

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 786 026**

51 Int. Cl.:

**C23C 4/06** (2006.01)

**C23C 28/00** (2006.01)

**C23C 30/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.07.2010 PCT/US2010/041759**

87 Fecha y número de publicación internacional: **20.01.2011 WO11008719**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.07.2010 E 10737409 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.02.2020 EP 2521802**

54 Título: **Sistema de recubrimiento para el control de la holgura en maquinaria giratoria**

30 Prioridad:

**14.07.2009 US 225241 P**

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

**08.10.2020**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**TAYLOR, THOMAS, ALAN**

74 Agente/Representante:

**DEL VALLE VALIENTE, Sonia**

ES 2 786 026 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

Sistema de recubrimiento para el control de la holgura en maquinaria giratoria

5 **Campo de la invención**

La invención se refiere a sistemas de sello de motores de turbinas de gas que tienen un elemento giratorio con una superficie de punta abrasiva que se dispone en relación de roce respecto a un elemento de sello estacionario con una superficie abrasible. La superficie de punta abrasiva se recubre con una matriz de aleación metálica que tiene partículas cerámicas abrasivas incrustadas en la matriz y sobresaliendo de esta. La superficie de sello abrasible se recubre con un recubrimiento cerámico. La relación de roce proporciona una holgura de funcionamiento ajustada entre el elemento giratorio y el elemento de sello estacionario, mejorando, de este modo, la eficiencia del motor, reduciendo el consumo de combustible y minimizando el tiempo de inactividad por revisión.

15 **Antecedentes de la invención**

Los motores de turbina de gas modernos se componen de tres secciones o componentes principales que funcionan conjuntamente para producir el empuje para la propulsión de las aeronaves. En la sección del compresor, el aire ambiente entrante se comprime y, por tanto, se calienta mediante una serie de etapas de álabes giratorios y paletas estacionarias. En las etapas iniciales del compresor los álabes se hacen, de forma general, de aleaciones de titanio, y en las etapas posteriores, donde las temperaturas son más altas, los álabes se hacen, de forma general, de aleaciones con base de hierro o de níquel. El aire comprimido puede calentarse a 648,9 °C (1200 °F) y a 760 °C (1400 °F) en la última etapa de compresión, donde se hace pasar a la sección de la cámara de combustión, donde se inyecta y quema combustible. Los gases calientes que salen de la sección de la cámara de combustión pueden estar a aproximadamente 1315,6 °C (2400 °F), y se dirigen a las paletas y álabes de la primera etapa de la sección de turbina. En la sección de turbina, que comprende una serie de etapas de álabes giratorios y paletas estacionarias, el trabajo en sí se extrae de los gases comprimidos calientes que hacen girar la turbina, que está conectada para accionar la sección de compresor anterior. Una parte significativa del empuje del motor procede de la gran sección de ventilador en la parte delantera del motor, que aspira aire ambiental y lo empuja hacia atrás a una alta velocidad. El ventilador también está impulsado por la sección de turbina.

En el compresor, las primeras etapas de la sección de compresor de baja presión se componen de álabes de aleación de titanio que giran a alta velocidad. Los álabes se diseñan de modo que sus puntas estén muy cerca de un anillo de sello estacionario. La finalidad del hueco estrecho es minimizar las fugas de gas y permitir que la presión del aire aumente de una etapa a la siguiente. Una punta estrecha para sellar huecos da lugar a una mayor eficiencia del motor y a una mayor producción de energía. Si el hueco es demasiado estrecho, existe la posibilidad de roce entre la punta y el sello. Esto puede producirse, por ejemplo, cuando se enciende el motor o si el piloto impulsa el acelerador para más potencia. En estos casos, el álabe puede calentarse más rápidamente que la carcasa circundante y, por la expansión térmica, alargarse y, por lo tanto, rozar el anillo de sello. Es probable que haya otros mecanismos que también puedan causar roces. Cuando el álabe de aleación de titanio roce el sello, la fricción puede ser muy elevada y la punta del álabe puede calentarse rápidamente hasta temperaturas donde el titanio caliente puede de hecho quemarse u oxidarse, con una gran liberación adicional de calor. Estas situaciones son, esencialmente, fuegos de titanio que, si no se controlan, podrían dañar el motor. Por consiguiente, se aplica un recubrimiento sobre la punta de estos álabes de titanio para separar el titanio desnudo del material de sello por sí se produjera un roce. En las últimas etapas del compresor, donde las temperaturas son más altas, se utilizan álabes de aleación con base de hierro o níquel, y estas también requieren recubrimientos de punta.

En la turbina, las primeras etapas de la sección de la turbina de alta presión se componen, de forma general, de álabes de superaleación con base de níquel que giran a alta velocidad. Estos álabes se diseñan de modo que sus puntas estén muy cerca de un anillo de sello estacionario. La finalidad del espacio estrecho es minimizar la fuga de gas y permitir que la presión del aire realice trabajo contra los álabes de turbina, haciendo que giren. Una punta estrecha para sellar huecos da lugar a una mayor eficiencia del motor y a una mayor producción de energía. Si el hueco es demasiado estrecho, existe la posibilidad de roce entre la punta y el sello. Como se indicó anteriormente, esto puede producirse, por ejemplo, cuando se enciende el motor o si el piloto impulsa el acelerador para más potencia. En estos casos, el álabe puede calentarse más rápidamente que la carcasa circundante y, por la expansión térmica, alargarse y, por lo tanto, rozar el anillo de sello. Es probable que haya otros mecanismos que también puedan causar roces. De forma típica, cuando una punta desnuda de álabe de superaleación roza contra un sello desnudo de superaleación de fundición, la punta del álabe se desgasta.

En la búsqueda continua de mayor eficiencia de funcionamiento, los fabricantes buscan mejores sistemas de sello de motores de turbinas de gas. Las exigencias de recubrimientos de punta de álabe abrasivos y de recubrimientos de sello abrasibles resistentes al desgaste son incluso mayores. De igual modo, las exigencias de una relación de roce que ofrezca una holgura de funcionamiento estrecha entre las puntas y las superficies de sello son incluso mayores.

Sigue existiendo una necesidad en la técnica de proporcionar sistemas mejorados de sello de motores de turbinas de gas, especialmente de recubrimientos abrasivos mejorados resistentes al desgaste para puntas de álabes de turbina y de compresor, y de recubrimientos mejorados abrasibles para superficies de sello estacionarias que tengan una relación de roce que permita una holgura de funcionamiento estrecha entre las puntas y las

superficies de sello. Sigue habiendo una necesidad en la técnica de mejorar la eficiencia de los motores, de reducir el consumo de combustible y de minimizar el tiempo de inactividad por revisión.

**Sumario de la invención**

5 La presente invención es un sistema de sello de motores de turbina de gas, tal como se define en la reivindicación independiente 1.

10 La invención se refiere, en parte, a un sistema de sello de motores de turbina de gas que comprende un elemento giratorio que tiene una superficie de punta abrasiva que se dispone en relación de roce respecto a una superficie de sello estacionaria abrasible, en donde dicha superficie de punta abrasiva comprende un recubrimiento abrasivo que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de la punta, en donde dicho recubrimiento abrasivo comprende una matriz de aleación metálica que tiene partículas cerámicas abrasivas al menos parcialmente incorporadas en dicha matriz, y al menos algunas de las partículas cerámicas abrasivas sobresalen de dicha matriz;

15 en donde dicha superficie de sello abrasible comprende un recubrimiento cerámico abrasible que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de sello, en donde dicho recubrimiento cerámico se hace de un polvo cerámico que comprende macropartículas de polvo cerámico, comprendiendo dichas macropartículas de polvo cerámico un componente basado en circonita y un componente basado en (alúmina + sílice), en donde dichas macropartículas de polvo cerámico contienen desde aproximadamente un 10 hasta aproximadamente un 95 por ciento en peso de componente basado en circonita, y aproximadamente de un 5 a aproximadamente un 90 por ciento en peso del componente basado en (alúmina + sílice), y en donde el tamaño (diámetro) de partículas promedio de las macropartículas de polvo cerámico es desde aproximadamente 10 hasta aproximadamente 150 micrómetros; y en donde dicho sistema de sello de motores de turbina de gas tiene una relación de desgaste de punta a sello de al menos 1:10, preferiblemente de al menos 1:20. El recubrimiento cerámico puede incluir, además, un tercer componente que comprenda alúmina pura. La carga por impacto de la superficie de punta abrasiva en la superficie de sello estacionaria abrasible genera partículas de residuos de desgaste que tienen un tamaño (diámetro) de partícula promedio de desde aproximadamente 1 micrómetro o menor, hasta aproximadamente 150 micrómetros.

**Descripción detallada de la invención**

30 En una realización, esta invención se refiere a un sistema de sello de motores de turbina de gas, en donde dichas partículas cerámicas abrasivas se seleccionan de policristal de alúmina, monocristal de alúmina (zafiro), monocristal de alúmina dopado con croma (rubí), granate de itria-alúmina (YAG), policristal de alúmina dopado con titanita o monocristal (esmeralda), SiAlON, SiC, Si3N4 o diamante.

35 Los sistemas de sello de motores de turbina de gas de esta invención requieren de mantenimiento de holguras estrechas entre un elemento rotatorio que tiene una superficie de punta abrasiva y una superficie de sello abrasible. El elemento giratorio puede ser una punta de álabe abrasiva de turbina o de compresor, o un borde de cuchilla abrasiva de turbina o de compresor. La punta de álabe o borde de cuchilla abrasivas pueden emparejarse con una superficie de sello abrasible para formar un sello de aire exterior o interior.

40 Como se describió anteriormente, un motor de turbina de gas típico incluye una sección de compresor y una sección de turbina. La sección de compresor incluye una pluralidad de álabes de compresor que están montados sobre un rotor de compresor. Una pluralidad de estatores de compresor se disponen entre los álabes del compresor. La sección de turbina incluye una pluralidad de álabes de turbina que están montados sobre un rotor de turbina. Entre los álabes de la turbina hay dispuesta una pluralidad de paletas de turbina.

45 El elemento giratorio puede ser, por ejemplo, un álabe de turbina, un borde de cuchilla de rotor de turbina dispuesto sobre un rotor de turbina, y una superficie de sello abrasible dispuesta sobre una pala de turbina para formar un sello de aire interior, un álabe de compresor, o un borde de cuchilla de rotor de compresor dispuesto sobre un rotor de compresor, y una superficie de sello abrasible dispuesta sobre un estátor de compresor para formar un sello de aire interior.

50 Con respecto al elemento giratorio que tiene la superficie de punta abrasiva, la superficie de punta abrasiva tiene un recubrimiento abrasivo que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de punta. El recubrimiento abrasivo es una matriz de aleación metálica que tiene partículas abrasivas cerámicas al menos parcialmente integradas en la matriz, y al menos algunas de las partículas cerámicas abrasivas sobresalen de la matriz. Las partículas abrasivas cerámicas son partículas angulares, duras y resistentes que se mantienen en la matriz de tamaño nominal desde aproximadamente 0,102 mm (4 mils) hasta aproximadamente 0,381 mm (15 mils).

55 Como se indicó anteriormente, esta invención se refiere, en parte, a un elemento giratorio de un sistema de sello de motores de turbina de gas, teniendo dicho elemento giratorio una superficie de punta abrasiva, en donde dicha superficie de punta abrasiva comprende un recubrimiento abrasivo que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de punta, en donde dicho recubrimiento abrasivo comprende una matriz de aleación metálica que tiene partículas abrasivas cerámicas al menos parcialmente integradas en dicha matriz, y al menos algunas de las partículas abrasivas cerámicas sobresalen de dicha matriz, en donde dichas partículas abrasivas cerámicas se seleccionan de policristal de alúmina,

60

65

monocristal de alúmina (zafiro), monocristal de alúmina dopado con cromia (rubí), granate de itria-alúmina (YAG), policristal de alúmina dopado con titanía o monocristal (esmeralda), SiAlON, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> o diamante.

5 Como también se indicó anteriormente, esta invención se refiere en parte a un recubrimiento abrasivo que comprende una matriz de aleación metálica que tiene partículas abrasivas cerámicas al menos parcialmente integradas en dicha matriz, y al menos algunas de las partículas abrasivas cerámicas sobresalen de dicha matriz, en donde dichas partículas abrasivas cerámicas se seleccionan de policristal de alúmina, monocristal de alúmina (zafiro), monocristal de alúmina dopado con cromia (rubí), granate de itria-alúmina (YAG), policristal de alúmina dopado con titanía o monocristal (esmeralda), SiAlON, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> o diamante.

10 El recubrimiento abrasivo es, preferiblemente, una matriz de aleación metálica que se adhiere bien al elemento giratorio al que se aplica. La matriz de aleación metálica puede comprender MCrAlY, en donde M es Ni, Co, Fe o combinaciones de los mismos. Preferiblemente, la matriz de aleación metálica se selecciona de NiCrAlY, NiCoCrAlY y CoNiCrAlY.

15 Las partículas abrasivas cerámicas se seleccionan, preferiblemente, de alúmina, cromia y aleaciones de los mismos. En particular, las partículas abrasivas cerámicas se seleccionan de nitruro de boro cúbico (cBN), policristal de alúmina, monocristal de alúmina (zafiro), monocristal de alúmina dopado con cromia (rubí), granate de itria-alúmina (YAG), policristal de alúmina dopado con titanía, monocristal de alumina dopado con titanía (esmeralda), SiAlON, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> y diamante. Las partículas abrasivas cerámicas comprenden partículas abrasivas cerámicas angulares de tamaño nominal desde aproximadamente 4 hasta aproximadamente 15 mils.

20 Algunas de las partículas abrasivas cerámicas pueden ser más adecuadas para una sección particular del motor de turbina de gas. Por ejemplo, algunas partículas abrasivas cerámicas pueden ser más adecuadas para la sección de compresor, mientras que otras son más adecuadas para la sección de turbina.

25 Preferiblemente, las partículas abrasivas cerámicas tienen una dureza (en Kg/mm<sup>2</sup>) de desde aproximadamente 1000 hasta aproximadamente 7000, preferiblemente desde aproximadamente 1500 hasta aproximadamente 7000, y una resistencia a la fractura (en MPa\*m<sup>0,5</sup>) de desde aproximadamente 1,5 hasta aproximadamente 8, preferiblemente desde aproximadamente 2 hasta aproximadamente 8. El producto de la dureza (en Kg/mm<sup>2</sup>) y la resistencia a la fractura (en MPa\*m<sup>0,5</sup>) es, preferiblemente, mayor que el de los monocristales de circonita pura. Las partículas abrasivas cerámicas se integran en la matriz hasta una profundidad de aproximadamente nominalmente la mitad del tamaño de las partículas abrasivas cerámicas, con una parte superior de las partículas abrasivas cerámicas que sobresale por encima de la matriz.

30 Preferiblemente, al menos algunos de los artículos abrasivos se integran parcialmente en la matriz de aleación metálica, y al menos algunas de las partículas abrasivas cerámicas sobresalen por encima de la superficie exterior del recubrimiento abrasivo formado por la matriz de aleación metálica.

35 El recubrimiento abrasivo de esta invención puede formarse por deposición, p. ej., electrodeposición de la matriz de aleación metálica, p. ej., la aleación de MCrAlY, sobre el sustrato para formar una capa inicial. Posteriormente, la deposición de la aleación de MCrAlY se continúa en presencia de las partículas abrasivas cerámicas, de modo que una dispersión de las partículas abrasivas cerámicas se incorpore a la capa de aleación de MCrAlY. A continuación, se deposita una capa exterior de aleación de MCrAlY sobre la capa inicial de aleación de MCrAlY que tiene partículas abrasivas cerámicas incorporadas en la misma. La deposición de la capa exterior de aleación de MCrAlY se limita a garantizar que al menos algunas de las partículas abrasivas cerámicas sobresalgan por encima de la superficie de la capa exterior de la aleación de MCrAlY. El grosor del recubrimiento abrasivo puede variar desde aproximadamente 0,0635 mm hasta aproximadamente 2,54 mm (aproximadamente 0,0025 pulgadas a aproximadamente 0,10 pulgadas) o más, preferiblemente no superior a aproximadamente 0,0635 mm (0,025 pulgadas).

40 El recubrimiento abrasivo puede depositarse directamente sobre el elemento giratorio, o puede depositarse sobre una capa adherente que se aplica al elemento giratorio. La capa adherente puede depositarse entre la superficie de punta y el recubrimiento abrasivo y, preferiblemente, está libre de partículas. La capa adherente puede comprender MCrAlY, en donde M es Ni, Co, Fe o combinaciones de los mismos. La capa adherente puede tener una rugosidad de superficie de al menos aproximadamente 3,81 μm (150 micropulgadas). El grosor de la capa adherente varía, de forma típica, desde aproximadamente 3 hasta aproximadamente 10 mils (aproximadamente 0,08 a aproximadamente 0,25 mm).

45 La capa adherente puede comprender (i) una aleación que contenga cromo, aluminio, itrio con un metal seleccionado del grupo que consiste en níquel, cobalto y hierro, o (ii) una aleación que contenga aluminio y níquel. En particular, la capa adherente puede comprender un recubrimiento de MCrAlY + X que se aplica mediante un método de pulverización de plasma, un método de pulverización por detonación o un método de galvanizado, en donde M es Ni, Co o Fe, o cualquier combinación de los tres elementos, y X incluye la adición de Pt, Ta, Hf, Re, u otros metales de tierras raras, o partículas finas de dispersante de alúmina, solas o en combinación.

50 Con una capa adherente, el elemento giratorio puede calentarse en vacío a una temperatura suficiente para crear una unión entre la capa adherente y la superficie de punta. Sin una capa adherente, el elemento giratorio puede calentarse en vacío a una temperatura suficiente para crear una unión entre el recubrimiento abrasivo y la superficie de punta. Preferiblemente, el recubrimiento abrasivo se deposita mediante galvanizado.

Integrar parcialmente las partículas abrasivas cerámicas a la capa de matriz de aleación metálica proporciona un recubrimiento abrasivo que es adecuado como una punta abrasiva para un elemento giratorio, p. ej., punta de álabe, para motores de turbina de gas. El recubrimiento de punta abrasivo es capaz de sobrevivir a numerosos roces con una superficie estacionaria de sello abrasible en un entorno hostil, típico de los motores de turbina de gas. La capa de matriz de aleación metálica protege el sustrato subyacente del entorno hostil del motor, mientras que las partículas abrasivas cerámicas protegen al sustrato y a la capa de matriz de aleación metálica del contacto con la superficie estacionaria de sello abrasible.

Con respecto a la superficie estacionaria de sello abrasible, la superficie tiene un recubrimiento cerámico abrasible que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de sello. El recubrimiento cerámico puede ser cualquier óxido metálico adecuado, por ejemplo, circonita estabilizada con itria, circonita estabilizada con itterbia, circonita estabilizada con gadolinia, y similares. Preferiblemente, el recubrimiento cerámico contiene alúmina. La circonita puede estabilizarse en la estructura cristalina tetragonal o cúbica, o una mezcla de las estructuras cristalinas tetragonal o cúbica. La estabilización puede producirse mediante adiciones seleccionadas de itria, magnesia, calcia, hafnia, ceria, gadolinia, itterbia, lantánidos o mezclas de los mismos.

Preferiblemente, un recubrimiento cerámico sobre un segmento o anillo de sellado debería cumplir simultáneamente muchas características, incluyendo que pueda ser tanto abrasible como una barrera térmica. La abrasividad de un material es una función de varios factores, que incluyen la resistencia mecánica del material, densidad, friabilidad, temperatura de funcionamiento, naturaleza de las interacciones en su superficie de roce y similares.

El sistema de sello del motor que comprende un recubrimiento abrasible aplicado al elemento estacionario opuesto a las puntas de álabes giratorios, es decir, el sello estacionario, debería diseñarse para que se arranque en una trayectoria circular en una situación de roce, minimizando de este modo el desgaste en la punta de álabe. Es deseable una banda de desgaste sobre el sello abrasible, ya que esto tiene mucho menos efecto sobre la pérdida de compresión entre etapas que la menor longitud del álabe debido al desgaste de punta. Un desgaste de punta enorme o repentino pueden dar lugar a que el compresor se pare y a una pérdida de potencia del motor, creando por tanto una situación grave.

Algunos recubrimientos de compresor abrasibles en la técnica tienen tendencia a sinterizarse y endurecerse durante el funcionamiento del motor. Esto reduce su abrasividad, por lo que fuerza mucho más el desgaste en una situación de roce de la punta del álabe o del recubrimiento de la punta. Según esta invención, se proporcionan recubrimientos abrasibles para secciones de compresor y de turbina que son totalmente cerámicos y con mucha menor probabilidad de sinterizarse y endurecerse a las temperaturas de funcionamiento. Esta invención proporciona, también, opciones de tratamiento térmico para los recubrimientos abrasibles cerámicos que mejoran más su estabilidad a largo plazo.

Recubrimientos cerámicos abrasibles ilustrativos útiles en esta invención incluyen, por ejemplo, recubrimientos cerámicos de baja densidad tales como recubrimientos de circonita estabilizados con itria; recubrimientos de circonita estabilizados con itria que tienen una microestructura de macrogrietas (es decir, una pluralidad de microgrietas que se distribuyen por todo el recubrimiento); recubrimientos que tienen un componente basado en circonita y un componente basado en (alúmina + sílice); y similares. Preferiblemente, los recubrimientos cerámicos de baja densidad contienen alúmina. Los recubrimientos cerámicos multicapa que se describen en la presente memoria también pueden ser útiles en esta invención.

En una realización, los recubrimientos cerámicos abrasibles útiles en esta invención, comprenden recubrimientos multifase de componentes insolubles que resisten la sinterización, p. ej., recubrimientos que tienen un componente basado en circonita y un componente basado en (alúmina + sílice), u otras fases binarias o ternarias insolubles. La carga por impacto de la superficie de punta abrasiva en la superficie de sello estacionaria abrasible genera partículas de residuos de desgaste que tienen un tamaño (diámetro) de partícula promedio de desde aproximadamente 1 micrómetro o menor, p. ej., submicrómetros, hasta aproximadamente 150 micrómetros. La porosidad del recubrimiento cerámico abrasible puede controlarse en tamaño y distribución para mejorar la ruptura del recubrimiento en lugares dentro de los límites de partículas de tamaño micrométrico, o a lo largo de planos de corte de un grosor de tamaño micrométrico. Los polvos pulverizados térmicamente que se utilizan en la presente memoria pueden producirse para retener la porosidad dentro de las macropartículas, p. ej., un polvo basado en circonita y un polvo basado en (alúmina + sílice). Los parámetros de recubrimiento por pulverización térmica y el tratamiento térmico opcional del recubrimiento pueden mejorar la distribución de porosidad para la abrasibilidad. Además, pueden utilizarse aditivos de infiltración post-recubrimiento para formar uniones de partículas locales para una resistencia mejorada de erosión con una reducción mínima en abrasibilidad.

Los recubrimientos de circonita estabilizada son, de forma típica, recubrimientos de baja densidad, p. ej., que tengan una densidad de aproximadamente un 45 a un 90 por ciento del valor teórico. De forma ventajosa, la densidad del recubrimiento de circonita estabilizada con itria es de aproximadamente un 45 a un 90 por ciento del valor teórico, de forma más ventajosa de un 50 a un 86 por ciento del valor teórico, y de la forma más ventajosa posible, de aproximadamente un 50 a un 70 por ciento del valor teórico. Otras composiciones ilustrativas de recubrimientos de baja densidad incluyen, por ejemplo, circonita estabilizada que está completa o parcialmente estabilizada con itria, itterbia, ceria, otras tierras raras, magnesia u otros óxidos. El recubrimiento cerámico de baja densidad puede constituirse de otros óxidos, tales como alúmina, cromia o magnesia.

Preferiblemente, la circonita estabilizada puede estabilizarse total o parcialmente con desde aproximadamente 6 hasta aproximadamente 25, preferiblemente desde aproximadamente 6 hasta aproximadamente 10, más preferiblemente desde aproximadamente 6,5 hasta aproximadamente 8 por ciento en peso de óxido de itrio (itria), o desde aproximadamente 10 hasta aproximadamente 36, preferiblemente desde aproximadamente 10 hasta aproximadamente 16, más preferiblemente desde aproximadamente 11 hasta aproximadamente 14 por ciento en peso de óxido de lterbio (iterbia).

Una circonita estabilizada ilustrativa se elabora a partir de polvo de circonita de alta pureza estabilizado con itria o iterbia que comprende desde aproximadamente 0 hasta aproximadamente 0,15 por ciento en peso de óxidos de impurezas, desde aproximadamente 0 hasta aproximadamente 2 por ciento en peso de óxido de hafnio (hafnia), desde aproximadamente 6 hasta aproximadamente 25 por ciento en peso de óxido de itrio (itria), o desde aproximadamente 10 hasta aproximadamente 36 por ciento en peso de óxido de iterbio (iterbia) y el resto, óxido de circonio (circonita). Ver, por ejemplo, WO 2008/054536, cuya descripción se incorpora en la presente memoria como referencia.

El polvo de circonita estabilizada que se utiliza en la elaboración de los recubrimientos de circonita estabilizada puede mezclarse con un material fugitivo, p. ej., partículas de tamaño controlado de un poliéster o Lucita. El polvo de circonita estabilizada y el material fugitivo pueden pulverizarse térmicamente para conformar un recubrimiento precursor que se trata térmicamente para volatilizar el material fugitivo, y producir un recubrimiento que tenga una porosidad de al menos aproximadamente 20 %. El material fugitivo puede inyectarse por separado en un dispositivo de pulverización térmica en un punto de entalpía de pluma inferior y pulverizarse junto con el polvo de circonita estabilizada. El polvo de circonita estabilizada puede mezclarse adicionalmente con un lubricante sólido, p. ej., nitruro de boro hexagonal. El lubricante sólido puede inyectarse por separado en un dispositivo de pulverización térmica en un punto de entalpía de pluma inferior y pulverizarse junto con el polvo cerámico. El polvo de circonita estabilizada que se utiliza en la presente memoria comprende partículas que tengan un tamaño (diámetro) de partículas promedio de desde aproximadamente 1 hasta aproximadamente 150 micrómetros.

Los recubrimientos de circonita estabilizada son materiales convencionales disponibles comercialmente. Dichos recubrimientos pueden pulverizarse o depositarse mediante métodos convencionales conocidos en la técnica, tales como pulverización de plasma, pistola de detonación, high velocity oxy-fuel (oxicombustible de alta velocidad - HVOF) o high velocity air-fuel (aire-combustible de alta velocidad - HVOF). La pulverización térmica es un método preferido para la deposición de los recubrimientos cerámicos abrasibles que se utilizan en esta invención.

Los recubrimientos cerámicos multicapa también pueden ser útiles en esta invención. Por ejemplo, puede aplicarse una capa o capa adherente interior al sustrato, y puede aplicarse el recubrimiento cerámico abrasible sobre la capa o capa adherente interior. Las capas interiores metálicas y metálicas/cerámicas o capas adherentes ilustrativas que pueden depositarse sobre el sustrato incluyen, por ejemplo, capas adherentes metálicas pulverizadas térmicamente de NiCoCrAlY o NiCrAlY, y capas dispersadas con óxido de estos componentes metálicos con partículas de alúmina o de itria, o capas producidas por difusión de compuestos de aluminuro o de aluminuro de platino. La capa adherente puede tener una rugosidad de superficie de al menos aproximadamente 3,81  $\mu\text{m}$  (150 micropulgadas). El grosor de la capa adherente varía, de forma típica, desde aproximadamente 3 hasta aproximadamente 10 mils (aproximadamente 0,08 a aproximadamente 0,25 mm). Pueden aplicarse primero una o múltiples capas adherentes o recubrimientos de capa interior a un sustrato metálico, resultando en una rugosidad superficial superior controlada de al menos aproximadamente 3,81  $\mu\text{m}$  (150 micropulgadas) antes de la capa o capas cerámicas. Además, la capa adherente o las capas interiores pueden tratarse térmicamente antes o después de aplicar las capas cerámicas de recubrimiento. La capa adherente o las capas interiores pueden tratarse térmicamente, seguidamente pueden aplicarse las capas cerámicas de recubrimiento, y seguidamente pueden tratarse térmicamente todas las capas juntas. La capa adherente o las capas interiores y las capas cerámicas de recubrimiento pueden tratarse térmicamente juntas en un tratamiento térmico. La capa adherente o las capas interiores pueden tratarse térmicamente y no tratar térmicamente las capas cerámicas de recubrimiento.

Los sustratos metálicos y no metálicos ilustrativos incluyen, por ejemplo, superaleaciones metálicas de distintas composiciones con base de níquel, base de cobalto o base de hierro, y materiales cerámicos que se componen de carburo de silicio y materiales no metálicos basados en nitruro de silicio.

Un grosor adecuado para los recubrimientos cerámicos abrasibles, p. ej., recubrimientos de circonita estabilizada, puede ser de hasta aproximadamente 1000 micrómetros o mayor, dependiendo de la aplicación particular y del grosor de cualquier otra capa. El grosor del recubrimiento cerámico abrasible puede variar desde aproximadamente 0,51 mm (0,02 pulgadas) hasta aproximadamente 2,54 mm (0,10 pulgadas) o superior. Temperaturas de aplicación elevadas, p. ej., hasta 1200 °C, requieren sistemas de recubrimiento protector gruesos, de forma general, del orden de 250 micrómetros o más.

Como se indicó anteriormente, esta invención se refiere en parte a un sistema de sello de motores de turbina de gas que comprende un elemento giratorio que tiene una superficie de punta abrasiva que se dispone en relación de roce respecto a una superficie de sello estacionaria abrasible, en donde dicha superficie de punta abrasiva comprende un recubrimiento abrasivo que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de punta, en donde dicho recubrimiento abrasivo comprende una matriz de aleación metálica que tiene partículas abrasivas cerámicas al menos parcialmente integradas en dicha matriz, y al menos algunas de las partículas abrasivas cerámicas sobresalen de dicha matriz; en donde dicha

superficie de sello abrasible comprende un recubrimiento cerámico abrasible que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de sello, en donde dicho recubrimiento cerámico abrasible comprende un recubrimiento de circonita estabilizada con itria o iterbia que tiene una pluralidad de macrogrietas verticales que se distribuyen a lo largo de dicho recubrimiento cerámico abrasible; y en donde dicho sistema de sello de motores de turbina de gas tiene una relación de desgaste de punta a sello de al menos aproximadamente 1:10. La carga por impacto de la superficie de punta abrasiva en la superficie de sello estacionaria abrasible genera partículas de residuos de desgaste que tienen un tamaño (diámetro) de partícula promedio de desde aproximadamente 1 micrómetro o menor, hasta aproximadamente 150 micrómetros.

En particular, esta invención se refiere en parte a un sistema de sello de motores de turbina de gas que comprende un elemento giratorio que tiene una superficie de punta abrasiva que se dispone en relación de roce respecto a una superficie de sello estacionaria abrasible, en donde dicha superficie de punta abrasiva comprende un recubrimiento abrasivo que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de punta, en donde dicho recubrimiento abrasivo comprende una matriz de aleación metálica que tiene partículas abrasivas cerámicas al menos parcialmente integradas en dicha matriz, y al menos algunas de las partículas abrasivas cerámicas sobresalen de dicha matriz; en donde dicha superficie de sello abrasible comprende un recubrimiento cerámico sometido a abrasión que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de sello, en donde dicho recubrimiento cerámico abrasible comprende un recubrimiento de circonita estabilizada con itria o iterbia, en el que un área de sección transversal del recubrimiento normal a la superficie de sellado expone una pluralidad de macrogrietas verticales que se extienden al menos a la mitad del grosor del recubrimiento en longitud hasta el grosor total del recubrimiento, y que tiene desde aproximadamente 5 hasta aproximadamente 200 macrogrietas verticales por pulgada lineal medidas en una línea paralela a la superficie del sello y en un plano perpendicular a la superficie del sello; y en donde dicho sistema de sello de motores de turbina de gas tiene una relación de desgaste de punta a sello de al menos aproximadamente 1:10. La carga por impacto de la superficie de punta abrasiva en la superficie de sello estacionaria abrasible genera partículas de residuos de desgaste que tienen un tamaño (diámetro) de partícula promedio de desde aproximadamente 1 micrómetro o menor, hasta aproximadamente 150 micrómetros.

Los recubrimientos de circonita que tienen una microestructura con macrogrietas, normalmente, son cerámicas basadas en circonita que se estabilizan, ya sea completa o parcialmente, con itria, ceria, otros óxidos de tierras raras, magnesia u otro óxido para estabilizar al menos una de las fases cristalográficas tetragonal o cúbica. El recubrimiento cerámico puede también ser otras cerámicas, tales como alúmina, cromita u óxidos basados en magnesia.

Macrogrietas son aquellas grietas visibles en una sección transversal pulida del recubrimiento a un aumento de 100X. De forma ventajosa, las macrogrietas del recubrimiento cerámico son verticales con respecto al sustrato. Macrogrietas verticales son aquellas que son, predominantemente, perpendiculares o normales al plano de la interfase del recubrimiento con el del sustrato, con una longitud que es al menos la menor de 0,1 mm (4 mils) o una mitad del grosor del recubrimiento. Si tienen al menos la mitad del grosor del recubrimiento, también pueden denominarse grietas de segmentación o grietas de segmentación verticales. Las macrogrietas horizontales son aquellas que son predominantemente paralelas al plano de la superficie del sustrato, y conectan una grieta de segmentación con una grieta de segmentación adyacente. El recubrimiento cerámico puede contener una combinación de macrogrietas verticales y horizontales para aumentar la vida útil del recubrimiento. El recubrimiento cerámico abrasible puede tener, de forma típica, al menos aproximadamente 20, o al menos aproximadamente 40, macrogrietas verticales por pulgada lineal medidas en una línea paralela a la superficie del sello y en un plano perpendicular a la superficie del sello.

De forma ventajosa, el recubrimiento cerámico puede tener macrogrietas verticales que se extienden al menos al menor de aproximadamente 0,1 mm de longitud o una mitad del grosor del recubrimiento cerámico. Estas macrogrietas verticales son grietas de segmentación que se extienden al menos una mitad del espesor del recubrimiento cerámico. Además, estas macrogrietas de segmentación verticales tienen, de forma ventajosa, una densidad de grietas de aproximadamente 7,5 a 75 macrogrietas verticales por centímetro lineal. Cuando el recubrimiento cerámico incluye macrogrietas horizontales, el total de macrogrietas horizontales puede extenderse de desde aproximadamente 15 hasta 100 por ciento, medido de forma acumulativa a lo largo de un plano normal a la interfase del sustrato con el recubrimiento. De la forma más ventajosa, las macrogrietas horizontales totales se extienden desde aproximadamente el 20 hasta el 60 por ciento, medido de forma acumulativa a lo largo de un plano normal a la interfase del sustrato con el recubrimiento cerámico. El proceso de recubrimiento puede controlarse para producir grietas de segmentación vertical prácticamente a través del grosor de recubrimiento completo, con al menos aproximadamente 10 celdas de segmentación por 2,54 cm (pulgada) (diámetro de celda de 0,254 cm [0,1 pulgadas] o inferior).

Las macrogrietas horizontales pueden contactar con más de una macrogrieta vertical. El ancho de las macrogrietas verticales puede ser inferior a aproximadamente 1 mil. El recubrimiento cerámico abrasible puede tener segmentos de grietas horizontales, que conectan dos grietas de segmentación vertical cualesquiera, medidas en la sección transversal pulida, con una longitud de suma total inferior al 10 % del ancho del recubrimiento.

El recubrimiento cerámico, tal como un recubrimiento basado en circonita, puede contener macrogrietas horizontales, además de las macrogrietas verticales, para formar una estructura tipo ladrillo con una multitud de grietas horizontales de longitudes que varían desde 0,13 mm hasta 2,5 mm (5 a 100 mils) y que se extienden colectivamente desde un 15 hasta un 100 por ciento, medido a lo largo de un plano que extiende el ancho del recubrimiento.

Un polvo de zircona estabilizada ilustrativo que se utiliza en la elaboración de los recubrimientos de zircona con macrogrietas, es un polvo de zircona estabilizada de alta pureza con itria o iterbia, que comprende desde aproximadamente el 0 hasta aproximadamente el 0,15 por ciento en peso de óxidos de impurezas, desde aproximadamente el 0 hasta aproximadamente el 2 por ciento en peso de óxido de hafnio (hafnia), desde aproximadamente el 6 hasta aproximadamente el 25 por ciento de óxido de itrio (itria), o desde aproximadamente el 10 hasta aproximadamente el 36 por ciento en peso de óxido de iterbia (iterbia), y el resto, de óxido de circonio (zircona). Ver, por ejemplo, WO 2008/054536, mencionada anteriormente.

El polvo de zircona estabilizada que se utiliza en la elaboración de los recubrimientos de zircona con macrogrietas, puede mezclarse con un material fugitivo, p. ej., partículas de tamaño controlado de un poliéster o Lucita. El polvo de zircona estabilizada y el material fugitivo pueden pulverizarse térmicamente para conformar un recubrimiento precursor que se trata térmicamente para volatilizar el material fugitivo y producir un recubrimiento con macrogrietas que tiene una porosidad de al menos aproximadamente el 20 %. El material fugitivo puede inyectarse por separado en un dispositivo de pulverización térmica en un punto de entalpía de pluma inferior y pulverizarse junto con el polvo de zircona estabilizada. El polvo de zircona estabilizada puede mezclarse adicionalmente con un lubricante sólido, p. ej., nitruro de boro hexagonal. El lubricante sólido puede inyectarse por separado en un dispositivo de pulverización térmica en un punto de entalpía de pluma inferior y pulverizarse junto con el polvo cerámico. El polvo de zircona estabilizada que se utiliza en la presente memoria comprende partículas que tengan un tamaño (diámetro) de partículas promedio de desde aproximadamente 1 hasta aproximadamente 150 micrómetros.

Los recubrimientos cerámicos con macrogrietas están disponibles comercialmente. Dichos recubrimientos cerámicos con macrogrietas pueden pulverizarse o depositarse mediante métodos convencionales conocidos en la técnica, tales como pulverización de plasma, pistola de detonación, high velocity oxy-fuel (oxi-combustible de alta velocidad - HVOF) o high velocity air-fuel (aire-combustible de alta velocidad - HVOF). La pulverización térmica es un método preferido para la deposición de los recubrimientos cerámicos abrasibles que se utilizan en esta invención. Véanse, por ejemplo, las patentes de los EE. UU. con n.º US-5.743.013, US-5.073.433 y US-5.520.516, cuyas descripciones se incorporan como referencia en la presente memoria.

En esta invención también pueden ser útiles los recubrimientos cerámicos multicapa que incluyan al menos una capa cerámica abrasible que tenga una microestructura con macrogrietas. Por ejemplo, puede aplicarse una capa o capa adherente interior al sustrato, y puede aplicarse el recubrimiento cerámico abrasible sobre la capa o capa adherente interior. Las capas interiores metálicas y metálicas/cerámicas o capas adherentes ilustrativas que pueden depositarse sobre el sustrato incluyen, por ejemplo, capas adherentes metálicas pulverizadas térmicamente de NiCoCrAlY o NiCrAlY, y capas dispersadas con óxido de estos componentes metálicos con partículas de alúmina o de itria, o capas producidas por difusión de compuestos de aluminio o de aluminio de platino. La capa adherente puede tener una rugosidad de superficie de al menos aproximadamente 3,81  $\mu\text{m}$  (150 micropulgadas). Pueden aplicarse primero una o múltiples capas adherentes o recubrimientos de capa interior a un sustrato metálico, resultando en una rugosidad superficial superior controlada de al menos aproximadamente 3,81  $\mu\text{m}$  (150 micropulgadas) antes de la capa o capas cerámicas. El grosor de la capa adherente varía, de forma típica, desde aproximadamente 3 hasta aproximadamente 10 mils (aproximadamente 0,08 a aproximadamente 0,25 mm). Además, la capa adherente o las capas interiores pueden tratarse térmicamente antes o después de aplicar las capas cerámicas de recubrimiento. En una realización, puede aplicarse una capa de zircona estabilizada que tenga la estructura con macrogrietas sobre la capa adherente metálica. La capa adherente o las capas interiores pueden tratarse térmicamente, seguidamente pueden aplicarse las capas cerámicas de recubrimiento, y seguidamente pueden tratarse térmicamente todas las capas juntas. La capa adherente o las capas interiores y las capas cerámicas de recubrimiento pueden tratarse térmicamente juntas en un tratamiento térmico. La capa adherente o las capas interiores pueden tratarse térmicamente y no tratar térmicamente las capas cerámicas de recubrimiento. Pueden aplicarse una o más capas cerámicas, p. ej., recubrimiento de zircona estabilizada, sobre la capa cerámica que tiene una microestructura con macrogrietas. La una o más capas cerámicas pueden tener la misma o diferente composición, porosidad y/o densidad de grietas de segmentación que la capa cerámica que tiene una microestructura con macrogrietas.

Los sustratos metálicos y no metálicos ilustrativos incluyen, por ejemplo, superaleaciones metálicas de distintas composiciones con base de níquel, base de cobalto o base de hierro, y materiales cerámicos que se componen de carburo de silicio y materiales no metálicos basados en nitruro de silicio.

Un grosor adecuado para los recubrimientos cerámicos abrasibles, p. ej., aquellos que tengan una microestructura con macrogrietas, puede ser de hasta aproximadamente 1000 micrómetros o mayor, dependiendo de la aplicación particular y del grosor de cualquier otra capa. Temperaturas de aplicación elevadas, p. ej., hasta 1200 °C, requieren sistemas de recubrimiento protector gruesos, de forma general, del orden de 250 micrómetros o más.

Como se indicó anteriormente, esta invención se refiere en parte a un sistema de sello de motores de turbina de gas que comprende un elemento giratorio que tiene una superficie de punta abrasiva que se dispone en relación de roce respecto a una superficie de sello estacionaria abrasible, en donde dicha superficie de punta abrasiva comprende un recubrimiento abrasivo que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de punta, en donde dicho recubrimiento abrasivo comprende una matriz de aleación metálica que tiene partículas abrasivas cerámicas al menos parcialmente integradas en dicha matriz, y al menos algunas de las partículas abrasivas cerámicas sobresalen de dicha



- matriz; en donde dicha superficie de sello abrasible comprende un recubrimiento cerámico abrasible que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de sello, en donde dicho recubrimiento cerámico se hace de un polvo cerámico que comprende macropartículas de polvo cerámico, comprendiendo dichas macropartículas de polvo cerámico un componente basado en circonita y un componente basado en (alúmina + sílice), en donde dichas macropartículas de polvo cerámico contienen desde aproximadamente un 10 hasta aproximadamente un 95 por ciento en peso de componente basado en circonita, y aproximadamente de un 5 a aproximadamente un 90 por ciento en peso del componente basado en (alúmina + sílice), y en donde el tamaño (diámetro) de partículas promedio de las macropartículas de polvo cerámico es desde aproximadamente 10 hasta aproximadamente 150 micrómetros; y en donde dicho sistema de sello de motores de turbina de gas tiene una relación de desgaste de punta a sello de al menos aproximadamente 1:10. El recubrimiento cerámico puede incluir, además, un tercer componente que comprenda alúmina pura. La carga por impacto de la superficie de punta abrasiva en la superficie de sello estacionaria abrasible genera partículas de residuos de desgaste que tienen un tamaño (diámetro) de partícula promedio de desde aproximadamente 1 micrómetro o menor, hasta aproximadamente 150 micrómetros.
- 5 Los recubrimientos cerámicos abrasibles pueden hacerse de mezclas cerámicas que comprenden un componente basado en circonita y un componente basado en (alúmina + sílice), en donde dicha mezcla cerámica contiene desde aproximadamente un 10 hasta aproximadamente un 95 por ciento en peso del componente basado en circonita, y aproximadamente un 5 a aproximadamente un 90 por ciento en peso del componente basado en (alúmina + sílice), y en donde el tamaño del componente basado en circonita es desde aproximadamente 0,1 hasta aproximadamente 10 micrómetros, y el tamaño del componente basado en (alúmina + sílice) es desde aproximadamente 0,1 hasta aproximadamente 10 micrómetros. Ver, por ejemplo, WO 2007/053493, cuya descripción se incorpora en la presente memoria como referencia.
- 10 Los componentes basados en circonita ilustrativos incluyen, por ejemplo, circonita estabilizada con itria, circonita estabilizada con iterbia, circonita estabilizada con gadolinia y similares. El componente basado en circonita puede estabilizarse en la estructura cristalina tetragonal o cúbica, o puede ser una mezcla de dos componentes basados en circonita, uno estabilizado como tetragonal y uno estabilizado como cúbico. La estabilización puede producirse mediante adiciones seleccionadas de itria, magnesia, calcia, hafnia, ceria, gadolinia, iterbia, lantánidos o mezclas de los mismos.
- 15 Los componentes basados en (alúmina+sílice) incluyen, por ejemplo,  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  (mullita), sílice + mullita, corindón + mullita, y similares. Los componentes basados en (alúmina + sílice) preferidos se seleccionan del intervalo de composición que forma la estructura de mullita.
- 20 Un componente basado en circonita estabilizada ilustrativa es circonita de alta pureza estabilizada con itria o iterbia que comprende desde aproximadamente un 0 hasta aproximadamente un 0,15 por ciento en peso de óxidos de impurezas, desde aproximadamente un 0 hasta aproximadamente un 2 por ciento en peso de óxido de hafnio (hafnia), desde aproximadamente un 6 hasta aproximadamente un 25 por ciento en peso de óxido de itrio (itria), o desde aproximadamente un 10 hasta aproximadamente un 36 por ciento en peso de óxido de iterbio (iterbia) y el resto, óxido de circonio (circonita). Ver, por ejemplo, WO 2008/054536, mencionada anteriormente.
- 25 Los componentes basados en circonita y los componentes basados en (alúmina + sílice) son materiales convencionales disponibles comercialmente. Preferiblemente, las mezclas cerámicas contienen un componente de alúmina. Las mezclas cerámicas pueden prepararse mediante métodos convencionales, por ejemplo, mezcla mecánica.
- 30 Las mezclas de cerámica pueden contener, preferiblemente, desde aproximadamente un 20 hasta aproximadamente un 95 por ciento en peso del componente basado en circonita, y desde aproximadamente un 5 hasta aproximadamente un 80 por ciento en peso del componente basado en (alúmina + sílice), más preferiblemente desde aproximadamente un 40 hasta aproximadamente un 95 por ciento en peso del componente basado en circonita, y aproximadamente un 5 a aproximadamente un 60 por ciento en peso del componente basado en (alúmina + sílice), y con máxima preferencia desde aproximadamente un 60 hasta aproximadamente un 95 por ciento en peso del componente basado en circonita, y aproximadamente un 5 a aproximadamente un 40 por ciento en peso del componente basado en (alúmina + sílice). Las mezclas cerámicas pueden comprender, además, un componente de alúmina, por ejemplo, desde aproximadamente un 5 hasta aproximadamente un 90 por ciento en peso de un componente de alúmina.
- 35 Los recubrimientos cerámicos abrasibles que se hacen de mezclas cerámicas que comprenden un componente basado en circonita y un componente basado en (alúmina + sílice) se hacen, preferiblemente, de subpartículas muy finas y presentan una porosidad de recubrimiento controlada. Las partículas finas proporcionan abrasión o pérdida de recubrimiento en una situación de roce a una escala fina del orden del tamaño de subpartícula. Este mecanismo se proporciona mediante el uso de un polvo de macropartículas que comprende una multitud de micropartículas finas, unidas entre sí en el proceso de elaboración de polvo. La pulverización térmica de las macropartículas de polvo se hace para preservar gran parte de la estructura fina de micropartículas en el recubrimiento.
- 40 Preferiblemente, el tamaño (diámetro) del componente basado en circonita es desde aproximadamente 0,1 hasta aproximadamente 10 micrómetros, y el tamaño (diámetro) del componente basado en (alúmina + sílice) es desde aproximadamente 0,1 hasta aproximadamente 10 micrómetros, y más preferiblemente, el tamaño del componente basado en circonita es desde aproximadamente 0,1 hasta aproximadamente 2 micrómetros y el tamaño del componente basado en
- 45
- 50
- 55
- 60
- 65

(alúmina + sílice) es desde aproximadamente 0,1 hasta aproximadamente 2 micrómetros. El tamaño del componente de alúmina es desde aproximadamente 0,1 hasta aproximadamente 10 micrómetros, y más preferiblemente, desde aproximadamente 0,1 hasta aproximadamente 2 micrómetros. El tamaño del componente basado en circona puede ser igual o distinto del tamaño del componente basado en (alúmina + sílice) y/o del componente de alúmina. La carga por impacto de la superficie de punta abrasiva en la superficie de sello abrasible estacionaria genera partículas de residuos de desgaste que tienen un tamaño (diámetro) de partícula promedio de, preferiblemente, el mismo o similar tamaño que las micropartículas que se unen entre sí para formar el polvo de macropartículas.

Las mezclas de polvo cerámico pueden comprender una mezcla de partículas de polvo cerámico en proporciones deseadas. Las partículas de polvo cerámico pueden mezclarse a una relación deseada y secarse por pulverización y, opcionalmente, sinterizarse para producir macropartículas de polvo cerámico. La mezcla de partículas de polvo cerámico puede secarse por pulverización de forma controlada y sinterizarse para producir un tamaño y distribución de microporosidad dentro las macropartículas del polvo cerámico compuesto. Las macropartículas compuestas de polvo cerámico pueden tener un tamaño (diámetro) de partículas promedio de desde aproximadamente 10 hasta aproximadamente 100 micrómetros, preferiblemente, desde aproximadamente 25 hasta aproximadamente 75 micrómetros, y más preferiblemente, desde aproximadamente 40 hasta aproximadamente 60 micrómetros.

Los componentes ilustrativos basados en circona útiles en los polvos cerámicos se describieron anteriormente. Los componentes ilustrativos basados en (alúmina + sílice) útiles en los polvos cerámicos también se describieron anteriormente. Los componentes de alúmina ilustrativos útiles en los polvos cerámicos incluyen, por ejemplo, alúmina de alta pureza con muy bajo contenido de sílice. Los componentes basados en circona, los componentes basados en (alúmina + sílice) y los componentes de alúmina son materiales convencionales disponibles comercialmente.

El tamaño promedio de las macropartículas de las mezclas de polvo cerámico útiles en esta invención se establece, preferiblemente, según el tipo de dispositivo pulverizador térmico y las condiciones de pulverización térmica que se utilizan durante la pulverización térmica. El tamaño (diámetro) de las macropartículas de polvo cerámico puede variar desde aproximadamente 10 hasta aproximadamente 150 micrómetros, preferiblemente, desde aproximadamente 25 hasta aproximadamente 75 micrómetros, y más preferiblemente, desde aproximadamente 40 hasta aproximadamente 60 micrómetros.

Las mezclas de polvo cerámico pueden mezclarse con un material fugitivo, p. ej., partículas de tamaño controlado de un poliéster o Lucita. La mezcla de polvo cerámico y el material fugitivo pueden pulverizarse térmicamente para conformar un recubrimiento precursor que se trata térmicamente para volatilizar el material fugitivo y producir un recubrimiento que tenga al menos aproximadamente un 20 % de porosidad. El material fugitivo puede inyectarse por separado en un dispositivo de pulverización térmica en un punto de entalpía de pluma inferior y pulverizarse junto con la mezcla de polvo cerámico. La mezcla de polvo cerámico puede mezclarse con un lubricante sólido, p. ej., nitruro de boro hexagonal. El lubricante sólido puede inyectarse por separado en un dispositivo de pulverización térmica en un punto de entalpía de pluma inferior y pulverizarse junto con el polvo cerámico.

Los recubrimientos cerámicos abrasibles pueden producirse mediante diversos métodos conocidos en la técnica. Estos métodos incluyen pulverización térmica (plasma, HVOF, pistola de detonación, etc.), recubrimiento con láser; y arco de plasma transferido. La pulverización térmica es un método preferido para la deposición de los recubrimientos cerámicos abrasibles que se utilizan en esta invención.

La cantidad del componente basado en circona y del componente basado en (alúmina + sílice) puede variar a lo largo del grosor del recubrimiento. Los recubrimientos de mezcla cerámica pulverizados térmicamente pueden comprender dos o más subcapas en las que la cantidad del componente basado en circona y del componente basado en (alúmina + sílice) cambian continuamente a lo largo de las subcapas. Los recubrimientos de mezcla cerámica pulverizados térmicamente pueden comprender dos o más subcapas en las que la cantidad del componente basado en circona y del componente basado en (alúmina + sílice) cambian de forma discreta de una subcapa a otra.

En una realización, las subcapas pueden tener una composición graduada, que cambia de forma continua desde una alta concentración de un componente hasta una concentración más baja de ese componente, o desde una baja concentración de un componente hasta una concentración más alta de ese componente, en una dirección alejada de un sustrato u otras capas. Por ejemplo, la concentración del componente basado en (alúmina + sílice) puede cambiar de forma continua desde aproximadamente un 40 por ciento en peso, en esa parte interior del recubrimiento adyacente a otra capa de recubrimiento, hasta aproximadamente un 5 por ciento en peso, en esa parte exterior del recubrimiento expuesto al medio ambiente. De forma similar, la concentración del componente basado en circona puede cambiar de forma continua desde aproximadamente un 60 por ciento en peso, en esa parte interior del recubrimiento adyacente a otra capa de recubrimiento, hasta aproximadamente un 95 por ciento en peso, en esa parte exterior del recubrimiento expuesto al medio ambiente.

Los recubrimientos de mezcla cerámica pulverizados térmicamente pueden comprender dos o más subcapas en las que el componente basado en circona y el componente basado en (alúmina + sílice) cambian de forma continua de tamaño a lo largo de las subcapas. Los recubrimientos de mezcla cerámica pulverizados

térmicamente pueden comprender dos o más subcapas en las que el componente basado en circonita y el componente basado en (alúmina + sílice) cambian de forma discreta de tamaño de una subcapa a otra.

5 Además, los recubrimientos de mezcla cerámica pulverizada térmicamente pueden comprender una pluralidad de macrogrietas verticales dispersas homogéneamente a lo largo del recubrimiento. Dichos recubrimientos pueden formarse mediante métodos conocidos en la técnica. Véase, por ejemplo, la patente de los EE. UU. con n.º US-5.073.433, cuya descripción se incorpora en la presente memoria como referencia.

10 Por ejemplo, un polvo de mezcla cerámica puede depositarse térmicamente sobre un sustrato para formar una monocapa que tenga al menos dos salpicaduras superpuestas del polvo que se deposita sobre el sustrato en el que la temperatura de una salpicadura depositada posterior es mayor que la temperatura de una salpicadura depositada previamente. A continuación, la monocapa se enfría y solidifica para producir una pluralidad de grietas verticales en la monocapa debido al encogimiento de las salpicaduras depositadas. Las etapas anteriores se repiten para producir una capa de recubrimiento general en la que cada monocapa tiene grietas verticales inducidas a través de las salpicaduras. Preferiblemente, el al menos 70 por ciento de las grietas verticales en cada monocapa se alinean con grietas verticales en una monocapa adyacente para formar macrogrietas verticales que tienen una longitud de al menos 0,102 mm (4 mils) hasta el grosor del recubrimiento, y la capa recubierta tiene al menos aproximadamente 20, o al menos aproximadamente 40, macrogrietas verticales por pulgada lineal medidas en una línea paralela a la superficie del sustrato. El proceso de recubrimiento puede controlarse para producir grietas de segmentación verticales prácticamente a través del espesor completo del recubrimiento, que tienen al menos aproximadamente 10 celdas de segmentación por 2,54 cm (1 pulgada) (diámetro de celda de 2,54 mm [0,1 pulgadas] o inferior).

20 Un grosor adecuado para los recubrimientos pulverizados térmicamente que se utilizan en esta invención puede ser de hasta aproximadamente 1000 micrómetros o mayor, dependiendo de la aplicación particular y del grosor de cualquier otra capa. Temperaturas de aplicación elevadas, p. ej., hasta 1200 °C, requieren sistemas de recubrimiento protector gruesos, de forma general, del orden de 250 micrómetros o más.

25 En una realización, la superficie de sello estacionario abrasible puede comprender (i) un sustrato metálico o no metálico, (ii) al menos una capa interior metálica o metálica/cerámica que se deposita sobre el sustrato, (iii) opcionalmente, al menos una capa intermedia cerámica que se deposita sobre la capa interior y (iv) al menos una capa cerámica exterior que se deposita sobre la capa interior u, opcionalmente, la capa intermedia. La capa cerámica exterior puede comprender, preferiblemente, un recubrimiento pulverizado térmicamente que se hace a partir de un polvo cerámico que comprende macropartículas de polvo cerámico, comprendiendo dichas macropartículas de polvo cerámico un componente basado en circonita y un componente basado en (alúmina + sílice), en donde dichas macropartículas de polvo cerámico contienen desde aproximadamente un 10 hasta aproximadamente un 95 por ciento en peso del componente basado en circonita y aproximadamente un 5 a aproximadamente un 90 por ciento en peso del componente basado en (alúmina + sílice), y en donde el tamaño de partícula promedio de las macropartículas de polvo cerámico es desde aproximadamente 10 hasta aproximadamente 150 micrómetros.

40 Los sustratos metálicos y no metálicos ilustrativos incluyen, por ejemplo, superaleaciones metálicas de distintas composiciones con base de níquel, base de cobalto o base de hierro, y materiales cerámicos que se componen de carburo de silicio y materiales no metálicos basados en nitruro de silicio.

45 Las capas interiores metálicas y metálicas/cerámicas ilustrativas que pueden depositarse sobre el sustrato incluyen, por ejemplo, capas adherentes metálicas pulverizadas térmicamente de NiCoCrAlY o NiCrAlY, y capas dispersadas con óxido de estos componentes metálicos con partículas de alúmina o itria, o capas producidas por difusión de compuestos de aluminuro o de aluminuro de platino. La capa adherente puede tener una rugosidad de superficie de al menos aproximadamente 3,81 µm (150 micropulgadas). El grosor de la capa adherente varía, de forma típica, desde aproximadamente 3 hasta aproximadamente 10 mils (aproximadamente 0,08 a aproximadamente 0,25 mm). Pueden aplicarse primero una o múltiples capas adherentes o recubrimientos de capa interior a un sustrato metálico, resultando en una rugosidad superficial superior controlada de al menos aproximadamente 3,81 µm (150 micropulgadas) antes de la capa o capas cerámicas. Además, la capa adherente o las capas interiores pueden tratarse térmicamente antes o después de aplicar las capas cerámicas de recubrimiento. La capa adherente o las capas interiores pueden tratarse térmicamente, seguidamente pueden aplicarse las capas cerámicas de recubrimiento, y seguidamente pueden tratarse térmicamente todas las capas juntas. La capa adherente o las capas interiores y las capas cerámicas de recubrimiento pueden tratarse térmicamente juntas en un tratamiento térmico. La capa adherente o las capas interiores pueden tratarse térmicamente y no tratar térmicamente las capas cerámicas de recubrimiento.

60 Las capas intermedias cerámicas ilustrativas que, opcionalmente, pueden depositarse sobre la capa interior incluyen, por ejemplo, recubrimientos de un solo componente de circonita estabilizada con itria, o que empleen otros estabilizantes, que se depositen con un nivel controlado de porosidad o, adicionalmente, con una concentración controlada de grietas de segmentación que discurran verticalmente a través de dicha capa.

65 Capas exteriores cerámicas ilustrativas que pueden depositarse sobre la capa interior u, opcionalmente, sobre la capa intermedia, incluyen, por ejemplo, recubrimientos cerámicos abrasibles hechos a partir de mezclas de polvo cerámico, recubrimientos de circonita estabilizada, recubrimientos de circonita con una microestructura con macrogrietas, y

similares. Pueden aplicarse sobre la capa cerámica una o más capas cerámicas, p. ej., recubrimiento de circonita estabilizada. La una o más capas cerámicas pueden tener la misma o diferente composición, porosidad y/o densidad de grietas de segmentación que la capa interior u, opcionalmente, la capa intermedia.

5 El recubrimiento cerámico abrasible también puede comprender una capa pulverizada no térmicamente sobre un sustrato metálico. Dicho recubrimiento puede componerse de partículas de núcleos de cerámica recubiertos con metal hechos para adherirse al sustrato metálico y formar uniones cohesivas entre las partículas mediante sinterización sin presión a alta temperatura en vacío. El núcleo cerámico puede elegirse de una variedad de materiales, por ejemplo, arcilla bentonita ( $Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ ), mullita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), circonita estabilizada con itria, 10 circonita estabilizada con itria más mullita, y similares. El núcleo cerámico tiene una forma nominalmente esférica y de aproximadamente 5 a aproximadamente 200 micrómetros de diámetro, en una distribución de dichos tamaños para producir un tamaño promedio nominal de aproximadamente 100 micrómetros. El recubrimiento metálico encapsula esencialmente de forma completa las partículas individuales de núcleo cerámico con un grosor de aproximadamente 2 a aproximadamente 20 micrómetros. El recubrimiento metálico puede elegirse de una variedad de materiales, por 15 ejemplo, aleaciones Ni-Cr, aleaciones Ni-Cr-Al, aleaciones Al-Si, aleaciones Ni-Cr-Al-Y, y similares.

Un grosor adecuado para las capas de recubrimiento anteriores puede ser de hasta aproximadamente 1000 micrómetros o mayor, dependiendo de la aplicación particular y del grosor de otras capas. Temperaturas de aplicación elevadas, p. ej., hasta 1200 °C, requieren sistemas de recubrimiento protector gruesos, de forma 20 general, del orden de 250 micrómetros o más.

Los recubrimientos cerámicos abrasibles pueden producirse mediante diversos métodos bien conocidos en la técnica. Estos métodos incluyen pulverización térmica (plasma, HVOF, pistola de detonación, etc.), recubrimiento con láser; y arco de plasma transferido. La pulverización térmica es un método preferido para la deposición de los 25 polvos cerámicos para formar los recubrimientos. Dichos métodos también pueden utilizarse para la deposición de las capas de recubrimiento, p. ej., capa interior metálica o metálica/cerámica, capa intermedia cerámica y capa exterior cerámica, descritas anteriormente.

El sistema de recubrimiento puede tratarse térmicamente después del recubrimiento, preferiblemente en una atmósfera inerte u oxidante de forma controlable. En una realización, únicamente se trata térmicamente una capa interna o un recubrimiento adhesivo después del recubrimiento. El tratamiento térmico puede llevarse a cabo a una temperatura máxima de desde aproximadamente 600 °C hasta aproximadamente 1200 °C durante un periodo de desde 30 aproximadamente 0,5 hasta aproximadamente 10 horas, y a una velocidad de calentamiento y de enfriamiento a, y desde, la temperatura máxima, de entre aproximadamente 5 °C por minuto y aproximadamente 50 °C por minuto. En una realización preferida, el tratamiento térmico se lleva a cabo en una atmósfera inerte u oxidante de forma controlable a una temperatura máxima de desde aproximadamente 600 °C hasta aproximadamente 1150 °C durante un periodo de 35 desde aproximadamente 0,5 hasta aproximadamente 4 horas, y a una velocidad de calentamiento y de enfriamiento a, y desde, la temperatura máxima, de entre aproximadamente 5 °C por minuto y aproximadamente 50 °C por minuto.

En otra realización, el recubrimiento cerámico abrasible puede depositarse por deposición de vapor físico de haz de electrones. Con respecto a las mezclas cerámicas, el vapor físico de haz de electrones puede utilizar lingotes de materia prima separados para el componente basado en circonita y para el componente basado en (alúmina + sílice), y pueden seleccionarse las velocidades relativas de deposición para producir el sistema de recubrimiento. De forma alternativa, el recubrimiento cerámico abrasible puede pulverizarse térmicamente sobre la capa interior 40 u, opcionalmente, la capa intermedia, que se ha precalentado a al menos 500 °C.

Los sistemas de sello de motores de turbinas de gas de esta invención tienen una relación de desgaste de punta a sello de al menos aproximadamente 1:10, preferiblemente, al menos aproximadamente 1:20. Para los pares de recubrimientos abrasibles/abrasivos, la carga por impacto de la superficie de punta abrasiva en la superficie de sello estacionaria abrasible genera partículas de residuos de desgaste que tienen un tamaño (diámetro) de partícula promedio de desde aproximadamente 1 micrómetro o menor, hasta aproximadamente 150 micrómetros. La porosidad del recubrimiento cerámico abrasible puede controlarse en tamaño y distribución para mejorar la ruptura del recubrimiento en lugares dentro de los límites de partículas de tamaño micrométrico, o a lo largo de planos de corte de un grosor de tamaño micrométrico. Los pares de recubrimientos abrasibles/abrasivos preferidos tienen, 50 preferiblemente, partículas abrasivas cerámicas resistentes a la oxidación y matriz metálica para la superficie de punta abrasiva, y recubrimientos abrasibles resistentes a la erosión para la superficie de sello estacionaria.

Entre otras ventajas, esta invención proporciona pares de recubrimientos abrasibles/abrasivos únicos para aplicaciones de control de holgura que minimizan la pérdida de punta de álabe, genera residuos de desgaste de tamaño fino del orden de la carga por impacto, es de bajo coste y es aplicable en una amplio rango de condiciones de funcionamiento de turbina y compresor. Las opciones para la elección de los materiales abrasivos y abrasibles, ambos cerámicos, 60 proporcionan temperaturas de funcionamiento más altas que los sistemas de sello metálico actuales.

## REIVINDICACIONES

1. Un sistema de sello de motores de turbina de gas que comprende un elemento giratorio que tiene una superficie de punta abrasiva que se dispone en relación de roce respecto a una superficie de sello estacionaria abrasible, en donde dicha superficie de punta abrasiva comprende un recubrimiento abrasivo que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de punta, en donde dicho recubrimiento abrasivo comprende una matriz de aleación metálica que tiene partículas abrasivas cerámicas al menos parcialmente integradas en dicha matriz, y al menos algunas de las partículas abrasivas cerámicas sobresalen de dicha matriz; en donde dicha superficie de sello abrasible comprende un recubrimiento cerámico abrasible que se deposita sobre al menos una parte de la superficie de sello, en donde dicho recubrimiento cerámico se hace de un polvo cerámico que comprende macropartículas de polvo cerámico, comprendiendo dichas macropartículas de polvo cerámico un componente basado en circonita y un componente basado en (alúmina+sílice), en donde dichas macropartículas de polvo cerámico contienen desde un 10 hasta un 95 por ciento en peso del componente basado en circonita, y un 5 a un 90 por ciento en peso del componente basado en (alúmina+sílice), y en donde el tamaño (diámetro) de partícula promedio de las macropartículas de polvo cerámico es desde 10 hasta 150 micrómetros; y en donde dicho sistema de sello de motores de turbina de gas tiene una relación de desgaste de punta a sello de al menos 1:10, preferiblemente de al menos 1:20.
2. El sistema de sello de motores de turbina de gas de la reivindicación 1, en donde dichas partículas abrasivas cerámicas se seleccionan de policristal de alúmina, monocristal de alúmina (zafiro), monocristal de alúmina dopado con cromita (rubí), granate de itria-alúmina (YAG), policristal de alúmina dopado con titanita o monocristal (esmeralda), SiAlON, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> o diamante.
3. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde la matriz de aleación metálica comprende MCrAlY, en donde M es Ni, Co, Fe, o combinaciones de los mismos.
4. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde las partículas abrasivas cerámicas comprenden partículas abrasivas cerámicas angulares de tamaño nominal de 0,10 a 0,38 mm (4 a 15 mils).
5. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde las partículas abrasivas cerámicas tienen una dureza de desde 1000 kg/mm<sup>2</sup> hasta 7000 kg/mm<sup>2</sup> y una resistencia a la fractura de desde 1,5 Mpa\*m<sup>0,5</sup> hasta 8 Mpa\*m<sup>0,5</sup>.
6. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde las partículas abrasivas cerámicas se integran en dicha matriz a una profundidad de aproximadamente nominalmente la mitad del tamaño de las partículas abrasivas cerámicas, con una parte superior de las partículas abrasivas cerámicas que sobresale por encima de dicha matriz.
7. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde una capa adherente se deposita entre la superficie de punta y el recubrimiento abrasivo, o se deposita entre la superficie de sello y el recubrimiento cerámico o ambos.
8. El sistema de sello de motores de turbina de gas de la reivindicación 7, en donde la capa adherente comprende MCrAlY, en donde M es Ni, Co, Fe o combinaciones de los mismos.
9. El sistema de sello de motores de turbina de gas de la reivindicación 7, en donde la capa adherente comprende un recubrimiento de MCrAlY + X, en donde M es Ni, Co o Fe, o cualquier combinación de los tres elementos, y X incluye la adición de Pt, Ta, Hf, Re, u otros metales de tierras raras, o partículas finas de dispersante de alúmina, solas o en combinación.
10. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde el grosor de dicho recubrimiento cerámico abrasivo es desde 0,0635 hasta 2,54 mm (0,0025 a 0,10 pulgadas).
11. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde dicho recubrimiento cerámico abrasible se hace de un polvo cerámico que se mezcla con un material fugitivo seleccionado de partículas de tamaño controlado de un poliéster o Lucita.
12. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde dicho recubrimiento cerámico abrasible se hace de un polvo cerámico que se mezcla con un lubricante sólido.
13. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde el recubrimiento cerámico abrasible tiene una porosidad que aumenta desde una superficie interior del recubrimiento cerámico hasta una superficie exterior del recubrimiento cerámico.

## ES 2 786 026 T3

14. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde el recubrimiento cerámico abrasible tiene una densidad de desde un 45 hasta un 90 por ciento del valor teórico.
- 5 15. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde el recubrimiento cerámico abrasible tiene un grosor de desde 0,508 cm hasta 2,54 mm (0,02 a 0,10 pulgadas).
- 10 16. El sistema de sello de motores de turbina de gas de las reivindicaciones 1 o 2, en donde el recubrimiento cerámico sometido a abrasión comprende, además, una pluralidad de macrogrietas verticales que se extienden al menos a la mitad del grosor del recubrimiento en longitud hasta el grosor total del recubrimiento, y que tiene desde 5 hasta 200 macrogrietas verticales por pulgada lineal medidas en una línea paralela a la superficie del sello y en un plano perpendicular a la superficie del sello.