

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 987 415**

51 Int. Cl.:

<b>B22F 3/105</b>	(2006.01)
<b>C22C 1/04</b>	(2013.01)
<b>B33Y 40/00</b>	(2010.01)
<b>B33Y 70/00</b>	(2010.01)
<b>B22F 1/00</b>	(2012.01)
<b>B22F 10/22</b>	(2011.01)
<b>B22F 10/25</b>	(2011.01)
<b>B22F 10/28</b>	(2011.01)
<b>B22F 10/64</b>	(2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.10.2019 PCT/FR2019/052346**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **09.04.2020 WO20070451**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.10.2019 E 19801951 (5)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.07.2024 EP 3860787**

54 Título: **Procedimiento para fabricar una pieza de aleación de aluminio**

30 Prioridad:

**05.10.2018 FR 1871132**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**14.11.2024**

73 Titular/es:

**C-TECCONSTELLIUM TECHNOLOGY CENTER  
(100.0%)  
Propriété Industrielle Parc EconomiqueCentr'Alp  
- 725, Rue Aristide Bergès, CS 100027  
38341 Voreppe, FR**

72 Inventor/es:

**CHEHAB, BECHIR**

74 Agente/Representante:

**DEL VALLE VALIENTE, Sonia**

ES 2 987 415 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 para fabricar una pieza de aleación de aluminio

5 **Campo técnico**

El campo técnico de la invención es un procedimiento para fabricar una pieza de aleación de aluminio, utilizando una técnica de fabricación aditiva.

10 **Técnica anterior**

Las técnicas de fabricación aditiva se han desarrollado desde la década de 1980. Consisten en dar forma a una pieza mediante la adición de material, que es lo opuesto a las técnicas de mecanizado, que buscan eliminar material. Anteriormente limitada a la creación de prototipos, la fabricación aditiva ahora es operativa para la fabricación de productos industriales producidos en masa, incluyendo piezas metálicas.

El término “fabricación aditiva” se define según la norma francesa XP E67-001, como un “conjunto de procesos para fabricar, capa por capa, añadiendo material, un objeto físico a partir de un objeto digital”. La norma ASTM F2792 (enero de 2012) también define la fabricación aditiva. También se definen y describen en la norma ISO/ASTM 17296-1 diversos métodos de fabricación aditiva. La utilización de la fabricación aditiva para producir una pieza de aluminio, con una baja porosidad, se describió en el documento WO2015/006447. La aplicación de capas sucesivas se lleva a cabo generalmente aplicando un denominado material de aporte, fundiendo o sinterizando luego el material de aporte utilizando una fuente de energía, tal como un haz láser, un haz de electrones, una antorcha de plasma o un arco eléctrico. Independientemente del proceso de fabricación aditiva aplicado, el espesor de cada capa añadida es del orden de unas pocas decenas o cientos de micrómetros.

Un medio de fabricación aditiva es fundir o sinterizar un material de aporte en forma de polvo. Esto puede consistir en fundir o sinterizar utilizando un haz de energía.

Se conocen técnicas de sinterización selectiva por láser (sinterización selectiva por láser, SLS, por su siglas en inglés, o sinterización directa de metales por láser, DMLS, por su siglas en inglés), en donde se aplica una capa de polvo metálico o de aleación metálica sobre la pieza a fabricar, y se sinteriza selectivamente según el modelo digital con energía térmica de un haz láser. Otro tipo de proceso de formación de metales comprende la fusión selectiva por láser (SLM, por su siglas en inglés) o la fusión por haz de electrones (EBM, por su siglas en inglés), en donde la energía térmica suministrada por un láser o un haz de electrones dirigido se utiliza para fundir selectivamente (en lugar de sinterizar) el polvo metálico, de modo que se funda mientras se enfría y se solidifica.

También se conoce la deposición por fusión por láser (LMD, por su siglas en inglés), en donde el polvo simultáneamente se rocía y se funde mediante un haz láser.

La solicitud de patente WO2016/209652 describe un proceso para fabricar un aluminio de alta resistencia mecánica, que comprende: preparar un polvo de aluminio atomizado que tenga uno o más tamaños de polvo aproximados deseados y una morfología aproximada; sinterizar el polvo para formar un producto mediante fabricación aditiva; tratamiento térmico en solución; temple; y revenido del aluminio fabricado con un proceso aditivo.

La solicitud de patente EP2796229 describe un proceso para formar una aleación de aluminio metálica reforzada por dispersión, que comprende las etapas de: obtener, en forma de polvo, una composición de aleación de aluminio que sea capaz de adquirir una microestructura reforzada por dispersión; dirigir un haz láser de baja densidad de energía sobre una porción del polvo que tiene la composición de la aleación; retirar el haz láser de la porción de la composición de aleación en forma de polvo; y enfriar la porción de la composición de aleación en forma de polvo a una velocidad mayor o igual a aproximadamente  $10^6$  °C por segundo, para así formar la aleación de aluminio metálico reforzada por dispersión. El método está particularmente adaptado para una aleación que tenga una composición según la siguiente fórmula:  $Al_{comp}Fe_aSi_bX_c$ , en donde X representa al menos un elemento seleccionado del grupo que consiste en Mn, V, Cr, Mo, W, Nb y Ta; “a” varía del 2,0 al 7,5 % en átomos; “b” varía del 0,5 al 3,0 % en átomos; “c” varía del 0,05 al 3,5 % en átomos; y el resto es aluminio e impurezas accidentales, siempre que la relación  $[Fe+Si]/Si$  se sitúe dentro del rango de aproximadamente 2,0:1 a 5,0:1.

La solicitud de patente US-2017/0211168 describe un proceso para fabricar una aleación ligera y resistente, con altas prestaciones a altas temperaturas, que comprende aluminio, silicio, hierro y/o níquel.

La solicitud de patente EP3026135 describe una aleación de fundición que comprende de 87 a 99 partes en peso de aluminio y silicio, de 0,25 a 0,4 partes en peso de cobre, y de 0,15 a 0,35 partes en peso de una combinación de al menos dos elementos de Mg, Ni y Ti. Esta aleación de fundición está adaptada para atomizarse mediante un gas inerte para formar un polvo, utilizándose el polvo para formar un objeto mediante fabricación aditiva por láser, siendo el objeto posteriormente sometido a un tratamiento de revenido.

La publicación “Characterization of Al–Fe–V–Si heat-resistant aluminum alloy components fabricated by selective laser melting”, Journal of Material Research, vol. 30, n.º 10, 28 de mayo de 2015, describe la fabricación por SLM de componentes resistentes al calor con una composición, en % en peso, de Al–8,5Fe–1,3V–1,7Si.

5 La publicación “Microstructure and mechanical properties of Al-Fe-V-Si aluminum alloy produced by electron beam melting”, Materials Science & Engineering A659(2016), 207–214, describe partes de la misma aleación que en el artículo anterior obtenidas por EBM.

10 Existe una creciente demanda de aleaciones de aluminio de alta resistencia para la aplicación de SLM. Las aleaciones 4xxx (esencialmente, Al10SiMg, Al7SiMg y Al12Si) son las aleaciones de aluminio más maduras para la aplicación de SLM. Estas aleaciones ofrecen una muy buena idoneidad para el proceso SLM, pero adolecen de propiedades mecánicas limitadas.

15 Scalmalloy® (DE102007018123A1), desarrollado por APWorks, ofrece (con un tratamiento térmico post-fabricación de 4 horas a 325 °C) buenas propiedades mecánicas a temperatura ambiente. Sin embargo, esta solución adolece de un elevado coste en forma de polvo ligado a su elevado contenido de escandio (~0,7 % de Sc) y a la necesidad de un proceso de atomización específico. Esta solución también adolece de malas propiedades mecánicas a altas temperaturas, por ejemplo, superiores a 150 °C.

20 Addalloy™, desarrollado por NanoAl (WO201800935A1), es una aleación de Al Mg Zr. Esta aleación adolece de propiedades mecánicas limitadas con un pico de dureza de aproximadamente 130 HV.

25 Las propiedades mecánicas de las piezas de aluminio obtenidas mediante fabricación aditiva dependen de la aleación que forme el metal de aporte, y más concretamente de su composición, de los parámetros del proceso de fabricación aditiva, así como de los tratamientos térmicos aplicados.

30 Se conoce, por ejemplo, una aleación del tipo 7xxx descrita en el documento CN 108 330 344 A, que tiene la siguiente composición, en porcentajes en masa: 0,1-6,0 % de Si; 0-6,0 % de Fe; 1,2-6,0 % de Cu; 0,1-6,3 % de Mn; 2,1-6,9 % de Mg; 0,18-0,68 % de Cr; 5,1-10,1 % de Zn; 0-6,2 % de Ti; 0-6,0 % de Zr; 0-1 % de Sc; siendo el resto aluminio.

35 Los inventores determinaron una composición de aleación que, utilizada en un proceso de fabricación aditiva, permite obtener piezas con características notables. En particular, las piezas obtenidas según la presente invención presentan características mejoradas con respecto a la técnica anterior (en particular, una aleación 8009), en particular en términos de dureza en caliente (por ejemplo, después de 1 hora a 400 °C).

### Descripción de la invención

40 La invención se refiere, en primer lugar, a un procedimiento para fabricar una pieza, que comprende la formación de capas metálicas sólidas sucesivas, que están superpuestas unas sobre otras, describiendo cada capa un motivo definido utilizando un modelo digital, formándose cada capa mediante deposición de un metal, denominado metal de aporte, sometándose el metal de aporte a un suministro de energía para fundirse, y constituir, al solidificarse, dicha capa, en donde el metal de aporte adquiere la forma de un polvo, cuya exposición a un haz de energía produce una fusión seguida de una solidificación, para formar una capa sólida, caracterizándose el proceso en que el metal de aporte es una aleación de aluminio que comprende al menos los siguientes elementos de aleación:

45 - Fe, según una fracción másica del 1 al 10 %, preferiblemente del 2 al 8 %, más preferiblemente del 2 al 5 %, aún más preferiblemente del 2 al 3,5 %;

50 - Cr, según una fracción másica del 1 % al 10 %, preferiblemente del 2 al 7 %, más preferiblemente del 2 al 4 %;

55 - opcionalmente, Zr y/o Hf y/o Er y/o Sc y/o Ti, preferiblemente Zr, según una fracción másica de hasta el 4 %, preferiblemente del 0,5 al 4 %, más preferiblemente del 1 al 3 %, incluso más preferiblemente del 1 al 2 % cada uno, y según una fracción másica, inferior o igual al 4 %, preferiblemente inferior o igual al 3 %, más preferiblemente inferior o igual al 2 % en total;

- Si, según una fracción másica, inferior o igual al 1 %, preferiblemente inferior o igual al 0,5 %.

Cabe señalar que la aleación según la presente invención también puede comprender:

60 - impurezas, según una fracción másica inferior al 0,05 % cada una (es decir, 500 ppm), e inferior al 0,15 % en total;

- siendo el resto aluminio.

65 Preferiblemente, la aleación según la presente invención comprende una fracción másica de al menos el 85 %, más preferiblemente de al menos el 90 %, de aluminio.

## ES 2 987 415 T3

La fusión del polvo puede ser parcial o completa. Preferiblemente, del 50 al 100 % del metal expuesto se funde, más preferiblemente del 80 al 100 %.

Opcionalmente, la aleación también puede comprender al menos un elemento seleccionado de: W, Nb, Ta, Y, Yb, Nd, Mn, Ce, Co, La, Cu, Ni, Mo y/o mischmetal, según una fracción másica inferior o igual al 5 %, preferiblemente inferior o igual al 3 % cada uno, e inferior o igual al 15 %, preferiblemente inferior o igual al 12 %, incluso más preferiblemente inferior o igual al 5 % en total. Sin embargo, en una realización, se evita la adición de Sc, siendo la fracción másica preferida de Sc inferior al 0,05 %, y preferiblemente inferior al 0,01 %. Estos elementos pueden provocar la formación de dispersoides o fases intermetálicas finas, permitiendo aumentar la dureza del material obtenido.

De un modo conocido por un experto en la técnica, la composición del mischmetal es generalmente de aproximadamente el 45 al 50 % de cerio, el 25 % de lantano, del 15 al 20 % de neodimio, y el 5 % de praseodimio.

Preferiblemente, la aleación de aluminio no comprende Cu y/o Ce y/o mischmetal y/o Co y/o La y/o Mn y/o Si y/o V.

Opcionalmente, la aleación también puede comprender al menos un elemento seleccionado de: Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In y/o Sn, según una fracción másica inferior o igual al 1 %, preferiblemente inferior o igual al 0,1 %, aún más preferiblemente inferior o igual a 700 ppm cada uno, e inferior o igual al 2 %, preferiblemente inferior o igual al 1 % en total. Sin embargo, en una realización, se evita la adición de Bi, siendo la fracción másica preferida de Bi inferior al 0,05 %, y preferiblemente inferior al 0,01 %.

Opcionalmente, la aleación también puede comprender al menos un elemento seleccionado de: Ag, según una fracción másica del 0,06 al 1 %, Li, según una fracción másica del 0,06 al 1 %, y/o Zn, según una fracción másica del 0,06 al 6 %, preferiblemente del 0,06 al 0,5 %. Estos elementos pueden actuar sobre la resistencia del material por endurecimiento por precipitación, o por el efecto de este sobre las propiedades de la solución sólida. Según una realización alternativa de la presente invención, no hay adición voluntaria de Zn, particularmente debido al hecho de que se evapora durante el proceso SLM.

Según una realización alternativa de la presente invención, la aleación no es una aleación de tipo AA7xxx.

Opcionalmente, la aleación también puede comprender Mg, según una fracción másica de al menos el 0,06 % y como máximo del 0,5 %. Sin embargo, no se recomienda la adición de Mg, y es preferible mantener el contenido de Mg por debajo de un valor de impureza del 0,05 % en masa.

Opcionalmente, la aleación también puede comprender al menos un elemento para refinar los granos y evitar una microestructura columnar gruesa, por ejemplo, AlTiC o AlTiB<sub>2</sub> (por ejemplo, en forma AT5B o AT3B), según una cantidad inferior o igual a 50 kg/tonelada, preferiblemente inferior o igual a 20 kg/tonelada, incluso más preferiblemente inferior o igual a 12 kg/tonelada cada uno, e inferior o igual a 50 kg/tonelada, preferiblemente inferior o igual a 20 kg/tonelada en total.

Según una realización, el proceso puede comprender, tras la formación de las capas:

- un tratamiento térmico en solución seguido de un temple y un revenido, o
- un tratamiento térmico normalmente a una temperatura de al menos 100 °C y como máximo 400 °C
- y/o una compresión isostática en caliente (HIC).

El tratamiento térmico puede significativamente dimensionar las tensiones residuales y/o la precipitación adicional de las fases de endurecimiento.

El tratamiento de HIC puede permitir en particular mejorar las propiedades de alargamiento y las propiedades de fatiga. La compresión isostática en caliente puede llevarse a cabo antes, después o en lugar del tratamiento térmico.

De forma ventajosa, la compresión isostática en caliente se lleva a cabo a una temperatura de 250 °C a 550 °C, y preferiblemente de 300 °C a 450 °C, a una presión de 500 a 3000 bar y durante un periodo de 0,5 a 10 horas.

El tratamiento térmico y/o la compresión isostática en caliente permiten en particular aumentar la dureza del producto obtenido.

Según una realización adicional, adaptada a aleaciones de endurecimiento estructural, se puede llevar a cabo un tratamiento térmico en solución seguido de un temple y un revenido de la pieza formada y/o una compresión isostática en caliente. En este caso, la compresión isostática en caliente puede reemplazar ventajosamente el tratamiento térmico en solución. Sin embargo, el proceso según la invención es ventajoso, ya que preferiblemente no requiere un tratamiento térmico en solución seguido de un temple. El tratamiento térmico en solución puede tener un efecto

perjudicial sobre la resistencia mecánica en algunos casos, al contribuir al crecimiento de dispersoides o fases intermetálicas finas.

5 Según una realización, el método según la presente invención también incluye, opcionalmente, un tratamiento de mecanizado, y/o un tratamiento superficial químico, electroquímico o mecánico, y/o un triboacabado. En particular, estos tratamientos pueden llevarse a cabo para reducir la rugosidad y/o mejorar la resistencia a la corrosión y/o mejorar la resistencia a la iniciación de agrietamiento por fatiga.

10 Opcionalmente, es posible llevar a cabo una deformación mecánica de la pieza, por ejemplo, después de la fabricación aditiva y/o antes del tratamiento térmico.

La invención se refiere, en segundo lugar, a una pieza metálica, obtenida con un procedimiento según el primer objeto de la invención.

15 La invención se refiere, en tercer lugar, a un polvo que comprende, preferiblemente consiste en, una aleación de aluminio que comprende al menos los siguientes elementos de aleación:

20 - Fe, según una fracción másica del 1 al 10 %, preferiblemente del 2 al 8 %, más preferiblemente del 2 al 5 %, aún más preferiblemente del 2 al 3,5 %;

- Cr, según una fracción másica del 1 % al 10 %, preferiblemente del 2 al 7 %, más preferiblemente del 2 al 4 %;

25 - opcionalmente, Zr y/o Hf y/o Er y/o Sc y/o Ti, preferiblemente Zr, según una fracción másica de hasta el 4 %, preferiblemente del 0,5 al 4 %, más preferiblemente del 1 al 3 %, incluso más preferiblemente del 1 al 2 % cada uno, y según una fracción másica, inferior o igual al 4 %, preferiblemente inferior o igual al 3 %, más preferiblemente inferior o igual al 2 % en total;

- Si, según una fracción másica, inferior o igual al 1 %, preferiblemente inferior o igual al 0,5 %.

30 Cabe señalar que la aleación de aluminio del polvo según la presente invención también puede comprender:

- impurezas, según una fracción másica inferior al 0,05 % cada una (es decir, 500 ppm), e inferior al 0,15 % en total;

- siendo el resto aluminio.

35 Preferiblemente, la aleación del polvo según la presente invención comprende una fracción másica de al menos el 85 %, más preferiblemente de al menos el 90 %, de aluminio.

40 La aleación de aluminio del polvo según la presente invención también puede comprender:

45 • opcionalmente, al menos un elemento seleccionado de: W, Nb, Ta, Y, Yb, Nd, Mn, Ce, Co, La, Cu, Ni, Mo y/o mischmetal, según una fracción másica inferior o igual al 5 %, preferiblemente inferior o igual al 3 % cada uno, e inferior o igual al 15 %, preferiblemente inferior o igual al 12 %, incluso más preferiblemente inferior o igual al 5 % en total. Sin embargo, en una realización, se evita la adición de Sc, siendo la fracción másica preferida de Sc inferior al 0,05 %, y preferiblemente inferior al 0,01 %; y/o

50 • opcionalmente, al menos un elemento seleccionado de: Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In y/o Sn, según una fracción másica inferior o igual al 1 %, preferiblemente inferior o igual al 0,1 %, aún más preferiblemente inferior o igual a 700 ppm cada uno, e inferior o igual al 2 %, preferiblemente inferior o igual al 1 % en total. Sin embargo, en una realización, se evita la adición de Bi, siendo entonces la fracción másica preferida de Bi inferior al 0,05 %, y preferiblemente inferior al 0,01 %; y/o

55 • opcionalmente, al menos un elemento seleccionado de: Ag, según una fracción másica del 0,06 al 1 %, Li, según una fracción másica del 0,06 al 1 %, y/o Zn, según una fracción másica del 0,06 al 6 %, preferiblemente del 0,06 al 0,5 %. Según una realización alternativa de la presente invención, no hay adición voluntaria de Zn, particularmente debido al hecho de que se evapora durante el proceso SLM. Según una realización alternativa de la presente invención, la aleación no es una aleación de tipo AA7xxx; y/o

60 • opcionalmente, Mg, según una fracción másica de al menos el 0,06 % y como máximo el 0,5 %. Sin embargo, no se recomienda la adición de Mg, y es preferible mantener el contenido de Mg por debajo de un valor de impureza del 0,05 % en masa; y/o

65 • opcionalmente, al menos un elemento seleccionado para refinar los granos y evitar una microestructura columnar gruesa, por ejemplo, AlTiC o AlTiB<sub>2</sub> (por ejemplo, en forma AT5B o AT3B), según una cantidad inferior o igual a 50 kg/tonelada, preferiblemente inferior o igual a 20 kg/tonelada, incluso más preferiblemente inferior o igual a 12 kg/tonelada cada uno, e inferior o igual a 50 kg/tonelada, preferiblemente inferior o igual a 20 kg/tonelada en total.

Preferiblemente, la aleación de aluminio del polvo según la presente invención no comprende Cu y/o Ce y/o mischmetal y/o Co y/o La y/o Mn y/o Si y/o V.

- 5 Otras ventajas y características se pondrán de manifiesto más claramente a partir de la siguiente descripción y de los ejemplos no limitativos, representados en las figuras que se enumeran a continuación.

**Figuras**

10 La Figura 1 es un diagrama que muestra un proceso de fabricación aditiva tipo SLM o EBM.

La Figura 2 muestra una micrografía de una sección transversal de una muestra de Al10Si0,3Mg después de escanear la superficie con un láser, cortada y pulida con dos impresiones de dureza Knoop en la capa refundida.

15 La Figura 3 es un diagrama de la probeta cilíndrica de prueba tipo TOR4 utilizada según los ejemplos.

**Descripción detallada de la invención**

En la descripción, salvo que se indique lo contrario:

- 20
- las aleaciones de aluminio se designan según la nomenclatura establecida por *The Aluminum Association*;
  - el contenido del elemento químico se designa como un porcentaje y representa fracciones másicas.

25 La impureza denota elementos químicos presentes de forma involuntaria en la aleación.

La Figura 1 describe en general una realización, en donde se utiliza el proceso de fabricación aditiva según la invención. Según este procedimiento, el material 25 de aporte se presenta en forma de un polvo de aleación según la invención. Una fuente de energía, por ejemplo, una fuente de láser o una fuente 31 de electrones, emite un haz de energía, por ejemplo, un haz láser o un haz 32 de electrones. La fuente de energía se acopla al material de aporte mediante un sistema 33 de lentes óptico o electromagnético, pudiendo así determinarse el movimiento del haz según un modelo digital *M*. El haz 32 de energía sigue un movimiento a lo largo del plano longitudinal XY, describiendo un patrón dependiente del modelo digital *M*. El polvo 25 se deposita sobre un soporte 10. La interacción del haz 32 de energía con el polvo 25 induce una fusión selectiva del mismo, seguida de una solidificación, dando como resultado la formación de una capa 20<sub>1</sub>...20<sub>n</sub>. Cuando se haya formado una capa, se cubre con polvo 25 de metal de aporte y se forma otra capa, superpuesta a la producida anteriormente. El espesor del polvo que forma una capa puede ser, por ejemplo, de 10 a 100 μm. Este modo de fabricación aditiva se conoce típicamente como fusión selectiva por láser (SLM) cuando el haz de energía es un haz láser, ejecutándose ventajosamente el proceso en este caso a presión atmosférica, y como fusión por haz de electrones (EBM) cuando el haz de energía es un haz de electrones, ejecutándose ventajosamente el proceso en este caso a presión reducida, normalmente menos de 0,01 bar y preferiblemente menos de 0,1 mbar.

En otra realización, la capa se obtiene mediante sinterización selectiva por láser (SLS) o sinterización directa de metales por láser (DMLS), sinterizándose de forma selectiva la capa de polvo de aleación según la invención según el modelo digital seleccionado con energía térmica suministrada por un haz láser.

En otra realización adicional no descrita en la Figura 1, el polvo simultáneamente se rocía y se funde mediante un haz generalmente láser. Este proceso se conoce como deposición por fusión láser.

50 Se pueden utilizar otros procesos, en particular los conocidos como deposición de energía directa (DED, por sus siglas en inglés), deposición de metales directa (DMD, por sus siglas en inglés), deposición directa con láser (DLD, por sus siglas en inglés), tecnología de deposición por láser (LDT, por sus siglas en inglés), deposición de metales por láser (LMD, por sus siglas en inglés), conformación de redes de ingeniería con láser (LENS, por sus siglas en inglés), tecnología de adición por láser (LCT, por sus siglas en inglés) o tecnología de fabricación con láser de forma libre (LFMT, por sus siglas en inglés).

En una realización, el procedimiento según la invención se utiliza para producir una pieza híbrida que comprende una porción obtenida utilizando procesos convencionales de laminado y/o extrusión y/o fundición y/o forjado, opcionalmente seguidos de mecanizado, y una porción conectada rígidamente obtenida mediante fabricación aditiva. Esta realización también puede ser adecuada para reparar piezas obtenidas mediante procesos convencionales.

También es posible, en una realización de la invención, utilizar el procedimiento según la invención para reparar piezas obtenidas por fabricación aditiva.

65 Tras la formación de las capas sucesivas, se obtiene una pieza sin mecanizar o una pieza en estado de fabricación.

Las piezas metálicas obtenidas con el procedimiento según la invención son particularmente ventajosas, ya que presentan una dureza en un estado de fabricación inferior a la de una referencia hecha de 8009 y, al mismo tiempo, una dureza después de un tratamiento térmico superior a la de una referencia hecha de 8009. De este modo, a diferencia de las aleaciones según la técnica anterior, tal como la aleación 8009, la dureza de las aleaciones según la presente invención aumenta entre el estado de fabricación y el estado después de un tratamiento térmico. Se considera que la menor dureza en estado de fabricación según la presente invención con respecto a una aleación 8009, es ventajosa para la idoneidad para el proceso SLM, al inducir un menor nivel de tensión durante la fabricación por SLM y, por lo tanto, una menor susceptibilidad al agrietamiento en caliente. La mayor dureza después de un tratamiento térmico (por ejemplo, 1 hora a 400 °C) de las aleaciones según la presente invención con respecto a una aleación 8009, proporciona una estabilidad térmica superior. El tratamiento térmico podría ser un paso de compresión isostática en caliente (HIC) posterior a la fabricación por SLM. De este modo, las aleaciones según la presente invención son más blandas en estado de fabricación, pero tienen una dureza superior después del tratamiento térmico; por lo tanto, propiedades mecánicas superiores para las piezas en uso.

La dureza Knoop HK0.05 (con una carga de 50 g, según la norma ASTM E384 de junio de 2017) en estado de fabricación, de las piezas metálicas obtenidas según la presente invención, es preferiblemente de 150 a 300 HK, más preferiblemente de 160 a 260 HK. Preferiblemente, la dureza Knoop HK0.05 de las piezas metálicas obtenidas según la presente invención, después de un tratamiento térmico de al menos 100 °C y como máximo 550 °C y/o una compresión isostática en caliente, por ejemplo, después de 1 hora a 400 °C, es de 160 a 310 HK, más preferiblemente de 170 a 280 HK. El protocolo de medición de dureza Knoop se describe en los ejemplos siguientes.

El polvo según la presente invención puede tener al menos una de las siguientes características:

- tamaño de partícula promedio de 5 a 100 µm, preferiblemente de 5 a 25 µm, o de 20 a 60 µm. Los valores dados significan que al menos el 80 % de las partículas tienen un tamaño promedio dentro del intervalo especificado;
- forma esférica. La esfericidad de un polvo puede determinarse, por ejemplo, utilizando un morfogranulómetro;
- buena colabilidad. La colabilidad de un polvo puede determinarse, por ejemplo, según la norma ASTM B213 o la norma ISO 4490:2018. Según la norma ISO 4490:2018, el tiempo de flujo es preferiblemente inferior a 50 segundos;
- baja porosidad, preferiblemente del 0 al 5 %, más preferiblemente del 0 al 2 %, aun más preferiblemente del 0 al 1 % en volumen. La porosidad puede determinarse en particular mediante microscopía electrónica de barrido o mediante picnometría de helio (véase la norma ASTM B923);
- ausencia o pequeña cantidad (menos del 10 %, preferiblemente menos del 5 % en volumen) de partículas pequeñas (del 1 al 20 % del tamaño promedio del polvo), denominadas satélites, que se adhieren a las partículas más grandes.

El polvo según la presente invención puede obtenerse con procesos de atomización convencionales utilizando una aleación según la invención en forma líquida o sólida o, alternativamente, el polvo puede obtenerse mezclando polvos primarios antes de la exposición al haz de energía, teniendo las diferentes composiciones de los polvos primarios una composición promedio correspondiente a la composición de la aleación según la invención.

También es posible añadir partículas infusibles, no solubles, por ejemplo, óxidos o partículas de TiB<sub>2</sub> o partículas de carbono, en el baño antes de atomizar el polvo y/o durante la deposición del polvo y/o durante la mezcla de los polvos primarios. Estas partículas pueden servir para refinar la microestructura. También pueden servir para endurecer la aleación si son de tamaño nanométrico. Estas partículas pueden estar presentes según una fracción de volumen inferior al 30 %, preferiblemente inferior al 20 %, más preferiblemente inferior al 10 %.

El polvo según la presente invención puede obtenerse, por ejemplo, mediante atomización por chorro de gas, atomización por plasma, atomización por chorro de agua, atomización ultrasónica, atomización centrífuga, electrólisis y esferoidización, o molienda y esferoidización.

Preferiblemente, el polvo según la presente invención se obtiene mediante atomización por chorro de gas. El proceso de atomización por chorro de gas comienza con la colada de un metal fundido a través de una boquilla. A continuación, al metal fundido llegan chorros de gas inerte, tal como nitrógeno o argón, y se atomiza en gotas muy pequeñas que se enfrían y solidifican al caer dentro de una torre de atomización. A continuación, los polvos se recogen en una lata. El proceso de atomización por chorro de gas tiene la ventaja de producir un polvo con forma esférica, a diferencia de la atomización por chorro de agua que produce un polvo con una forma irregular. Una ventaja adicional de la atomización por chorro de gas es la buena densidad del polvo, en particular gracias a la forma esférica y a la distribución del tamaño de partículas. Una ventaja adicional de este proceso es una buena reproducibilidad de la distribución del tamaño de partículas.

Después de su fabricación, el polvo según la presente invención puede secarse en horno, en particular con el fin de reducir su humedad. El polvo también puede envasarse y almacenarse entre su fabricación y su uso.

El polvo según la presente invención se puede utilizar en particular en las siguientes aplicaciones:

- 5 - Sinterización selectiva por láser (o SLS);
- Sinterización directa de metales por láser (o DMLS);
- 10 - Sinterización selectiva por calor (o SHS);
- Fusión selectiva por láser (o SLM);
- Fusión por haz de electrones (o EBM);
- 15 - Deposición de fusión por láser;
- Deposición de energía directa (o DED);
- 20 - Deposición de metales directa (o DMD);
- Deposición directa con láser (o DLD);
- Tecnología de deposición por láser (o LDT);
- 25 - Conformación de redes de ingeniería con láser (o LENS);
- Tecnología de adición por láser (o LCT);
- 30 - Tecnología de fabricación con láser de forma libre (o LFMT);
- Deposición de metales por láser (o LMD);
- Consolidación por pulverización en frío (o CSC);
- 35 - Agitación por fricción aditiva (o AFS);
- Tecnología de sinterización asistida por campo (FAST) o sinterización por plasma de chispa; o
- 40 - Soldadura por fricción rotativa por inercia (o IRFW).

La invención se describirá con más detalle en el ejemplo siguiente.

45 La invención no se limita a las realizaciones descritas en la descripción anterior o en los ejemplos siguientes, y puede variar ampliamente dentro del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas a la presente descripción.

**Ejemplos**

50 Ejemplo 1

Tres aleaciones según la presente invención, denominadas Innov1, Innov2 e Innov3, y una aleación 8009 según la técnica anterior, se fundieron en un molde de cobre utilizando una máquina Induthem VC 650V, para obtener lingotes de 130 mm de alto, 95 mm de ancho y 5 mm de espesor. La composición de las aleaciones se da como porcentaje de fracción másica en la Tabla 1 a continuación.

Tabla 1

Aleaciones	Si	Fe	V	Cr	Zr
Referencia (8009)	1,8	8,65	1,3	-	-
Innov1	-	7	-	6	-
Innov2	-	3	-	3,4	-
Innov3	-	3,1	-	2,7	2,4

Las aleaciones descritas en la Tabla 1 anterior se probaron utilizando un método de creación rápida de prototipos. Las muestras se mecanizaron mediante el escaneo de la superficie con un láser, en forma de tiras de unas dimensiones de 60 x 22 x 3 mm, a partir de los lingotes obtenidos anteriormente.

5 Las tiras se colocaron en una máquina de SLM, y se realizó escaneo de superficie con un láser, siguiendo la misma estrategia de escaneo y condiciones de proceso representativas de las utilizadas para el proceso SLM. De hecho, se observó que de esta manera era posible evaluar la idoneidad de las aleaciones para el proceso SLM y, en particular, la calidad de la superficie, la susceptibilidad al agrietamiento en caliente, la dureza en el estado no mecanizado, y la dureza después del tratamiento térmico.

10 Bajo el haz láser, el metal se funde en un baño de 10 a 350 µm de grosor. Después de escanear con un láser, el metal se enfría rápidamente, como en el proceso SLM. Después del escaneo láser, una capa superficial fina de 10 a 350 µm de grosor, se fundió y posteriormente solidificó. Las propiedades del metal de esta capa son similares a las propiedades del metal en el núcleo de una pieza fabricada por SLM, ya que los parámetros de escaneado se seleccionan cuidadosamente. 15 El escaneo láser de la superficie de las diversas muestras se realizó utilizando una máquina ProX300 de fusión selectiva por láser de la marca 3DSystems. La fuente de láser tenía una potencia de 250 W, la desviación del vector era de 60 µm, la velocidad de escaneo era de 300 mm/s, y el diámetro del haz era de 80 µm.

20 **Medición de dureza Knoop**

La dureza es una propiedad importante de las aleaciones. De hecho, si es alta la dureza de la capa refundida al escanear la superficie con un láser, una pieza fabricada con la misma aleación probablemente tendría una alta resistencia a la tracción.

25 Para evaluar la dureza de la capa refundida, las tiras obtenidas anteriormente se cortaron en el plano perpendicular a la dirección de los pasos del láser, y luego se pulieron. Después del pulido, se tomaron medidas de dureza en la capa refundida. La medición de la dureza se realizó utilizando un aparato modelo Struers Durascan. Se seleccionó el método de dureza Knoop HK0.05 con la principal diagonal de la impresión colocada paralela al plano de la capa refundida, para mantener una distancia suficiente entre la impresión y el borde de la muestra. Se colocaron 15 impresiones en el espesor medio de la capa refundida. La Figura 2 muestra un ejemplo de la medición de la dureza. La referencia 1 30 corresponde a la capa refundida y la referencia 2 corresponde a una impresión de dureza Knoop.

La dureza se midió según la escala Knoop HK0.05 con una carga de 50 g después del tratamiento con láser (en el estado no mecanizado), y después de un tratamiento térmico adicional a 400 °C a duraciones variables, permitiendo 35 evaluar en particular la templabilidad de la aleación durante un tratamiento térmico, y el efecto de un posible tratamiento HIC en las propiedades mecánicas.

Los valores de dureza Knoop HK0.05 en estado no mecanizado y después de varias duraciones a 400 °C, se dan en la Tabla 2 a continuación (HK0.05).

40 Tabla 2

Aleación	Estado no mecanizado	Después de 1 h a 400 °C	Después de 4 h a 400 °C	Después de 10 h a 400 °C
Referencia (8009)	316	145	159	155
Innov1	206	200	188	171
Innov2	215	202	170	142
Innov3	223	232	211	207

50 Las aleaciones según la presente invención (Innov1 a Innov3) mostraron una dureza Knoop HK0.05 en el estado no mecanizado menor que la de la aleación 8009 de referencia, pero, después de un tratamiento térmico a 400 °C, mayor que la de la aleación 8009 de referencia.

55 La Tabla 2 anterior muestra claramente la estabilidad térmica superior de las aleaciones según la presente invención con respecto a la aleación 8009 de referencia. De hecho, la dureza de la aleación 8009 disminuyó significativamente desde el inicio del tratamiento térmico, para luego alcanzar una meseta. Por otra parte, la dureza de las aleaciones según la presente invención disminuyó progresivamente.

60 La comparación de Innov2 e Innov3, cuya única diferencia es la adición de Zr, muestra el efecto ventajoso de añadir Zr, que permite mejorar las propiedades después del tratamiento térmico.

Ejemplo 2

65 Se preparó una aleación según la presente invención con la composición que se presenta en la Tabla 3 a continuación, en porcentajes de masa.

Tabla 3

Aleación	Fe	Cr	Zr
Innov4	3	2,8	2

Se atomizaron con éxito 5 kg de polvo de aleación utilizando un atomizador VIGA (del inglés “Vacuum Inert Gas Atomization”; atomización con gas inerte al vacío). El polvo se utilizó con éxito en una máquina de fusión selectiva por láser modelo FormUp 350, para producir piezas en bruto de probetas para pruebas de tracción. Los ensayos se llevaron a cabo con los siguientes parámetros: espesor de capa: 60 µm, potencia del láser: 370 W, desviación vectorial: 0,13 mm, velocidad del láser: 1000 mm/s. La losa de construcción se calentó a una temperatura de 200 °C (sin estar limitados por la teoría, parecería que calentar la losa de 50 °C a 300 °C es beneficioso para reducir las tensiones residuales y el agrietamiento de origen térmico en las piezas producidas).

Las piezas en bruto para las mediciones fueron cilíndricas con una altura de 45 mm y un diámetro de 11 mm para las pruebas de tracción en la dirección de fabricación (dirección Z). Las piezas en bruto se sometieron a un tratamiento térmico de alivio de tensiones durante 2 horas a 300 °C. Algunas piezas en bruto se mantuvieron en el estado de alivio de tensiones y otras piezas en bruto se sometieron a un tratamiento adicional de 1 hora a 400 °C (recocido de endurecimiento).

Se mecanizaron probetas cilíndricas de prueba tipo TOR4 con las características descritas a continuación en mm (ver Tabla 4 y Figura 3) utilizando las piezas en bruto descritas anteriormente.

Tabla 4

Tipo	Ø	M	LT	R	Lc	F
TOR 4	4	8	45	3	22	8,7

En la Figura 3 y en la Tabla 4, Ø representa el diámetro de la parte central de la probeta de prueba, M la anchura de los dos extremos de la probeta de prueba, LT la longitud total de la probeta de prueba, R el radio de curvatura entre la parte central y los extremos de la probeta de prueba, Lc la longitud de la parte central de la probeta de prueba, y F la longitud de los dos extremos de la probeta de prueba.

Las pruebas de tracción se llevaron a cabo a temperatura ambiente según las normas NF EN ISO 6892-1 (2009-10) y ASTM E8-E8M-13a (2013). Los resultados obtenidos en cuanto a propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 5 a continuación.

Tabla 5

Dirección	Tratamiento térmico	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A %
Z	Estado de alivio de tensiones (2 h a 300 °C)	342	387	10,4
Z	Después del recocido de endurecimiento (1 h a 400 °C)	437	461	5,4

Según la Tabla 5 anterior, el recocido de endurecimiento dio como resultado un aumento significativo de la resistencia mecánica con respecto al estado no mecanizado, asociado a una reducción en el alargamiento. La aleación según la presente invención permite, por tanto, evitar un tratamiento térmico en solución convencional/tratamiento térmico del tipo temple.

## REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para fabricar una pieza, que comprende la formación de capas metálicas sólidas sucesivas (20<sub>1</sub>...20<sub>n</sub>), que se superponen unas sobre otras, describiendo cada capa un patrón definido utilizando un modelo digital (M), formándose cada capa mediante la deposición de un metal (25), denominado metal de aporte, sometiéndose el metal de aporte a un suministro de energía para fundirse, y constituir, al solidificarse, dicha capa, en donde el metal de aporte toma la forma de un polvo (25), cuya exposición a un haz (32) de energía da lugar a una fusión seguida de una solidificación, para formar una capa sólida (20<sub>1</sub>...20<sub>n</sub>), el proceso **se caracteriza por que** el metal (25) de aporte es una aleación de aluminio que comprende al menos los siguientes elementos de aleación:
- Fe, según una fracción másica del 1 al 10 %, preferiblemente del 2 al 8 %, más preferiblemente del 2 al 5 %, aún más preferiblemente del 2 al 3,5 %;
  - Cr, según una fracción másica del 1 % al 10 %, preferiblemente del 2 al 7 %, más preferiblemente del 2 al 4 %;
  - opcionalmente, Zr y/o Hf y/o Er y/o Sc y/o Ti, según una fracción másica de hasta el 4 %, preferiblemente del 0,5 al 4 %, más preferiblemente del 1 al 3 %, incluso más preferiblemente del 1 al 2 % cada uno, y según una fracción másica inferior o igual al 4 %, preferiblemente inferior o igual al 3 %, más preferiblemente inferior o igual al 2 % en total;
  - Si, según una fracción másica inferior o igual al 1 %, preferiblemente inferior o igual al 0,5 %;
  - opcionalmente, al menos un elemento seleccionado de: W, Nb, Ta, Y, Yb, Nd, Mn, Ce, Co, La, Cu, Ni, Mo y/o mischmetal, según una fracción másica inferior o igual al 5 % cada uno, e inferior o igual al 15 % en total;
  - opcionalmente, al menos un elemento seleccionado de: Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In y/o Sn, según una fracción másica inferior o igual al 1 % cada uno, e inferior o igual al 2 % en total;
  - opcionalmente, al menos un elemento seleccionado de: Ag, según una fracción másica del 0,06 al 1 %, Li, según una fracción másica del 0,06 al 1 %, y/o Zn, según una fracción másica del 0,06 al 6 %;
  - impurezas, según una fracción másica inferior al 0,05 % cada una (es decir, 500 ppm), e inferior al 0,15 % en total;
  - siendo el resto aluminio.
2. El procedimiento según la reivindicación 1, en donde la fracción másica de dicho al menos un elemento seleccionado de: W, Nb, Ta, Y, Yb, Nd, Mn, Ce, Co, La, Cu, Ni, Mo y/o mischmetal, es inferior o igual al 3 % cada uno, y preferiblemente inferior o igual al 12 %, más preferiblemente inferior o igual al 5 % en total.
3. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la aleación de aluminio no comprende Cu y/o Ce y/o mischmetal y/o Co y/o La y/o Mn y/o Si y/o V.
4. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la fracción másica de dicho al menos un elemento seleccionado de: Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In y/o Sn, es inferior o igual al 0,1 %, más preferiblemente inferior o igual a 700 ppm cada uno, y preferiblemente inferior o igual al 1 % en total.
5. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la aleación de aluminio también comprende al menos un elemento para refinar los granos, por ejemplo, AlTiC o AlTiB<sub>2</sub>, según una cantidad inferior o igual a 50 kg/tonelada, preferiblemente inferior o igual a 20 kg/tonelada, incluso más preferiblemente inferior o igual a 12 kg/tonelada cada uno, e inferior o igual a 50 kg/tonelada, preferiblemente inferior o igual a 20 kg/tonelada en total.
6. El procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende, después de la formación de las capas (20<sub>1</sub>...20<sub>n</sub>),
- un tratamiento térmico en solución seguido de un temple y un revenido, o
  - un tratamiento térmico normalmente a una temperatura de al menos 100 °C y como máximo 400 °C, y/o una compresión isostática en caliente (HIC).
7. Una pieza metálica obtenida mediante un procedimiento según una de cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
8. Un polvo que comprende, preferiblemente que consiste en, una aleación de aluminio que comprende:
- Fe, según una fracción másica del 1 al 10 %, preferiblemente del 2 al 8 %, más preferiblemente del 2 al 5 %, aún más preferiblemente del 2 al 3,5 %;
  - Cr, según una fracción másica del 1 % al 10 %, preferiblemente del 2 al 7 %, más preferiblemente del 2 al 4 %;

## ES 2 987 415 T3

- 5 -opcionalmente, Zr y/o Hf y/o Er y/o Sc y/o Ti, según una fracción másica de hasta el 4 %, preferiblemente del 0,5 al 4 %, más preferiblemente del 1 al 3 %, incluso más preferiblemente del 1 al 2 % cada uno, y según una fracción másica inferior o igual al 4 %, preferiblemente inferior o igual al 3 %, más preferiblemente inferior o igual al 2 % en total;
- Si, según una fracción másica inferior o igual al 1 %, preferiblemente inferior o igual al 0,5 %;
- opcionalmente, al menos un elemento seleccionado de: W, Nb, Ta, Y, Yb, Nd, Mn, Ce, Co, La, Cu, Ni, Mo y/o mischmetal, según una fracción másica inferior o igual al 5 % cada uno, e inferior o igual al 15 % en total;
- 10 -opcionalmente, al menos un elemento seleccionado de: Sr, Ba, Sb, Bi, Ca, P, B, In y/o Sn, según una fracción másica inferior o igual al 1 % cada uno, e inferior o igual al 2 % en total;
- opcionalmente, al menos un elemento seleccionado de: Ag, según una fracción másica del 0,06 al 1 %, Li, según una fracción másica del 0,06 al 1 %, y/o Zn, según una fracción másica del 0,06 al 6 %;
- 15 -impurezas, según una fracción másica inferior al 0,05 % cada una (es decir, 500 ppm), e inferior al 0,15 % en total;
- siendo el resto aluminio.

20

25

30

35

40

45

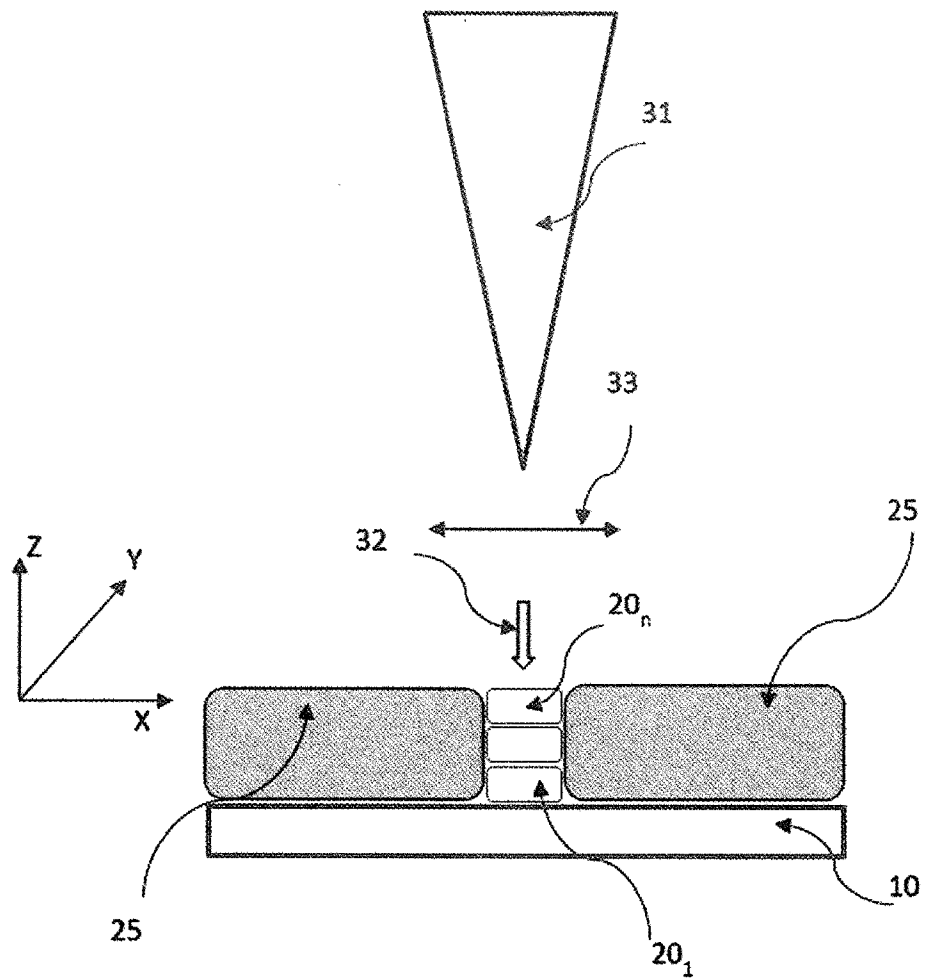
50

55

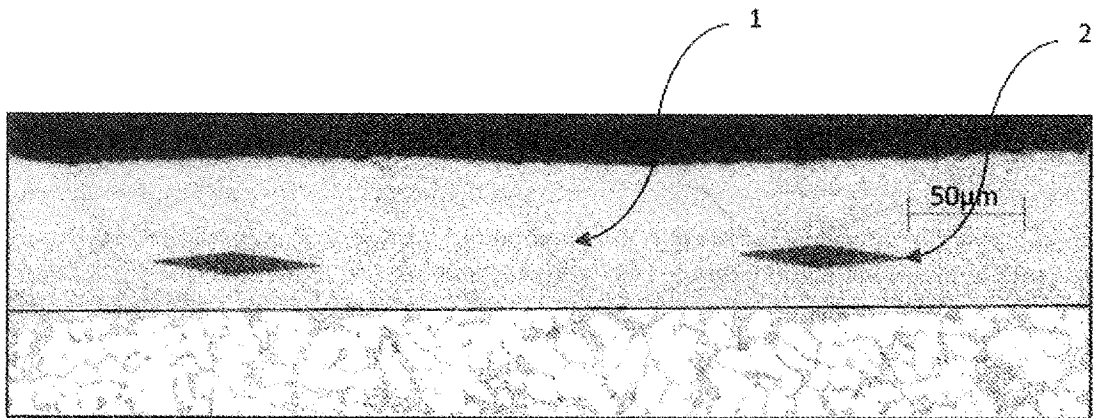
60

65

[Figura 1]



[Figura 2]



[Figura 3]

