

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 966 485**

51 Int. Cl.:

B22F 3/08 (2006.01)
B22F 3/087 (2006.01)
B33Y 10/00 (2015.01)
B33Y 30/00 (2015.01)
B22F 10/25 (2011.01)
B22F 10/36 (2011.01)
B22F 12/43 (2011.01)
C23C 26/00 (2006.01)
C23C 24/04 (2006.01)
B22F 10/31 (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.10.2020** **PCT/FR2020/051941**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **06.05.2021** **WO21084201**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.10.2020** **E 20807833 (7)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.11.2023** **EP 4051444**

54 Título: **Equipo y procedimiento de deposición de partículas mediante ondas de choque láser**

30 Prioridad:

29.10.2019 FR 1912143

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.04.2024

73 Titular/es:

UNIVERSITE DE BORDEAUX (25.0%)
35, Place Pey Berland
33000 Bordeaux, FR;
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (CNRS) (25.0%);
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARTS ET
MÉTIER (ENSAM) (25.0%) y
INSTITUT POLYTECHNIQUE DE BORDEAUX
(25.0%)

72 Inventor/es:

KROMER, ROBIN

74 Agente/Representante:

VEIGA SERRANO, Mikel

ES 2 966 485 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

Equipo y procedimiento de deposición de partículas mediante ondas de choque láser

5 Sector de la técnica

La presente invención se refiere a equipos de deposición por proyección de partículas mediante ondas de choque láser. La presente invención también se refiere a un procedimiento de deposición por proyección de partículas mediante ondas de choque láser. Más concretamente, el procedimiento de la presente invención consiste en realizar una proyección, partícula a partícula, en la posición adecuada y a la velocidad adecuada, sobre zonas determinadas de un objetivo con vistas a realizar un tratamiento superficial local o una funcionalización de zonas del objetivo, o para producir una pieza tridimensional en una zona objetivo por yuxtaposición de deposición.

La invención se aplica, en particular, a la producción de patrones complejos a escala microscópica y/o mesoscópica, sobre sustratos o piezas.

La invención se aplica también al tratamiento dirigido de la superficie de un recubrimiento mediante deposición por proyección, partícula a partícula, en zonas objetivo con el fin de reducir la rugosidad de la superficie de una pieza producida, por ejemplo, por fabricación aditiva.

El campo técnico de la invención puede definirse, de manera general, como el de la proyección asistida por láser.

Estado de la técnica

Es conocido el uso de la proyección térmica en numerosos campos industriales, tales como la automoción y la aeronáutica, para realizar la deposición de capas de recubrimientos gruesos, con un espesor que va desde unas pocas decenas de micrómetros hasta unos pocos cientos, o incluso miles, de micrómetros sobre sustratos o piezas.

La figura 1 ilustra un ejemplo de equipo de proyección térmica 1 según el estado de la técnica que comprende una entrada 2 para el material que se va a depositar y una entrada 3 para la fuente de energía. La proyección térmica consiste en introducir el material que se va a depositar en forma de partículas finas 7 en un gas 4, denominado gas de proyección. El gas se utiliza para acelerar, calentar y transportar hasta la pieza que se va a recubrir partículas finas 7 que impactan en la superficie 6 de un sustrato 5. Estas partículas finas 7, sólidas en su estado inicial, pueden estar en estado líquido, semifundido o incluso sólido tras pasar por el gas de proyección. Así, las partículas proyectadas sobre el sustrato se fragmentan y se esparcen de diferentes maneras según su cinética, su estado tras pasar por el gas, su temperatura, el material del sustrato, etc. La acumulación de partículas sobre el sustrato permite realizar el recubrimiento por apilamiento de dichas partículas.

Existen muchas maneras de realizar un depósito por proyección térmica. Una de las técnicas conocidas es la proyección por plasma, que permite realizar recubrimientos metálicos o cerámicos. Se utiliza más concretamente para la deposición de recubrimientos cerámicos para recubrir piezas de geometría y tamaño variados. La proyección por plasma consiste en inyectar el material que se va a depositar en forma de partículas en un medio plasmático en el que se calientan y aceleran hacia un sustrato. El recubrimiento se construye por apilamientos sucesivos de partículas fundidas o parcialmente fundidas que impactan sobre el sustrato, donde se enfrían. El espesor del recubrimiento está comprendido, generalmente, entre 500 µm y 1 mm.

Otra técnica conocida es un procedimiento de proyección térmica en frío (CS por *coldspray* en inglés). Los polvos metálicos se proyectan a muy alta velocidad mediante un gas presurizado (hasta 50 bar y a 1100 °C) sobre un objetivo que es una pieza nueva o una pieza que se va a reparar. Una boquilla convergente-divergente (tipo De Laval) permite transformar la temperatura y la presión del gas en energía cinética, llevando su aceleración a una velocidad supersónica y su enfriamiento a una temperatura inferior a 100 °C. Los polvos inyectados en la zona de alta presión de la boquilla de proyección se aceleran a velocidades que pueden alcanzar los 1200 m/s. La deformación de las partículas en el impacto permite obtener recubrimientos con una estructura muy densa y muy buena adherencia.

En la técnica de proyección térmica, para obtener una buena adherencia mecánica de la capa de recubrimiento sobre el sustrato, es necesario preparar la superficie con materiales abrasivos tales como arena, corindón y/o hielo a fin de crear rugosidades en la superficie del sustrato para poder anclar las partículas. Antes de la deposición, generalmente se llevan a cabo pruebas de adherencia, que son procedimientos conocidos, para definir un rango de adherencia satisfactorio con respecto a una especificación. En efecto, si la adherencia es mediocre, las partículas no pueden agarrarse a la superficie del sustrato durante la deposición o el recubrimiento obtenido puede desprenderse fácilmente durante la fabricación de una pieza, por ejemplo. Estas técnicas de preparación de la superficie pueden introducir residuos en la superficie del sustrato y, por lo tanto, no son adecuadas para todos los sustratos o piezas.

Además, la proyección por plasma utiliza como material de relleno un polvo con tamaños de grano superiores a unos diez micrómetros. Para obtener estructuras nanométricas o micrométricas, es necesario reducir el tamaño de las

partículas elementales. Además, la inyección de una partícula en un chorro de plasma a través de un gas vector requiere que la cantidad de movimiento de las partículas coincida con la del gas de proyección, o que sea al menos ligeramente superior para permitir que las partículas penetren bien en el gas de proyección. Por consiguiente, cuando la masa de las partículas disminuye, es necesario un buen control de la distribución granulométrica, así como de los parámetros de inyección (caudal de gas, diámetro del inyector y posición del inyector con respecto al chorro) para limitar la dispersión del polvo en el chorro a fin de obtener una trayectoria óptima de proyección de las partículas sobre el objetivo.

El documento CN 105 271 106 A divulga un equipo para la deposición selectiva por proyección mediante ondas de choque de al menos una partícula sobre una superficie de deposición de un sustrato receptor, comprendiendo dicho equipo al menos una fuente láser configurada para emitir un haz láser, estando dicho haz láser constituido por una serie de pulsos de luz; un soporte de sustrato sobre el cual se fija el sustrato; una capa generadora de ondas de choque que comprende una primera superficie orientada hacia el haz láser y una segunda superficie orientada hacia la superficie de deposición del sustrato; un sistema óptico para dirigir y focalizar dicho haz láser hacia una zona de focalización de la primera superficie de la capa generadora.

En general, las soluciones del estado de la técnica no permiten una deposición selectiva por proyección, partícula a partícula, en una zona concreta de una pieza, por ejemplo, en particular, con una resolución espacial micrométrica.

Además, las soluciones del estado de la técnica no permiten depositar diferentes materiales localmente sobre una zona objetivo para generar, por ejemplo, recubrimientos multifásicos. Por recubrimientos multifásicos se entiende recubrimientos compuestos formados por al menos dos materiales diferentes, o por al menos dos fases de materiales.

Además, otro problema que la invención pretende solucionar se refiere a las dificultades asociadas con la deposición de partículas desde una boquilla. En efecto, para obtener resoluciones espaciales elevadas, es necesario controlar la sección de la boquilla y la densidad de las partículas.

Asimismo, la presente invención tiene por objeto subsanar los inconvenientes del estado de la técnica proponiendo un equipo y un procedimiento que permiten realizar con gran precisión la deposición de material partícula a partícula sobre sustratos y piezas para obtener un recubrimiento microestructurado, con propiedades de adherencia excelentes o mejoradas sin necesidad de recurrir a la preparación de la superficie del sustrato. En particular, el equipo y el procedimiento de la presente invención permiten la deposición de una amplia gama de materiales, en particular, de manera que se formen patrones multifásicos complejos a partir de ensamblajes partícula a partícula.

Objeto de la invención

Se propone un equipo para la deposición selectiva por proyección mediante ondas de choque de al menos una partícula sobre una superficie de deposición de un sustrato receptor, comprendiendo dicho equipo:

- al menos una fuente láser configurada para emitir un haz láser, estando dicho haz láser constituido por una serie de pulsos de luz;
- un soporte de sustrato sobre el cual se fija el sustrato;
- una capa generadora de ondas de choque que comprende una primera superficie orientada hacia el haz láser y una segunda superficie orientada hacia la superficie de deposición del sustrato;
- un sistema óptico para dirigir y focalizar dicho haz láser hacia una zona de focalización de la primera superficie de la capa generadora;
- comprendiendo dicha segunda superficie una pluralidad de cavidades, cada una de las cuales aloja al menos una partícula;
- estando dicho haz láser configurado para generar un plasma a nivel de la zona de focalización sobre la primera superficie de la capa generadora y propagándose una onda de choque dentro de la capa generadora desde la primera superficie hasta la segunda superficie de la capa generadora para expulsar al menos una partícula en la dirección de la superficie de deposición del sustrato.

A los efectos de la presente divulgación, se entiende por "partícula" una partícula metálica, en particular partículas micrométricas.

Por partículas micrométricas se entiende partículas que tienen un tamaño comprendido entre 1 y 100 μm .

El equipo y el procedimiento según la invención permiten, de manera ventajosa, utilizar la técnica de choque láser para depositar partículas de manera selectiva, partícula a partícula, sobre la superficie de un sustrato y construir una pieza tridimensional formada a partir de partículas sobre una zona objetivo.

Gracias a la solución propuesta en la presente divulgación, ya no es necesario realizar una preparación previa de la superficie del sustrato, tal como el arenado, a fin de aumentar la rugosidad de la superficie para favorecer el anclaje mecánico de las partículas. En otras palabras, ya no es necesario modificar el estado de la superficie del sustrato

para garantizar la adherencia entre el recubrimiento y el sustrato. Como resultado, es posible, por ejemplo, realizar depósitos de partículas sobre piezas frágiles, en particular componentes médicos o piezas de joyería.

5 El equipo y el procedimiento según la invención permiten, de manera ventajosa, realizar patrones a escala micrométrica sobre sustratos o piezas de forma compleja o funcionalizar localmente una zona de interés de un sustrato.

10 Al suprimir el uso del gas portador y utilizar únicamente la onda de choque generada por el plasma para proyectar las partículas una a una sobre la superficie de deposición del sustrato, la solución técnica propuesta permite superar las limitaciones técnicas y los problemas asociados al control de la cantidad de movimiento de las partículas y al control de la sección de la boquilla utilizada en el estado de la técnica, y hacer posible la deposición con independencia de la naturaleza de la superficie del sustrato, de la naturaleza de las partículas, y de la forma y geometría del sustrato.

15 Gracias a la deposición selectiva de partículas una a una, es posible construir patrones micrométricos 2D o 3D sobre una zona objetivo de una pieza metálica existente, u obtener una pieza por acumulación de partículas unas sobre otras.

20 La solución propuesta en la presente divulgación también permite tratar la rugosidad superficial de una pieza obtenida por fabricación aditiva. En efecto, las piezas obtenidas por un procedimiento de fabricación aditiva presentan generalmente una rugosidad aritmética (Ra) del perfil que oscila entre algunos micrómetros y algunas decenas de micrómetros. Esta rugosidad está asociada al apilamiento por capas sucesivas propio del procedimiento de fabricación aditiva y también a la presencia de granos de polvo que se aglomeran en la superficie de la pieza. El procedimiento de la presente divulgación permite depositar partículas de la misma naturaleza que el material de la
25 pieza, una a una, en las zonas rugosas con el fin de reducir la rugosidad superficial.

La solución propuesta permite también densificar una zona objetivo de una pieza con el fin de mejorar las propiedades de fatiga de la pieza.

30 Según una realización de la invención, el equipo comprende, además, una capa de confinamiento transparente a la longitud de onda del haz láser y que recubre la primera superficie de la capa generadora, estando dicha capa de confinamiento configurada para confinar el plasma generado a nivel de la primera superficie de la capa generadora. Esta capa de confinamiento es una capa de vidrio o una capa de agua.

35 Según una realización de la invención, el equipo comprende, además, un sistema de dirección de la fuente láser configurado para controlar un nivel de energía del haz láser.

40 Según una realización de la invención, el sistema de dirección comprende un ordenador configurado para determinar un nivel de energía óptimo del haz láser a partir de un modelo digital en función del tamaño de la partícula, del material de la partícula, del material del sustrato receptor, del material de la capa generadora y del espesor de la capa generadora.

45 Según una realización de la invención, el equipo comprende, además, un medio de calentamiento para calentar el sustrato.

Según una realización de la invención, el equipo comprende, además, un sensor de temperatura configurado para medir la temperatura del sustrato.

50 Según otra realización de la invención, el equipo comprende, además, un sistema de adquisición de imágenes, tal como una cámara.

De manera opcional pueden implementarse las características expuestas en los siguientes párrafos. Pueden implementarse de forma independiente o combinadas entre sí:

- 55
- la capa de confinamiento presenta un espesor comprendido entre 200 y 5000 μm ;
 - la capa generadora de ondas de choque presenta un espesor comprendido entre 200 y 3000 μm .
 - la fuente láser está configurada para emitir un haz láser constituido por una serie de pulsos de luz con una duración de pulso comprendida entre 1 y 5 nanosegundos, con un nivel de energía comprendido entre 1 y 10 julios;

60

 - cada cavidad comprende al menos dos alojamientos, cada uno de los cuales aloja una partícula;
 - las partículas tienen un diámetro comprendido entre 5 μm y 100 μm .

Según otro aspecto, la presente invención también propone un procedimiento de deposición de partículas por medio del equipo de deposición descrito anteriormente, que comprende las siguientes etapas:

- 65
- en una primera etapa (E1), generar un haz láser constituido por una serie de pulsos de luz;

- en una segunda etapa (E2), dirigir el haz láser hacia la primera superficie de la capa generadora y focalizar el haz láser a nivel de una zona de focalización sobre la primera superficie de la capa generadora;
- en una tercera etapa (E3), ajustar el nivel de energía del haz láser de manera que se genere un plasma a nivel de la primera superficie de la capa generadora de ondas de choque;
- 5 - en una cuarta etapa (E4), generar ondas de choque dentro de la capa generadora, propagándose las ondas de choque desde la primera superficie en la dirección de la segunda superficie de la capa generadora para expulsar al menos una partícula en la dirección de la superficie de deposición del sustrato.

Según una realización de la invención, el nivel de energía del haz láser se calcula a partir de un modelo digital en función del tamaño de la partícula, del material de la partícula, del material del sustrato receptor, del material de la capa generadora y del espesor de la capa generadora.

Según otra realización de la invención, el procedimiento comprende, además, una etapa preliminar (E0) de calibración del nivel de energía del haz láser que comprende las siguientes etapas:

- repetir las etapas E1 a E4 para depositar al menos una partícula sobre una región de calibración de la superficie de deposición de un sustrato,
- adquirir al menos una imagen de la zona de impacto de dicha partícula sobre la superficie de deposición del sustrato,
- 20 - evaluar la deformación plástica de la partícula y de la zona de impacto de la superficie de deposición del sustrato en función del nivel de energía del haz láser,
- determinar el nivel de energía óptimo del haz láser.

Descripción de las figuras

Otras características, detalles y ventajas de la invención resultarán de la lectura de la descripción detallada que figura a continuación, y del análisis de los dibujos adjuntos, en los que:

Fig. 1

[Fig. 1] muestra un dispositivo de proyección térmica de partículas según el estado de la técnica;

Fig. 2

[Fig. 2] muestra un equipo para la deposición selectiva por proyección de partículas mediante ondas de choque láser según una realización de la invención;

Fig. 3

[Fig. 3] muestra un ejemplo de un patrón producido por medio del equipo de la figura 2;

Fig. 4

[Fig. 4] muestra una vista esquemática del estado de una partícula tras su impacto sobre la superficie de un objetivo;

Fig. 5

[Fig. 5] muestra una imagen 3D, observada a través de un microscopio óptico, de la superficie de un patrón compuesto por cuatro partículas, habiendo sido producido el patrón por medio del equipo según una realización de la invención;

Fig. 6

[Fig. 6] es un diagrama de flujo del procedimiento de deposición de partículas según una realización de la invención.

Descripción detallada de la invención

Los dibujos y la descripción que figuran a continuación contienen, básicamente, elementos de carácter cierto. Por lo tanto, pueden servir no solo para mejorar la comprensión de la presente invención, sino también para contribuir a su definición, cuando proceda.

En la figura 2, se muestra un equipo para la deposición selectiva por proyección de partículas mediante ondas de choque láser 100 según una realización de la invención. Según esta realización, el equipo comprende una fuente láser 101 configurada para emitir un haz láser 103 que se define por los siguientes parámetros: su longitud de onda, su frecuencia, su energía, su diámetro y su duración de pulso. Los parámetros de la fuente láser pueden configurarse, preferiblemente, para ajustar al menos uno de los parámetros, en particular, su nivel de energía.

A modo de ejemplo y en particular en el ejemplo de utilización del equipo de deposición de partículas para depositar cuatro partículas a una velocidad de 500 m/s (figura 5), el tren de pulsos láser tiene una duración igual a 40 ns, a una longitud de onda de 1064 nm. El haz láser se emite con una energía de 10 J.

El equipo comprende también un soporte de sustrato 130 sobre el cual está fijado un sustrato receptor 140 destinado a recibir las partículas proyectadas por el equipo. Más concretamente, el sustrato receptor comprende una primera superficie de deposición libre 141 orientada hacia el haz láser y una segunda superficie fijada sobre el soporte. El soporte está montado sobre una placa móvil que se desplaza en un plano horizontal (X, Y) perpendicular a la dirección del haz láser, para desplazar la posición de deposición de la partícula. El soporte 130 puede orientarse en las tres direcciones a fin de presentar la superficie de deposición perpendicularmente al haz láser, de manera que se maximice la adhesión entre la partícula y la superficie de deposición. Además, dicho soporte permite producir patrones complejos.

En la presente divulgación, la superficie de deposición 141 corresponde a la superficie de un sustrato para las partículas de la primera capa o a la superficie de la capa depositada sobre el sustrato receptor para las partículas de la capa siguiente.

El equipo de deposición 100 comprende, además, un sistema óptico 102 que permite ajustar la focalización a lo largo de un eje Z perpendicular a la superficie de deposición.

La fuente láser 101 y el sistema óptico 102 no se describen con más detalle puesto que son conocidos por el experto en la materia y pueden ser similares a los del estado de la técnica.

El equipo de deposición también comprende al menos un soporte donante de partículas 150.

Como se ilustra en la figura 2 y según una realización de la invención, el soporte donante 150 comprende una capa de confinamiento de plasma 110 y una capa generadora de ondas de choque 120.

La capa de confinamiento 110 presenta una primera superficie libre 111 orientada hacia el haz láser y una segunda superficie 112. La capa generadora de ondas de choque 120 presenta una primera superficie 121 que tiene una interfaz de contacto con la segunda superficie 112 de la capa de confinamiento 110 y una segunda superficie 122 libre. La segunda superficie libre 122 comprende una pluralidad de cavidades 123, estando cada una de las cavidades configurada para alojar una partícula 11.

Por lo tanto, la capa de confinamiento de plasma 110 y la capa generadora de ondas de choque 120 que forman el soporte donante de partículas 150 se presentan en forma de pila.

El equipo de deposición también comprende una segunda placa móvil (no ilustrada) sobre la cual está montado de manera extraíble el soporte donante 150, desplazándose la placa móvil en un plano horizontal X, Y perpendicular a la dirección del haz láser. Así, gracias a la segunda placa móvil, es posible desplazar la posición de focalización del haz láser sobre la primera superficie 121 de la capa generadora de ondas de choque 120 de manera que se proyecten selectivamente las partículas una a una sobre una zona objetivo de la superficie de deposición 141 del sustrato 140. De este modo, es posible seleccionar una partícula 11 concreta y proyectar la partícula seleccionada sobre una zona determinada de la superficie de deposición.

Según una realización de la invención, el equipo de deposición comprende un sistema de mando y control de desplazamiento del sustrato receptor 140 y del soporte donante 150 a través de las placas con precisión micrométrica y orientable a lo largo de seis ejes a fin de generar formas complejas.

Según otra realización de la invención, el equipo de deposición comprende un sistema de mando y control de desplazamiento para cada placa.

La capa de confinamiento 110 está hecha de un material transparente a la longitud de onda del haz láser. Esta capa también puede ser del agua contenida en una carcasa. El sistema óptico 102 está configurado para focalizar el haz láser 103 sobre la primera superficie 121 de la capa generadora de ondas de choque, a través de la capa de confinamiento.

La función de esta capa de confinamiento 110 es ralentizar la expansión volumétrica del plasma generado en la interfaz 121 de manera que se genere una mayor presión, permitiendo así aumentar la presión sobre la primera superficie de la capa generadora de ondas de choque 120. Además, la presencia de la capa de confinamiento también permite aumentar la duración de la aplicación de la presión. Preferiblemente, la capa de confinamiento 110 presenta un espesor comprendido entre 200 μm y 5000 μm . La capa de confinamiento es una capa dieléctrica. Preferiblemente está hecha de vidrio. También puede sustituirse por agua destilada o una película de cinta adhesiva transparente.

La capa generadora de ondas de choque 120 está hecha de un material metálico, por ejemplo, aluminio, o de un material plástico absorbente a la longitud de onda del haz láser. Presenta un espesor comprendido entre 200 μm y 3000 μm . Según un fenómeno físico conocido, cuando un pulso fotónico de alta potencia y corta duración se focaliza sobre la primera superficie 121 de la capa generadora 120, la interacción láser-material se traduce, en primer lugar,

en la penetración del haz láser en el espesor de la capa generadora, creando una zona de absorción de energía láser. El espesor de penetración de las ondas ópticas en el sólido es del orden de unos pocos nanómetros. Debido a la muy corta duración del pulso y a la elevada potencia del haz, la temperatura aumenta considerablemente en esta zona y se produce la sublimación de un espesor muy pequeño de material de la capa generadora. El vapor ionizado entra entonces en contacto con el haz láser y genera un plasma denso y caliente que continúa absorbiendo energía durante toda la duración del pulso.

La expansión del plasma generado a nivel de la primera superficie de la capa generadora ejerce una presión sobre la primera superficie de la capa generadora. Esta tensión superficial genera ondas de compresión en el espesor de la capa generadora de ondas de choque 120, dando lugar a una onda de choque mecánico con una amplitud que puede alcanzar algunas decenas de GPa y propagándose en la dirección de la segunda superficie. La onda de choque así creada se propaga localmente desde la primera superficie 121 de la capa generadora hasta la segunda superficie 122 de la capa generadora. Debido al efecto de la onda de choque, que ejerce presión sobre la partícula alojada en la cavidad, esta última se proyecta en la dirección de la superficie de deposición 141 del sustrato receptor 140.

Las partículas tienen un diámetro comprendido entre 5 y 100 μm . El sustrato tiene un espesor comprendido entre 500 y 2000 μm . La deposición de las partículas se realiza mediante una fuente láser que permite generar un haz láser de longitud de onda de 1064 nm con una duración de pulso comprendida entre 1 y 5 ns. El diámetro del haz láser en el punto de focalización está comprendido generalmente entre 500 y 2000 μm . La energía del haz láser está comprendida entre 5 y 10 julios.

Según otra realización de la invención no ilustrada, la cavidad puede comprender varios alojamientos, estando cada uno de los alojamientos dimensionado para recibir una partícula.

De manera ventajosa, la disposición de las cavidades sobre la superficie libre 122 de la capa generadora de ondas de choque forma directamente el patrón que se desea imprimir sobre la superficie de deposición. Por consiguiente, cuando las partículas se proyectan sobre la superficie de deposición del sustrato receptor, las partículas depositadas forman directamente el patrón deseado. La proyección permite así depositar las partículas y transferir el patrón al mismo tiempo.

Las cavidades presentan una sección circular, ovalada o de otras formas geométricas. Las cavidades pueden realizarse, en particular, mediante un conocido procedimiento de tratamiento de texturizado láser. Las cavidades así generadas presentan una dimensión micrométrica del mismo orden de magnitud que las partículas.

Así, el equipo de la invención permite producir patrones por deposición partícula a partícula sobre la superficie de deposición de un sustrato a partir de un soporte donante mediante ondas de choque láser.

El patrón puede comprender una sola capa formada a partir de una pluralidad de partículas. El patrón también puede comprender una pluralidad de capas como se ilustra en la figura 2, estando formada cada una de las capas por una pluralidad de partículas.

Según una realización de la invención, el equipo de deposición selectiva comprende un bastidor que soporta varios soportes donantes de partículas 150, estando provisto cada uno de los soportes de un tipo de partícula y un patrón. El bastidor está asociado con un sistema de ejes X, Y, Z. Los diferentes soportes se fijan sobre el bastidor y se desplazan en una dirección X y en una dirección Y de manera que el soporte donante se coloque frente a la superficie de deposición del sustrato.

La figura 3 ilustra un ejemplo de un patrón 10 de partículas que forman una matriz de partículas sobre la superficie de deposición 141 del sustrato. Según este ejemplo, el patrón comprende cuatro tipos de partículas 11A, 11B, 11C, 11D que están dispuestas a intervalos regulares L.

Según una realización de la invención y tal como se ilustra en la figura 2, el haz láser 103 y la dirección de proyección de las partículas se orientan en dirección opuesta a la fuerza gravitacional. En la configuración ilustrada en la figura 2, la superficie libre 122 de la capa generadora de ondas de choque 120 está orientada hacia arriba, en la dirección de la superficie de deposición 141 del sustrato. Durante la proyección, la partícula es expulsada de la cavidad en la que está alojada en dirección ascendente, en sentido contrario a la fuerza gravitacional. Por lo tanto, en esta configuración, las partículas pueden mantenerse fácilmente en las cavidades de la capa generadora de ondas de choque. En el caso en el que la capa de confinamiento 110 está compuesta de agua, la capa generadora de ondas de choque está sumergida en el agua.

Determinación de la velocidad crítica óptima de una partícula en el momento de su impacto sobre un sustrato

La adherencia de la partícula sobre el sustrato es un factor predominante en la determinación del rendimiento de un recubrimiento.

A los efectos de la presente divulgación, se entiende por "adherencia" el estado en el que la partícula y el sustrato están unidos.

La adherencia de una partícula al sustrato se rige principalmente por la velocidad crítica de impacto de la partícula.

A los efectos de la presente divulgación, se entiende por velocidad crítica una velocidad por debajo de la cual la partícula no se adhiere al sustrato.

En condiciones óptimas, la velocidad de impacto da lugar a fuerzas de cizallamiento. La fricción entre los dos materiales sólidos y la deformación plástica que sufren provocan un aumento de la temperatura local de los materiales. La partícula y la zona de impacto del sustrato sufren una deformación plástica que provoca una unión entre la partícula y el sustrato.

La figura 4 ilustra esquemáticamente las deformaciones plásticas sufridas por la partícula 11 y la zona de impacto 142 del sustrato en el momento del impacto de la partícula sobre el sustrato 140. La adhesión se tradujo en un hundimiento de la partícula en el sustrato y la formación de una zona hueca 143 a nivel de la zona de impacto.

El comportamiento de una partícula que llega a gran velocidad, en el momento del impacto sobre el sustrato, se ha simulado mediante un cálculo por elementos finitos de una esfera que choca contra un plano. Utilizando un modelo conocido, se ha modelizado el impacto de una partícula sobre un sustrato mediante una ley de comportamiento de tipo "Johnson-Cook". A partir de este modelo, es posible simular el fenómeno de deformación plástica de una partícula en su impacto sobre el sustrato y calcular la velocidad cinética crítica óptima para la adhesión de la partícula sobre el sustrato en función de parámetros tales como el tamaño de la partícula, el material de la partícula y el material del sustrato.

Determinación de la velocidad de eyección de la partícula

La velocidad crítica óptima que permite la adhesión de la partícula sobre el sustrato está directamente relacionada con la velocidad a la que la partícula es expulsada de la cavidad bajo el efecto de la onda de choque. Por lo tanto, la velocidad de eyección está vinculada a la onda de choque generada por el haz láser en la capa generadora de ondas de choque.

Según un modelo conocido, a partir de las relaciones de Hugoniot (leyes de conservación de estado en un medio), la ecuación de estado de Mie-Grüneisen y la relación lineal que vincula la velocidad de la onda de choque y la velocidad del material, es posible modelizar la propagación de la onda de choque dentro de la capa generadora. Así, a partir de estas ecuaciones, es posible determinar la velocidad a la que será expulsada la partícula en función de la amplitud de la onda de choque inducida por el haz láser y, por tanto, de la presión ejercida por el plasma creado por el haz láser. Como resultado, es posible entonces determinar el nivel de energía óptimo del haz láser para obtener la velocidad óptima de proyección de la partícula en función del material de la capa generadora y del espesor de la capa generadora.

Por consiguiente, la velocidad de proyección de la partícula bajo el efecto de la onda de choque y la velocidad crítica de la partícula en el momento del impacto sobre el sustrato varían en función del tamaño de la partícula, del material de la partícula, del material del sustrato, del espesor y del material de la capa generadora de ondas de choque y del nivel de energía del haz láser.

Conociendo el tamaño de la partícula, el material de la partícula, el material del sustrato receptor, el espesor y el material de la capa generadora, es posible ajustar el nivel de energía del haz láser con objeto de obtener la energía cinética crítica de la partícula en el momento de su impacto sobre el sustrato para obtener una buena adhesión entre la partícula y la superficie de deposición del sustrato.

La figura 5 ilustra un ejemplo de deposición de cuatro partículas de cobre mediante ondas de choque láser sobre un sustrato de aluminio.

La capa generadora 110 es una capa metálica de aluminio y tiene un espesor de 500 μm . La capa de confinamiento es de vidrio y tiene un espesor de 5 mm. La superficie libre 122 de la capa generadora incluye cuatro cavidades, cada una de las cuales contiene una partícula de cobre.

La onda de choque ha permitido proyectar las cuatro partículas sobre la superficie de deposición. La velocidad de las partículas es de 500 m/s, que es un valor experimental.

Con referencia a la figura 6, a continuación, se describe en detalle el procedimiento de deposición de partículas por proyección mediante ondas de choque láser sobre la superficie de deposición de un sustrato según una realización de la invención.

En una primera etapa (E1), el nivel de energía óptimo del haz láser se calcula en un ordenador a partir de un modelo

digital conocido. En este modelo, el tamaño de la partícula, el material de la partícula, el material del sustrato receptor, el espesor del sustrato receptor, el espesor de la capa generadora de ondas de choque y el material de la capa generadora son parámetros conocidos. Por tanto, es posible ajustar el nivel de energía del haz láser para obtener la energía cinética crítica de la partícula en el momento de su impacto sobre el sustrato con el fin de obtener una buena adhesión entre la partícula y la superficie de deposición del sustrato.

En una segunda etapa (E2), el sistema de dirección de la fuente láser ordena a la fuente láser que emita un haz láser con los parámetros deseados: el nivel de energía transmitido por el ordenador, la longitud de onda y la duración del pulso. El haz láser se focaliza sobre la primera superficie de la capa generadora a través de la capa de confinamiento. En el ejemplo ilustrado en la figura 5 de la presente divulgación, la fuente láser funciona, por ejemplo, a una longitud de onda de 1064 nm para una duración de pulso de 5,1 ns y un nivel de energía de 1 julio.

En una tercera etapa (E3), se genera un plasma en la superficie de la interfaz entre la capa de confinamiento 110 y la capa generadora de ondas de choque 120 como resultado de la absorción de la energía del haz láser por la capa generadora. El plasma se crea en un periodo de tiempo extremadamente corto, normalmente unos pocos nanosegundos después de la absorción del haz láser.

En una cuarta etapa (E4), se genera una onda de choque dentro de la capa generadora que se propaga en la dirección de la segunda superficie libre 122 portadora de partículas. Esta onda de choque es el resultado de la presión ejercida por el plasma sobre la superficie de la capa generadora. La onda de choque que llega a la superficie libre 122 provoca la proyección de la partícula alojada en la cavidad de la segunda superficie 122 en la dirección de la superficie de deposición 141 del sustrato 140.

Según una realización de la invención, el procedimiento comprende una etapa preliminar (E0) de calibración de la velocidad crítica de la partícula, siendo la velocidad crítica la velocidad de la partícula en el momento de su impacto sobre la superficie de deposición del sustrato, con el fin de obtener una buena adherencia entre la partícula y el sustrato. Esta etapa de calibración permite, por tanto, validar el modelo digital con pruebas experimentales de deposición de partículas mediante ondas de choque láser sobre un sustrato de prueba. Esta etapa de calibración también puede realizarse en una región específica de un sustrato dedicada a la calibración.

Esta etapa preliminar de calibración consiste en repetir las etapas E1 a E4 para depositar una partícula sobre una región de calibración de la superficie de deposición de un sustrato, con diferentes niveles de energía del haz láser calculados a partir del modelo digital.

En esta etapa preliminar, después de la etapa E4, las etapas son:

- adquirir al menos una imagen de la zona de impacto de dicha partícula sobre la superficie de deposición del sustrato y, a continuación,
- evaluar la deformación plástica de la partícula y de la zona de impacto de la superficie de deposición del sustrato en función del nivel de energía del haz láser,
- determinar el nivel de energía óptimo del haz láser.

Según una realización de la invención, el equipo de deposición de partículas comprende un sistema de adquisición de imágenes, tal como una cámara de alta velocidad cuya frecuencia de adquisición de imágenes, comprendida entre 1000 y 50000 Hz, está sincronizada con la frecuencia de pulso de la fuente láser. El sistema de adquisición de imágenes permite adquirir en tiempo real, durante el procedimiento de deposición, al menos una imagen del estado de la partícula justo después de su impacto sobre la superficie de deposición del sustrato en función de diferentes niveles de energía del haz láser calculados.

Las caracterizaciones tridimensionales del estado de la partícula permiten controlar cualitativamente la deformación plástica de la partícula y de la zona de impacto de la superficie de deposición del sustrato y evaluar la calidad de la adhesión entre la partícula y el sustrato. La etapa preliminar de calibración permite determinar el nivel de energía óptimo del haz láser que se utilizará para la deposición ulterior de las partículas con el fin de formar el patrón complejo o la pieza.

Aplicación industrial

La invención puede aplicarse, en particular, para producir:

- piezas de joyería con geometrías complejas,
- componentes médicos;
- recubrimientos de acabado en zonas objetivo con el fin de reducir la rugosidad de la superficie de piezas obtenidas, en particular, por fabricación aditiva;
- recubrimientos que permiten modificar las propiedades físicas de una zona;
- recubrimientos electrofuncionales.

- recubrimientos anticorrosión.

A modo de ejemplo y sin carácter limitativo, las partículas pueden estar hechas de:

- 5
- materiales preciosos como oro, plata y platino, o semipreciosos.
 - materiales cerámicos;
 - materiales metálicos estándar;

A modo de ejemplo y sin carácter limitativo, el sustrato puede estar hecho de:

- 10
- materiales preciosos como oro, plata y platino, o semipreciosos.
 - materiales metálicos;
 - materiales compuestos;
 - y cerámica.
- 15

REIVINDICACIONES

1. Equipo (100) de deposición selectiva por proyección mediante ondas de choque (11) de al menos una partícula sobre una superficie de deposición (141) de un sustrato receptor (140), comprendiendo dicho equipo:
 - al menos una fuente láser (101) configurada para emitir un haz láser (103), estando dicho haz láser constituido por una serie de pulsos de luz;
 - un soporte de sustrato (130) sobre el cual se fija el sustrato (140);
 - una capa generadora de ondas de choque (120) que comprende una primera superficie (121) orientada hacia el haz láser y una segunda superficie (122) orientada hacia la superficie de deposición (141) del sustrato;
 - un sistema óptico (102) para dirigir y focalizar dicho haz láser hacia una zona de focalización de la primera superficie (121) de la capa generadora;
 - comprendiendo dicha segunda superficie (122) una pluralidad de cavidades (123), cada una de las cuales aloja al menos una partícula (11);
 - estando dicho haz láser configurado para generar un plasma (104) en la zona de focalización sobre la primera superficie (121) de la capa generadora y propagándose una onda de choque (105) dentro de la capa generadora (120) desde la primera superficie (121) hasta la segunda superficie (122) de la capa generadora para expulsar al menos una partícula (11) en la dirección de la superficie de deposición (141) del sustrato receptor (140).
2. Equipo de deposición según la reivindicación 1, que comprende, además, una capa de confinamiento (110) transparente a la longitud de onda del haz láser y que recubre la primera superficie (121) de la capa generadora, estando dicha capa de confinamiento configurada para confinar el plasma generado a nivel de la primera superficie (121) de la capa generadora (120).
3. Equipo de deposición según la reivindicación 2, en el que dicha capa de confinamiento es una capa de vidrio o una capa de agua.
4. Equipo de deposición según la reivindicación 2 o 3, en el que dicha capa de confinamiento presenta un espesor comprendido entre 200 y 5000 μm .
5. Equipo de deposición según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, un sistema de dirección (170) de la fuente láser configurado para controlar un nivel de energía del haz láser.
6. Equipo de deposición según la reivindicación 5, en el que el sistema de dirección (170) comprende un ordenador configurado para determinar un nivel de energía óptimo del haz láser a partir de un modelo digital en función del tamaño de la partícula, del material de la partícula, del material del sustrato receptor, del material de la capa generadora y del espesor de la capa generadora.
7. Equipo de deposición según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, un medio de calentamiento (180) para calentar el sustrato (140).
8. Equipo de deposición según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, un sensor de temperatura (181) configurado para medir la temperatura del sustrato.
9. Equipo de deposición según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, además, un sistema de adquisición de imágenes, tal como una cámara.
10. Equipo de deposición según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha fuente láser (101) está configurada para emitir un haz láser constituido por una serie de pulsos de luz con una duración de pulso comprendida entre 1 y 5 nanosegundos, con un nivel de energía comprendido entre 1 y 10 julios.
11. Equipo de deposición según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada cavidad (123) comprende al menos dos alojamientos, cada uno de los cuales aloja una partícula.
12. Equipo de deposición según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichas partículas tienen un diámetro comprendido entre 5 μm y 100 μm .
13. Procedimiento de deposición (200) de partículas por medio del equipo de deposición (100) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende las siguientes etapas:
 - en una primera etapa (E1), generar un haz láser (103) constituido por una serie de pulsos de luz;
 - en una segunda etapa (E2), dirigir el haz láser hacia la primera superficie (121) de la capa generadora (120) y focalizar el haz láser a nivel de una zona de focalización sobre la primera superficie de la capa generadora;
 - en una tercera etapa (E3), ajustar el nivel de energía del haz láser de manera que se genere un plasma a nivel de la primera superficie de la capa generadora de ondas de choque;
 - en una cuarta etapa (E4), generar ondas de choque dentro de la capa generadora (120), propagándose las

ondas de choque desde la primera superficie en la dirección de la segunda superficie de la capa generadora para expulsar al menos una partícula en la dirección de la superficie de deposición (141) del sustrato (140).

5 14. Procedimiento de deposición según la reivindicación 13, en el que el nivel de energía del haz láser se calcula a partir de un modelo digital en función del tamaño de la partícula, del material de la partícula, del material del sustrato receptor, del material de la capa generadora y del espesor de la capa generadora.

10 15. Procedimiento de deposición según la reivindicación 13 o 14, que comprende, además, una etapa preliminar (E0) de calibración del nivel de energía del haz láser que comprende las siguientes etapas:

- repetir las etapas E1 a E4 para depositar al menos una partícula sobre una región de calibración de la superficie de deposición de un sustrato,
- adquirir al menos una imagen de la zona de impacto de dicha partícula sobre la superficie de deposición del sustrato,
- 15 - evaluar la deformación plástica de la partícula y de la zona de impacto de la superficie de deposición del sustrato receptor en función del nivel de energía del haz láser,
- determinar el nivel de energía óptimo del haz láser.

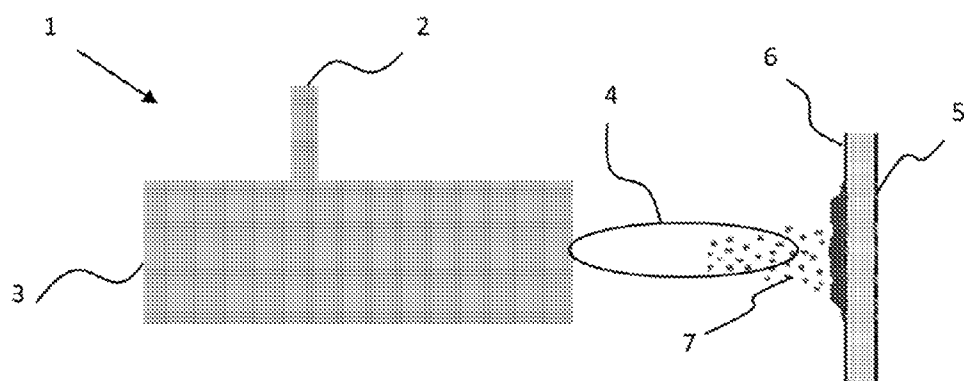


Fig. 1

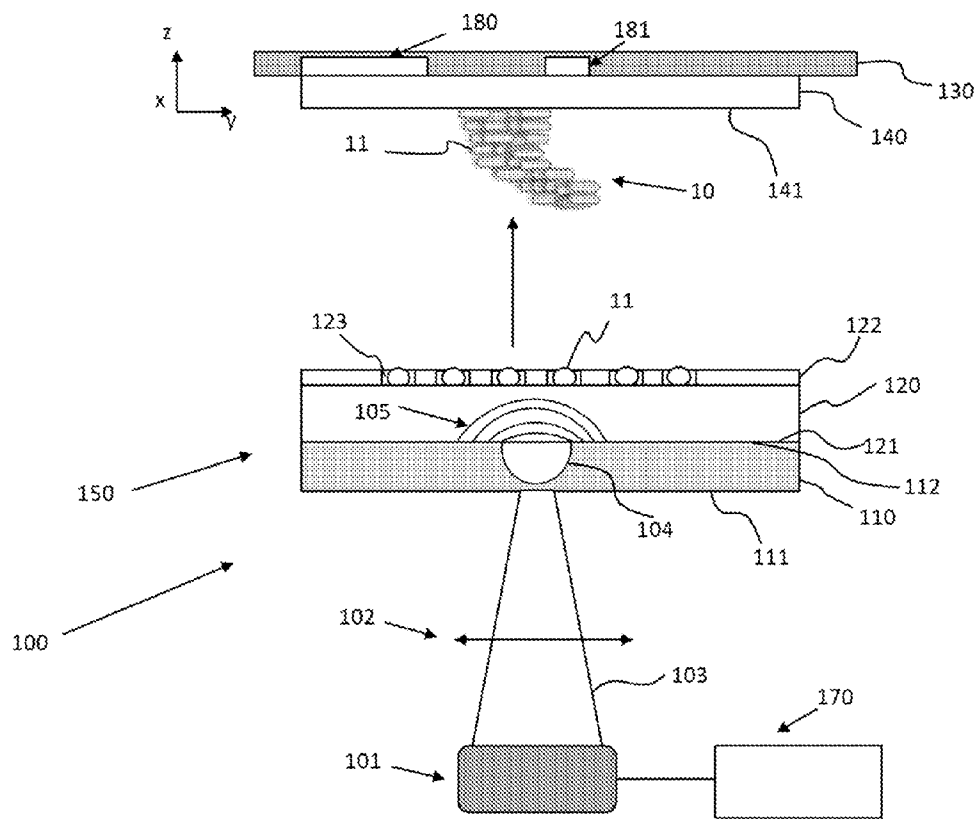


Fig. 2

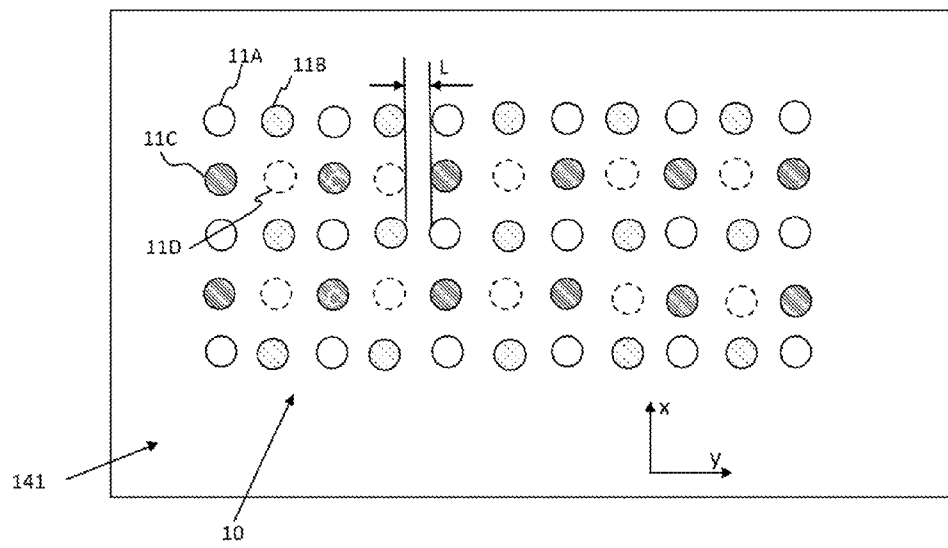


Fig. 3

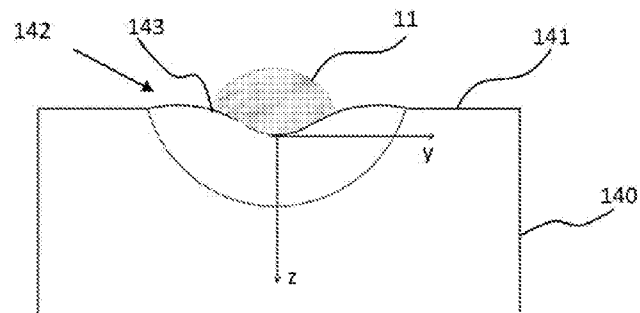


Fig. 4

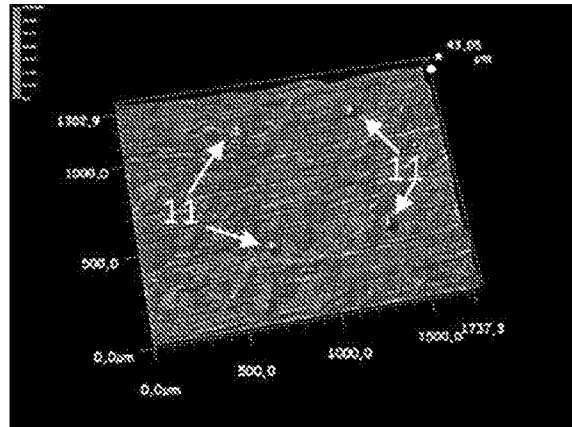


Fig. 5

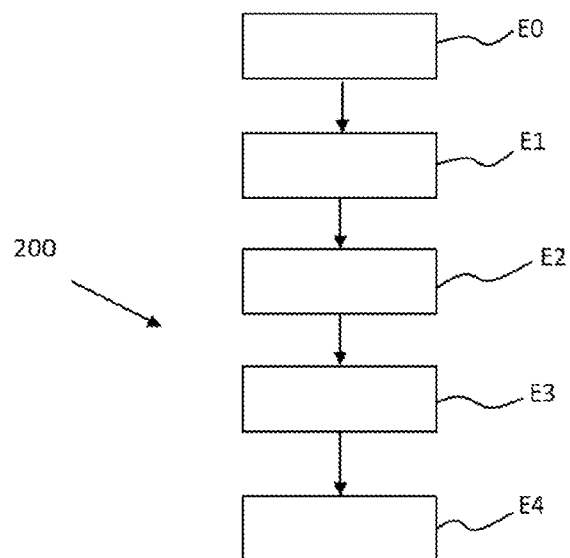


Fig. 6