los medios para asegurar unos rendimientos cada vez más elevados. Las funcionalidades requieren unos diseños y unos materiales cada vez más sometidos a esfuerzos en cuanto resulta económicamente necesario para satisfacer las necesidades energéticas mundiales.

40 Los modelos cerámicos expuestos ya no se remiten a experimentos y, se ofrecen en general una resistencia mecánica elevada, se consideran capaces de poner en práctica la estanqueidad a los gases requerida por un reactor nuclear; sin embargo, estas tecnologías de unión no consiguieron demostrar la resistencia a la corrosión y a la irradiación necesarias para sobrevivir en un entorno de reactor nuclear durante una vida útil normal de una varilla de combustible. Otras tecnologías de estanqueidad (por ejemplo la sinterización por plasma de chispa experimental - en lo sucesivo "SPS") descrita por Munir et al., "El efecto del campo eléctrico y de la presión sobre la síntesis y los materiales de consolidación describe : un panorama del procedimiento de sinterización por plasma de chispa", J. Mater Sci., 41 (2006) 763, 777. No hacen uso de compuestos químicos adicionales; pero la fabricación a gran escala económica que utiliza este proceso es huido hasta la fecha y sigue constituyendo un desafío. El prensado isostático en caliente (HIP), una técnica conocida para su uso en muchas áreas comerciales, puede también ser utilizada para unir SiC con SiC; pero el HIP, destacado previamente, A. Rossi et al., Patente estadounidense No 4,925,608, no es práctico en el entorno frágil de las varillas de combustible nuclear de estanqueidad debido al largo ciclo de sinterización y a las altas temperaturas, aproximadamente de $1700^{\circ}C$ y a la presión extremadamente alta, y no es aplicable a la producción en masa. Se necesita un procedimiento de unión comercialmente viable para cerrar de manera estanca composites cerámicos tubulares con unas tapas terminales de material cerámico o metal.

55 Otra técnica anterior se encuentra en la Patente estadounidense No. 5,182,077 y en la solicitud de patente estadounidense No. 2010/0139840. La patente estadounidense 5,182,077 divulga una varilla de combustible para un reactor nuclear enfriado por agua con un revestimiento compuesto por un tubo de fibras de cerámica enrolladas

continuas, en el que las fibras enrolladas están impregnadas con una matriz. La solicitud de patente estadounidense publicada 2010/0139840 A1 divulga un proceso de unión, mediante sinterización por plasma de chispa de al menos dos partes cerámicas refractarias presentando cada una de las partes al menos una superficie destinada a quedar unida mediante sinterización por plasma de chispa, en el que las superficies que tienen que ser unidas son situadas en contacto sin adición de ningún tipo entre las superficies. Una presión de unión es aplicada a las partes cerámicas y una corriente eléctrica pulsada es aplicada a las partes cerámicas para elevar la temperatura de las partes hasta una temperatura de unión de al menos 1300° C. La elevación de la temperatura se lleva a cabo gradualmente en una serie de rampas de temperatura con una pendiente de 50° C a 200° C por minuto.

Es un objetivo principal de la presente invención proporcionar un procedimiento para la fabricación de unas juntas de estanqueidad terminales y unos procedimientos útiles y viables comercialmente, herméticamente selladas, de alta resistencia, resistentes a la irradiación en un entorno nuclear alarmante utilizando tubos composite cerámicos como base para la contención de pastillas de combustible.

Sumario

La presente invención, con el fin de solventar los problemas referidos y conseguir el objetivo principal, está relacionada con un procedimiento de cierre hermético de un tubo formado a partir de un composite cerámico con al menos una tapa terminal, según se define en la reivindicación 1, que comprende las etapas de:

- (1) la provisión de un tubo (40,12) formado a partir de un composite cerámico que presenta unas paredes del tubo, al menos un extremo y un eje geométrico y al menos un material de la tapa (14) terminal;
- (2) la aplicación de al menos un material de la tapa (14) terminal a al menos un extremo del tubo (40, 12), presentando la tapa (14) terminal un lado exterior y un lado interior;
- (3) la aplicación de al menos un electrodo (22) primario al lado exterior de la al menos una tapa (14) terminal;
- (4) la aplicación de al menos un electrodo (24) adicional al lado (20) exterior del tubo (40, 12);
- (5) la aplicación de corriente a al menos el electrodo primario utilizando el electrodo adicional y un procedimiento (50) de sinterización por plasma de chispa para suministrar una elevación rápida de la temperatura durante de 0,01 a 6,0 minutos en una superficie de contacto entre el tubo y la tapa terminal a un ritmo de 200° C / min. hasta 1500° C / min.; en la que las temperaturas de la superficie de contacto oscilan entre la temperatura ambiente y 2500° C.

Características adicionales preferentes de la invención se definen en las subreivindicaciones.

Las tapas terminales de cerámica son, de modo preferente, las mismas o un precursor del mismo material que el composite cerámico que pasará a ser ese material tras el calentamiento.

Los parámetros operativos del proceso de plasma por chispa generalmente conocidos (proceso SPS), excepto respecto de intervalos particulares críticos divulgados y descubiertos en la presente memoria son, de modo preferente: la aplicación de las elevaciones de la temperatura en el obturador / revestimiento, espacios libres / superficie de contacto de hasta 1500° C / min., a un ritmo rápida de, de modo preferente, 100° C / min. a 1000° C / min., como máxima preferencia de 1000° C / min., y hasta una temperatura de pico de 2500° C, de modo preferente de 1800° C a 2150° C, como máxima preferencia de 2100° C a de 1,0 a 6,0 minutos y de 5,0 a 10 MPa. Como se muestra en la FIG. 2, con relación a las FIGS. 3 y 4, el electrodo 24 circunferencial es opcional pero preferente. La técnica más sencilla de la FIG. 2 utiliza exactamente dos electrodos 22 terminales. Ambas aplicaciones son de utilidad. Así mismo, de modo preferente, se aplica una presión de unión después de la etapa (4) de 4 MPa a 20 MPa con un tiempo de espera de 5 minutos a 60 minutos; y un gas inerte por ejemplo helio es insertado / inyectado / bombeado dentro del tubo después de la etapa (1) o la etapa (2) posiblemente mediante taladrado dentro del obturador terminal, insertando el gas a presión y cerrando herméticamente el tubo del obturador terminal a una presión de 345 a 3450 kPa.

Las tapas terminales preferentes están, de preferencia, fabricadas a partir de SiC, también pueden ser utilizados tapas terminales de metal, por ejemplo de circonio o de aleaciones de circonio u otros metales. Un grupo de carburos o nitruros ternarios pueden también ser utilizados como materiales de las tapas terminales, como por ejemplo Ti_2AlC , Ti_4AlN_3 , Ti_3AlC_2 , Ti_2SiC , Ti_3SiC_2 , Ti_3SnC_2 , Zr_2AlC , Zr_2TiC , Zr_2SnC , Nb_2SnC , Nb_3SiC_2 , $(Zr_xNb_{1-x})_2AlC$ donde $0 < x < 1$.

El composite cerámico de máxima preferencia o el precursor del mismo y las tapas terminales están fabricados a partir de un composite de SiC que comprende un SiC monolítico sobre el interior y al menos una de las capas de fibras de SiC sobre una matriz de SiC. Como máxima preferencia, los puntos de la superficie de interconexión / contacto de las tapas terminales y de los extremos composite cerámicos están pulidos. El tubo composite cerámico puede oscilar entre 60,96 cm y 546,64 cm de largo para adaptarse a una amplia gama de diseños del reactor.

Breve descripción de los dibujos

Una comprensión en profundidad de la invención se puede obtener a partir de la descripción subsecuente de las formas de realización precedentes tomadas en combinación con los dibujos que se acompañan, en los que:

- 5 La FIG. 1 es una vista en sección longitudinal de tamaño ampliado de una varilla de combustible de aleación de circonio de la técnica anterior que contiene pellas de combustible, un resorte de retención y unas tapas terminales;
- la FIG. 2 ilustra una vista en sección transversal de un proceso de SPS para cerrar herméticamente las tapas terminales en una operación doble sobre ambos extremos de un composite cerámico sin electrodos secundarios;
- 10 la FIG. 3 ilustra una vista en sección transversal de un proceso de SPS que utiliza un extremo de estanqueidad circunferencial cada vez con unos electrodos circunferenciales secundarios;
- la FIG. 4 ilustra una vista en sección transversal de un proceso de SPS que utiliza un cierre de estanqueidad superior e interno central, una tapa terminal en cada extremo con unos electrodos circunferenciales secundarios, y
- 15 la FIG. 5, que muestra de forma óptima la invención, ilustra un diagrama de flujo genéricamente esquemático del proceso.

Descripción de la forma de realización preferente

20 El revestimiento de combustible actual y estándar está compuesto por varias aleaciones de circonio que actúan como barrera de producto de fisión e impiden la liberación de materiales radioactivos al entorno. Aunque las aleaciones de circonio presentan propiedades neutrónicas deseables y, en el pasado, una solidez y una resistencia a la oxidación suficientes en líquido refrigerante en condiciones operativas normales, rápidamente se oxidan a temperaturas más allá de la base del diseño por encima de 1200° C. Debido a que la reacción del vapor de circonio es exotérmica y rápida y se obtiene hidrógeno durante esta reacción, se han propuesto nuevos materiales, por ejemplo carburo de silicio (SiC) y se han puesto a prueba de manera experimental, que presentan una resistencia a la oxidación mucho mejor que las aleaciones de circonio a temperaturas por encima de 1200° C. El uso de materiales a base de SiC avanzados, ya no en la completa etapa experimental, pueden enormemente mejorar la temperatura de fallo del combustible en > 600° C en comparación con el revestimiento consistente en un revestimiento compuesto por una aleación de circonio - lo que, por sí mismo, resulta impresionante. Esta aplicación describe un procedimiento de cierre estanco que puede operar un tubo de combustible nuclear cerámico en un reactor nuclear a temperaturas elevadas; y forma un cierre estanco terminal tolerante a las radiaciones que puede ser operado a > 1200° C sobre tubos de varillas de combustible fabricadas a partir del "composite cerámico" anteriormente descrito y definido.

35 El tubo de varilla de combustible de "Composite Cerámico", según se definió con anterioridad, está compuesto, como máxima preferencia, por múltiples capas de materiales de SiC cerámicos, incluyendo composites de SiC, SiC - SiC monolítico denso. Cada una de las capas desempeña una función específica que contribuye a satisfacer las exigencias de realización respecto del revestimiento. En una versión preferente del revestimiento de "composite cerámico" la capa interior del revestimiento consiste en SiC monolítico denso, que ofrece una permeabilidad extremadamente baja. La función primaria de esta capa es la contención de productos de fisión. Para mejorar la fiabilidad, el revestimiento puede incorporar hasta tres capas de SiC monolítico para obtener una contención redundante de productos de fisión. Cada capa estará separada por una capa intermedia de pirocarbono, que es un material similar al grafito, pero con algún enlace covalente entre sus láminas de grafeno como resultado de las imperfecciones en el curso de su fabricación, u otro material como por ejemplo nitruro de boro o carburo de boro que impiden la formación de una masa de SiC continua para impedir la propagación de grietas de una capa a otra. La siguiente capa de la estructura de revestimiento es un Composite Cerámico de SiC - SiC.

45 Un Composite Cerámico de SiC - SiC está en tensión, manteniendo la capa monolítica en compresión para contrarrestar el gradiente de esfuerzo radial a través del revestimiento durante periodos de alto flujo de calor. El composite SiC - SiC puede adaptarse a este gradiente de esfuerzo debido a su límite de esfuerzo a la tracción superior en comparación con un SiC monolítico denso. Así mismo, la capa de composite puede ser manipulada ajustando la arquitectura de las fibras de refuerzo. Por ejemplo, ángulos de trenzado o devanado diferentes pueden afectar a la resistencia relativa del revestimiento en las direcciones axial y circunferencial. Esto da un margen para diseñar la arquitectura más apropiada para adaptarse a los esfuerzos que se esperan durante la vida útil del revestimiento. La capa de SiC - SiC exterior desempeña la función básica de mantener la integridad estructural del revestimiento en el caso de fallo de la(s) capa(s) de SiC monolítico interior. En todo este diseño se define de nuevo como incluido en el término anteriormente definido de "Composite Cerámico". Capas de SiC adicionales pueden ser añadidas para proporcionar características adicionales tales como una resistencia a la corrosión incrementada, una caída de la presión reducida, una transferencia de calor incrementada u otros atributos. Todo ello de nuevo se define como incluido en el término anteriormente definido como "Composite Cerámico".

En la presente solicitud, un procedimiento enormemente mejorado, específicamente adaptado a esta tecnología específica, implica un campo eléctrico asistido con parámetros mejorados donde la sinterización por plasma basada en la tecnología de la sinterización es utilizada con unos parámetros operativos de utilidad descubiertos y divulgados. De utilidad para la presente aplicación, para unir el obturador terminal de SiC a la cerámica tubular, en su superficie de contacto; de modo preferente, un tubo de varilla metálica a base de SiC y el cierre estanco del tubo con una presión de relleno de hasta 3450 kPa; esto es, la sinterización por plasma de chispa (SPS), versiones relacionadas con la presente invención, se muestran en las FIGS. 2 a 4.

Enfoques alternativos podrían utilizar obturadores con caras opuestas situadas o bien en el interior del tubo o en el exterior del tubo. El procedimiento SPS presenta un ritmo de calentamiento de hasta 1500° C / min. y es capaz de unir dos piezas de SiC o prepiezas / precursores de manera conjunta en unos pocos minutos. La temperatura local deseable en la superficie de contacto oscila entre 1400° C y 2150° C, los intervalos del tiempo de espera oscilan de 0,01 minutos a 60 minutos, de modo preferente de 5 minutos a 60 minutos y la presión oscila de 5 MPa a 60 MPa y la presión oscila entre 0,001 y 50 MPa, de modo preferente de 5 MPa a 20 MPa.

Dirigiendo ahora la atención a las Figuras, la FIG. 2 ilustra el uso de un proceso de SPS - sinterización por plasma de chispa - para aplicar, cementar, fundir, tapas terminales cerámicas al composite cerámico utilizando un aparato 11 de sinterización por plasma de chispa, utilizando aquí unos electrodos primario y opcional secundario. Así mismo, un gas inerte, por ejemplo He, es insertado en los tubos para obtener una contrapresión interna de 345 a 3450 kPa mediante procesos conocidos, incluyendo el taladrado de los obturadores terminales, insertando el gas y el reaprovisionamiento del obturador terminal que contiene al menos un tubo 12 composite cerámico, de utilidad para mantener las pellas de combustible nuclear dentro de un reactor nuclear, dispuestas entre al menos una tapa 14 terminal, tapa 14 terminal que encaja con la parte superior 16 y con el interior 18 del tubo composite cerámico, y aquí también con el exterior 20 del tubo composite cerámico. Una pasta puede ser aplicada a la tapa 14 terminal o a las superficies 16 y 18 para obtener una capacidad de estanqueidad adicional. Al menos dos electrodos están fijados a la tapa / tubo terminal, estando cada electrodo 22 situado en posición adyacente a y en contacto con la al menos una tapa terminal. La superficie de contacto 26 entre las tapas terminales y los extremos del tubo, como máxima preferencia, está pulida para asegurar una mejor adherencia.

El aparato 10 de sinterización puede ser presurizado al vacío o a temperatura ambiente y disponerse en un horno a una temperatura de 50° C hasta 1500° C. Así mismo, se muestran unos medios 30 de control de la presión / fuente de alimentación, unas líneas 32 de transporte de energía. La(s) tapa(s) terminal(es) son, de modo preferente, de SiC y el espacio preferente de la envuelta 38 de las tapas terminales oscila entre 1,905 cm y 3,175 cm.

La FIG. 3, que emplea los mismos numerales que la FIG. 2, pero que utiliza electrodos circunferenciales opcionales para cerrar herméticamente un extremo sucesivamente, describe un procedimiento en el que la(s) tapa(s) terminal(es) presenta(n) un contacto superior y circunferencial, y la FIG. 4 describe un procedimiento en el que la(s) tapa(s) terminal(es) presenta(n) un contacto superior e interior. En estos procedimientos, hay al menos un electrodo 24 adyacente a y en contacto con o rodeando el tubo composite cerámico. La FIG. 5 muestra el procedimiento de la presente invención, en el que la referencia numeral 40 se suministra un composite cerámico tubular con unas paredes de tubo interior y exterior y un eje geométrico circunferencial; el composite cerámico se ha fijado, en la referencia numeral 42, a al menos una composición de obturador terminal, de modo preferente la misma composición que el composite cerámico. Una tapa 44 terminal que cubre la parte superior, el interior y los laterales del composite - una tapa terminal de estanqueidad completa pero complicada o una tapa 46 terminal que cubre exactamente la parte superior y los laterales del tubo composite cerámico mostrado en la FIG. 3; o una tapa 48 terminal que cubre la parte superior y el interior del tubo composite cerámico mostrado en la FIG. 4. El obturador terminal puede ser situado con o sin pasta sobre el extremo del tubo y los electrodos ser aplicados al tubo y al (a los) obturador(es) terminal(es) y todo ello aplicado dentro de los medios (11, 50) de sinterización por plasma de chispa para cerrar herméticamente las tapas terminales solidificadas de manera segura al extremo del composite cerámico 52.

Así mismo, pueden presentarse las siguientes características:

- la utilización de unos tubos de varillas de combustible herméticamente cerradas por un extremo con una longitud de 60,96 a 548,64 cm de SiC que consiste en al menos una y hasta tres capas internas de SiC monolítico con una densidad teórica de > 95%, una capa de composite de SiC / - SiC y una capa exterior opcional de SiC depositado;
- el uso del tubo de varilla de combustible referido cerrado herméticamente con SiC monolítico o con obturadores terminales de metal en uno o ambos extremos utilizando el procedimiento de sinterización por plasma de chispa con o sin un material de pasta precursor de SiC en la superficie de contacto de unión, utilizando otra pasta de composite cerámico, un material de soldadura fuera de metal, materiales que contengan vidrio como por ejemplo Si y Al, o compuestos de soldadura fuerte metálicos como por ejemplo Si y Al,

- donde los obturadores terminales contienen una hendidura circular con una anchura de 1,001 a 1,1 veces el grosor del tubo de varilla de combustible y una profundidad de 0,127 a 1,27 cm donde el tubo de varilla de combustible está cerrado herméticamente;
- 5 • donde el obturador terminal se ajusta por dentro o por fuera del tubo de varilla de combustible hasta una profundidad de 0,127 a 2,54 cm disponiendo unas caras opuestas en las que el tubo de varilla de combustible está cerrado herméticamente;
- 10 • donde el material de composición / precursor del obturador terminal, pero no el tubo, está fabricado mediante uno de estos procedimientos: deposición química en fase de vapor (CVD), extrusión en frío seguida por sinterización sin presión, HIP, o procedimientos de fabricación aditivos como por ejemplo impresión en 3D y deposición / sinterización asistida por láser;
- donde el material precursor de SiC presenta una densidad que oscila entre un 35% y un 60% del valor teórico;
- 15 • donde las superficies de contacto opuestas del obturador terminal y del tubo de varilla de combustible están pulidas en un acabado de espejo o pulimentado con un papel de lija o refinador de gránulo de diamante de 320 y
- donde el diámetro interior del tubo de varilla de combustible oscila entre 0,635 y 1,524 cm, y el grosor del tubo oscila entre 0,025 y 0,381 cm.

20 La presente invención proporciona un procedimiento dramático y posiblemente futurístico para producir comercial y prácticamente unos tubos de varillas de combustible semiflexibles con una longitud de 60,96 - 548,64 cm cerrados de forma estanca de salvamento, capaz de afrontar desastres, de destrucción controlada, semiflexibles, fabricados a partir de SiC monolítico y matriz de fibras de SiC u otros "composites cerámicos" rellenos de helio u otro gas hasta 3,450 kPa.

25 El tubo de varilla de combustible, de modo preferente, presenta una estructura doble que consiste en una capa interior de SiC monolítico o múltiples capas y un SiC / SiC exterior, de modo preferente, con una capa composite. El tubo está cerrado herméticamente con unos obturadores terminales en un extremo o en ambos extremos fabricados a partir de SiC u otro material. El tubo y los obturadores terminales están unidos entre sí utilizando tecnología de sinterización asistida por un campo eléctrico como por ejemplo el procedimiento de sinterización por plasma de chispa. La unión se puede llevar a cabo en un entorno ambiental o al vacío o en una cámara presurizada o en una cámara calentada. El tubo sellado es estanco a los gases y se deformará sometido a una presión diferencial de hasta 68,950 kPa hasta una temperatura de hasta 2500° C durante al menos 6 años.

Ejemplo:

35 Un "Composite Cerámico" consiste en un tubo de SiC de reactor nuclear de fase alfa estioquiométrico extruido con una longitud de 365,76 cm, para contener combustible nuclear en un reactor, con un diámetro interior de 0,8128 cm y un grosor de pared de 0,0381 cm con una densidad de un 95% de la densidad teórica del SiC, es enrollado con una capa de 0,066 cm de composite de SiC de 6 capas de devanados de fibras de SiC de fase beta estioquiométricas y es infiltrado con el SiC estioquiométrico de fase beta utilizando una infiltración química en fase de vapor hasta una densidad neta para el composite superior a un 80% de la densidad teórica del SiC.

40 Este "Composite Cerámico" fue cerrado herméticamente con unos obturadores terminales de fase alfa estioquiométricos extruidos con unas caras de estanqueidad de tubo interior y superior altamente pulimentadas, como se muestra en la Figura 4, aplicados utilizando sinterización por plasma de chispa como es conocido y definido con anterioridad en una cámara llena de helio a 2,585 kPa a temperatura ambiente. La tasa de calentamiento fue de 200° C / minuto, con una presión de adherencia de 5 MPa, una temperatura de pico de 2100° C y la superficie de contacto de unión del obturador / tubo, y con un tiempo de espera de 5 minutos hasta 60 minutos a la temperatura de pico.

45 Esto proporcionó un procedimiento aplicable de modo satisfactorio unas tapas terminales a los tubos de SiC de Composite Cerámico de acuerdo con el proceso de sinterización por plasma de chispa ajustado descrito anteriormente para obtener un tubo terminal cerrado herméticamente PSA con una presión y unas temperaturas nucleares estándar y sustancialmente resiliente para flexionarse y fracturarse.

REIVINDICACIONES

- 1.- Un procedimiento de cierre hermético de un tubo formado a partir de un composite cerámico con al menos una tapa (14) terminal que comprende:
- 5 (1) la provisión de un tubo (40,12) formado a partir de un composite cerámico con unas paredes del tubo, al menos un extremo, y un eje geométrico y al menos un material de al menos una tapa (14) terminal;
- (2) la aplicación del al menos un material de la tapa (14) terminal a el al menos un extremo del tubo (12) presentando la tapa (14) terminal un lado exterior (20) y un lado interior (18);
- caracterizado por:**
- 10 (3) la aplicación de al menos un electrodo (22) primario sobre el lado (20) exterior de la al menos una tapa (14) terminal;
- (4) la aplicación de al menos un electrodo (24) adicional sobre el lado (20) exterior del tubo (40, 12);
- 15 (5) la aplicación de corriente a al menos el electrodo primario y al electrodo adicional y utilizando un proceso de sinterización por plasma de chispa para suministrar una elevación rápida de la temperatura durante de 0,01 a 6,0 minutos en una superficie de contacto entre el tubo (12) y la tapa (14) terminal a un ritmo de 200° C / min. hasta 1500° C / min., donde las temperaturas de la superficie de contacto oscilan entre la temperatura ambiente y 2500° C.
- 2.- El procedimiento de la Reivindicación 1, en el que el material de las tapas (14) terminales se selecciona entre el grupo que consiste en cerámica, carburo, nitruro, metal y aleación de metales.
- 3.- El procedimiento de la Reivindicación 1, en el que el material de las tapas (14) terminales es a base de SiC.
- 20 4.- El procedimiento de la Reivindicación 1, en el que después de la etapa (1), los extremos de las superficies de contacto de las tapas (14) terminales y del tubo (12) son pulidos.
- 5.- El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende además, en la etapa (5) el mantenimiento de una temperatura de pico de hasta 2500° C durante un tiempo de espera de 0,01 a 60 minutos a presiones desde 0,001 MPa hasta 50 MPa para cerrar herméticamente el tubo (12) en al menos una tapa (14) terminal.
- 25 6.- El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que las tapas (14) terminales son del mismo o de un precursor del mismo material que el composite cerámico.
- 7.- El procedimiento de cualquiera de las Reivindicaciones 1 a 6, en el que los parámetros operativos del proceso de sinterización por plasma de chispa consisten en la aplicación de una elevación rápida de la temperatura a un ritmo de 1000° C / min. hasta 1500° C / min., durante 1,0 a 5,0 minutos para elevar la temperatura de la superficie de contacto hasta 2500° C y de 0,001 a 10 MPa.
- 30 8. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el composite cerámico tubular y las tapas (14) terminales están fabricadas de SiC.
- 9.- El procedimiento de la Reivindicación 8, en el que el composite cerámico (40, 12) tubular está fabricado a partir de un composite de SiC que comprende una capa o múltiples capas a base de SiC monolítico sobre el interior y al menos una capa exterior de fibras a base de SiC y una matriz a base de SiC.
- 35 10.- El procedimiento de la Reivindicación 5, en el que una presión de enlace de 4 a 20 MPa es aplicada después de la etapa (4) con un tiempo de espera de 5 minutos a 60 minutos aplicado después de la etapa (5).
- 11.- El procedimiento de la Reivindicación 5, en el que un gas inerte es insertado dentro del tubo (40, 12) después de la etapa (1) o la etapa (2), a una contrapresión de 345 kPa hasta 3,450 kPa.
- 40 12.- El procedimiento de la Reivindicación 11, en el que el gas inerte es helio.
- 13.- El procedimiento de la Reivindicación 5, en el que al menos la etapa (5) se lleva a cabo en un horno a una temperatura de aproximadamente de 50° C a 1500° C.
- 45 14.- Un composite cerámico (40, 12) tubular fabricado mediante el procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13.

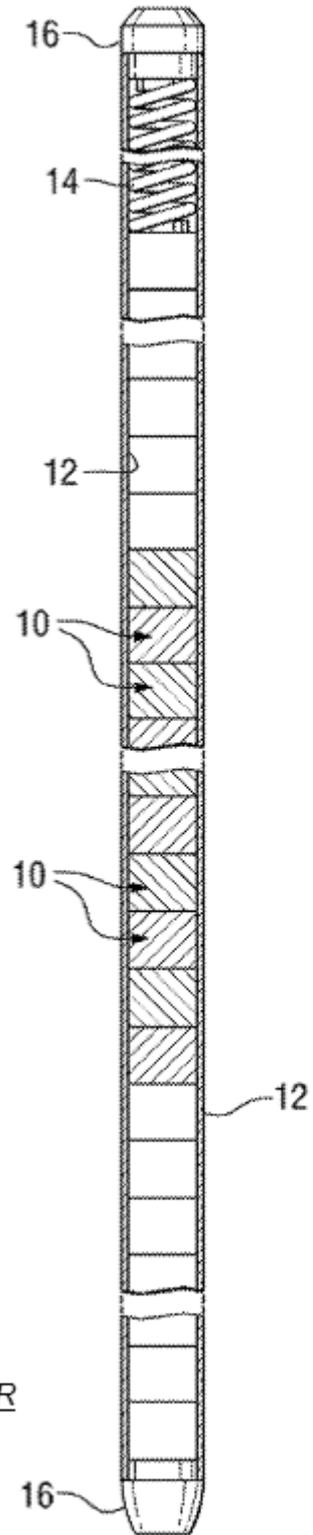


FIG. 1
TÉCNICA ANTERIOR

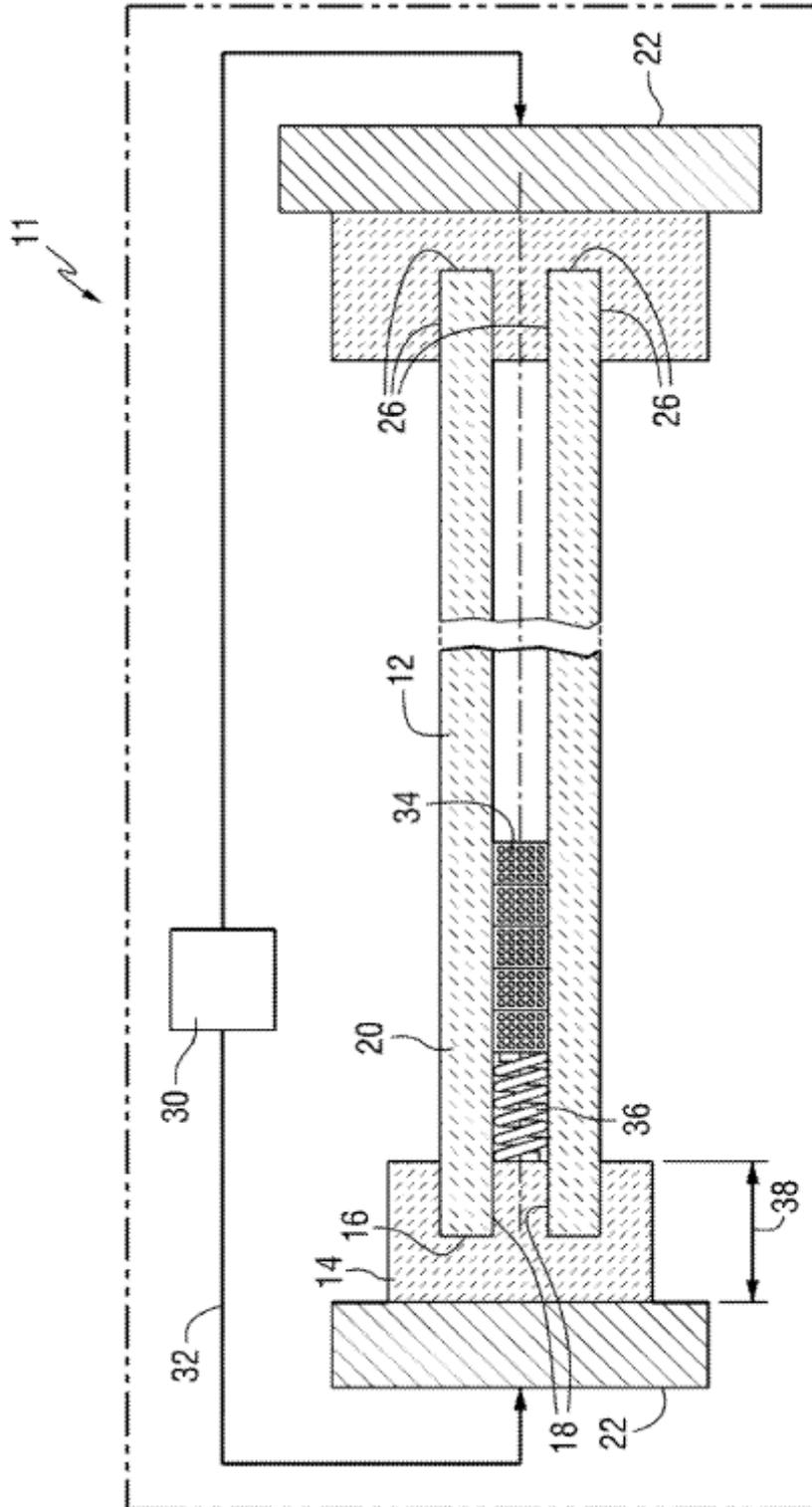


FIG. 2

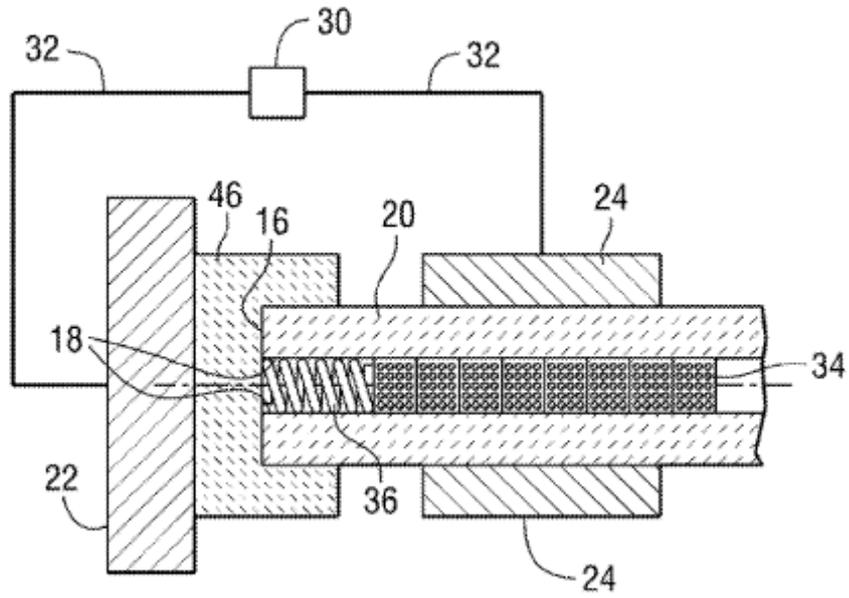


FIG. 3

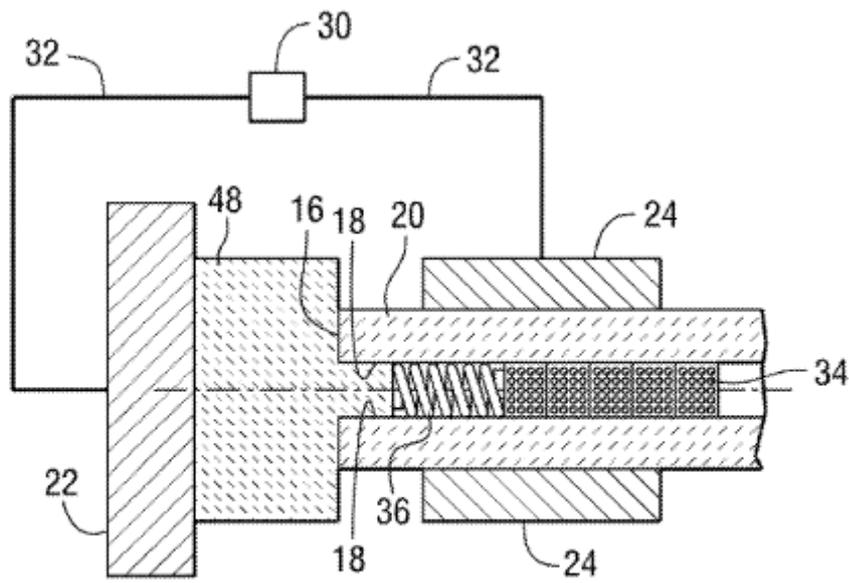


FIG. 4

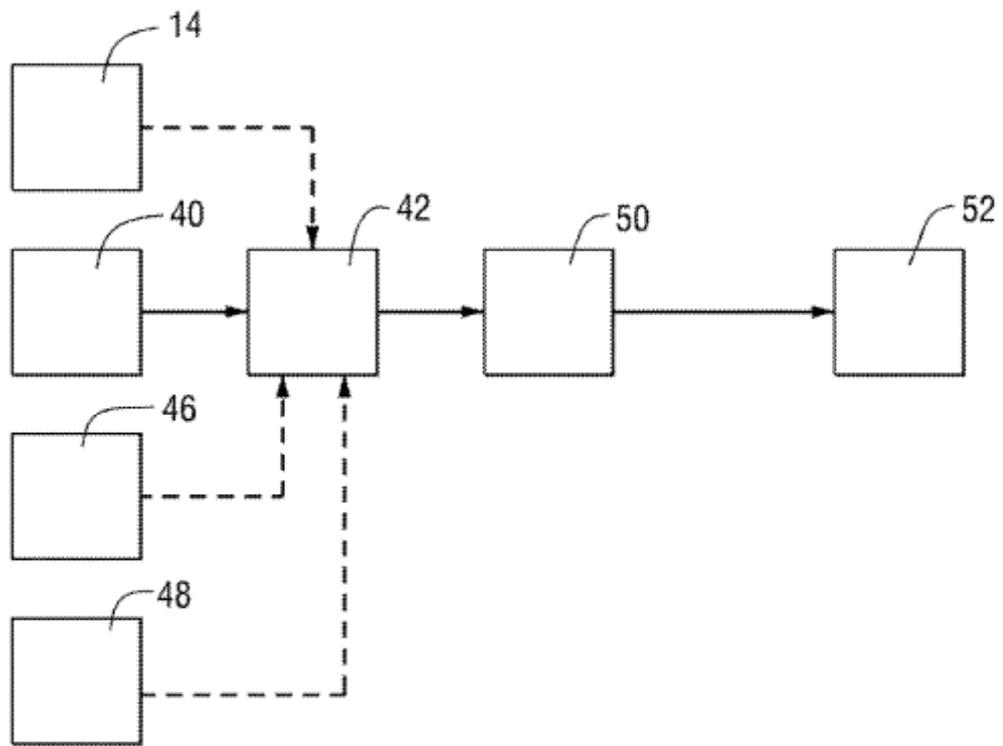


FIG. 5