

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 728 116**

51 Int. Cl.:

C25D 5/00 (2006.01)

C22C 19/05 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.08.2015 PCT/US2015/047140**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.03.2016 WO16033301**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.08.2015 E 15760349 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.03.2019 EP 3186414**

54 Título: **Recubrimientos electrodepositados**

30 Prioridad:

27.08.2014 US 201462042428 P
26.08.2015 US 201514836229

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.10.2019

73 Titular/es:

PRAXAIR S.T. TECHNOLOGY, INC. (100.0%)
441 Sackett Point Road
North Haven, CT 06473, US

72 Inventor/es:

FOSTER, JOHN;
TANG, ZHIHONG;
GARING, KEVIN;
BURTON, BRADLEY, J. y
LEWIS, THOMAS, F.

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 728 116 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

Recubrimientos electrodepositados

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a recubrimientos electrodepositados novedosos que tienen una microestructura y composición únicas. Los recubrimientos son ventajosos para componentes de turbinas de gas. Especialmente, los recubrimientos ofrecen una mayor resistencia y pueden servir como recubrimientos adecuados para una variedad de componentes, que incluyen álabes de turbinas de gas con puntas abrasivas.

Antecedentes de la invención

Los sistemas de sellado abrasivos se utilizan actualmente en turbinas de gas para reducir la fuga de gas de la punta del álabes, lo que puede mejorar la eficiencia de la turbina. En la turbina, las primeras etapas de la sección de la turbina de alta presión están compuestas de forma general de álabes de superaleación basados en níquel que rotan a alta velocidad. Estos álabes están diseñados de modo que sus puntas respectivas estén situadas en estrecha proximidad a un anillo de sellado estacionario. Como resultado de ello, hay un espacio estrecho entre las puntas y el anillo de sellado. El propósito del espacio estrecho es reducir al mínimo la fuga de gas y permitir que la presión del aire realice trabajo contra los álabes de turbina, haciendo de este modo que los álabes roten. Un espacio estrecho da lugar a una mayor eficiencia del rotor y a una mayor producción de energía. Sin embargo, un espacio estrecho también aumenta el riesgo de "roce de la punta", definido como que la punta entre en contacto con la junta y causando de este modo un desgaste excesivo en la junta y en los componentes.

Las puntas de los álabes pueden recibir un recubrimiento abrasivo para mejorar el sellado entre las puntas de los álabes y el anillo estacionario. El recubrimiento abrasivo comprende partículas abrasivas integradas en una matriz metálica, como se describe en la Fig. 1. El Cubic Boron Nitride (Nitruro de boro cúbico - NBC) es un material abrasivo típico utilizado para este propósito. La matriz metálica mantiene o fija las partículas abrasivas y mantiene la unión de las partículas a la punta de la turbina durante el servicio. Para que funcione de forma eficaz, la matriz metálica debe ser resistente a temperaturas elevadas para resistir las deformaciones durante el servicio; resistencia medioambiental para evitar la pérdida de material de la oxidación y corrosión a altas temperaturas; y compatibilidad química con las puntas de los álabes para garantizar la ausencia de formación de fases quebradizas, que son conocidas como topologically close-packed phases (fases topológicamente muy agrupadas - "TCP").

Los materiales de matriz metálica convencionales han utilizado de forma típica MCrAlY, donde M se define como níquel, cobalto, o níquel y cobalto en cualquier combinación. Los recubrimientos de MCrAlY son conocidos por su resistencia ambiental. Los recubrimientos de MCrAlY consisten principalmente en una fase gamma-níquel y una fase beta-aluminuro de níquel. Aun cuando los recubrimientos de MCrAlY tienen una excelente resistencia al medio ambiente, los recubrimientos de MCrAlY muestran una resistencia insuficiente para resistir la deformación a temperaturas de servicio elevadas, especialmente a 800 °C y más. Otro problema con los recubrimientos convencionales de MCrAlY es la interdifusión de estos recubrimientos con sustratos de superaleación avanzados que causan una inestabilidad de fase en la interfase y reduce el rendimiento mecánico de los sustratos de superaleación. Por lo tanto, los recubrimientos de MCrAlY tienden a tener una vida útil limitada durante temperaturas de servicio de 800 °C y superiores. El término "temperatura de servicio" como se utiliza en la presente memoria y en toda la memoria descriptiva se refiere al intervalo de temperaturas de funcionamiento a las que se expone un componente recubierto particular cuando está en uso comercial. La temperatura de servicio sirve de indicador de la estabilidad térmica del recubrimiento.

Otros materiales de matriz metálica también han mostrado una vida útil limitada a temperaturas de servicio más altas. En vista de los inconvenientes, es necesario aumentar la resistencia a temperatura elevada de la matriz metálica para recubrimientos abrasivos al tiempo que se mantiene sustancialmente la resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Es necesario mejorar el rendimiento de recubrimientos independientes y de recubrimientos por revestimiento que requieran una mayor resistencia a sus temperaturas de funcionamiento.

Resumen de la invención

La invención puede incluir cualquiera de los siguientes aspectos en varias combinaciones y puede incluir también cualquier otro aspecto de la presente invención descrito más adelante en la descripción escrita.

En un primer aspecto, un recubrimiento electrodepositado que comprende: una composición electrodepositada metálica basada en níquel que comprende 5-15 % en peso de cobalto, 5-10 % en peso de cromo, 5-10 % en peso de aluminio, 0 a 6 % en peso de molibdeno, 0 a 6 % en peso de tungsteno, 0 a 6 % en peso de tantalio, 0 a 6 % en peso de renio, 0 a 2 % en peso de titanio, 0 a 1 % en peso de circonio, 0 a 1 % en peso de hafnio, 0 a 1 % en peso de itrio, 0 a 1 % en peso de silicio, 0 a 0,2 % en peso de carbono, 0 a 0,03 % en peso de boro y un resto de níquel; estando caracterizada dicha composición por una microestructura multifase definida al menos en parte por una fase gamma de solución de níquel sólido (fase γ -Ni) y una fase gamma prima de aluminuro de níquel (fase γ' -Ni₃Al) distribuida dentro de dicha fase γ -Ni; incluyendo dicha fase γ' -Ni₃Al una microestructura bimodal que comprende una fase γ' -Ni₃Al primaria y una fase

γ' -Ni₃Al secundaria; teniendo dicha fase γ' -Ni₃Al secundaria un tamaño de partícula menor que el de la fase γ' -Ni₃Al primaria; incluyendo dicha fase γ' -Ni₃Al opcionalmente una distribución uniforme dentro de dicha fase γ -Ni; en donde dicha fase γ' -Ni₃Al está en una cantidad que es al menos aproximadamente 40 % en volumen pero no superior a 90 % en volumen para de este modo producir una resistencia última a la tracción a temperaturas de servicio superiores en comparación con un recubrimiento que tenga una composición de MCrAlY.

En un segundo aspecto, un método para formar un recubrimiento electrodepositado que comprende: proporcionar un sustrato de superaleación; proporcionar una solución de galvanoplastia que comprende una solución de galvanoplastia de níquel con un polvo precursor de aleación en donde dicho polvo precursor de aleación comprende CoCrAlX o NiCoCrAlX, donde X es uno o más de Re, Ta, Mo, W, Hf, Y, Si, Zr, C, B o cualquier combinación de los mismos; electrodepositar dicho níquel y dicho polvo precursor de aleación sobre el sustrato para formar un recubrimiento verde que tenga una composición que comprende 5-15 % en peso de cobalto, 5-10 % en peso de cromo, 5-10 % en peso de aluminio, 0 a 6 % en peso de molibdeno, 0 a 6 % en peso de tungsteno, 0 a 6 % en peso de tantalio, 0 a 6 % en peso de renio, 0 a 2 % en peso de titanio, 0 a 1 % en peso de zirconio, 0 a 1 % en peso de hafnio, 0 a 1 % en peso de itrio, 0 a 1 % en peso de silicio, 0 a 0,2 % en peso de carbono, 0 a 0,03 % en peso de boro y un resto de níquel; realizar un primer tratamiento térmico de dicho recubrimiento verde a una temperatura que varía de 1093 °C a 1316 °C (2000 °F a 2400 °F) para una duración de 2 a 6 horas; y permitir la interdifusión entre la composición en polvo de CoCrAlX o NiCoCrAlX y níquel para producir un recubrimiento intermedio; realizar un segundo tratamiento térmico de dicha composición a una temperatura que va de 760 °C a 1066 °C (1400 °F a 1950 °F) para una duración de 6 a 48 horas; y precipitar la fase gamma-prima de aluminio de níquel (fase γ' -Ni₃Al) para producir el recubrimiento electrodepositado modificado.

Otros aspectos, características y realizaciones de la descripción resultarán más plenamente evidentes a partir de la descripción que sigue y de las reivindicaciones anexas.

Breve descripción de los dibujos

Los objetivos y ventajas de la invención se comprenderán mejor a partir de la siguiente descripción detallada de las realizaciones preferidas de la misma en relación con las figuras adjuntas, en donde los números indican las mismas características en toda la descripción y en donde:

La Figura 1 es una descripción esquemática de una punta de álabe de turbina recubierta con un recubrimiento abrasivo que comprende partículas abrasivas en una matriz metálica.

La Figura 2 muestra una comparación gráfica de la resistencia última a la tracción medida del recubrimiento electrodepositado de la presente invención y un recubrimiento convencional de MCrAlY en el intervalo de temperaturas de 800-1000 °C;

la Figura 3 compara la resistencia a la oxidación cíclica medida a 1133 °C del recubrimiento electrodepositado de la presente invención con las de un recubrimiento convencional de MCrAlY y una superaleación basada en níquel convencional.

La Figura 4 es una imagen de scanning electron microscopy (microscopía electrónica de barrido - SEM) de una microestructura en sección transversal del recubrimiento electrodepositado de la presente invención que muestra una distribución bimodal de la fase γ' en una fase γ en la que la muestra se grabó con reactivo de Marble;

la Figura 5 es una imagen de scanning electron microscopy (microscopía electrónica de barrido - SEM) de una microestructura en sección transversal del recubrimiento electrodepositado de la presente invención que comprende precipitados finos de fase γ' uniformes en una fase γ en la que la muestra se grabó con reactivo de Marble; y

la Figura 6 es una imagen de scanning electron microscopy (microscopía electrónica de barrido - SEM) de una microestructura en sección transversal de un recubrimiento convencional de MCrAlY que comprende fases γ y β .

Descripción detallada de la invención

La descripción se expone en la presente memoria en diversas realizaciones y con referencia a diversas características y aspectos de la invención. La descripción contempla dichas características, aspectos y realizaciones en diversas permutaciones y combinaciones, como dentro del ámbito de la descripción. Por lo tanto, la descripción puede especificarse como que comprende, consiste o consiste esencialmente en, cualquiera de dichas combinaciones y permutaciones de estas características, aspectos y realizaciones específicas, o una o unas seleccionadas de las mismas.

La presente invención está dirigida a un recubrimiento de aleación metálica modificada basada en níquel electrodepositada que se utiliza como la matriz metálica para un recubrimiento abrasivo en las puntas de los álabes. El recubrimiento electrodepositado de la presente invención muestra un rendimiento mejorado con respecto a materiales metálicos convencionales. El recubrimiento tiene una microestructura y composición únicas que combinadas crean una mayor resistencia a temperaturas de servicio elevadas en comparación con los recubrimientos convencionales. El recubrimiento electrodepositado tiene una microestructura multifase definida, al

menos en parte, por una solución sólida de níquel gamma (γ -Ni) y una fase intermetálica de aluminuro de níquel gamma prima (γ' -Ni₃Al). La fase γ' -Ni₃Al está contenida en una cantidad que es al menos aproximadamente 40 % en volumen, pero no mayor que aproximadamente 90 % en volumen, con respecto al volumen total del recubrimiento. La fase γ' -Ni₃Al es una fase distinta que está situada dentro de la matriz de solución sólida de γ -Ni. La fase γ' -Ni₃Al se forma en la precipitación para reforzar una fase γ -Ni por lo demás débil. La fase γ' -Ni₃Al se mantiene dentro de un intervalo de aproximadamente 40-90 % para lograr los efectos de refuerzo deseados de los precipitados de γ' -Ni₃Al.

El recubrimiento de aleación metálica modificada de la presente invención posee un rendimiento superior respecto a materiales convencionales. Por ejemplo, y como se explicará con mayor detalle en los ejemplos prácticos que siguen, la presente invención produce un recubrimiento que tiene una mayor resistencia a 800 °C y mayor en comparación con los materiales de matriz metálica convencionales. Una comparación del recubrimiento electrodepositado de la invención con un recubrimiento de MCrAlY convencional indica que el recubrimiento de la invención tiene una mayor resistencia última a la tracción aumentada en un factor de aproximadamente 2-5 respecto al MCrAlY convencional a temperaturas de servicio elevadas en el intervalo de 800 °C-1000 °C. La comparación gráfica se muestra en la Figura 2.

Como demuestran los solicitantes en el Ejemplo 4, el recubrimiento electrodepositado de la presente invención tiene una resistencia a la oxidación prácticamente equivalente a la de un recubrimiento convencional de MCrAlY. Por tanto, a diferencia de los recubrimientos convencionales de MCrAlY, el recubrimiento electrodepositado de la presente invención alcanza una mayor resistencia a temperaturas elevadas (Ejemplos 1-3) en relación con un recubrimiento convencional de MCrAlY al tiempo que mantiene sustancialmente la resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas.

Como se explicará, la mejora en el rendimiento del recubrimiento electrodepositado modificado de la presente invención se atribuye, al menos parcialmente, a la microestructura de recubrimiento única, que se produce mediante una combinación de composición de recubrimiento, proceso de recubrimiento y un tratamiento con calor especializado posterior. Los efectos reforzantes del recubrimiento proceden al menos en parte de la interacción sinérgica de las estructuras multifase de γ' -Ni₃Al y γ -Ni. El γ' -Ni₃Al se distribuye dentro de la matriz gamma-níquel (matriz γ -Ni) como se muestra en la imagen de microscopía electrónica de barrido de una microestructura en sección transversal de la Figura 4. Debe entenderse que " γ -Ni" se utiliza indistintamente con " γ ". Se requiere al menos 40 % en volumen del γ' -Ni₃Al para generar y mantener la cantidad necesaria de tensión en el recubrimiento para que se muestren los efectos de mayor refuerzo de los precipitados de gamma prima. Sin embargo, la fracción de volumen de γ' -Ni₃Al no deberá ser superior a 90 %. Sin pretender imponer ninguna teoría particular, se cree que superar el 90 % en volumen aumenta la fragilidad del recubrimiento, que puede provocar el agrietamiento del recubrimiento durante el servicio. Preferiblemente, el γ' -Ni₃Al está contenido en un intervalo entre 55 y 85 % en volumen, y más preferiblemente en un intervalo entre 65 y 75 % en volumen.

Todavía con referencia a la Figura 4, el γ' -Ni₃Al puede estar caracterizado por una microestructura bimodal que comprende un γ' -Ni₃Al primario y un γ' -Ni₃Al secundario. El γ' -Ni₃Al primario consiste en partículas discretas gruesas que varían en tamaño de aproximadamente 2-8 micrómetros (μ m). El γ' -Ni₃Al secundario consiste en partículas discretas finas que tienen un tamaño de partículas en el intervalo de aproximadamente 0,2-0,5 μ m. Tanto el γ' -Ni₃Al primario (es decir, " γ primario") como el secundario γ' -Ni₃Al (es decir, " γ secundario") en la imagen de microscopía electrónica de barrido de la Figura 4 se muestran como de un aspecto más oscuro en relación con la fase de níquel γ gris más clara. La fase γ' -Ni₃Al primaria y secundaria se distribuye dentro de la matriz de níquel γ , que se ha demostrado se extiende de forma continua en todo el recubrimiento. La matriz proporciona una estructura similar a un soporte para los precipitados de las fases γ' -Ni₃Al primaria y secundaria. Las fases γ' -Ni₃Al primaria y secundaria se distribuyen dentro de la matriz para interactuar e impartir una resistencia a temperaturas elevadas a 800 °C y más.

En una realización alternativa, el γ' -Ni₃Al puede caracterizarse por una microestructura uniforme que comprende precipitados finos de γ' -Ni₃Al en una matriz y según muestra la Figura 5. Los precipitados finos de γ' -Ni₃Al pueden tener un tamaño de partícula en el intervalo de aproximadamente 0,2-0,5 μ m.

A diferencia de los materiales convencionales tales como MCrAlY, el recubrimiento electrodepositado de la presente invención se caracteriza por la ausencia de cualquier fase de aluminuro de níquel beta (β) que pueda reducir la resistencia de la matriz metálica de recubrimiento abrasivo. MCrAlY se caracteriza por una microestructura principalmente definida como que contiene γ y β sin ninguna fracción de volumen γ' . Ambas fases γ y β son intrínsecamente débiles a temperaturas elevadas y se cree que debilitan sustancialmente la resistencia a la tracción del recubrimiento de MCrAlY resultante. En la Figura 6 se muestra una microestructura de SEM representativa del recubrimiento convencional de MCrAlY. Como puede observarse, el MCrAlY posee una microestructura totalmente distinta a las de las Figuras 4 y 5.

La presente invención también puede incluir una fase enriquecida de molibdeno y tantalio (Mo-Ta) opcional distribuida dentro de la matriz de níquel γ , según muestra la Figura 4. La fase enriquecida (Mo-Ta) aparece como partículas en forma de racimos en ciertas regiones de la matriz basada en níquel γ . La fase enriquecida opcional (Mo-Ta) está contenida en una cantidad que varía de 0 a 15 % en volumen, preferiblemente, 0 a 10 % y más preferiblemente menos de 5 %. La presencia de la fase enriquecida (Mo-Ta) puede aumentar potencialmente la resistencia a altas temperaturas de la matriz de níquel γ . Sin embargo, una fracción elevada de la fase enriquecida (Mo-Ta) puede degradar potencialmente la resistencia a la oxidación a alta temperatura.

Además de la microestructura de recubrimiento única, el rendimiento mejorado del recubrimiento electrodepositado modificado de la presente invención se atribuye, al menos parcialmente, a la composición electrodepositada. El recubrimiento contiene una composición electrodepositada basada en níquel. En una primera realización de la presente invención, la composición electrodepositada metálica basada en níquel comprende 5-15 % en peso de cobalto, 5-10 % en peso de cromo, 5-10 % en peso de aluminio, 0 a 6 % en peso de molibdeno, 0 a 6 % en peso de tungsteno, 0 a 6 % en peso de tantalio, 0 a 6 % en peso de renio, 0 a 2 % en peso de titanio, 0 a 1 % en peso de circonio, 0 a 1 % en peso de hafnio, 0 a 1 % en peso de itrio, 0 a 1 % en peso de silicio, 0 a 0,2 % en peso de carbono, 0 a 0,03 % en peso de boro y un resto níquel. La composición de recubrimiento de esta invención difiere significativamente de los recubrimientos convencionales de MCrAlY de técnicas anteriores, que contemplan un contenido significativamente más elevado de Al y Cr. Por ejemplo, la patente US-4.585.481 describe una composición de recubrimiento para la protección de sustratos metálicos contra la oxidación y corrosión a altas temperaturas que tiene hasta 40 % de Cr y hasta 35 % de Al.

Además, las concentraciones de Al y Cr en el recubrimiento electrodepositado de la presente invención son similares a las de un sustrato de superaleación basada en níquel, minimizando así la interdifusión entre el recubrimiento y el sustrato durante una exposición a altas temperaturas y suprimiendo la formación de fases perjudiciales topológicamente muy agrupadas en la zona de difusión entre el recubrimiento y el sustrato.

En esta invención, el contenido de aluminio en el recubrimiento es preferiblemente de aproximadamente 5 a 10 por ciento en peso. El aluminio puede ayudar a reforzar los efectos del recubrimiento resultante de la presente invención. El aluminio contribuye a una resistencia a temperaturas elevadas, permitiendo la formación de la fase γ' -Ni₃Al y transmitiendo una resistencia a la oxidación deseable al formar una capa protectora de alúmina. Cuando el contenido de aluminio cae por debajo de 5 por ciento en peso, puede haber una fracción insuficiente de fase γ' -Ni₃Al de modo que no se alcance la resistencia necesaria. Además, unos niveles elevados de contenido de aluminio mayores que aproximadamente 10 por ciento en peso pueden inducir o promover la formación de la fase β -NiAl débil.

Los demás constituyentes también transmiten propiedades deseables. El tantalio y el titanio, cuando están presentes en las cantidades prescritas, pueden incrementar adicionalmente la fracción de la fase γ' -Ni₃Al y también promover la formación de carburos en el límite de grano de la fase γ -Ni, lo que mejora adicionalmente la resistencia al inhibir el denominado deslizamiento del límite de grano. El molibdeno, tungsteno y renio ayudan en el refuerzo de solución sólida de la fase de solución sólida γ -Ni. El cromo contribuye a la resistencia ambiental facilitando la formación de una capa de alúmina protectora incluso con un contenido en aluminio bajo de aproximadamente 5 % en peso. Sin embargo, un contenido de cromo superior a las cantidades de la presente invención tiende a favorecer la formación de fase sigma quebradiza. El hafnio, itrio y circonio, cuando se añaden dentro de las cantidades prescritas, pueden mejorar la resistencia a la oxidación del recubrimiento resultante.

La presente invención contempla otras variantes de la composición electrodepositada. Por ejemplo, la composición electrodepositada puede comprender aproximadamente 8-12 % en peso de cobalto, aproximadamente 6-9 % en peso de cromo, aproximadamente 5,5-7 % en peso de aluminio, con un contenido total de titanio, circonio, carbono, boro, molibdeno, tungsteno, renio, y tantalio en una cantidad de aproximadamente 3-12 % en peso, y el níquel restante.

Se contemplan otras realizaciones adicionales sin desviarse del espíritu y ámbito de la presente invención. Por ejemplo, en otra realización adicional, la cantidad respectiva de boro, carbono, molibdeno, tungsteno y titanio es 0 %.

El recubrimiento de la presente invención se obtiene mediante un proceso de electrodeposición adecuado diseñado para recubrimiento por atrapamiento de un polvo precursor de aleación a partir de un baño de solución de galvanoplastia de níquel con polvo precursor suspendida en la misma. En una realización de la presente invención, el polvo precursor de aleación puede representarse mediante la fórmula general CoCrAlX o CoNiCrAlX, donde X, como se utiliza en la presente memoria y en toda la memoria descriptiva, es uno o más de Re, Ta, Mo, W, Hf, Y, Si, Zr, C y B. El Ni se proporciona en forma de una solución de galvanoplastia. De forma alternativa, pueden utilizarse Ni y/o Co como solución de galvanoplastia. El peso porcentual total de polvo precursor de CoCrAlX o CoNiCrAlX atrapado por el proceso de electrodeposición preferiblemente supone 30-40 % del peso total del recubrimiento. El polvo precursor de CoCrAlX o CoNiCrAlX puede producirse mediante un proceso de atomización gaseosa, conocido en la técnica por el experto en la técnica. El porcentaje total de elementos refractarios que incluyen Ta, W, Mo, Re, Ti, Hf, Y Zr se mantiene en los niveles prescritos de menos de 20 % para permitir la atomización gaseosa del polvo precursor.

El proceso de electrodeposición puede producirse como sigue. Las partículas que están en suspensión en la solución de electrodeposición quedan atrapadas dentro del recubrimiento a medida que se forma y se acumula la matriz electrodepositada. Este recubrimiento denominado "verde" puede tratarse con calor para formar la estructura de recubrimiento deseada que presente propiedades de resistencia a altas temperaturas.

Según los principios de la presente invención, el proceso de electrodeposición permite la formación del recubrimiento "verde" con polvo precursor de CoCrAlX CoNiCrAlX incorporado en una matriz de Ni. Comparado con los procesos convencionales de pulverización térmica y physical vapor deposition (deposición física en fase vapor - PVD), el proceso de galvanizado por atrapamiento utilizado en la presente invención ofrece varias ventajas técnicas y únicas que permiten la creación de los recubrimientos de la presente invención. Por ejemplo, la galvanoplastia por atrapamiento es particularmente adecuada para piezas con geometrías complejas ya que no

hay complicaciones “previsibles” que puedan producirse con el rociado térmico. Además, la galvanoplastia por atrapamiento se considera un proceso en frío y evita la reacción química entre las partículas abrasivas y la matriz metálica que puede producirse durante los métodos de pulverización con plasma. Además, la galvanoplastia por atrapamiento ofrece mejoras en la exactitud y control de la composición de recubrimiento resultante, ya que el material de materia prima no se altera significativamente durante la deposición.

Una vez se ha producido la electrodeposición, puede llevarse a cabo un tratamiento térmico de dos etapas para lograr la estructura y propiedades de recubrimiento deseadas. Se lleva a cabo un primer tratamiento térmico en el recubrimiento “verde” electrodepositado de 1093 °C a 1316 °C (2000 °F a 2400 °F) para una duración de 2 a 6 horas. Este primer tratamiento térmico permite la interdifusión entre la composición de polvo de CoCrAlX o NiCoCrAlX y la matriz de níquel para producir un recubrimiento intermedio. A continuación puede llevarse a cabo un segundo tratamiento térmico a una temperatura que varía de 760 °C a 1066 °C (1400 °F a 1950 °F) para una duración de 6 a 48 horas. El segundo tratamiento térmico induce la precipitación de la fase gamma-prima de aluminuro de níquel (fase γ' -Ni₃Al) para producir el recubrimiento electrodepositado modificado.

Debido a las velocidades de difusión relativamente lentas de varios de los constituyentes, la microestructura resultante no alcanza equilibrio y, por lo tanto, produce una estructura modificada. La estructura modificada puede caracterizarse por un tamaño y/o distribución predeterminados de precipitados de γ' -Ni₃Al, carburos, u otras fases diseñadas para mejorar el rendimiento, tal como la resistencia a temperaturas elevadas. El grado de modificación dependerá de varios factores, como temperatura, tiempo y velocidades de enfriamiento. Como puede verse, una combinación de una selección adecuada de composición de recubrimiento, proceso de recubrimiento y tratamiento posterior puede producir la clase de recubrimientos electrodepositados de la invención.

En una realización preferida, el recubrimiento electrodepositado de la presente invención puede utilizarse como matriz metálica para un recubrimiento abrasivo en las puntas de los álabes. El proceso de producir el recubrimiento abrasivo comprende lo siguiente: producir un recubrimiento electrodepositado de la presente invención como la primera capa sobre las puntas de los álabes mediante electrodeposición a partir de un baño de solución de galvanoplastia con polvo precursor de CoCrAlX o CoNiCrAlX suspendido en la solución de galvanoplastia; fijar las partículas abrasivas a la primera capa mediante electrodeposición a partir de un baño de solución de galvanoplastia que tiene las partículas abrasivas suspendidas en la solución de galvanoplastia; y rellenar alrededor de las partículas abrasivas con el recubrimiento electrodepositado de la presente invención mediante electrodeposición a partir de un baño de solución de galvanoplastia con polvo precursor de CoCrAlX o CoNiCrAlX suspendido en la solución de galvanoplastia. Partículas abrasivas adecuadas incluyen nitruro de boro cúbico, alúmina, carburos de silicio u otro tipo de nitruros, óxidos y carburos.

Debe entenderse que se contemplan variaciones. Por ejemplo, el recubrimiento electrodepositado para el relleno alrededor de las partículas abrasivas puede tener una composición distinta del recubrimiento electrodepositado para la primera capa de recubrimiento abrasivo.

Los solicitantes han descubierto que otros métodos para aplicar el polvo precursor no son adecuados para crear el recubrimiento. Por ejemplo, los procesos de pulverización con plasma pueden no ser adecuados para crear el recubrimiento de la invención, dado que la temperatura del plasma es demasiado elevada como para que la matriz metálica reaccione con las partículas abrasivas, y degrada significativamente las propiedades del recubrimiento abrasivo. De forma adicional, los procesos de pulverización con plasma y de deposición física en fase vapor son procesos “previsibles” y no son adecuados para recubrir las piezas que tengan geometrías complejas, por ejemplo, puntas de álabes de turbina

Además de los recubrimientos abrasivos descritos en la presente memoria, debe entenderse que en la presente invención se contemplan diversas otras aplicaciones de uso final. Por ejemplo, el recubrimiento electrodepositado de la presente invención puede producirse sin la adición de partículas abrasivas y puede utilizarse como recubrimiento superpuesto para proteger sustratos metálicos contra oxidación y corrosión a temperaturas elevadas. El recubrimiento electrodepositado de esta invención puede utilizarse también como recubrimiento de unión para un sistema de recubrimiento de barrera térmica. De forma adicional, pueden utilizarse los recubrimientos electrodepositados de la invención para crear materiales electroconformados con formas de producto próximas a la del objeto deseado. Los recubrimientos de la presente invención pueden utilizarse para producir un microespecimen electroconformado para micro-electro-mechanical systems (sistemas microelectromecánicos - MEMS) y aplicaciones de LIGA. Además, la presente invención puede emplearse en diversas otras técnicas de fabricación por las que pueden producirse piezas independientes, sin costuras y de forma aproximada al producto final, tales como, a modo de ejemplo, procesos de fabricación aditivos o procesos de deposición de fabricación con electroconformación con formas aproximadas a las del producto final.

Los siguientes ejemplos prácticos demuestran que el recubrimiento electrodepositado presenta una resistencia final significativamente mayor a temperaturas de servicio elevadas de 800 °C-1000 °C. Debe entenderse que los ejemplos prácticos no pretenden en modo alguno limitar el ámbito de la presente invención, más bien pretenden ilustrar los principios de la presente invención.

Ejemplo comparativo 1 (MCrAlY convencional ensayado para UTS a 800 °C)

Se preparó un recubrimiento convencional independiente de MCrAlY para comparar su resistencia intrínseca a altas temperaturas con la de la presente invención.

5 El proceso para producir un recubrimiento independiente del recubrimiento convencional de MCrAlY implicó las siguientes etapas. En primer lugar, se preparó un polvo precursor de CrAlY mediante atomización gaseosa. La composición del polvo precursor en peso porcentual fue Cr-35 %Al-1 %Y.

10 A continuación, el polvo precursor de CrAlY se depositó por atrapamiento a partir de un baño de solución de níquel y sulfato de cobalto sobre una lámina de aluminio. El peso porcentual total de polvo precursor de CrAlY atrapado por el proceso de electrodeposición dio cuenta del 32 % del peso total del recubrimiento. El proceso de electrodeposición dio lugar a la formación de un “recubrimiento verde” que tiene partículas de CrAlY incorporadas en la matriz de Ni/Co. Se determinó que el espesor del recubrimiento verde resultante era de aproximadamente 0,5-1 mm.

15 La lámina de aluminio se puso a continuación en una solución de hidróxido sódico al 30 % para lixiviar de forma selectiva la lámina de aluminio manteniendo el recubrimiento verde estructuralmente intacto. Después de retirar la lámina de aluminio, se obtuvo una lámina de recubrimiento independiente “verde”.

20 Seguidamente, la lámina de recubrimiento se trató con calor para permitir la interdifusión entre los constituyentes de la matriz y las partículas. La condición de tratamiento térmico se llevó a cabo en vacío a una temperatura de 1120 °C durante 6 horas. Esto produjo una lámina convencional electrodepositada independiente de NiCoCrAlY con un espesor de 0,5-1 milímetros. La microestructura en sección transversal de este recubrimiento se muestra en la Figura 6. El recubrimiento consistía en dos fases primarias: la fase de solución sólida γ -Ni se muestra gris claro en la Fig. 6 y la fase β -NiAl se muestra en gris oscuro en la Fig. 6. La composición del recubrimiento independiente resultante fue Ni-24 %Co-19,5 % Cr-10,5 %Al-0,3 %Y en peso porcentual.

25 El espécimen plano del ensayo de tracción se mecanizó y pulió a partir de la lámina electrodepositada según la norma E8 de ASTM. El espécimen de prueba tenía una longitud de calibración de 32 mm y una anchura de 6 mm. La velocidad de deformación para el ensayo de tracción fue de 0,002 por minuto hasta aproximadamente 1 % y después 0,1 por minuto hasta la fractura. El ensayo de tracción se llevó a cabo a 800 °C (1470 °F). La resistencia última a la tracción del recubrimiento convencional electrodepositado de NiCoCrAlY se determinó que era de 240 MPa.

Ejemplo comparativo 2 (MCrAlY convencional ensayado para UTS a 900 °C)

35 El proceso para producir otro recubrimiento independiente de recubrimiento convencional de MCrAlY fue el mismo al descrito en el Ejemplo comparativo 1. La composición del recubrimiento independiente resultante fue Ni-24 %Co-19,5 % Cr-10,5 %Al-0,3 %Y en peso porcentual.

40 El procedimiento de ensayo UTS se llevó a cabo como se describe en el Ejemplo comparativo 1. El espécimen plano del ensayo de tracción se mecanizó y pulió a partir de la lámina electrodepositada según la norma E8 de ASTM. El espécimen de prueba tenía una longitud de calibración de 32 milímetros y una anchura de 6 milímetros. La velocidad de deformación para el ensayo de tracción fue de 0,002 por minuto hasta aproximadamente 1 % y después 0,1 por minuto hasta la fractura. El ensayo de tracción se llevó a cabo a 900 °C (1652 °F). La resistencia última a la tracción del recubrimiento convencional electrodepositado de NiCoCrAlY se determinó que era de 87 MPa.

45 Ejemplo comparativo 3 (MCrAlY convencional ensayado para UTS a 1000 °C)

50 El proceso para producir otro recubrimiento independiente de recubrimiento convencional de MCrAlY fue el mismo al descrito en el Ejemplo comparativo 1. La composición del recubrimiento independiente resultante fue Ni-24 %Co-19,5 % Cr-10,5 %Al-0,3 %Y en peso porcentual.

55 El procedimiento de ensayo UTS se llevó a cabo como se describe en el Ejemplo comparativo 1. El espécimen plano del ensayo de tracción se mecanizó y pulió a partir de la lámina electrodepositada según la norma E8 de ASTM. El espécimen de prueba tenía una longitud de calibración de 32 milímetros y una anchura de 6 milímetros. La velocidad de deformación para ensayo de tracción es de 0,002 por minuto hasta aproximadamente 1 % y después 0,1 por minuto hasta la fractura. El ensayo de tracción se llevó a cabo a 1000 °C (1832 °F). La resistencia última a la tracción del recubrimiento convencional electrodepositado de NiCoCrAlY a 1000 °C se determinó en 21 MPa.

60 Ejemplo 1 (recubrimiento electrodepositado de la presente invención ensayado para UTS a 800 °C)

65 Se preparó un recubrimiento independiente con la composición de recubrimiento como se describe en la presente invención con el fin de comparar la resistencia intrínseca a temperaturas elevadas del recubrimiento electrodepositado de la presente invención con los de los Ejemplos comparativos 1, 2 y 3. El proceso para producir el recubrimiento independiente de la presente invención implicó lo siguiente. Se preparó un polvo precursor de aleación basado en CoCrAl mediante atomización gaseosa. La composición de polvo precursor en peso porcentual fue 28,4 %Co-22,7Cr-17 %Mo-17 %Al- 2,8 %Ti-11,4 %Ta-0,3 %Zr-0,3 %C-0,04 %B.

5 A continuación, el polvo precursor de aleación basado en CoCrAl se depositó por atrapamiento a partir de un baño de solución de sulfato de níquel sobre una lámina de aluminio. El proceso de galvanoplastia por atrapamiento se llevó a cabo según los métodos descritos en las patentes US-5.076.897, US-5.702.574, y US-5.833.829. El peso porcentual total de polvo precursor basado en CoCrAl atrapado por el proceso de electrodeposición dio cuenta del 36 % del peso total del recubrimiento. El proceso de electrodeposición dio lugar a la formación de un “recubrimiento verde” que tiene partículas basadas en CoCrAl incorporadas en una matriz de Ni. El espesor del recubrimiento verde resultante fue de aproximadamente 0,5-1 milímetros. La lámina de aluminio se puso a continuación en una solución de hidróxido sódico al 30 % para lixiviar de forma selectiva la lámina de aluminio manteniendo el recubrimiento verde estructuralmente intacto. Después de retirar la lámina de aluminio, se obtuvo una lámina de recubrimiento independiente “verde”.

15 La lámina de recubrimiento se trató con calor para obtener la interdifusión entre los constituyentes de la matriz y las partículas. La condición de tratamiento térmico se llevó a cabo en vacío a una temperatura de 1120 °C durante 6 horas. Esto produjo un recubrimiento metálico electrodepositado independiente de la presente invención. El recubrimiento consistió en precipitados gamma prima (γ' -Ni₃Al) dentro de la matriz de níquel (matriz γ -Ni) como se muestra en la Fig. 4. La fracción de volumen de precipitados de γ' -Ni₃Al era aproximadamente 65 %. Además, el γ' -Ni₃Al se caracterizó por una microestructura bimodal que comprende un γ' -Ni₃Al primario y un γ' -Ni₃Al secundario. El γ' -Ni₃Al primario consistía en partículas discretas gruesas que varían en tamaño de aproximadamente 2-8 micrómetros (μ m). El γ' -Ni₃Al secundario consistía en partículas discretas finas que tienen un tamaño de partículas en el intervalo de aproximadamente 0,2-0,5 μ m. La composición (en peso porcentual) de recubrimiento independiente en esta invención fue

25 Ni: equilibrio
Cr: 8 %
Co: 10 %
Mo: 6 %
Al: 6 %
Ti: 1 %
Ta: 4 %
Zr: 0,1 %
30 C: 0,1 %
B: 0,015 %

35 El espécimen plano del ensayo de tracción se mecanizó y pulió a partir de la lámina electrodepositada según la norma E8 de ASTM. El espécimen de prueba tenía una longitud de calibración de 32 mm y una anchura de 6 mm. La velocidad de deformación para el ensayo de tracción fue de 0,002 por minuto hasta aproximadamente 1 % y después 0,1 por minuto hasta la fractura. El ensayo de tracción se llevó a cabo a 800 °C (1652 °F). La resistencia última a la tracción del nuevo recubrimiento metálico de la presente invención se determinó que era de 510 MPa, que es más de 2 veces mayor que la del recubrimiento convencional de NiCoCrAlY (240 MPa) a 800 °C como se describe en el Ejemplo comparativo 1.

40 Ejemplo 2 (recubrimiento electrodepositado de la presente invención ensayado para UTS a 900 °C)

El proceso para producir otro recubrimiento independiente de la presente invención fue el mismo que el descrito en el Ejemplo 1.

45 El procedimiento de ensayo UTS se llevó a cabo como se describe en el Ejemplo 1. El espécimen plano del ensayo de tracción se mecanizó y pulió a partir de la lámina electrodepositada según la norma E8 de ASTM. El espécimen de prueba tenía una longitud de calibración de 32 milímetros y una anchura de 6 milímetros. La velocidad de deformación para ensayo de tracción fue de 0,002 por minuto hasta aproximadamente 1 % y después 0,1 por minuto hasta la fractura. El ensayo de tracción se llevó a cabo a 900 °C (1470 °F). La resistencia última a la tracción del nuevo recubrimiento metálico de la presente invención se determinó que era de 363 MPa, que es más de 4 veces mayor que la del recubrimiento convencional de NiCoCrAlY (87 MPa) a 900 °C como se describe en el Ejemplo comparativo 2.

Ejemplo 3 (recubrimiento electrodepositado de la presente invención ensayado para UTS a 1000 °C)

55 El proceso para producir otro recubrimiento independiente de la presente invención fue el mismo que el descrito en el Ejemplo 1.

60 El procedimiento de ensayo UTS se llevó a cabo como se describe en el Ejemplo 1. El espécimen plano del ensayo de tracción se mecanizó y pulió a partir de la lámina electrodepositada según la norma E8 de ASTM. El espécimen de prueba tenía una longitud de calibración de 32 milímetros y una anchura de 6 milímetros. La velocidad de deformación para ensayo de tracción es de 0,002 por minuto hasta aproximadamente 1 % y después 0,1 por minuto hasta la fractura. El ensayo de tracción se llevó a cabo a 1000 °C (1470 °F). La resistencia última a la tracción del nuevo recubrimiento metálico de la presente invención se determinó que era de 106 MPa, que es más de 5 veces mayor que la del recubrimiento convencional de NiCoCrAlY (21 MPa) a 1000 °C como se describe en el Ejemplo comparativo 3. Se observó que la resistencia última a la tracción (106 MPa) del nuevo recubrimiento de la presente invención a 1000 °C es incluso superior a la resistencia última a la tracción (87 MPa)

del recubrimiento convencional de NiCoCrAlY a 900 °C, lo que revela que el nuevo recubrimiento puede aumentar la temperatura de servicio 100 °C o más respecto a los recubrimientos convencionales de NiCoCrAlY.

Ejemplo 4 (rendimiento de oxidación cíclica de la presente invención)

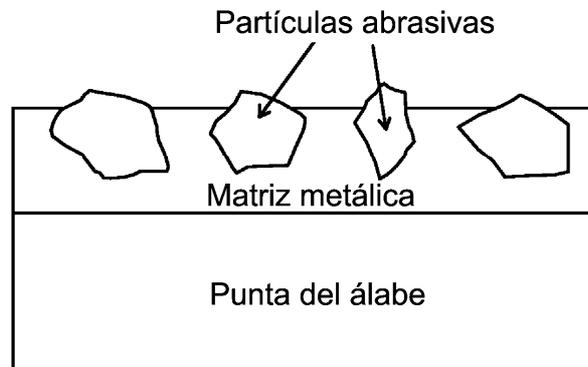
- 5
- Se realizó una prueba de ciclo de horno para comparar la resistencia cíclica a la oxidación a 1133 °C del recubrimiento electrodepositado de la presente invención con la de un recubrimiento convencional de MCrAlY y una superaleación convencional basada en níquel comercializada como CMSX-4® por Cannon-Muskegon Corp. (Muskegon, MI).
- 10
- El proceso para producir el recubrimiento independiente electrodepositado de la presente invención fue el mismo que el descrito en el Ejemplo 1. El proceso para producir el recubrimiento convencional independiente de MCrAlY fue el mismo que el descrito en el Ejemplo comparativo 1. CMSX-4® es una superaleación basada en níquel comercializada por Cannon-Muskegon Corp. (Muskegon, MI).
- 15
- La prueba de ciclo de horno se realizó a 1133 °C en aire. Cada ciclo consistió en una permanencia de 50 minutos a 1133 °C seguido de un enfriamiento de 10 minutos a temperatura ambiente. La resistencia a la oxidación cíclica se caracterizó por un gráfico de cambio en peso específico en función del número de ciclos, según muestra la Figura 3.
- 20
- Según muestra la figura 3, la ganancia de peso negativo es un indicador de poca resistencia a la oxidación cíclica. El resultado indicó que el recubrimiento electrodepositado de la presente invención mostró una resistencia a la oxidación aproximadamente equivalente a la del recubrimiento convencional de MCrAlY. El recubrimiento electrodepositado de la presente invención y el recubrimiento convencional de MCrAlY mostraron una resistencia a la oxidación significativamente mayor que la de la superaleación convencional basada en níquel CMSX-4®.
- 25
- Los ensayos anteriores demuestran que el recubrimiento electrodepositado de la presente invención tiene una resistencia a la tracción significativamente más elevada sin una disminución sustancial en la resistencia a la oxidación con respecto a los recubrimientos convencionales de MCrAlY.
- 30
- Aunque se ha mostrado y descrito lo que se consideran determinadas realizaciones de la invención, se entenderá, por supuesto, que pueden hacerse diversas modificaciones y cambios en la forma o en los detalles sin por ello abandonar el espíritu y el ámbito de la invención. Por lo tanto, se pretende que esta invención no esté limitada a la forma exacta y detalles mostrados y descritos en la presente memoria, ni a nada inferior a la invención íntegra descrita en la presente memoria y a continuación reivindicada en la memoria.

REIVINDICACIONES

1. Un recubrimiento electrodepositado que comprende:
 - 5 una composición electrodepositada metálica basada en níquel que comprende 5-15 % en peso de cobalto, 5-10 % en peso de cromo, 5-10 % en peso de aluminio, 0 a 6 % en peso de molibdeno, 0 a 6 % en peso de tungsteno, 0 a 6 % en peso de tantalio, 0 a 6 % en peso de renio, 0 a 2 % en peso de titanio, 0 a 1 % en peso de circonio, 0 a 1 % en peso de hafnio, 0 a 1 % en peso de itrio, 0 a 1 % en peso de silicio, 0 a 0,2 % en peso de carbono, 0 a 0,03 % en peso de boro y el níquel restante;
 - 10 estando caracterizada dicha composición por una microestructura multifase definida al menos en parte por una fase gamma de solución de níquel sólido (fase γ -Ni) y una fase gamma prima de aluminuro de níquel (fase γ' -Ni₃Al) distribuida dentro de dicha fase γ -Ni;
 - 15 incluyendo dicha fase γ' -Ni₃Al una microestructura bimodal que comprende una fase γ' -Ni₃Al primaria y una fase γ' -Ni₃Al secundaria; teniendo dicha fase γ' -Ni₃Al secundaria un tamaño de partículas menor que el de la fase γ' -Ni₃Al primaria;
 - 20 incluyendo dicha fase γ' -Ni₃Al opcionalmente una distribución uniforme dentro de dicha fase γ -Ni; en donde dicha fase γ' -Ni₃Al está en una cantidad que es al menos 40 % en volumen pero no superior a 90 % en volumen para de este modo producir una resistencia última a la tracción a temperaturas de servicio superiores en comparación con un recubrimiento que tenga una composición de MCrAlY.
2. El recubrimiento electrodepositado de la reivindicación 1, en donde dicho recubrimiento electrodepositado produce una resistencia última a la tracción correspondiente a una temperatura de 800 °C o superior que es al menos dos veces mayor en comparación con un recubrimiento que tiene una composición de MCrAlY.
3. El recubrimiento electrodepositado de la reivindicación 1, que además comprende partículas abrasivas incorporadas a la composición electrodepositada.
4. El recubrimiento electrodepositado de la reivindicación 1, en donde dichas partículas abrasivas se seleccionan del grupo que consiste en nitruro de boro cúbico, alúmina, carburos de silicio, u otro tipo de nitruros, óxidos y carburos.
5. El recubrimiento electrodepositado de la reivindicación 1, en donde dicha fase γ' -Ni₃Al está contenida en una fracción de volumen comprendida entre 65-75 % en volumen.
6. El recubrimiento electrodepositado de la reivindicación 1, caracterizado por una mayor resistencia a temperaturas elevadas al tiempo que mantiene sustancialmente la resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas en comparación con el recubrimiento que tiene la composición de MCrAlY.
7. El recubrimiento electrodepositado de la reivindicación 1, que además comprende dicha fase γ' -Ni₃Al está en una distribución uniforme dentro de dicha fase γ -Ni.
8. El recubrimiento electrodepositado de la reivindicación 1, en donde la cantidad respectiva de boro, carbono, molibdeno, tungsteno y titanio es 0 %.
9. El recubrimiento electrodepositado de la reivindicación 1, en donde dicho recubrimiento se caracteriza por la ausencia de una capa quebradiza en la zona de interdifusión entre el sustrato y el recubrimiento.
10. El recubrimiento electrodepositado de la reivindicación 1, que además comprende 8-12 % en peso de cobalto, 6-9 % en peso de cromo, 5,5-7 % en peso de aluminio, en donde el total de titanio, circonio, carbono, boro, molibdeno, tungsteno, renio, y tántalo está en una cantidad de entre 3-12 % en peso y el resto de níquel.
11. Un método para formar un recubrimiento electrodepositado que comprende:
 - 55 proporcionar un sustrato de superaleación;
 - proporcionar una solución de galvanoplastia con un polvo precursor de aleación en donde dicho polvo precursor de aleación comprende CoCrAlX o NiCoCrAlX, donde X es uno o más de Re, Ta, Mo, W, Hf, Y, Si, Zr, C, B o cualquier combinación de los mismos;
 - 60 electrodepositar dicho níquel y dicho polvo precursor de aleación sobre el sustrato para formar un recubrimiento verde que tenga una composición que comprende 5-15 % en peso de cobalto, 5-10 % en peso de cromo, 5-10 % en peso de aluminio, 0 a 6 % en peso de molibdeno, 0 a 6 % en peso de tungsteno, 0 a 6 % en peso de tantalio, 0 a 6 % en peso de renio, 0 a 2 % en peso de titanio, 0 a 1 % en peso de circonio, 0 a 1 % en peso de hafnio, 0 a 1 % en peso de itrio, 0 a 1 % en peso de silicio, 0 a 0,2 % en peso de carbono, 0 a 0,03 % en peso de boro y el níquel restante;
 - 65

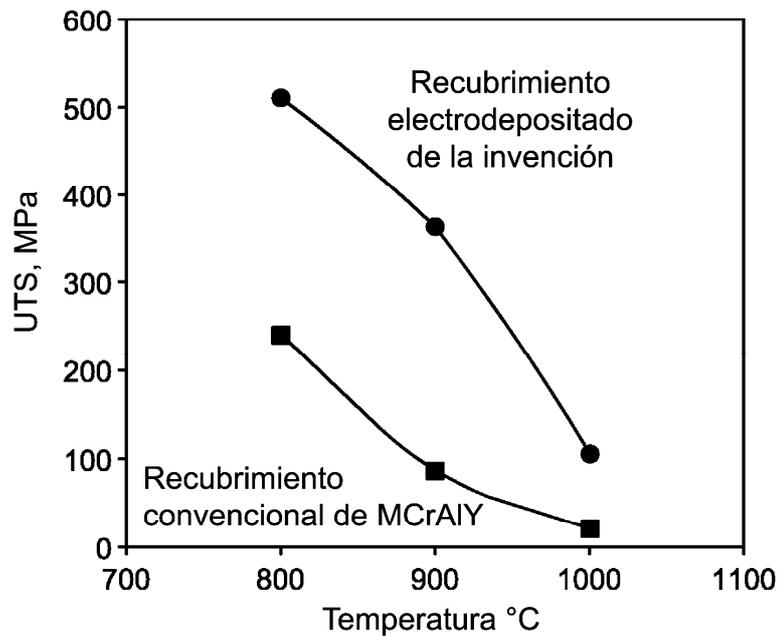
realizar un primer tratamiento térmico de dicho recubrimiento verde a una temperatura que varía de 1093 °C a 1316 °C (2000 °F a 2400 °F) para una duración de 2 a 6 horas;
difundir la composición en polvo de CoCrAlX o NiCoCrAlX en una matriz de galvanoplastia de níquel para producir un recubrimiento intermedio;
realizar un segundo tratamiento térmico de dicha composición a una temperatura que varía de 760 °C a 1066 °C (1400 °F a 1950 °F) para una duración de 6 a 48 horas; y
precipitar la fase gamma-prima de aluminuro de níquel (fase γ' -Ni₃Al) para producir el recubrimiento electrodepositado modificado.

- 5
- 10
12. El método de la reivindicación 11, que además comprende las etapas de:
- 15
- fijar las partículas abrasivas a dicho recubrimiento electrodepositado mediante electrodeposición a partir de un baño de solución de galvanoplastia que tiene las partículas abrasivas suspendidas en la misma; y
rellenar alrededor de las partículas abrasivas con dicho recubrimiento electrodepositado.
13. El método de la reivindicación 11, en donde dicho sustrato es un álabe de turbina que tiene una punta y dichas partículas abrasivas comprenden partículas de nitruro de boro.



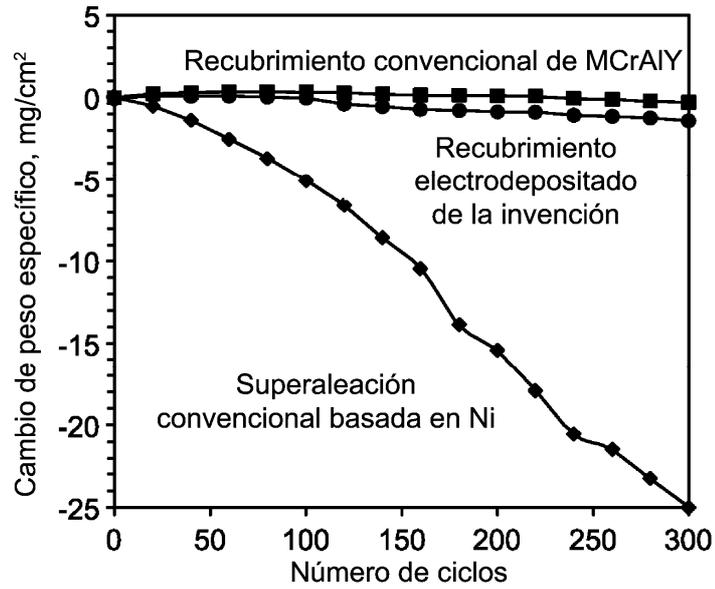
La Figura 1 es una descripción esquemática de un álabe de turbina recubierto con un recubrimiento abrasivo que comprende partículas abrasivas en una matriz metálica.

FIG. 1



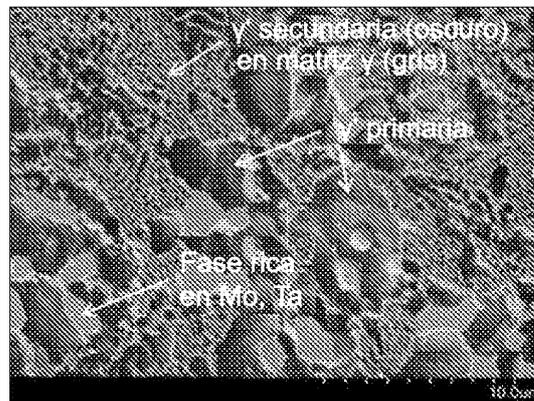
La Figura 2 muestra una comparación gráfica de la resistencia última a la tracción medida del recubrimiento electrodepositado de la presente invención y un recubrimiento convencional de MCrAlY en el intervalo de temperaturas de 800-1000 °C

FIG. 2



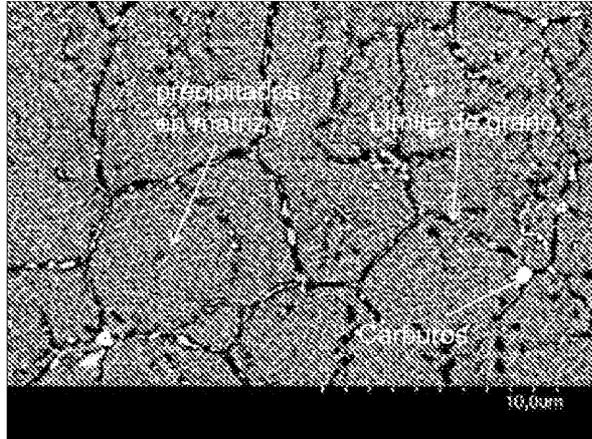
La Figura 3 compara la resistencia a la oxidación cíclica medida a 1133 °C del recubrimiento electrodepositado de la presente invención con las de un recubrimiento convencional de MCrAlY y una superaleación basada en níquel convencional.

FIG. 3



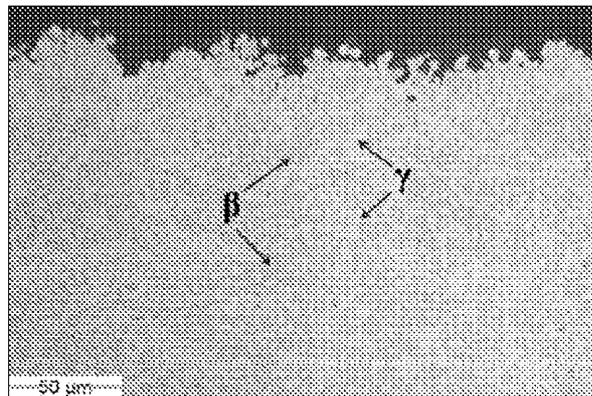
La Figura 4 es una imagen de scanning electron microscopy (microscopía electrónica de barrido - SEM) de una microestructura en sección transversal del recubrimiento electrodepositado de la presente invención que muestra una distribución bimodal de la fase γ' en una fase γ en la que la muestra se grabó con reactivo de Marble

FIG. 4



La Figura 5 es una imagen de scanning electron microscopy (microscopía electrónica de barrido - SEM) de una microestructura en sección transversal del recubrimiento electrodepositado de la presente invención que comprende precipitados finos de fase γ' uniformes en una fase γ y en la que la muestra se grabó con reactivo de Marble

FIG. 5



La Figura 6 es una imagen de scanning electron microscopy (microscopía electrónica de barrido - SEM) de una microestructura en sección transversal de un recubrimiento convencional de MCrAlY que comprende fases γ y β

FIG. 6