



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 366 347**

51 Int. Cl.:
G21C 3/07 (2006.01)
C23C 4/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08160753 .3**
96 Fecha de presentación : **18.07.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2017852**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **21.01.2009**

54 Título: **Barra de combustible nuclear con revestimiento inhibidor del desgaste.**

30 Prioridad: **20.07.2007 US 780537**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
19.10.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
19.10.2011

73 Titular/es: **GENERAL ELECTRIC COMPANY**
1 River Road
Schenectady, New York 12345, US

72 Inventor/es: **Gray, Dennis Michael;**
White, David William;
Andresen, Peter Louis;
Kim, Young Jin;
Lin, Yang-Pi;
Curtis, Todd Charles y
Patterson, Charles Beaty

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 366 347 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

Barra de combustible nuclear con revestimiento inhibidor del desgaste.

Antecedentes

5 La invención se refiere, en general, a elementos combustibles para reactores nucleares y, más particularmente, a abrazaderas, espaciadores o retículos de soporte que normalmente se colocan a una distancia predeterminada a lo largo de la longitud de los elementos combustibles, para proporcionar el soporte lateral y espaciado, y mantener los elementos combustibles en posiciones fijas.

10 Los reactores nucleares de agua en ebullición funcionan durante muchos años. Comenzando con su construcción inicial, y a lo largo de su vida útil, estos reactores pueden acumular residuos en sus sistemas moderadores de circulación cerrada. Estos residuos pueden convertirse en un peligro operativo si se permite que los residuos entren en la región del núcleo que contiene el haz de combustible, que tiene barras de combustible generadoras de calor. Para entender este problema, es necesario dar en primer lugar un resumen de la construcción del reactor en lo que respecta a la acumulación de residuos en el núcleo. Posteriormente, se expondrá la construcción del haz de combustible. Se dará énfasis a la necesidad de preservar sustancialmente sin cambios las regiones de pérdida de presión dentro de los haces de combustible. Posteriormente, se resumirán los efectos provocados por los residuos que entran en la región de la barra de combustible de los haces de combustible.

15 La construcción de un reactor nuclear de agua en ebullición puede resumirse simplemente con el fin de entender el problema de atropamiento de residuos. Dichos reactores nucleares están provistos de un gran núcleo central. El flujo de refrigerante/moderador de agua líquida entra en el núcleo desde la parte inferior y sale del núcleo como una mezcla de vapor de agua desde la parte superior.

20 El núcleo incluye muchos haces de combustible lado a lado. El agua se introduce en cada haz de combustible a través de una pieza colada de soporte de haz de combustible desde un plenum impelente de alta presión, que está situado por debajo del núcleo. El agua pasa en un flujo distribuido a través de los haces de combustible individuales, se calienta para generar vapor y sale por la parte superior del núcleo como una mezcla bifásica de vapor de agua desde la que el vapor se extrae para la generación de energía.

25 Las piezas coladas de soporte del núcleo y haces de combustible son una fuente de pérdida de presión en la circulación del agua a través del núcleo. Esta pérdida de presión asegura la distribución sustancialmente uniforme del flujo a través de los haces de combustible individuales del núcleo del reactor. Cuando se recuerda que hay hasta 750 haces de combustible individuales en un núcleo de reactor, puede apreciarse que el aseguramiento de la uniformidad de la distribución de flujo es importante. Interferir en la caída de presión dentro de los haces de combustible podría afectar a la distribución global de refrigerante/moderador dentro de los haces de combustible del núcleo del reactor.

Habiendo expuesto la construcción del reactor nuclear de agua en ebullición en la medida en que es apropiado, la atención puede dirigirse ahora a la construcción de los propios haces de combustible.

35 Los haces de combustible para un reactor nuclear de agua en ebullición incluyen un conjunto de placa de sujeción inferior que soporta una barra de combustible, en el que la placa de sujeción inferior es una estructura colada. El conjunto de placa de sujeción inferior incluye, en su punto más bajo, un estribo que sobresale hacia abajo, que cubre una tobera de entrada. Esta tobera de entrada permite la entrada a un volumen de flujo ampliado dentro de la placa de sujeción inferior. En el extremo superior del volumen de flujo, está localizada una rejilla de soporte de las barras. Entre la rejilla de soporte y la tobera está definido un volumen de flujo.

40 La rejilla de soporte de las barras tiene dos fines. En primer lugar, la rejilla de soporte de las barras proporciona la conexión de soporte mecánico para el peso de las barras de combustible individuales a transmitir por toda la placa de sujeción inferior a la pieza colada de soporte de combustible. En segundo lugar, la rejilla de soporte de las barras proporciona una trayectoria de flujo para el moderador de agua líquida hacia el haz de combustible, para el paso entre las barras de combustible soportadas lado a lado.

45 Por encima de la placa de sujeción inferior, cada haz de combustible incluye una matriz de barras de combustible verticales, que son tubos sellados, cada uno de los cuales contiene material fisionable que, cuando experimenta la reacción nuclear, produce el vapor que genera energía. En el extremo superior de la matriz de barras de combustible verticales está localizada la denominada placa de sujeción superior. Esta placa de sujeción superior mantiene al menos algunas de las barras de combustible en una alineación vertical lado a lado. Algunas de las barras de combustible están fijadas a ambas placas de sujeción superior e inferior. Entre las placas de sujeción superior e inferior, normalmente se incluyen barras de agua o dispositivos equivalentes para mejorar la proporción de moderador de agua a combustible, particularmente en la región superior de mayor fracción de huecos del haz de combustible.

55 Los haces de combustible incluyen también aproximadamente siete espaciadores de barra de combustible, a diversas elevaciones, a lo largo de la longitud del haz de combustible. Estos espaciadores se requieren porque las

barras de combustible son largas (aproximadamente 4,06 m (160 pulgadas)) y finas (aproximadamente de 10,16 a 12,7 mm (de 0,4 a 0,5 pulgadas) de diámetro), y entran en contacto bajo la dinámica del flujo de fluidos y generación de energía nuclear dentro de los haces de combustible. Los espaciadores proporcionan restricciones apropiadas para cada barra de combustible en sus elevaciones respectivas y, de esta manera, evitan el contacto abrasivo entre las barras de combustible, y mantienen las barras de combustible a un espaciado uniforme relativo entre sí a lo largo de la longitud del haz de combustible para un rendimiento óptimo. Como se revelará posteriormente en el presente documento, estos espaciadores son sitios donde los residuos pueden quedar atrapados y dañar las barras de combustible.

Cada haz de combustible está rodeado por un canal. Este canal provoca que el agua que fluye entre las placas de sujeción se restrinja a solo un haz en una trayectoria de flujo aislada entre las placas de sujeción. El canal sirve también para separar la trayectoria de flujo generadora de vapor a través de los haces de combustible, desde la región de circunvalación de núcleo que lo rodea, usándose esta región para la penetración de las barras de control. El agua en la región de circunvalación proporciona también una moderación de neutrones.

Durante el funcionamiento de un reactor nuclear de agua en ebullición, es importante entender que el mantenimiento de la distribución de flujo diseñada originalmente es importante. Específicamente, desde la entrada inferior del plenum impelente (alta presión) al núcleo, hasta la salida del núcleo de la mezcla de vapor y agua a través de las placas de sujeción superiores de los haces de combustible, se encuentra una caída de presión de aproximadamente 138 kPa (20 libras por pulgada cuadrada (psi)) en las condiciones de operación típicas de potencia 100%/flujo 100%. Aproximadamente, de 48 a 55 kPa (de 7 a 8 psi) de esta caída de presión ocurren a través de la pieza moldeada de soporte de combustible. Esta caída de presión sirve para asegurar, principalmente, la distribución uniforme de flujo de refrigerante/moderador a través de muchos de los haces de combustible que constituyen el núcleo del reactor y está relacionada con la prevención de inestabilidades operativas dentro del reactor a ciertas tasas de potencia del reactor. En la placa de sujeción inferior de cada haz de combustible, desde la tobera de entrada en el volumen de flujo, y a través de la rejilla de soporte de las barras de combustible, ocurre una caída de presión de aproximadamente 6,89 a 10,34 kPa (de 1 a aproximadamente 1 y 1/2 psi), que contribuye a establecer una distribución de flujo entre las barras de combustible individuales de cada haz de combustible. Finalmente, a través del propio haz de combustible, desde la rejilla de soporte inferior hasta la salida en una placa de sujeción superior, ocurre normalmente una caída de presión de 75,8 kPa (11 psi).

Habiendo resumido la construcción y funcionamiento de un reactor nuclear de agua en ebullición, puede entenderse ahora el problema de los residuos residentes dentro del sistema moderador de circulación cerrado del reactor. Típicamente, los residuos dentro de los reactores nucleares de agua en ebullición pueden incluir materiales extraños que quedan de la construcción del reactor. Adicionalmente, la corrosión durante la vida útil del reactor libera también residuos. Finalmente, otros residuos pueden introducirse durante las numerosas paradas y reparaciones del reactor nuclear. Por lo tanto, se entenderá que los reactores nucleares constituyen sistemas de circulación cerrada que básicamente acumulan residuos con el paso del tiempo.

Se ha descubierto que un lugar particularmente molesto y habitual para la acumulación de residuos es en los haces de combustible, entre las barras de combustible, particularmente en las proximidades de los espaciadores de barra de combustible. Debe recordarse que cada barra de combustible está rodeada por un espaciador, a la elevación particular del espaciador. Las partículas de residuos tienden a acumularse entre la estructura del espaciador y las barras de combustible, y a menudo vibran dinámicamente con el flujo de refrigerante/moderador en contacto abrasivo con el revestimiento sellado de las barras de combustible. Dicho flujo induce vibración dentro del reactor, que puede provocar desgaste y finalmente daño y/o rotura del revestimiento de las barras de combustible. La rotura del revestimiento puede conducir a la liberación indeseable del gas de fisión acumulado y sellado dentro de la barra de combustible antes de la rotura. Si se libera suficiente gas de fisión debido a la rotura del revestimiento, podría ser necesario cerrar la planta.

Debe entenderse que las plantas nucleares modernas tienen muchos sistemas de seguridad redundantes, diseñados para contrarrestar casualidades operativas anticipadas, tales como que las barras de combustible sean perforadas por los residuos. Dichos fallos no son una preocupación de seguridad. Sin embargo, en la mayoría de los casos dan como resultado que la planta funcione, al menos, a una eficacia menor que la óptima. De esta manera, es muy deseable reducir la incidencia del daño provocado por los residuos a las barras de combustible.

Breve descripción

Brevemente, un aspecto de la invención reside en una barra de combustible que comprende un tubo de revestimiento y un material metálico duro unido a una superficie externa del tubo de revestimiento, en el que el material metálico duro se selecciona entre el grupo que consiste en NiCrAlY, NiCr, FeCrAlY, FeCr o combinaciones de los mismos.

Otro aspecto de la invención reside en una barra de combustible que comprende un tubo de revestimiento y un material compuesto de una matriz metálica y un material cerámico, o un material de fase dura de óxido metálico, en el que la matriz metálica actúa como un agente aglutinante para unir el material cerámico o el material de fase dura de óxido metálico al tubo de revestimiento.

En otro aspecto de la invención, un procedimiento para potenciar las características de desgaste por corrosión de una barra de combustible comprende la etapa de pulverización térmica de un material en polvo metálico duro seleccionado entre el grupo que consiste en NiCrAlY, NiCr, FeCrAlY, FeCr o combinaciones de los mismos, sobre una superficie exterior de un tubo de revestimiento para formar un revestimiento inhibidor del desgaste que tenga un espesor de entre aproximadamente 25 μm (micrómetros) y aproximadamente 175 μm (micrómetros).

En otro aspecto más de la invención un procedimiento para potenciar las características de desgaste por corrosión de una barra de combustible comprende las etapas de:

pulverización térmica de un material en polvo metálico sobre una superficie externa de un tubo de revestimiento para formar una matriz metálica; y

pulverización térmica de un material en polvo de tipo cermet, simultáneamente con el material metálico, sobre la superficie externa del tubo de revestimiento, con lo que la matriz metálica formada por el material metálico actúa como un agente aglutinante para unir el material de tipo cermet sobre la superficie externa del tubo de revestimiento para formar un revestimiento inhibidor del desgaste.

Dibujos

Estas y otras características, aspectos y ventajas de la presente invención se entenderán mejor cuando la siguiente descripción detallada se lea con referencia a los dibujos adjuntos, a modo de ejemplo, en los que los caracteres similares representan partes similares en todos los dibujos, en los que:

La Figura 1 es una vista en perspectiva, parcialmente esquemática, que ilustra un conjunto de combustible que incluye barras de combustible que tienen un revestimiento inhibidor del desgaste de acuerdo con la invención;

La Figura 2 es una vista ampliada de la barra de combustible y la rejilla espaciadora de la Figura 1;

La Figura 3 es una vista en sección transversal ampliada, parcialmente esquemática, de una barra de combustible tomada a lo largo de la línea 3-3 de la Figura 2; y

La Figura 4 es una fotomicrografía en blanco y negro del revestimiento inhibidor del desgaste, que comprende NiCrAlY que se aplicó a la superficie exterior de un nuevo tubo de revestimiento de Zircaloy usando el procedimiento HVOF de acuerdo con la invención.

La Figura 5 es una fotomicrografía en blanco y negro del revestimiento inhibidor del desgaste, que comprende NiCrAlY y TiO_2 que se aplicaron a la superficie exterior de un nuevo tubo de revestimiento de Zircaloy usando los procedimientos HVOF y de pulverización térmica de plasma de aire, respectivamente, de acuerdo con la invención.

La Figura 6 es un gráfico de tasa de desgaste (pulgada²/ciclos) (1 pulgada² = 645 mm²) frente a la tensión de contacto inicial (Ksi) (1 Ksi = 6,89 MPa) en un intervalo de desplazamiento de aproximadamente 0,203 mm (0,008 pulgadas) a una temperatura de aproximadamente 288 °C (550 °F) y una presión de aproximadamente 10,34 MPa (1500 psi) para los tubos de revestimiento de Zircaloy sin el revestimiento inhibidor del desgaste, los tubos de revestimiento de Zircaloy con el revestimiento inhibidor del desgaste que comprendía NiCrAlY que se depositó usando el procedimiento HVOF, y los tubos de revestimiento de Zircaloy con el revestimiento inhibidor del desgaste que comprendía NiCrAlY y TiO_2 que se depositaron usando los procedimientos HVOF y de pulverización de plasma de aire, respectivamente.

Descripción detallada

Haciendo referencia a la Figura 1, un conjunto de haz de combustible se indica de manera general mediante el número de referencia 10. El conjunto de combustible 10 incluye una placa de sujeción superior 12 y una placa de sujeción inferior 14, que captura en extremos opuestos una pluralidad de barras de combustible 16 de la invención. En el caso de conjuntos BWR, el conjunto 10 puede contener una o más barras de agua 18. Una pluralidad de rejillas espaciadoras 20 están dispuestas a lo largo de la longitud de las barras de combustible 16, en localizaciones entre las placas de sujeción 12 y 14. En el caso de conjuntos BWR, el conjunto 10 puede contener una estructura de canal 19 que encierra las barras de combustible 16 y las rejillas espaciadoras 20.

El refrigerante suministrado desde debajo de la placa de sujeción inferior 14 puede llevar residuos del tipo indicado anteriormente. A medida que el refrigerante (agua) fluye hacia arriba, algunos residuos serán interceptados y pueden caer hacia abajo, por debajo de la placa de sujeción inferior 14. Algunos residuos, sin embargo, pueden impactar sobre la superficie exterior de las barras de combustible 16, las rejillas espaciadoras 20 y, en el caso de conjuntos BWR, encerrar la estructura de canal 22, particularmente en los extremos inferiores de la misma. En el caso de que un conjunto de combustible no incluya un dispositivo o pantalla de captura de residuos, cabe esperar que una cantidad aún mayor de residuos impacte sobre la superficie exterior de las barras de combustible 16, las rejillas espaciadoras 20 y otros componentes en el conjunto de combustible 10. Las partículas de residuos a menudo están endurecidas por irradiación y se sabe que corroen rápidamente el exterior de las barras de combustible 16, a medida

que el agua fluye en la dirección indicada por la flecha.

Con referencia ahora a las Figuras 2 y 3, la barra de combustible 16 incluye un tubo de revestimiento de aleación de zirconio, o tubo de revestimiento 22, que contiene gránulos de combustible 24 de un material fisionable, tal como, por ejemplo, UO₂ y similares. El tubo de revestimiento 22 está fabricado habitualmente de aleación de zirconio, tal como Zircaloy-2, Zircaloy-4 y similares.

De acuerdo con una realización, un revestimiento 26 inhibidor del desgaste se aplica a una superficie exterior 32 del tubo de revestimiento 22 en una o más áreas o zonas, donde se espera que ocurra la corrosión. Un área de corrosión esperada es en las proximidades de la rejilla espaciadora o espaciador 20. La dimensión relativa del revestimiento 16 está exagerada en la Figura 3 para fines de descripción.

Con referencia ahora a las Figuras 4 y 5, se muestran fotomicrografías de diversas realizaciones del revestimiento inhibidor de corrosión 26. En la realización ilustrada mostrada en la Figura 4, el revestimiento 26 comprende un material metálico duro 28, tal como NiCrAlY, NiCr, FeCrAlY, FeCr o combinaciones de los mismos, y similares, que tienen un espesor entre aproximadamente 25 μm (micrómetros) y aproximadamente 175 μm (micrómetros).

En una realización alternativa del revestimiento 26 inhibidor del desgaste mostrado en la Figura 5, el revestimiento 26 comprende una combinación tanto de un material de matriz metálica como de un cerámico y/u óxido metálico. Por ejemplo, el material compuesto de metal y material cerámico puede comprender una matriz metálica 30 (fase clara en la fotomicrografía) y material cerámico o material 32 de fase dura de óxido metálico (fase oscura en la fotomicrografía). La matriz metálica 30 proporciona, entre otras cosas, resistencia a corrosión, propiedades de tenacidad y adhesión, mientras que el material cerámico o el material 32 de fase dura de óxido metálico proporciona, entre otras cosas, dureza adicional y resistencia a desgaste al revestimiento 26 de material compuesto. En la realización ilustrada del revestimiento 26 de material compuesto mostrado en la Figura 5, el revestimiento metálico o matriz metálica 30 comprenden NiCrAlY, NiCr, FeCrAlY, FeCr y similares, y el material cerámico o el material 32 de fase dura de óxido metálico comprende ZrO₂ Al₂O₃, Cr₂O₃, TiO₂, Cr₃C₂, combinaciones de los mismos y similares. En la realización ilustrada, el revestimiento 26 tiene un espesor de entre aproximadamente 25 μm (micrómetros) y aproximadamente 175 μm (micrómetros).

En general, el revestimiento 26 inhibidor del desgaste puede aplicarse al tubo de revestimiento usando muchos tipos diferentes de procedimientos de pulverización térmica, dependiendo de los materiales aplicados al tubo de revestimiento.

Por ejemplo, en el caso de que el revestimiento comprenda una sola capa metálica dura mostrada en la Figura 4, el material metálico duro puede aplicarse usando una pistola de pulverización térmica y parámetros específicos para crear la capa metálica dura única. Específicamente, en la realización del revestimiento 26 con el material metálico 28 duro y único mostrado en la Figura 4, el material metálico puede aplicarse usando un procedimiento de pulverización tal como Hiper-Velocidad-Oxi-Combustible (HVOF), Hiper-Velocidad-Aire-Combustible (HVOF), combinaciones de los mismos, y similares, que tengan una temperatura y energía cinética suficientes para provocar que las partículas metálicas se adhieran al revestimiento, y entre sí, para formar un revestimiento. Por ejemplo, la temperatura usada en el procedimiento HVOF era de aproximadamente 3000 K y la velocidad de partícula media de aproximadamente 450 m/s para partículas metálicas de un tamaño medio de aproximadamente 5 μm (micrómetros) a aproximadamente 35 μm (micrómetros).

En el procedimiento de pulverización térmica HVOF (Combustible de Oxígeno de Alta Velocidad) hay un número de pistolas de HVOF que usan diferentes procedimientos para conseguir pulverización a alta velocidad. Un procedimiento es básicamente una cámara de combustión HVOF enfriada con agua a alta presión y una tobera larga. El combustible (queroseno, acetileno, propileno e hidrógeno) y el oxígeno se alimentan a la cámara. La combustión produce una llama caliente de alta presión que se fuerza hacia abajo por una tobera, aumentando su velocidad. El polvo puede alimentarse axialmente a la cámara de combustión HVOF a alta presión, o alimentarse a través del lado de la tobera de tipo Laval, donde la presión es menor. Otro procedimiento usa un sistema más sencillo de una tobera de combustión de alta presión y un tapón de aire. El gas combustible (propano, propileno o hidrógeno) y oxígeno se suministran a alta presión, la combustión ocurre fuera de la tobera pero dentro de un tapón de aire suministrado con aire comprimido. El aire comprimido aplasta y acelera la llama y actúa como refrigerante para la pistola de HVOF. El polvo se alimenta a una alta presión, axialmente desde el centro de la tobera.

En la realización alternativa del revestimiento 26 inhibidor del desgaste mostrado en la Figura 5, hay diferentes procedimientos o técnicas de pulverización térmica que podrían considerarse para crear el revestimiento 26 de cermet deseado. Una técnica para crear el revestimiento 26 de cermet compuesto mostrado en la Figura 5, que es más duro y más inhibidor del desgaste que el revestimiento 26 metálico de una sola capa mostrado en la Figura 4, consiste en inyectar un polvo que incluye tanto el metal como los materiales cerámicos y/o de óxido metálico en el mismo procedimiento de pulverización térmica que se ha optimizado para este polvo específico. Otra técnica para crear el revestimiento compuesto 26 mostrado en la Figura 5 sería inyectar simultáneamente el material en polvo metálico usando un procedimiento de pulverización térmica, que se ha optimizado para el material en polvo metálico, y un procedimiento de pulverización térmica diferente, que se ha optimizado para los materiales en polvo de cerámico y/u óxido.

Por ejemplo, el revestimiento compuesto 26 puede crearse usando simultáneamente un procedimiento de pulverización térmica diferente para el material en polvo metálico y un tipo diferente de procedimiento de pulverización térmica para el material en polvo cerámico y/o el material en polvo de fase dura de óxido metálico. Los dos procedimientos diferentes tendrían como objetivo la misma localización en la superficie de revestimiento, de manera que el metal fundido y el cerámico u óxido metálico se mezclarían cuando impactan con la superficie de revestimiento. De esta manera, cada procedimiento de pulverización térmica podría optimizarse para el material en polvo metálico, material en polvo cerámico y/o material en polvo de fase dura de óxido metálico, para crear la estructura de revestimiento deseada, tal como el tipo de estructura de revestimiento mostrado en la Figura 5.

Los procedimientos de pulverización térmica que pueden usarse para aplicar el material en polvo metálico son HVOF, HVAF y similares, que minimizarían la oxidación de las partículas mientras están en la llama caliente, pero que tienen suficiente energía para chocar con la superficie del revestimiento para formar un revestimiento denso. Es necesario usar procedimientos de pulverización térmica tales como pulverización de plasma de aire, y similares, con temperaturas mayores, para fundir los óxidos metálicos. Si se usa polvo de cermet con carburos, se prefiere no fundir o sobrecalentar los carburos.

El sobrecalentamiento de los carburos provocaría una descomposición indeseable de los carburos. Por lo tanto, se prefiere un procedimiento HVOF, un procedimiento HVAF, y similares, para minimizar la descomposición de los carburos y la oxidación del material metálico dentro del polvo de cermet, mientras están atrapados en la llama caliente.

El procedimiento de pulverización de plasma usado para el material en polvo de fase dura de óxido metálico es básicamente la pulverización de material fundido, o ablandado con calor, sobre la superficie para proporcionar un revestimiento. El material en forma de polvo se inyecta en una llama de plasma de temperatura muy alta, donde rápidamente se calienta y acelera a una alta velocidad. Por ejemplo, la temperatura de llama de la antorcha de plasma puede ser de aproximadamente 15000 K. El material caliente impacta sobre la superficie del sustrato y rápidamente se enfría formando un revestimiento. Este procedimiento de pulverización de plasma realizado correctamente puede denominarse "procedimiento frío" (respecto al material de sustrato que se está recubriendo) puesto que la temperatura del sustrato puede mantenerse baja durante el procesamiento, evitando daños, cambios metalúrgicos y distorsión del material de sustrato.

La pistola de pulverización de plasma comprende un ánodo de cobre y un cátodo de wolframio, ambos de los cuales son gases de plasma enfriados con agua (argón, nitrógeno, hidrógeno, helio), que fluyen alrededor del cátodo y a través del ánodo, que tiene forma de tobera de restricción. El plasma se inicia mediante una descarga de alta tensión que provoca la ionización localizada y una trayectoria conductora para un arco CC, que se forma entre el cátodo y el ánodo. El calentamiento de la resistencia desde el arco puede provocar que el gas alcance una temperatura extrema, se disocie e ionice para formar el plasma. El plasma sale de la tobera del ánodo como una llama de plasma libre o neutro (plasma que no lleva corriente eléctrica), que es bastante diferente del procedimiento de revestimiento con plasma de arco transferido, donde el arco se extiende hasta la superficie a recubrir. Cuando el plasma se estabiliza listo para pulverizarlo, el arco eléctrico se extiende hacia abajo por la boquilla, en lugar de dirigirse al borde más cercano de la tobera del ánodo. Este estiramiento del arco se debe al efecto de pinzamiento térmico. El gas frío alrededor de la superficie de la tobera de ánodo enfriada con agua, que es eléctricamente no conductor, restringe el arco de plasma, elevando su temperatura y velocidad. El polvo se alimenta a la llama de plasma más habitualmente mediante un acceso para polvo externo, montado cerca de la salida de la tobera del ánodo. La energía se calienta tan rápidamente y se acelera que las distancias de pulverización pueden ser del orden de aproximadamente 25 mm a aproximadamente 150 mm (de aproximadamente 0,984 pulgadas a aproximadamente 5,906 pulgadas).

Como se muestra en la Figura 5, aplicando simultáneamente el material en polvo metálico, el material en polvo cerámico y/o el material de fase dura de óxido metálico al exterior del tubo de revestimiento 22, el revestimiento 26 inhibidor del desgaste que se forma en el exterior del tubo de revestimiento 22 es principalmente una composición de cermet con una cantidad suficiente de matriz metálica 30 para unir el material cerámico o el material 32 de fase dura de óxido metálico al tubo de revestimiento 22. En una realización, el espesor del revestimiento compuesto 26 es preferentemente menor de aproximadamente 0,127 mm (aproximadamente 0,005 pulgadas) y, más preferentemente, entre aproximadamente 0,025 mm y aproximadamente 0,125 mm (aproximadamente 0,0098 pulgadas y aproximadamente 0,00492 pulgadas). Se ha descubierto que un revestimiento relativamente grueso podría impedir potencialmente que el agua refrigerante fluyera alrededor de los tubos de revestimiento. Además, revestimientos más gruesos podrían funcionar indeseablemente como una barrera térmica.

Como alternativa, el material en polvo metálico, un material en polvo cerámico y/o un material en polvo de fase dura de óxido metálico pueden premezclarse en una proporción tal que habrá suficiente matriz metálica 30 para unir el material cerámico fundido o el material 32 de fase dura de óxido metálico al tubo de revestimiento 22. El tamaño y porcentaje del material en polvo cerámico o material en polvo de fase dura de óxido metálico que podrían añadirse al revestimiento compuesto 26 es una función del tamaño esperado de los residuos que provocan la corrosión y una compensación entre la resistencia a desgaste por corrosión y resistencia a impacto. La adición de demasiado material en polvo cerámico o material en polvo de fase dura de óxido metálico, para una aplicación específica, puede provocar que el revestimiento de material compuesto 26 falle debido a impacto dinámico y no por desgaste por corrosión.

Ejemplo 1

5 En una forma del revestimiento 26 inhibidor del desgaste, similar al tipo mostrado en la Figura 4, un material en polvo metálico, que comprende NiCrAlY, se aplicó sobre la superficie exterior de un nuevo tubo de revestimiento de Zircaloy, a una velocidad de entre aproximadamente 600 mm/s y aproximadamente 1200 mm/s, usando un procedimiento de pulverización térmica de tipo Hiper-Velocidad-Oxi-Combustible (HVOF), para formar un revestimiento externo de aproximadamente 0,178 mm (aproximadamente 0,007 pulgadas) de espesor.

Ejemplo 2

10 En otra forma del revestimiento 26 inhibidor del desgaste, similar al tipo mostrado en la Figura 5, un material en polvo metálico, que comprende NiCrAlY, se aplicó sobre la superficie exterior de un nuevo tubo de revestimiento de Zircaloy, similar al Ejemplo 1. El revestimiento se aplicó usando un procedimiento de pulverización térmica de tipo Hiper-Velocidad-Oxi-Combustible (HVOF), a una velocidad rotacional de aproximadamente 2120 rpm, que dio como resultado una velocidad de revestimiento superficial de aproximadamente 1100 mm/s y con una velocidad de índice lineal de aproximadamente 6 mm/rotación. Además, un material en polvo cerámico que comprendía TiO₂ se aplicó
15 simultáneamente sobre la superficie exterior del tubo de revestimiento usando un procedimiento de pulverización de plasma, a una velocidad rotacional de aproximadamente 2120 rpm, que dio como resultado una velocidad de revestimiento superficial de aproximadamente 1100 mm/s, con una velocidad de índice lineal de aproximadamente 6 mm/rotación, para formar un revestimiento externo de aproximadamente 0,178 mm (aproximadamente 0,007 pulgadas) de espesor.

20 Los tubos de revestimiento con el revestimiento de NiCrAlY y el revestimiento de NiCrAlY/TiO₂ se colocaron en un aparato de ensayo que simulaba la temperatura del agua, la presión del agua, la química del agua, la dureza de los residuos y la presión de los residuos encontradas habitualmente durante el funcionamiento del reactor nuclear.

25 La Tabla I muestra datos de un ensayo en un aparato de desgaste que se realizó sobre un tubo de Zircaloy nuevo sin el revestimiento inhibidor del desgaste, un tubo de Zircaloy nuevo con el revestimiento inhibidor del desgaste que comprendía NiCrAlY, que se depositó usando el procedimiento HVOF, y un tubo de Zircaloy nuevo con el revestimiento inhibidor del desgaste que comprendía NiCrAlY/TiO₂, que se depositó usando el procedimiento HVOF y procedimientos de pulverización de plasma, respectivamente.

Tabla 1. Datos del Ensayo de Aparato de Desgaste

Muestra	Condición	Perfil Total área global (x 645 mm ²)	Profundidad Máxima (x 2,54 cm)	Anchura Máxima (x 2,54 cm)	Tensión de Contacto (x 6,89 MPa)	Comentarios	Entorno	Ciclos	Tasa de desgaste (x 645 mm ²)/ciclos (*10E-11)	Tasa de desgaste (x 645 mm ²)/ciclo
ZR4-2 4 oz .06R	4 oz .06R- 008	6,34E-04	1,16E-02	7,74E-02	116	Tubo de Zr nuevo	550F / 1500 psi	7,00E+06	9,05E+00	9,05E-11
ZR4-3 4 oz .06R	4 oz .06R- 008	8,12E-04	1,41E-02	8,21E-02	116	Tubo de Zr nuevo	550F / 1500 psi	7,00E+06	1,16E+01	1,16E-10
ZR5-1 4 oz .06R	4 oz .06R- 008	9,50E-05	2,93E-03	5,48E-02	116	NiCrAlY 0,007"	550F / 1500 psi	7,00E+06	1,36E+00	1,36E-11
ZR5-2 4 oz.10R	4 oz .10R- 008	1,37E-05	7,10E-04	3,87E-02	88	NiCrAlY 0,007"	550F / 1500ps	7,00E+06	1,96E-01	1,96E-12
ZR5-3 4 oz. 06R	4 oz .06R- 008	5,06E-05	1,54E-03	4,98E-02	116	NiCrAlY 0,007"	550F / 1500 psi	7,00E+06	7,23E-01	7,23E-12
ZR5-4 4 oz.10R	4 oz .10R- 008	9,62E-05	1,97E-03	6,88E-02	88	NiCrAlY 0,007"	550F / 1500ps	7,00E+06	1,37E+00	1,37E-11
ZR6-1 4 oz. 0R	4 oz .10R- 008	8,07E-04	1,15E-02	1,02E-01	88	Tubo de Zr nuevo	550F / 1500 psi	7,00E+06	1,15E+01	1,15E-10
ZR6-2 4 oz.10R	4 oz .10R- 008	7,52E-04	1,08E-02	9,20E-03	88	Tubo de Zr nuevo	550F / 1500 psi	7,00E+06	1,07E+01	1,07E-10
ZR6-3 4 oz. 06R	4 oz .06R- 008	8,61E-04	1,37E-02	8,73E-02	116	Tubo de Zr nuevo	550F / 1500 psi	7,00E+06	1,23E+01	1,23E-10
ZR6-4 4 oz. 06R	4 oz .06R- 008	7,34E-04	1,23E-02	8,25E-02	116	Tubo de Zr nuevo	550F / 1500 psi	7,00E+06	1,05E+01	1,05E-10
ZR8-1 4 oz.10R	4 oz .10R- 008	7,80E-06	6,02E-04	2,48E-03	88	NiCrAlY/TiO ₂	550F / 1500 psi	2,60E+07	3,00E-02	3,00E-13
ZR8-2 4 oz.10R	4 oz .10R- 008	1,22E-05	7,07E-04	3,17E-03	88	NiCrAlY/TiO ₂	550F / 1500 psi	2,60E+07	4,69E-02	4,69E-13 3
ZR8-3 4 oz. 06R	4 oz .06R- 008	1,60E-05	8,76E-04	3,00E-03	116	NiCrAlY/TiO ₂	550F / 1500 psi	2,60E+07	6,15E-02	6,15E-13
ZR8-4 4 oz. 06R	4 oz .06R- 008	1,02E-05	6,35E-04	2,55E-03	116	NiCrAlY/TiO ₂	550F / 1500 psi	2,60E+07	3,92E-02	3,92E-13

Tubo de Zr nuevo; un tubo de Zircaloy normalmente usado como revestimiento de barra de combustible. Este es el material que se desgasta por el desgaste por corrosión de residuos. NiCrAlY; Un revestimiento depositado sobre el tubo de Zircaloy que tiene un espesor de -0,178 mm (-0,007") mediante un procedimiento de pulverización térmica HVOF.

NiCrAlY/TiO₂; Un revestimiento aplicado al tubo de Zircaloy que se aplica usando tanto HVOF como pulverización con plasma, simultáneamente, de una manera que se crea un revestimiento que es denso, tiene un % de TiO₂ para potenciar significativamente el desgaste por corrosión, un % de TiO₂ que posibilitará un mejor

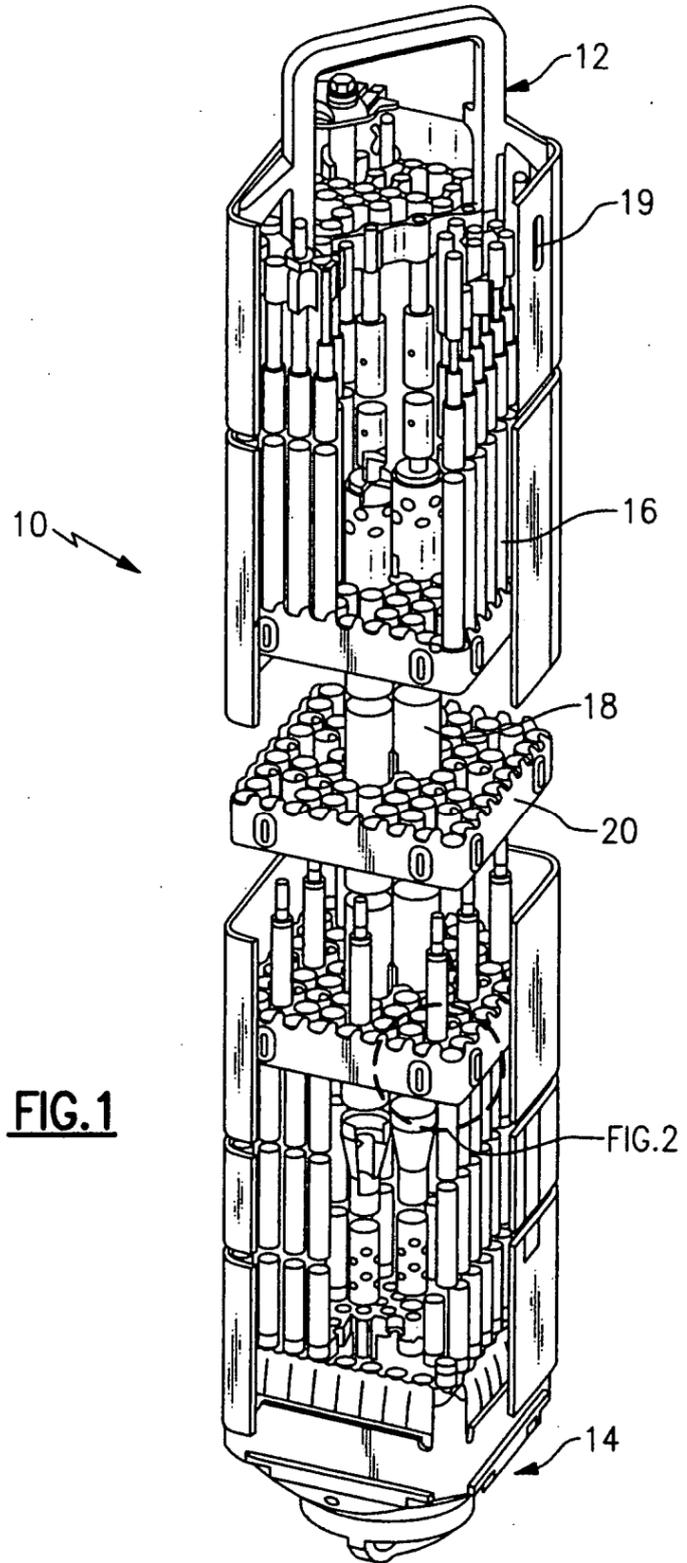
La Figura 6 es un gráfico de la tasa de desgaste (pulgada²/ciclos) (1 pulgada² = 645 mm²) frente a la tensión de contacto inicial (Ksi) (1 Ksi = 6,89 MPa), a un intervalo de desplazamiento de aproximadamente 0,203 mm (0,008 pulgadas) a una temperatura de aproximadamente 288 °C (550 °F) y una presión de aproximadamente 10,34 MPa (1500 psi) para tubos de revestimiento de Zircaloy sin el revestimiento inhibidor del desgaste, tubos de revestimiento de Zircaloy con el revestimiento inhibidor del desgaste que comprende NiCrAlY, que se depositó usando el procedimiento HVOF, y tubos de revestimiento de Zircaloy con el revestimiento inhibidor del desgaste que comprendía NiCrAlY y TiO₂, que se depositaron usando los procedimientos HVOF y de pulverización de plasma de aire, respectivamente.

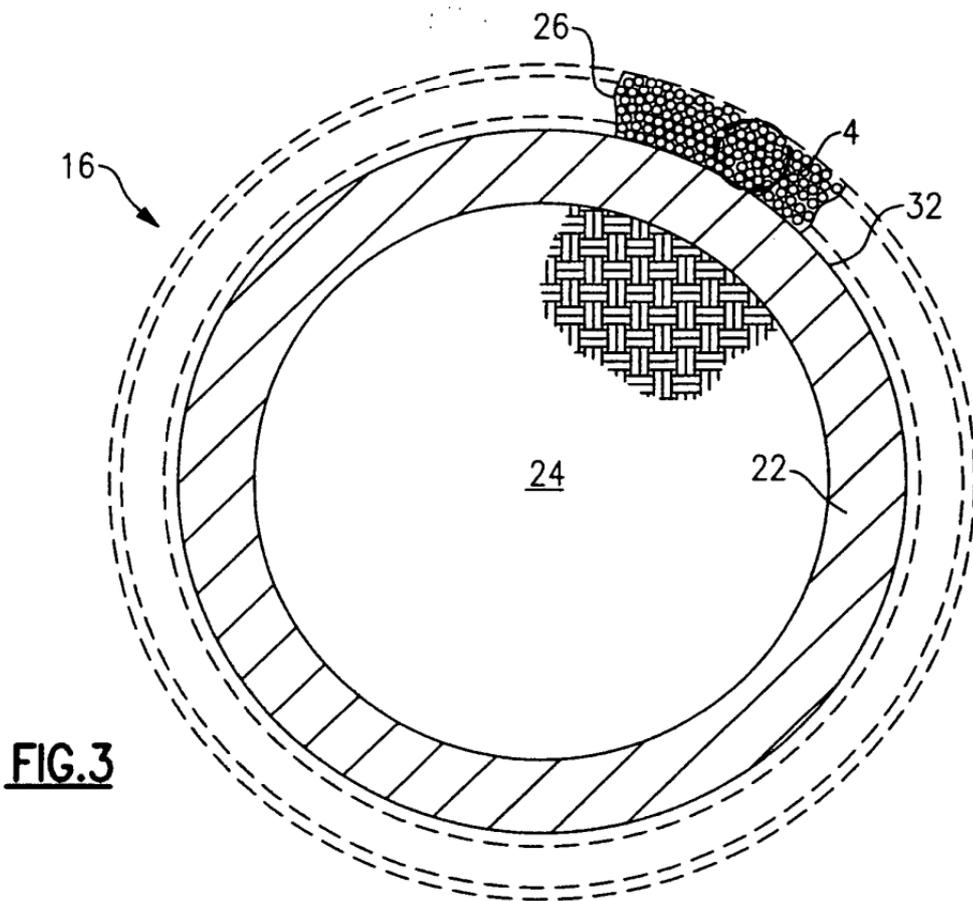
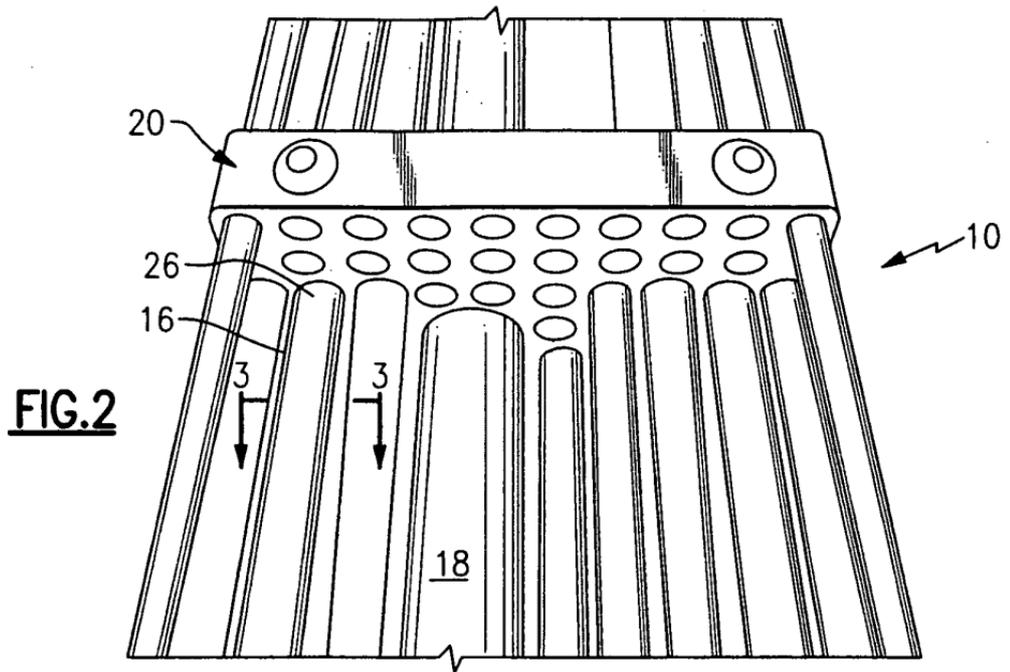
Como se muestra en la Tabla I y en la Figura 6, los tubos de revestimiento con revestimiento de NiCrAlY y revestimiento de NiCrAlY/TiO₂ proporcionaban características de desgaste por corrosión mejores, en comparación con el tubo de revestimiento de Zircaloy sin revestimiento. Además, los tubos de revestimiento con el revestimiento de NiCrAlY/TiO₂ proporcionaban características de desgaste por corrosión mejores, en comparación con el tubo de revestimiento de Zircaloy con el revestimiento de NiCrAlY.

La presente descripción usa ejemplos para desvelar la invención, incluyendo el mejor modo y también permitirá a cualquier persona experta en la materia realizar y usar la invención. El alcance patentable de la invención está definido por las reivindicaciones, y puede incluir otros ejemplos que se les ocurran a los expertos en la materia. Se pretende que dichos otros ejemplos estén dentro del alcance de las reivindicaciones si tienen elementos estructurales que no difieren del lenguaje literal de las reivindicaciones, o si incluyen elementos estructurales equivalentes con diferencias insustanciales respecto al lenguaje literal de las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Una barra de combustible nuclear (16), que comprende:
 - un tubo de revestimiento (22); y
 - un material metálico duro (28) unido a una superficie externa del tubo de revestimiento (22), en el que el material metálico duro (28) se selecciona entre el grupo que consiste en NiCrAlY, NiCr, FeCrAlY, FeCr o combinaciones de los mismos.
2. La barra de combustible de acuerdo con la reivindicación 1, en la que el material metálico duro (28) tiene un espesor de entre aproximadamente 25 μm (micrómetros) y aproximadamente 175 μm (micrómetros).
3. Una barra de combustible de acuerdo con la reivindicación 1, en la que el material metálico duro es una matriz metálica (30) que actúa como un agente aglutinante para unir un material cerámico o un material de fase dura de óxido metálico (32) al tubo de revestimiento (16).
4. La barra de combustible de acuerdo con la reivindicación 3, en la que el material cerámico o el material de fase dura de óxido metálico (32) se selecciona entre el grupo que consiste en ZrO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , Cr_3C_2 , o combinaciones de los mismos.
5. Un procedimiento para potenciar las características de desgaste por corrosión de una barra de combustible nuclear, que comprende la etapa de pulverizar térmicamente un material en polvo metálico duro (28) seleccionado entre el grupo que consiste en NiCrAlY, NiCr, FeCrAlY, FeCr, o combinaciones de los mismos, sobre una superficie externa de un tubo de revestimiento (22) para formar un revestimiento (26) inhibidor del desgaste.
6. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5, en el que el material en polvo metálico duro (28) se aplica usando un procedimiento de pulverización térmica de tipo Hiper-Velocidad-Oxi-Combustible (HVOF), o un procedimiento de pulverización térmica de tipo Hiper-Velocidad-Aire-Combustible (HVOF), o una combinación de los mismos.
7. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5 o la reivindicación 6, en el que el material en polvo metálico duro (28) tiene un tamaño de partícula medio entre aproximadamente 5 μm (micrómetros) y aproximadamente 35 μm (micrómetros).
8. El procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 5, 6 ó 7, que comprende adicionalmente la etapa de pulverizar con plasma un material en polvo cerámico simultáneamente con el material en polvo metálico duro (30) sobre la superficie exterior del tubo de revestimiento, con lo que el material en polvo metálico duro (30) actúa como un agente aglutinante para unir el material en polvo cerámico (32) sobre la superficie externa del tubo de revestimiento (22).
9. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 8, en el que el material en polvo cerámico (32) tiene un tamaño de partícula medio entre aproximadamente 5 μm (micrómetros) y aproximadamente 50 μm (micrómetros).
10. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 5, que comprende adicionalmente la etapa de pulverización térmica a alta temperatura de un material en polvo de fase dura de óxido metálico (32) simultáneamente con el material en polvo metálico duro (30) sobre la superficie externa del tubo de revestimiento, con lo que el material en polvo metálico duro (30) actúa como un agente aglutinante para unir el material en polvo de fase dura de óxido metálico (32) sobre la superficie externa del tubo de revestimiento (22).
11. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 10, en el que el material en polvo de fase dura de óxido metálico (32) tiene un tamaño de partícula medio entre aproximadamente 2 μm (micrómetros) y aproximadamente 15 μm (micrómetros).





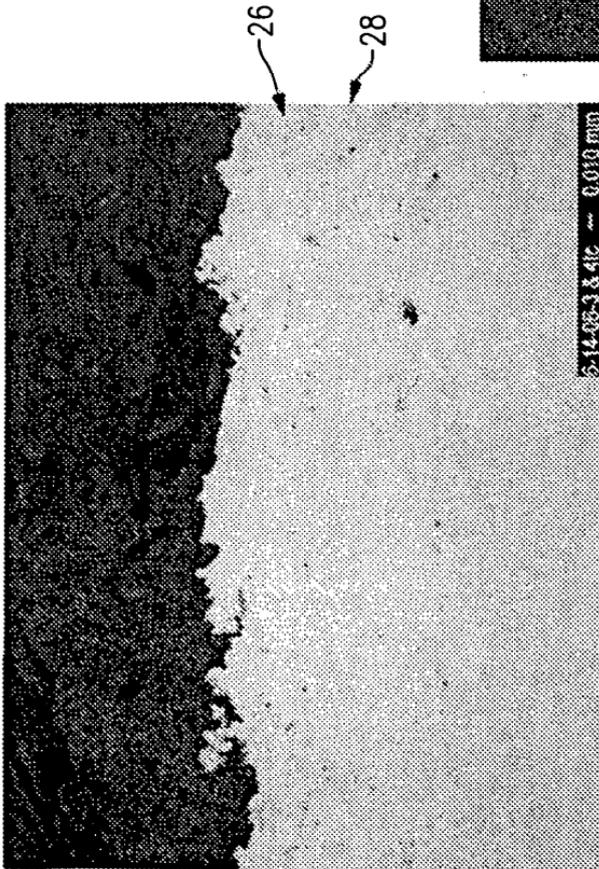


FIG. 4

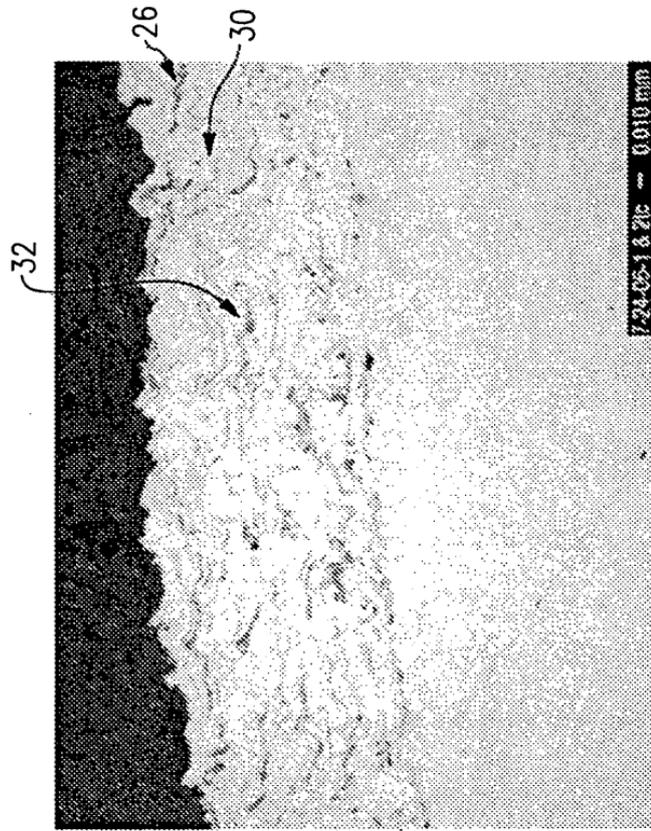


FIG. 5

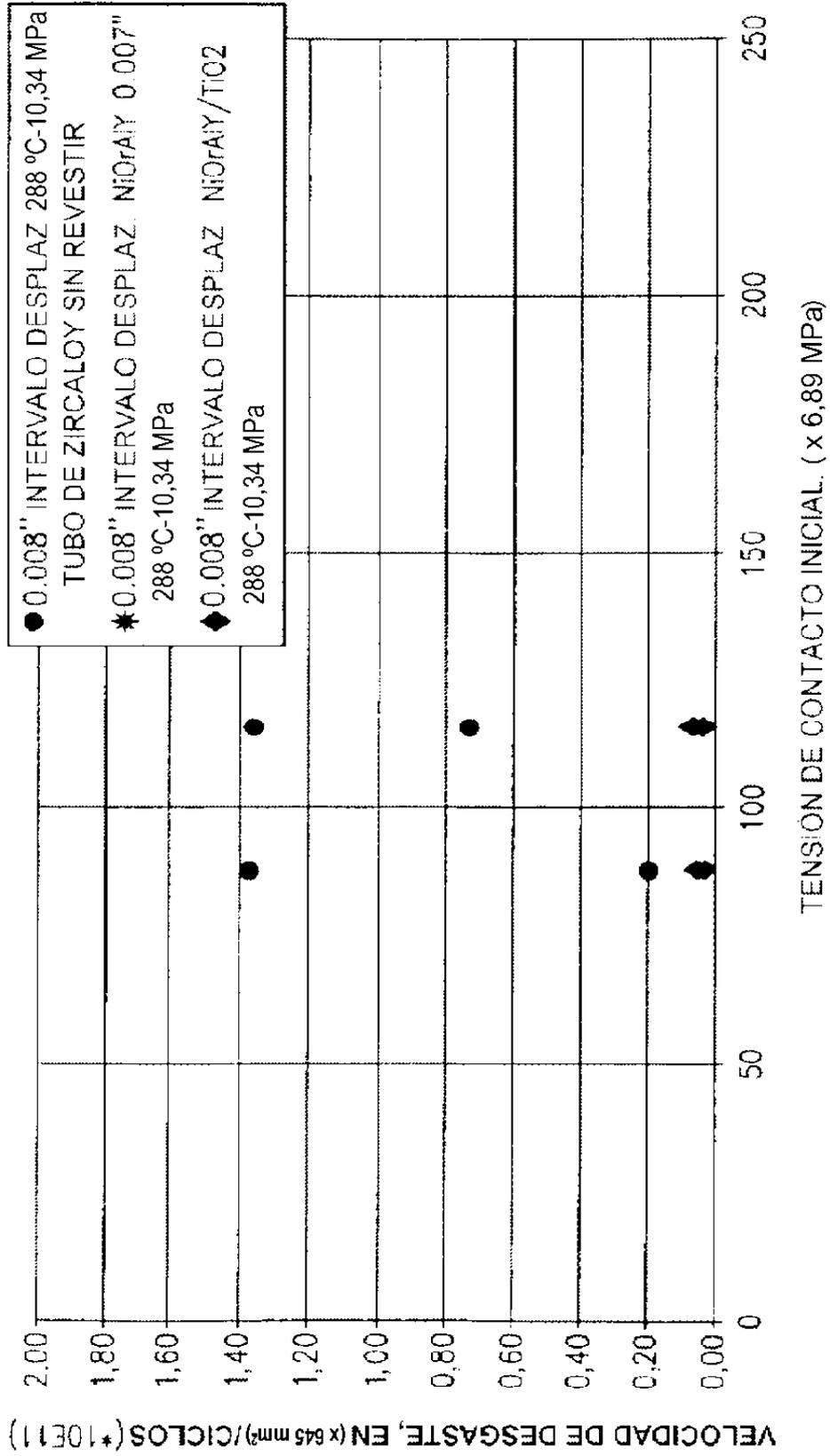


FIG.6