



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 327 955**

51 Int. Cl.:

**C23C 4/12** (2006.01)

**H05H 1/26** (2006.01)

**B05B 7/22** (2006.01)

**C23C 24/04** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06126123 .6**

96 Fecha de presentación : **14.12.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1801256**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **27.06.2007**

54

Título: **Procedimiento híbrido de recubrimiento por plasma y pulverización en frío y aparato.**

30

Prioridad: **21.12.2005 US 752061 P**

45

Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**05.11.2009**

45

Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**05.11.2009**

73

Titular/es: **Sulzer Metco (US) Inc.**  
**1101 Prospect Avenue**  
**Westbury, New York 11590, US**

72

Inventor/es: **Molz, Ronald;**  
**Hawley, David y**  
**McCullough, Richard**

74

Agente: **Ungría López, Javier**

ES 2 327 955 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**

Procedimiento híbrido de recubrimiento por plasma y pulverización en frío y aparato.

**5 Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un método y aparato para producir recubrimientos usando flujo de gas supersónico. Más específicamente, la presente invención se refiere a un método y aparato que aplica recubrimientos usando un híbrido de técnicas de recubrimiento por plasma y pulverización en frío.

**10 Descripción de la técnica relacionada**

Se han usado procesos de pulverización térmica por plasma en la industria de recubrimientos durante muchos años. El proceso de pulverización térmica por plasma implica básicamente rociar material fundido o ablandado por calor sobre un sustrato para formar un recubrimiento. Se inyecta material de alimentación, típicamente en forma de polvo, a una llama de plasma de temperatura alta, donde se calienta rápidamente y acelera a una alta velocidad. Las pistolas de plasma pueden producir fácilmente temperaturas del gas/plasma superiores a 6000 grados C. La transferencia de energía eléctrica a energía térmica es bastante eficiente, teniendo lugar casi todas las pérdidas como calor residual salido de la sección de boquilla y electrodo como resultado de la temperatura y latencia del gas.

Aunque los conceptos de pulverización en frío se patentaron por vez primera al iniciarse el siglo 20, en comparación con las tecnología de plasma, la aplicación comercial de la tecnología de pulverización en frío es una adición mucho más reciente a la industria. La pulverización en frío tiene la ventaja de producir recubrimientos fríos con mínima entrada de calor que puede dar lugar a que el material de recubrimiento se aproxime a las propiedades de forja del material fuente propiamente dicho. Una característica clave de un recubrimiento de pulverización en frío es el esfuerzo de compresión resultante que existe en el recubrimiento. Los procesos clásicos de pulverización térmica que producen recubrimiento como resultado de la fusión o fusión parcial del material de alimentación dan lugar a esfuerzos de tracción cuando el recubrimiento se enfría y contrae. Estos esfuerzos de tracción a menudo dan lugar a la fisuración del recubrimiento, especialmente al producir capas gruesas o combinar diferentes capas de materiales disimilares.

Los recientes avances en pistolas de plasma han hecho posible un proceso híbrido. Por ejemplo, las pistolas de plasma en cascada permitieron que la extensión práctica del arco de plasma y la longitud de abertura general a aumentasen el voltaje operativo de la pistola y por ello la eficiencia de la transferencia de calor al gas. Esto también ha dado lugar a la posibilidad de separar la generación de plasma de la dinámica del gas. Además, la incorporación de un escalón o discontinuidad en la sección de boquilla de una pistola de plasma para plantar el arco en la base de la boquilla ha permitido la separación de la dinámica del gas del arco propiamente dicho. Entonces es posible utilizar la generación de plasma como una fuente térmica separada de la boquilla como un método de aceleración de gas. Otro avance ha sido el diseño de una boquilla ampliada para permitir la incorporación de una sección convergente/divergente en la boquilla con el fin de acelerar el gas caliente/plasma a velocidades supersónicas después de que el gas ha sido calentado por un arco de plasma.

Se han alcanzado velocidades supersónicas en pistolas de plasma en varios diseños anteriores. Pero la velocidad en estos diseños se ha limitado a aproximadamente Mach 1 en entornos operativos estándar. Se han logrado velocidades más altas usando diseños que requieren costosas variaciones del proceso, tales como la operación en vacío o el uso de grandes cantidades de gas (por ejemplo, helio) para lograr las velocidades más altas. En estos casos anteriores, las temperaturas del gas/partículas eran demasiado altas y a menudo muy superiores a la temperatura de fusión del material. Además, con el proceso de plasma e incluso los procesos de pulverización en frío y carburante oxígeno a alta velocidad (HVOF), la eficiencia operativa y la duración esperada de los equipos físicos disminuía rápidamente a medida que se incrementaban las velocidades del gas. Esto es debido a la naturaleza del diseño para acelerar el gas en unión con el calentamiento del gas usando pistolas de plasma convencionales. Además, cuando fluye gas y se incrementan las presiones en una pistola de plasma convencional, la estabilidad del arco disminuye y los arcos son más limitados.

US-A-5 573 682 describe un método según el preámbulo de la reivindicación 1 y un aparato según el preámbulo de la reivindicación 12. También se describen métodos de pulverización de plasma y aparatos en US-A-4 540 121 y US 2005/252450 A1.

Así, a la luz de los factores descritos anteriormente, subsiste en la técnica la necesidad de un proceso de deposición de recubrimientos que logra el beneficioso esfuerzo de compresión de recubrimientos de pulverización en frío proporcionando al mismo tiempo un rango operativo más ancho de velocidades de partícula y temperaturas que las que se pueden lograr por técnicas convencionales de plasma o pulverización en frío.

**Resumen de la invención**

La presente invención proporciona un método y aparato de producir un recubrimiento denso con condiciones de esfuerzo deseables similar a los recubrimientos producidos por procesos de pulverización en frío, pero con mayores eficiencias de proceso y menor consumo de gas. El proceso novedoso combina características de un método de calentamiento de gas por proceso de plasma y un proceso de pulverización en frío para acelerar el gas. El proceso de

deposición no funde las partículas del material de alimentación en la corriente efluente, sino que usa una boquilla convergente/divergente para acelerar el gas calentado a velocidad supersónica. La inyección de material de alimentación se lleva a cabo pasada la sección divergente de la boquilla al flujo de gas supersónico. Como resultado, la presente invención proporciona un mecanismo más eficiente de producir recubrimientos con las características deseables de un recubrimiento de pulverización en frío, pero con la posibilidad de un rango operativo más ancho de velocidades de partícula y temperaturas no disponibles en las técnicas convencionales de deposición por plasma o pulverización en frío.

En un aspecto de la invención, se facilita un método de recubrimiento, donde el método de recubrimiento usa un proceso híbrido que combina la energía térmica asociada con el proceso de pulverización térmica por plasma con la energía cinética del proceso de pulverización en frío. En un paso del método, se introduce un gas de proceso en una pistola de pulverización térmica de plasma en un flujo suficiente para ionización y aceleración para la aplicación de un recubrimiento. A continuación, se usan uno o más arcos eléctricos para ionizar el gas de proceso, calentando así el gas a temperaturas superiores a 2000 grados C, teniendo lugar el arco entre en uno o más cátodos y uno o más ánodos que tienen una discontinuidad para unir el arco. En otro paso, el gas calentado es acelerado a velocidades supersónicas por una boquilla hacia abajo de la unión de arco que tiene una sección convergente/divergente con una garganta entremedio. Un paso final del método incluye inyectar material de alimentación a la corriente resultante de gas caliente a alta velocidad hacia abajo de la boquilla de aceleración. El material de alimentación puede ser inyectado dentro del agujero de la boquilla o en la salida de la boquilla.

En otro aspecto de la invención se facilita un aparato para aplicar un recubrimiento, incluyendo el aparato uno o más cátodos que generan arcos eléctricos, teniendo cada cátodo su propia fuente de corriente regulada. Los cátodos están situados en el centro de una cámara circundante donde el gas adecuado para ionización se introduce de tal manera que el gas pase a través de los cátodos y a través de los arcos resultantes. El aparato incluye una sección de agujero que es eléctricamente neutra, pero que puede soportar el paso parcial de un arco eléctrico durante el encendido para permitir la generación de un arco más largo y aumentar el potencial de voltaje entre el cátodo y el ánodo. El aparato incluye además una sección de ánodo que puede ser parte de la boquilla como una sección separada que contiene un escalón o borde para la finalidad de asentar el otro extremo del arco eléctrico y estabilizar la longitud del arco independientemente de la dinámica del gas. También se incluye una boquilla en el aparato. La boquilla tiene una sección convergente/divergente con una porción de garganta. La geometría de la sección convergente/divergente es tal que genere velocidades del gas calentado de al menos Mach 1,2. Finalmente, el aparato incluye uno o más inyectores de material de alimentación situados en el agujero de la boquilla hacia abajo de la sección convergente/divergente, en la salida de la boquilla o pasada la salida de la boquilla.

Se expondrán aspectos y ventajas adicionales de la invención en la descripción que sigue, y en parte serán obvios por la descripción, o se pueden conocer por la puesta en práctica de la invención. Los aspectos y ventajas de la invención se pueden llevar a cabo y obtener por medio de las instrumentalidades y combinaciones señaladas en particular a continuación.

#### Breve descripción de los dibujos

Los dibujos acompañantes, que se incluyen para ofrecer una comprensión más amplia de la invención y se incorporan y constituyen una parte de esta memoria descriptiva, ilustran realizaciones de la invención y juntamente con la descripción sirven para explicar los principios de la invención. En los dibujos:

La figura 1 proporciona un esquema de una pistola convencional de pulverización de plasma que ha sido modificada según la presente invención.

La figura 2 proporciona un esquema en sección transversal de una pistola de plasma en cascada de arco triple según la presente invención.

La figura 3 proporciona un diagrama de flujo de un método para aplicar un recubrimiento usando un proceso híbrido según realizaciones de la presente invención.

La figura 4 proporciona una imagen de diamantes de choque en penacho de plasma e inyección de material de carburo de tungsteno indicando la falta de incandescencia de las partículas inyectadas.

Y la figura 5 proporciona una microfotografía de la estructura de recubrimiento que representa nivel alto de carburos que indican muy baja entrada de calor al proceso.

#### Descripción detallada de la invención

Ahora se hará referencia en detalle a las realizaciones preferidas de la presente invención, de la que se ilustran ejemplos en los dibujos acompañantes.

La figura 1 ilustra una realización de una pistola híbrida según la presente invención. Aunque la pistola híbrida de la figura 1 se describe en términos de reconversión de una pistola de plasma existente, las características descritas también se contemplan para uso como equipo de fábrica original. En la figura, un electrodo 10 sigue siendo típico de

## ES 2 327 955 T3

una pistola de plasma junto con una entrada o entradas de inyección de gas 20 en la parte trasera de la pistola. Una boquilla 30 es alargada incluyendo un escalón 40 y una sección convergente/divergente 50. La sección supersónica convergente/divergente de la boquilla 50 también puede estar aislada eléctricamente de la sección de ánodo 80 de la boquilla 30 para contribuir a evitar que el arco entre en la sección supersónica de la boquilla 50. Para duración del equipo físico se precisa un material de construcción adecuado para que las paredes del agujero de boquilla resistan tanto el calor como la abrasión. Por ejemplo, materiales tales como tungsteno lantanado o toriado son adecuados para esta aplicación. Además, la operativa de la pistola de la presente invención será inferior a la de una pistola de plasma típica con temperaturas de gas típicamente inferiores a 9000 grados K. La inyección de polvo puede ser dentro del agujero, como se representa en el orificio de inyección de polvo 60, o por la salida de la boquilla, como se representa en el orificio de inyección de polvo 70.

En algunas realizaciones, la pistola híbrida puede operar en la forma típica de una pistola de plasma con la excepción de que los flujos de gas se incrementan según sea necesario, proporcionales a la zona de garganta de la boquilla, para producir flujos de gas supersónicos. Debido a la alta temperatura del plasma (con relación al proceso de pulverización en frío) la cantidad real de gas requerida es una fracción de la de una pistola típica de pulverización en frío, mientras que las velocidades de partícula son considerablemente más altas que las logradas con una pistola de plasma convencional. Usando flujo isentrópico clásico para un fluido compresible, se puede ver que la alta temperatura del gas contribuye más a la velocidad que la presión o el flujo reales a través de un orificio crítico ya que la velocidad del gas es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura del gas.

La transferencia de energía térmica a las partículas es limitada debido a lo siguiente: (a) una duración muy corta (latencia) en el gas caliente/plasma antes de impactar en el sustrato, (b) una caída de la temperatura que tiene lugar en el gas caliente cuando se expande en la porción divergente de la boquilla antes de la inyección de material de alimentación, y (c) el uso de dimensiones de partícula superiores a  $15\ \mu\text{m}$ . En algunas realizaciones se deberán usar tamaños de partícula superiores a aproximadamente  $15\ \mu\text{m}$ , y otras realizaciones pueden utilizar un rango de partículas entre aproximadamente  $30\ \mu\text{m}$  a  $75\ \mu\text{m}$ .

El control de la temperatura de las partículas por debajo del punto de fusión del material propiamente dicho puede verse afectado por la distancia de pulverización usada, la longitud y el ángulo de expansión de la porción divergente de la boquilla, la posición de inyección de material, y también el tipo de inyección. Donde la temperatura de las partículas es muy crítica, el uso de una suspensión líquida, donde una porción de la energía térmica es consumida en la ebullición del líquido, puede mejorar el proceso limitando más la temperatura de partícula resultante. El material de alimentación a base de líquido puede tener forma de un líquido que lleva particulados suspendidos, precursores líquidos, soluciones líquidas conteniendo sales disueltas, y análogos.

Aunque la modificación de una pistola de plasma convencional producirá resultados aceptables, se obtendrán excelentes resultados optimizando un diseño de pistola al objeto del proceso híbrido según las realizaciones de la invención. La razón es la limitación de la geometría que impide que las pistolas de plasma típicas logren una operación ideal a alta velocidad, es decir, baja temperatura (con relación a la pulverización por plasma). La limitación resulta del requisito de establecer y mantener un arco estable dentro del agujero de la pistola de plasma de tal manera que la densidad de corriente sea suficientemente baja a altas presiones y la longitud del arco sea constante.

La figura 2 ilustra una vista en sección transversal de una realización de una pistola de plasma en cascada de arco triple que es adecuada para uso según la presente invención. La cámara trasera 91 de la pistola contiene tres cátodos y un aro de inyección de gas (no representado para claridad). El primer segmento de neutrodo 92 tiene una geometría de arco adecuada para permitir una longitud inicial corta del arco mientras que los segmentos de neutrodo restantes 93 sirven para proporcionar un recorrido más largo del arco cuando se incrementa el flujo de gas. El segmento de ánodo 99 sirve como la boquilla y tiene un escalón 94 para asentar el arco y una sección de boquilla convergente/divergente supersónica 95 para acelerar el gas. Pasado el agujero de salida de la sección de boquilla 95 hay inyectores de polvo 97. La sección de boquilla 95 representada es para números Mach bajos y puede producir velocidades de gas en el orden de 400 a 1000 metros por segundo dependiendo del flujo total de gas y la potencia de la pistola. También son posibles con este diseño boquillas con números Mach más altos y posteriormente velocidades de gas más altas.

La longitud ampliada del(de los) arco(s) en una pistola de plasma en cascada, junto con el uso de tres arcos distintos, da lugar a un voltaje operativo más alto y una densidad de energía más uniforme para el calentamiento de gas. El voltaje más alto permite menores densidades de corriente que amplían la duración del equipo físico para compensar la constricción del arco que tiene lugar en condiciones de presión alta. También es posible la inyección de un material de alimentación en forma de polvo antes de la garganta de la boquilla en forma de inyección axial. Sin embargo, esta disposición proporciona altas temperaturas de partícula y fusión parcial que darán lugar a recubrimientos más similares a los de los procesos de carburante oxígeno a alta velocidad (HVOF) más bien que pulverización en frío. La inyección axial también se puede realizar pasada la garganta con resultados deseables.

Las realizaciones adicionales y/o características de la presente invención pueden incluir: (a) usar un número diferente de arcos que los específicamente descritos aquí; (b) aislamiento de la sección de ánodo que incorpora el escalón de unión de arco de la sección de boquilla o incluso incorporar tres segmentos circunferenciales de ánodo, un segmento para cada arco; (c) conformar más el gas caliente/plasma a un penacho alargado similar a una boquilla de pulverización en frío rectangular o ranurada; (d) variaciones de la geometría de la boquilla, longitud de la boquilla, y flujo de gas para aumentar o disminuir el número Mach del gas y las velocidades de partícula resultantes; y/o (e) ampliar el

## ES 2 327 955 T3

diámetro de la cámara de gas trasera hasta el punto de unión del arco a la boquilla y alterar la colocación de los cátodos para disminuir la velocidad del gas en la región de los arcos para alterar la transferencia de energía térmica al gas.

5 Otras características de la presente invención pueden incluir (f) realizar el proceso novedoso de recubrimiento en condiciones de presión ambiente del orden de atmosférica hasta aproximadamente 50 mBar; (g) realizar el proceso  
novedoso de recubrimiento en un entorno de gas inerte; (h) usar un gas de envuelta para contener la corriente de  
gas/particulado al objeto de conformar el penacho de plasma y una extensión a la boquilla; (i) usar cualquier gas de  
proceso adecuado para ionización, incluyendo uno o más de aire, argón, nitrógeno, helio, hidrógeno, oxígeno; (l) tener  
10 un arco o arcos eléctricos de longitud suficiente para producir un potencial de voltaje superior a 40 voltios CC, y  
en algunas realizaciones, un voltaje superior a 80 voltios; (m) usar material de alimentación en forma de polvo que  
tiene un tamaño de partícula de aproximadamente  $5\ \mu\text{m}$  a más de  $100\ \mu\text{m}$ , con un rango preferido de  $30\text{-}75\ \mu\text{m}$ ; y/o  
(n) usar material de alimentación de líquido que lleva particulados suspendidos que tienen un tamaño de partícula de  
aproximadamente  $1\ \mu\text{m}$  a más de  $100\ \mu\text{m}$ , con un rango preferido de  $5\text{-}75\ \mu\text{m}$ .

15 Se llevó a cabo modelado de dinámica computacional de fluidos (CFD) de una pistola de plasma en cascada de triple arco usando la geometría representada en la figura 2. El modelo operó a contrapresiones de hasta 220 psi con una fuente fija de calentamiento de gas que representa el arco de plasma a 3000 grados K y argón como el gas de proceso. Se indicaron las velocidades de gas superiores a 2400 m/s (típicas para un proceso de pulverización en frío), mientras que las temperaturas de salida se aproximaban a las condiciones ambientales de 293 grados K. Ecuaciones isentrópicas confirmaron los resultados. El incremento adicional de la temperatura del gas/plasma a 6000 grados K, el incremento de la contrapresión a 300 psi, y el uso de una combinación de argón y helio produjeron velocidades del gas superiores a 5000 m/s. En base a la tasa porcentual de la velocidad transferida de gas a partícula de alrededor de 30%, se pueden lograr velocidades de partícula superiores a 1500 m/s. Las pistolas típicas de plasma de alta energía generan temperaturas de plasma superiores a 9000 grados K y, como tales, la conversión usando una boquilla supersónica de alto mach se traduciría en velocidades de partícula que alcanzan y potencialmente superan 2000 m/s. Además, a medida que se introduce más energía en el proceso, las temperaturas de salida caen incluso más por debajo de las condiciones ambientales permitiendo verdaderas condiciones de pulverización en frío para los materiales que son dúctiles a las temperaturas inferiores, como el cobre o el zinc.

30 Se puso en funcionamiento una pistola de plasma en cascada de triple arco desarrollada recientemente usando las características de diseño indicadas anteriormente (por ejemplo, pistola de plasma en cascada, incorporación de un escalón o discontinuidad en la sección de boquilla, y una boquilla ampliada). Cuando se incrementaron la presión y corriente operativas de la pistola de plasma, se indicó que el penacho de plasma real que salía de la parte delantera de la pistola en la salida de la boquilla comenzaba a encogerse. Esto daba la impresión de estar en conflicto con la ley física normal con respecto a pistolas de plasma porque cuando aumenta el flujo de gas y entrada de energía (corriente), el penacho de plasma es mayor, coincidiendo con el aumento de la entrada de energía. La aplicación de recubrimientos en estos parámetros de alta energía produjo recubrimientos con esfuerzo de compresión, indicativos de los recubrimientos más fríos. Además, la temperatura del sustrato resultante era considerablemente inferior a la esperada con un recubrimiento pulverizado con plasma. El análisis de las conclusiones indicaba que la pistola de plasma operaba de hecho en un régimen operativo reservado para procesos tales como HVOF y posiblemente pulverización en frío.

45 Existe entonces la posibilidad de aumentar la operación de una pistola de plasma de tal manera que la ventana operativa se pueda ampliar hasta el punto donde se podría usar, de hecho, una pistola de plasma híbrida para producir recubrimientos "en frío", en contraposición a las ideas convencionales. En consecuencia, una pistola de plasma híbrida usa mucho menos gas que un dispositivo pulverizador en frío convencional, y como tal el efecto del choque de arco en la parte delantera del sustrato sería considerablemente menor, dando lugar a una menor transferencia de calor al sustrato, así como menor deflexión de las partículas.

50 Las realizaciones de la invención, en el sentido aquí definido, usan un arco de plasma similar al producido por una pistola pulverizadora térmica de plasma para calentar una fuente de suministro de gas de proceso. El gas de proceso puede ser cualquier gas inerte o reactivo que pueda ser ionizado fácilmente por un arco eléctrico. El arco de plasma tiene lugar en la porción trasera de la pistola de tal manera que el gas sea calentado por el arco antes de llegar a la boquilla. La boquilla incorpora una discontinuidad para unir el arco, seguida de una sección convergente/divergente que acelera el gas caliente/plasma a velocidad supersónica. El material de alimentación es inyectado a la corriente de plasma/gas caliente hacia abajo o pasada la sección divergente de boquilla, y posteriormente es acelerado a velocidad supersónica por el gas.

60 En una realización de la invención, una pistola pulverizadora térmica de plasma típica puede ser modificada al objeto de incorporar las características siguientes:

(1) la pistola se mejora para manejar una contrapresión alta suficiente para soportar altas velocidades del gas a través de una boquilla supersónica, que puede ser de hasta 100 psi dentro de la pistola;

(2) la boquilla se altera para incorporar un escalón para asentar el arco de plasma al inicio de la sección convergente de la boquilla; y

(3) la longitud de la boquilla se amplía e incorpora una sección convergente/divergente en el extremo de la boquilla.

## ES 2 327 955 T3

Alternativamente, el aparato se puede fabricar incluyendo específicamente las características anteriores como equipo de fábrica original.

La figura 3 proporciona un diagrama de flujo de un método 300 para aplicar un recubrimiento usando un proceso híbrido según realizaciones de la presente invención que combina la energía térmica asociada con el proceso de pulverización térmica por plasma con la energía cinética del proceso de pulverización en frío. En el paso S310, se introduce un gas (o gases) de proceso en una pistola pulverizadora térmica en un flujo suficiente para ionización y aceleración para la aplicación de recubrimientos. En el paso S320, el gas de proceso es ionizado usando uno o más arcos eléctricos para calentar el gas a temperaturas superiores a 2.000 grados C, teniendo lugar el arco eléctrico entre uno o más cátodos y uno o más ánodos. En el paso S330, el gas de plasma ionizado es acelerado a velocidades supersónicas por una boquilla hacia abajo de la unión del arco que tiene una sección convergente/divergente con una garganta entremedio. En el paso S340, se inyecta material de alimentación a la corriente resultante de gas caliente/plasma a alta velocidad hacia abajo de la garganta de la boquilla de aceleración dentro del agujero de la boquilla o en la salida de la boquilla. Finalmente, en el paso S350, el material de alimentación es acelerado por la corriente de gas caliente/plasma a alta velocidad para lograr velocidades de partícula de 600 a 2000 m/s.

### Resultados experimentales

Se modificó una pistola de plasma en cascada de arco triple de manera que incluyese una boquilla alargada con un paso en la boquilla y una sección convergente/divergente similar a la figura 2. La garganta de la boquilla tenía 5 mm de diámetro mientras que el diámetro divergente era 9 mm. La pistola de plasma se había modificado previamente para manejar contrapresiones más altas en la pistola incluyendo cambios en el método de inyección de gas y juntas estancas redundantes de la pistola. La pistola se montó en un controlador de plasma modificado para permitir el flujo y presión de gas adicionales a los típicos de una pistola de plasma y voltajes de arco más altos del suministro de potencia. La inyección de material de alimentación tuvo lugar pasado el punto de salida de la boquilla usando tres inyectores dispuestos en una orientación radial.

La pistola se puso en funcionamiento y operó con argón puro, y los flujos de gas se ajustaron entonces a 100 NLPM de argón, 200 NLPM de helio, y 10 NLPM de nitrógeno. La corriente se puso a 450 amps y el voltaje registrado a 192 VDC. La contrapresión medida en la pistola era alrededor de 80 psi. La observación del corto penacho de plasma indicó la presencia de al menos 4 diamantes de choque 400 (representados en la figura 4). Se inyectó un material de alimentación de carburo de tungsteno con una distribución de tamaño del orden de  $5\ \mu\text{m}$  a  $31\ \mu\text{m}$  a la corriente de gas caliente/plasma a una tasa de 75 g/min. Las velocidades de partícula medidas excedían de 700 m/s y la temperatura de partícula era inferior a la que podría leer el equipo usado para medir temperaturas de partícula de hasta 1000 grados C. La observación visual mostró muy poca, o nula, incandescencia en las partículas, indicando una temperatura muy baja con relación a la pulverización térmica clásica y específicamente para el proceso típico de pulverización con plasma. Se roció un conjunto de muestras de recubrimiento usando el parámetro, y se obtuvieron los resultados siguientes:

1. Inmediatamente después de la pulverización, la temperatura de las muestras era muy inferior a la de un recubrimiento con plasma típico o incluso HVOF con una temperatura registrada de 150 grados C.

2. A la inspección visual del recubrimiento sobre un sustrato fino fijado a un refuerzo sólido durante la pulverización se observó evidencia de curvado en la dirección convexa indicativa de esfuerzo de compresión en el recubrimiento.

3. Las muestras sometidas al laboratorio mostraron una porosidad de menos de 1% con una estructura ideal y dureza alta.

La figura 5 proporciona una microfotografía de la estructura de recubrimiento que representa nivel alto de carburos que indican muy baja entrada de calor al proceso. El recubrimiento es el recubrimiento real de carburo de tungsteno producido usando los procedimientos experimentales descritos anteriormente.

A flujos y presiones operativos más altos se lograron velocidades de partícula superiores a 900 m/s con varios materiales incluyendo titanio. El flujo máximo de gas usado era inferior a 400 NLPM, que es mucho menos que los flujos de gas típicos usados en el método de pulverización en frío para lograr velocidades de partícula similares. Se puede obtener velocidades de partícula aún más altas incrementando el flujo de gas y los niveles de potencia, pero requieren una modificación adicional del equipo de control (controles de suministro de potencia y gas) para manejar la mayor demanda así como la elongación de la sección en cascada para aumentar el voltaje de la pistola. Las observaciones hechas del penacho de plasma también mostraron que cuando se introducía más presión de gas y potencia del arco al proceso, el penacho se hacía menor y obviamente más frío, como indican los modelos de ordenador.

Igualmente, se fabricó una boquilla alargada y se comprobó en la misma pistola con un paso y una salida divergente de forma oval en lugar de una salida divergente redonda. Esta boquilla operó de forma similar a la boquilla anterior en que se observaron al menos 4 diamantes de choque. La inyección del mismo polvo que antes a la llama produjo características similares a las obtenidas con una boquilla redonda.

## ES 2 327 955 T3

Los aspectos y otras ventajas de la invención se realizarán y lograrán con la estructura señalada en particular en la descripción escrita así como los apéndices anexos. Se ha de entender que la descripción general anterior y la siguiente descripción más detallada (contenida en el apéndice) son ejemplares y explicativas y se ha previsto que proporcionen una explicación adicional de la invención reivindicada más adelante. Consiguientemente, se puede hacer varias modificaciones sin apartarse del espíritu o alcance del concepto general de la invención.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

# ES 2 327 955 T3

## REIVINDICACIONES

1. Un método de aplicar un recubrimiento a un sustrato, incluyendo dicho método los pasos de:

5 introducir un gas de proceso en una pistola pulverizadora térmica en un flujo suficiente para ionización y aceleración para la aplicación de recubrimientos;

ionizar el gas de proceso usando un arco eléctrico para calentar el gas a temperaturas superiores a 2000°C;

10 acelerar el gas de plasma ionizado a velocidades supersónicas por una boquilla que tiene una sección convergente/divergente con una garganta entremedio;

15 inyectar material de alimentación a la corriente de gas caliente/plasma a alta velocidad resultante hacia abajo de la garganta de la boquilla de aceleración,

**caracterizado** porque

20 el gas de proceso es ionizado usando más de un arco eléctrico para calentar el gas, teniendo lugar los arcos eléctricos entre más de un cátodo y uno o más ánodos, y donde el plasma se une en un escalón de unión de arco, donde la boquilla para acelerar el gas de plasma ionizado a velocidades supersónicas se coloca hacia abajo del escalón de unión de arco, y donde el material de alimentación es inyectado a la corriente de gas caliente/plasma a alta velocidad dentro del agujero de la boquilla o en la salida de la boquilla; y el material de alimentación es acelerado por la corriente de gas caliente/plasma a alta velocidad para lograr velocidades de partícula de 600 a 2000 m/s.

25 2. El método según la reivindicación 1, donde se usan tres arcos distintos para ionizar y calentar el gas de proceso.

3. El método según la reivindicación 1 o 2, donde el método se lleva a cabo en condiciones de presión ambiente desde presión atmosférica hasta 50 mbar.

30 4. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el método se lleva a cabo en aire o en un entorno de gas inerte.

35 5. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el gas de proceso es uno de aire, argón, nitrógeno, helio, hidrógeno, oxígeno y cualquier combinación de los mismos.

6. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde los arcos eléctricos son de longitud suficiente para producir un potencial de alto voltaje superior a 40 voltios CC, en particular superior a 80 voltios CC.

40 7. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el material de alimentación es un polvo que tiene un rango de tamaños de partícula de aproximadamente 5  $\mu\text{m}$  o más.

8. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el material de alimentación tiene un rango de tamaños de partícula de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$ .

45 9. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el material de alimentación es un material de alimentación de base líquida.

50 10. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el material de alimentación es un líquido que lleva particulados suspendidos en el rango de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$ .

11. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el material de alimentación impulsado por el plasma ionizado a alta velocidad impacta en el sustrato para formar un recubrimiento con esfuerzo de compresión.

55 12. Un aparato para aplicar un recubrimiento de pulverización térmica, incluyendo:

una boquilla conteniendo una sección convergente/divergente (50) con una garganta entremedio, donde la geometría de la sección convergente/divergente (50) es tal que genere números mach superiores a 1; una sección de ánodo (80, 99); y uno o más inyectores de material de alimentación (60, 70, 97),

60 **caracterizado** porque

65 se usa más de un cátodo (10) como emisores para generar arcos eléctricos, dichos cátodos situados de tal manera que gas (20) adecuado para ionización pase a través de los cátodos (10); conteniendo la sección de ánodo (80, 99) un escalón (94) o borde para la finalidad de asentar el otro extremo de los arcos eléctricos y estabilizar las longitudes de arco; incluyendo además el aparato una sección de agujero (92, 93) que es eléctricamente neutra, pero puede soportar el paso parcial de una corriente eléctrica durante el encendido para alargar los arcos y aumentar el voltaje.

## ES 2 327 955 T3

13. El aparato según la reivindicación 12, donde el aparato incluye tres cátodos (10) usados como emisores para generar tres arcos eléctricos distintos.

5 14. El aparato según la reivindicación 12 o 13, donde los arcos eléctricos son de longitud suficiente para producir un potencial de alto voltaje superior a 40 voltios CC, en particular superior a 80 voltios CC.

10 15. El aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 14, donde los inyectores de material de alimentación (60, 70, 97) están adaptados para proporcionar polvo que tiene un rango de tamaños de partícula de aproximadamente 5 o más.

16. El aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 15, donde los inyectores de material de alimentación (60, 70, 97) están adaptados para proporcionar polvo que tiene un rango de tamaños de partícula de aproximadamente 30 a 75  $\mu\text{m}$ .

15 17. El aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 16, donde los inyectores de material de alimentación (60, 70, 97) están adaptados para proporcionar un material de alimentación de base líquida.

20 18. El aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 17, donde los inyectores de material de alimentación (60, 70, 97) están adaptados para proporcionar un líquido que lleva particulados suspendidos en el rango de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$ .

19. El aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 18, donde cada cátodo (10) tiene su propia fuente de corriente eléctrica.

25 20. El aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 19, donde la sección de ánodo (99) es parte de la boquilla.

30 21. El aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 20, donde la sección de ánodo (99) es una sección separada de la boquilla.

22. El aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 21, donde el inyector de material de alimentación (60) está situado en el agujero de la boquilla hacia abajo de la garganta.

35 23. El aparato según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 22, donde dicho inyector de material de alimentación (70, 97) está situado en la salida de la boquilla.

40

45

50

55

60

65

Fig. 1

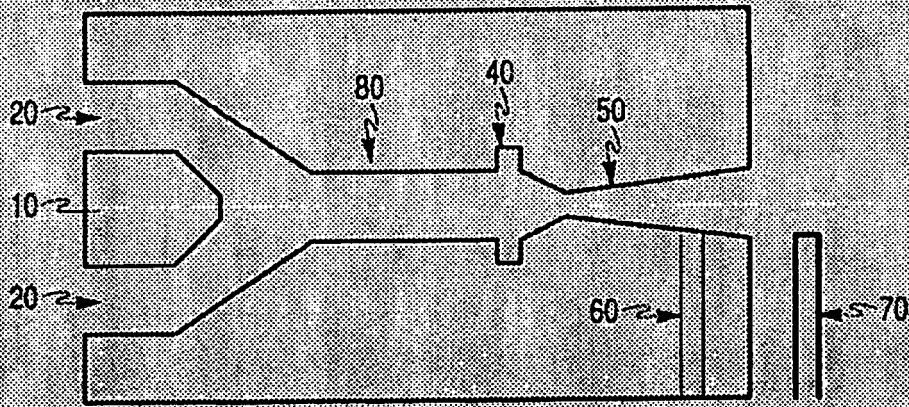
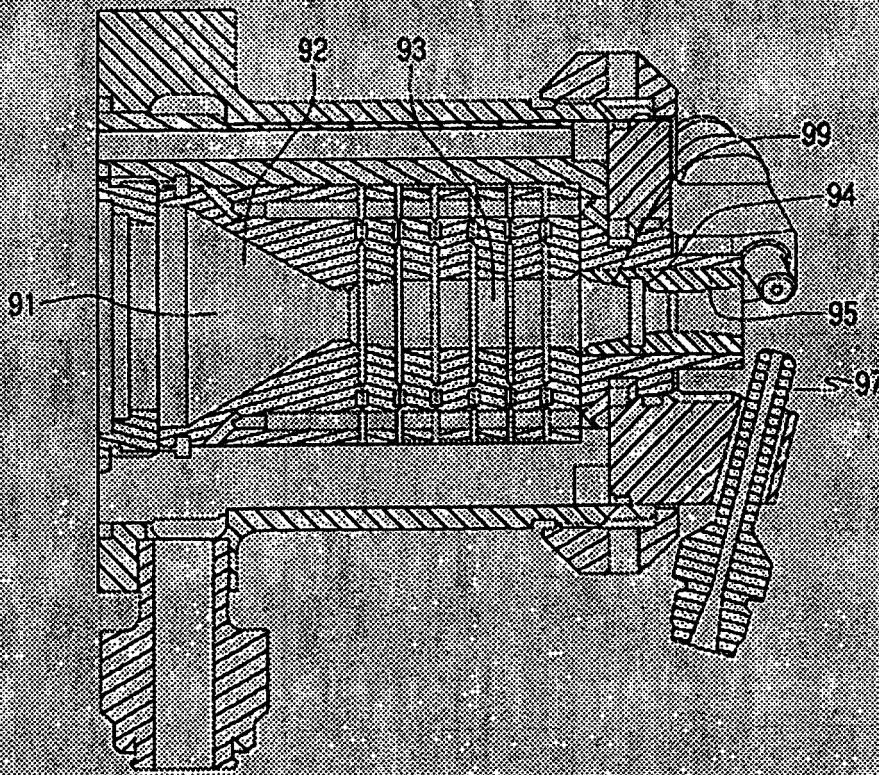


Fig. 2



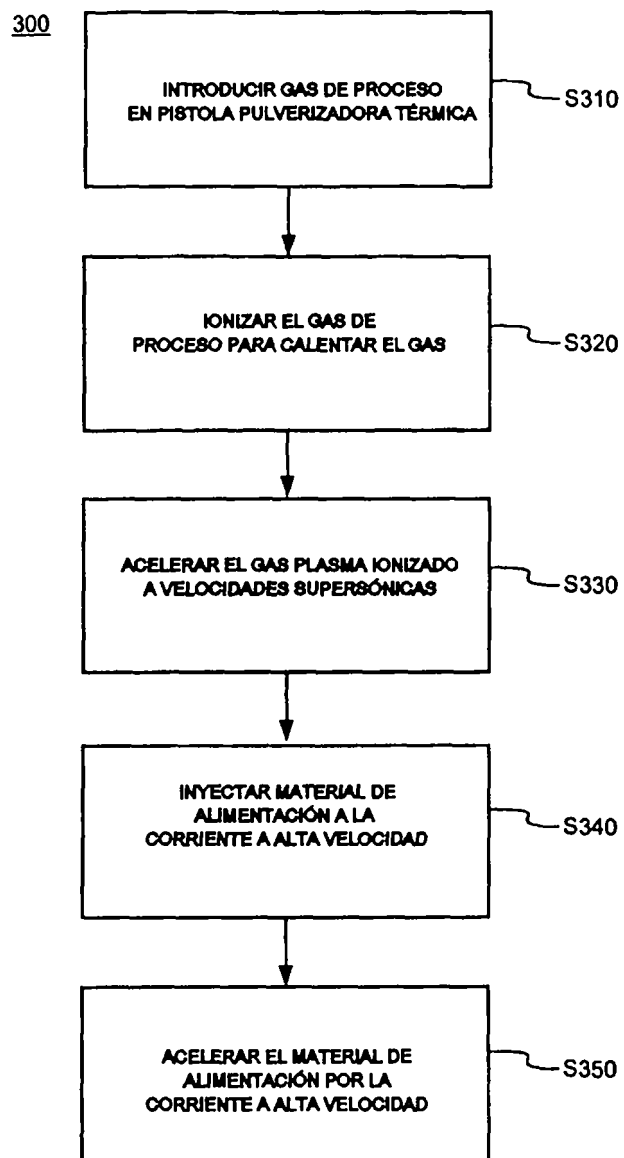


Fig. 3

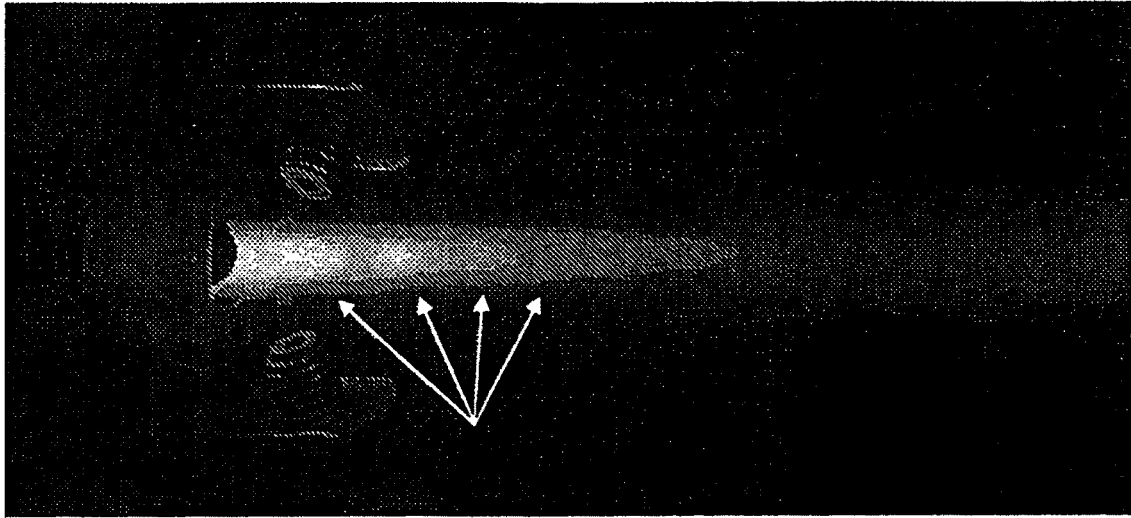


Fig. 4

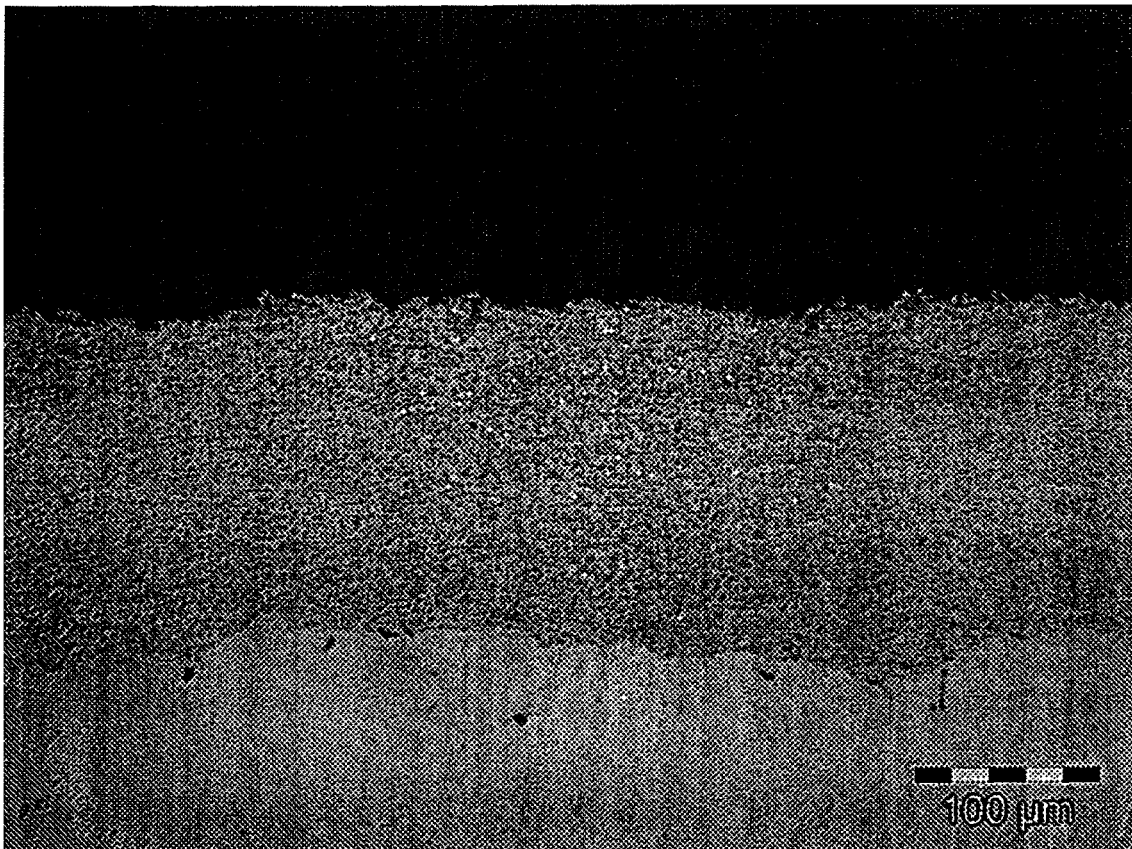


Fig. 5