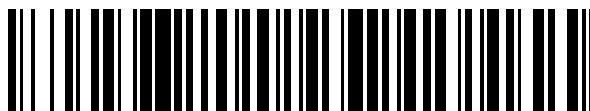


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 525 453**

51 Int. Cl.:

B22F 3/105 (2006.01)

C22C 19/05 (2006.01)

B29C 70/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **31.10.2012 E 12190766 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.10.2014 EP 2589449**

54 Título: **Un procedimiento para la producción de artículos hechos de una superaleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima mediante fusión selectiva por láser (SLM)**

30 Prioridad:

04.11.2011 CH 17762011

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

23.12.2014

73 Titular/es:

**ALSTOM TECHNOLOGY LTD (100.0%)
Brown Boveri Strasse 7
5400 Baden, CH**

72 Inventor/es:

**RICKENBACHER, LUKAS EMANUEL y
SPIERINGS, ADRIAAN BERNARDUS**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 525 453 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

Un procedimiento para la producción de artículos hechos de una superaleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima mediante fusión selectiva por láser (SLM)

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

5 La presente invención se refiere a la tecnología de producir artículos tridimensionales por medio de fusión selectiva por láser (SLM). Se refiere a un procedimiento para la producción de artículos tridimensionales densos y libres de grietas hechos de una aleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima que comprende más de 6% en peso de [dos veces una concentración de Al (% en peso) + una concentración de Ti (% en peso)], mediante fusión selectiva por láser (SLM).

10 TÉCNICA ANTERIOR

Se sabe que las superaleaciones a base de níquel reforzadas por precipitación gamma-prima (γ') con una fracción combinada de Al y Ti de alrededor de más de 5% en peso son muy difíciles de soldar debido a su sensibilidad a las microgrietas.

15 En el documento B. Geddes, H. Leon, X. Huang: Superalloys, Alloying and performance, ASM International, 2010, página 71-72, los autores describen una línea de soldadura para superaleaciones aproximadamente como [2 veces una concentración de Al (% en peso) + una concentración de Ti (% en peso)] < 6,0; esto significa que las superaleaciones a base de Ni con más de 6% en peso de [dos veces una concentración de Al (% en peso) + una concentración de Ti (% en peso)] se definen como materiales difíciles de soldar. Durante el procedimiento de soldadura se produce el agrietamiento por solidificación y por licuación en los bordes de grano, mientras que los tratamientos térmicos tras la soldadura conducen a menudo a agrietamiento por deformación del envejecimiento en aleaciones reforzadas por precipitado de $Ni_3(Al,Ti)$ gamma-prima. Por lo tanto, hasta el día de hoy se pueden procesar mediante SLM superaleaciones a base de níquel principalmente reforzadas por disolución sólida (por ejemplo IN625) o reforzadas por gamma-prima, con una pequeña cantidad de Al y Ti (por ejemplo In718).

20 En un enfoque habitual para procesar superaleaciones a base de níquel reforzadas por precipitación gamma-prima difíciles de soldar, se calienta un lecho de polvo hasta una temperatura elevada para reducir los esfuerzos residuales que resultan del procedimiento de soldadura. Pero, antes de que las partes acabadas puedan ser retiradas del lecho de polvo, se han de enfriar hasta la temperatura ambiente. Debido a la baja conductividad térmica de los lechos de polvo, el calentamiento y enfriamiento del lecho de polvo requiere mucho tiempo, dando como resultado una disminución significativa en la productividad del procedimiento de SLM. Además, se necesita un equipo de calentamiento caro, y el aislamiento así como la adaptación de la cámara del procedimiento.

La siguiente bibliografía está relacionada con estas tecnologías y problemas:

(1) Kelbassa, I., et al. Manufacture and repair of aero engine components using laser technology. En Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics. 2008.

35 (2) Mumtaz, K. y N. Hopkinson, Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting. Rapid Prototyping Journal, 2009. 15(2): p. 96 - 103.

(3) Mumtaz, K. y N. Hopkinson, Laser melting functionally graded composition of Waspaloy® and Zirconia powders. Journal of Materials Science, 2007. 42(18): p. 7647-7656.

(4) Mumtaz, K.A., P. Erasenthiran, y N. Hopkinson, High density selective laser melting of Waspaloy®. Journal of Materials Processing Technology, 2008. 195(1-3): p. 77-87.

40 (5) Sehr, J.T. y G. Witt, Entwicklung einer Verfahrenssystematik bei der Qualifizierung neuer Werkstoffe for das Strahlschmelzverfahren. 2010. Publication of trials to process difficult to weld gamma-prime precipitation-strengthened ni-base superalloys.

Además, el documento US 6.215.093 B1 describe un método para fabricar un cuerpo moldeado, según datos CAD tridimensional de un modelo de un cuerpo moldeado, depositando capas de un material metálico en forma de polvo. Varias capas de polvo se depositan sucesivamente una encima de la otra, con lo que cada capa de polvo se calienta hasta una temperatura específica por medio de un haz de láser enfocado aplicado a un área dada que corresponde a un área de sección transversal seleccionada del modelo del cuerpo moldeado, antes de la deposición de la siguiente capa. El haz de láser es guiado sobre cada capa de polvo según los datos de sección transversal de CAD del área de sección transversal seleccionada del modelo, de tal manera que cada capa de polvo se fija a la capa de debajo. Especialmente, el material metálico en forma de polvo se aplica en forma de un polvo metálico libre de aglutinantes y agentes y fundentes, que se calienta por el haz de láser hasta la temperatura de fusión, eligiéndose la energía del haz de láser de tal manera que la capa de polvo metálico se funde completamente a lo largo del punto de impacto de dicho haz de láser, siendo el haz de láser guiado a lo largo del área especificada de polvo en varias pasadas de tal manera que cada pasada del haz de láser solapa parcialmente la pasada anterior, y manteniéndose

una atmósfera de gas protector por encima de la zona de interacción del haz de láser y el polvo metálico.

5 El documento DE 10104732 C1 enseña un dispositivo para la fusión selectiva por láser de materiales metálicos, que comprende una placa de calentamiento dispuesta sobre una plataforma con paredes laterales. La placa de calentamiento está estructurada de manera que una capa aislante está térmicamente aislada de la plataforma de manera que se pueden lograr durante la operación temperaturas de 500°C. Preferiblemente, la placa de calentamiento se forma como una placa de sustrato y tiene alambres de calentamiento integrados. Se proporciona una unidad de inducción para calentar de forma inductiva la placa de calentamiento.

10 El documento US 6.621.039 B2 describe un aparato controlado por ordenador y un método para producir partes metálicas fundiendo por láser regiones seleccionadas de capas de polvo metálico en un área diana. El sistema incluye dispositivos para precalentar y mantener una temperatura relativamente elevada, por ejemplo 400°C, del polvo metálico, para unir junto el polvo metálico con láser de potencia relativamente baja, por ejemplo un láser de CO₂ de 200 W. El polvo metálico se precalienta en un cilindro dispensador o el área diana mediante conducción térmica, y/o también se calienta mediante una placa de calentamiento situada por encima de la plataforma mediante radiación.

15 En el documento de Osaka et al.: Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder”, International Journal of Machine Tool Design and Research, Pergamon Press, Oxford, GB, vol. 46, n° 11, 1 de septiembre de 2006, páginas 1188-1193, se describe un procedimiento de fusión selectiva por láser usando un láser pulsado con una potencia promedio de 50 W, una velocidad de barrido de 4-8 mm/s, un diámetro de foco de 0,75 mm y un espacio de trama de 0,75 mm para una aleación a base de níquel con la siguiente composición química: 83% de Ni, 9,4% de Cr, 1,8% de B, 2,8% de Si, 2,0% de Fe y 0,4% de C. Tal material es un buen candidato para el procedimiento de SLM. Esto también es cierto para el material (Inconel 625) descrito por Yadroitsev et al.: “Manufacturing of fine-structured 3D porous filter elements by selective laser melting” Applied Surface Science, Elsevier, Ámsterdam, NL, vol. 255, n° 10, 1 de marzo de 2009, páginas 5523-5527. Tal material con un contenido muy limitado de Al y Ti tiene una buena capacidad de soldadura.

25 **SUMARIO DE LA INVENCION**

Es un objeto de la presente invención proporcionar un procedimiento para la producción de artículos tridimensionales densos y libres de grietas hechos de una superaleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima mediante fusión selectiva por láser (SLM).

Este objeto se logra mediante un procedimiento según la reivindicación 1.

30 Según la invención, un procedimiento para la producción de artículos tridimensionales densos y libres de grietas hechos de una superaleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima, que comprende más de 6% en peso de [dos veces una concentración de Al (% en peso) + una concentración de Ti (% en peso)], mediante fusión selectiva por láser (SLM), comprende las etapas de:

- a) proporcionar un aparato de SLM con una unidad de control de SLM;
- 35 b) proporcionar un modelo tridimensional cortado en rebanadas de dicho artículo con secciones transversales calculadas, que se hace pasar a y se almacena en dicha unidad de control de SLM;
- c) preparar polvo de dicho material de aleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima, que es necesario para dicho procedimiento de SLM;
- 40 d) preparar una capa de polvo con un grosor regular y uniforme sobre una placa de sustrato de dicho aparato de SLM, o sobre una capa de polvo previamente procesada;
- e) fundir dicha capa de polvo preparada barriendo con un haz de láser enfocado un área que corresponde a una sección transversal de dicho artículo según el modelo tridimensional cortado en rebanadas almacenado en dicha unidad de control;
- f) rebajar la placa de sustrato en un grosor de una capa;
- 45 g) repetir las etapas d) a f) hasta alcanzar la última sección transversal según el modelo tridimensional cortado en rebanadas;

en el que para dicha etapa e) de fusión, la potencia del láser, el diámetro del foco del punto focal y la velocidad de barrido de dicho haz de láser enfocado se ajustan para obtener una relación de aspecto del cordón de soldadura de profundidad a anchura más pequeña que 0,5, preferiblemente entre 0,3 y 0,1 aplicando el siguiente parámetro

50	Potencia del láser:	50-150 W
	Velocidad de barrido:	80-700 mm/s

Distancia de trama:	0,01-0,5 mm
Diámetro del foco:	0,1-0,5 mm

y en el que dicho ajuste de dicho diámetro del foco se realiza usando una unidad de enfoque y desplazamiento del láser específica, o desplazando dicha placa de sustrato con una unidad de desplazamiento de placa de sustrato.

5 Según una realización de la invención, para dicha etapa e) de fusión, se usa una fuente de láser en modo pulsado, y la frecuencia del pulso se ajusta para obtener una soldadura por disipación de calor.

10 Una realización se caracteriza por que la distribución de tamaños de partículas del polvo se ajusta con respecto al grosor de la capa de polvo, de manera que conduce a una buena capacidad de fluidez y a una densidad aparente >60% necesaria para preparar capas de polvo con un grosor regular y uniforme, y para reducir los efectos de la contracción.

Especialmente, la distribución exacta de tamaños de partículas se obtiene tamizando y/o aventando (separación por aire).

Según otra realización de la invención, el polvo se obtiene mediante procedimiento de atomización por gas o de electrodo giratorio fundido por plasma.

15 Una realización adicional de la invención se caracteriza por que dicha superaleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima consiste en

3,2 - 4,2% en peso de Al

2,8 - 3,8% en peso de Ti

14,5 - 17% en peso de Cr

20 7,8 - 9,0% en peso de Co

1,2 - 1,9% en peso de Mo

2,1 - 3,5% en peso de W

1,0-2,0% en peso de Ta

0,5 - 1,5% en peso de Nb

25 <0,15 % en peso de C

<0,02% en peso de B

siendo el resto Ni e impurezas inevitables.

Según justamente otra realización de la invención, dichas etapas d) a g) se llevan a cabo en una atmósfera de gas protector.

30 Preferiblemente, dicha atmósfera de gas protector comprende nitrógeno o argón, u otro gas adecuado para establecer una atmósfera reductora.

Según otra realización de la invención, dicha placa de sustrato se enfría para eliminar el calor del proceso y reducir de ese modo el tiempo requerido para la solidificación del cordón de soldadura.

35 Según otra realización de la invención, antes de dicha etapa e) de fusión, se lleva a cabo una etapa de prefusión para fundir o presinterizar junto de forma no compacta el polvo de dicha capa de polvo, y dicha etapa e) de fusión densificará después la capa de polvo para obtener un artículo tridimensional denso.

Otra realización de la invención se caracteriza por que se aplica un post-tratamiento térmico a dicho artículo para optimizar adicionalmente la microestructura después de que se ha construido el artículo tridimensional.

Especialmente, dicho tratamiento térmico es prensado isostático en caliente (HIP).

40 BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La presente invención se explica ahora más detalladamente por medio de diferentes realizaciones y con referencia a los dibujos que se adjuntan.

Fig. 1 muestra un diagrama esquemático de un aparato de SLM para llevar a cabo el procedimiento de la invención;

- Fig. 2 muestra, en la vista detallada, los parámetros del haz de láser usados en el procedimiento según la invención;
- Fig. 3 muestra un ejemplo de una microestructura libre de grietas como resultado de un procedimiento según la invención, con cordones de soldadura claramente visibles de sección transversal o relación de profundidad a anchura adecuada, respectivamente;
- Figs. 4, 5 muestran, en comparación con la Fig. 3, cordones de soldadura con una relación de sección transversal desfavorable, que conduce a una microestructura con grietas por solidificación; y
- Fig. 6 muestra una posible distribución de tamaños de partículas de un polvo con buena capacidad de fluidez y densidad aparente.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE DIFERENTES REALIZACIONES DE LA INVENCION

Para superar las restricciones descritas anteriormente, los parámetros del procedimiento de SLM se ajustan con respecto al comportamiento único del material de las superaleaciones reforzadas por precipitación gamma-prima que permiten la fabricación de artículos tridimensionales densos y libres de grietas mediante fusión selectiva por láser sin el calentamiento del lecho de polvo o de la parte a construir. Además, se encontró que el uso de equipo específico del procedimiento mejora además la procesabilidad de estos materiales.

La descripción de la presente invención se refiere a parámetros del procedimiento especialmente ajustados y a equipo del procedimiento para producir artículos tridimensionales hechos de superaleaciones a base de níquel reforzadas por precipitación gamma-prima con una fracción combinada de [2 veces una concentración de Al + una concentración de Ti] de más de 6% en peso, usando tecnología de fusión selectiva por láser (SLM). Estas superaleaciones se refuerzan a través del tratamiento térmico controlado que produce precipitados de $Ni_3(Al, Ti)$, conocidos como gamma-prima (γ'), o Ni_3Nb , conocidos como gamma-doble-prima (γ''). Estas precipitaciones conducen a una fluencia, ruptura por esfuerzo y resistencia a la tracción superiores en comparación con la generación previa de aleaciones a base de níquel.

La invención proporciona parámetros del procedimiento y describe un equipo de procedimiento adecuado para la fusión selectiva por láser de superaleaciones reforzadas por precipitación gamma-prima que contienen titanio y aluminio en una cantidad combinada de al menos alrededor de 5% en peso, preferiblemente 6-12% en peso, que contienen cromo en una cantidad de hasta alrededor de 20% en peso, preferiblemente 7-17% en peso, dando como resultado un contenido de gamma-prima de al menos alrededor de 25%.

Estas superaleaciones también pueden contener metales tales como wolframio, molibdeno, cobalto y tántalo, y pueden contener otros elementos tales como carbono, boro, circonio y hafnio. Los ejemplos típicos de estas superaleaciones a base de níquel reforzadas por precipitación gamma-prima son: Mar-M247, IN100, IN738, IN792, Mar-M200, B1900, RENE 80, Aleación 713 y otros derivados.

Los fenómenos de endurecimiento por precipitación y los cambios volumétricos asociados facilitan el agrietamiento y hacen muy difícil la soldadura de estas superaleaciones. En particular, con la soldadura, una porción de las capas previamente procesadas (zona afectada por el calor HAZ) se calienta en el intervalo de temperaturas de endurecimiento por precipitación y sufre una contracción volumétrica dando como resultado un esfuerzo residual en la soldadura al solidificarse, acompañado de una pérdida de la ductilidad. El calentamiento y enfriamiento rápidos de las temperaturas de soldadura, que son características para el procedimiento de SLM, producen una expansión y contracción térmicas complicadas, conduciendo a un esfuerzo residual adicional. Estos esfuerzos térmicos, cuando se combinan con los esfuerzos previos que resultan de la precipitación, pueden dar como resultado un agrietamiento durante el procedimiento de soldadura. El agrietamiento se produce en el propio cordón de soldadura (agrietamiento por solidificación) o en la HAZ debido a la fusión localizada en los bordes de grano (agrietamiento por licuación en los bordes de grano). Los tratamientos térmicos post-soldadura de recocido y/o envejecimiento en disolución, que dan como resultado contracción volumétrica, pueden incrementar adicionalmente la susceptibilidad al agrietamiento (agrietamiento por deformación del envejecimiento). La dificultad en la soldadura aumenta generalmente al aumentar el contenido de aluminio y titanio.

Se ha encontrado que el procedimiento de SLM da como resultado una microestructura muy homogénea con pocas segregaciones y pequeños granos. Esto es beneficioso con respecto al agrietamiento por licuación en los bordes de grano, puesto que la sensibilidad al agrietamiento aumenta al aumentar el tamaño de los granos y el mayor contenido de segregaciones. Además, se ha encontrado que sólo existe un contenido muy pequeño de gamma-prima después del procedimiento de SLM, debido a los gradientes térmicos elevados característicos que se producen en las interacciones láser-material, evitando la precipitación controlada por difusión de las fases intermetálicas. Por lo tanto, el agrietamiento por deformación del envejecimiento durante la construcción mediante SLM se puede despreciar y, como consecuencia, principalmente el agrietamiento por solidificación es preocupante para el procedimiento de SLM.

Un amplio intervalo de solidificaciones de la aleación, segregación de impurezas que funden a baja temperatura en la línea central del cordón de soldadura, así como los esfuerzos residuales son las causas principales del

agrietamiento por solidificación. Para minimizar la influencia de las segregaciones, es beneficiosa una velocidad elevada de solidificación y por lo tanto gradientes de temperaturas elevadas. Esto se puede lograr mejor ajustando los parámetros de SLM que dan como resultado un cordón de soldadura con una relación baja de profundidad a anchura. Pero los gradientes de temperaturas elevadas conducen a un esfuerzo residual elevado y por lo tanto se ha de encontrar una geometría óptima del cordón de soldadura, mientras que la relación de profundidad a anchura debería ser tan baja como sea posible, permitiendo la fabricación mediante SLM de artículos densos y libres de grietas.

Según la presente invención, el procedimiento comprende las etapas de:

- a) proporcionar un aparato (10) de SLM con una unidad (19) de control de SLM;
- b) proporcionar un modelo tridimensional cortado en rebanadas (SM) de dicho artículo con secciones transversales calculadas, que se hace pasar a y se almacena en dicha unidad (19) de control de SLM;
- c) preparar polvo de dicho material de aleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima, que se necesita para dicho procedimiento de SLM;
- d) preparar una capa (18) de polvo con un grosor regular y uniforme sobre una placa (13) de sustrato de dicho aparato (10) de SLM, o sobre una capa de polvo procesada previamente (14);
- e) fundir dicha capa de polvo preparada (18) barriendo con un haz de láser enfocado (17) un área que corresponde a una sección transversal de dicho artículo según el modelo tridimensional cortado en rebanadas (SM) almacenado en dicha unidad (19) de control;
- f) rebajar la placa (13) de sustrato en un grosor de una capa;
- g) repetir las etapas d) a f) hasta alcanzar la última sección transversal según el modelo tridimensional cortado en rebanadas (SM);

en el que para dicha etapa e) de fusión, la potencia del láser, el diámetro (d) del foco del punto focal (20) y la velocidad de barrido de dicho haz de láser enfocado (17) se ajustan para obtener una relación de aspecto del cordón de soldadura (21) de profundidad (h) a anchura (w) más pequeña que 0,5, preferiblemente entre 0,3 y 0,1, aplicando los siguientes parámetros

Potencia del láser:	50-150 W
Velocidad de barrido:	80-700 mm/s
Distancia de trama:	0,01-0,5 mm
Diámetro del foco:	0,1-0,5 mm

y en el que dicho ajuste de dicho diámetro (d) del foco se realiza usando una unidad (16) de enfoque y desplazamiento del láser específica, o desplazando dicha placa (13) de sustrato con una unidad (12) de desplazamiento de placa de sustrato.

La Fig. 1 muestra un diagrama esquemático de un aparato de SLM para llevar a cabo el procedimiento de la invención. El aparato 10 de SLM de la Fig. 1 comprende un compartimiento 11 cerrado, que se puede rellenar con una atmósfera de gas protector, por ejemplo nitrógeno o argón. Dentro del compartimiento 11 se coloca una unidad 12 de desplazamiento de la placa de sustrato, que es capaz de desplazar en dirección vertical una placa 13 de sustrato horizontal. La unidad 12 de desplazamiento de la placa de sustrato está controlada por una unidad 19 de control central.

La placa 13 de sustrato se usa para construir un artículo tridimensional por medio de la fusión sucesiva de diversas capas 14, 18 de polvo sobre un área predeterminada según un modelo cortado en rebanadas SM, que se genera a partir del artículo a producir y se almacena en la unidad 19 de control. La placa 13 de sustrato se puede enfriar por un medio de enfriamiento que se introduce a través de una entrada 22 del medio de enfriamiento y sale de la placa 13 de sustrato a través de una salida 23 del medio de enfriamiento.

La capa 18 de polvo que está más arriba se funde por medio de un haz 17 de láser enfocado, que emana de una fuente 15 de láser y se enfoca y se desplaza por medio de una unidad 16 de enfoque y desplazamiento del haz de láser. La fuente 15 de láser y la unidad 16 de enfoque y desplazamiento del haz de láser se controlan mediante la unidad 19 de control central.

En primer lugar, la distribución de tamaño de partículas del polvo a usar se ajusta al grosor de capa de las capas 14, 18 del polvo, de manera que conduzca a una buena capacidad de fluidez y una densidad aparente elevada (preferiblemente >60%), que se requiere para preparar capas de polvo con un grosor regular y uniforme y para reducir los efectos de la contracción. Preferiblemente, las partículas de polvo tienen preferiblemente una forma

esférica. La distribución exacta de tamaños de partículas se obtiene tamizando y/o aventando (es decir, separación por aire). Es ventajoso obtener el polvo mediante procedimiento de atomización por gas o de electrodo giratorio fundido por plasma. La Fig. 6 muestra una distribución posible y ejemplar de tamaños de partículas de un polvo con buena capacidad de fluidez y densidad aparente para el procedimiento de la presente solicitud.

5 Como fuente 15 de láser para la etapa de fusión, se usa un láser en modo de onda continua o en modo pulsado. Para dicha etapa de fusión, la potencia del láser, la frecuencia de pulso, el diámetro del foco, la velocidad de barrido, la longitud del vector de barrido, la distancia de trama y el solapamiento de la isla de barrido se ajustan con respecto al material específico reforzado por precipitación gamma-prima, para permitir la fabricación de artículos tridimensionales densos y libres de grietas.

10 Preferiblemente, dicha fuente de láser tiene una baja densidad o un producto de parámetro de haz bajo (BPP).

La potencia del láser, la frecuencia del pulso, el diámetro del foco (d en la Fig. 2) y la velocidad de barrido se ajustan para obtener una relación de aspecto (profundidad h/anchura w) del cordón 21 de soldadura menor que 0,5, preferiblemente entre 0,3 y 0,1 (véase la Fig. 2). Dicho ajuste del diámetro del foco del punto focal 20 se puede realizar usando la unidad 16 de enfoque y desplazamiento del láser, o desplazando la capa de polvo desde el plano focal con la unidad 12 de desplazamiento de placa de sustrato.

15 La Fig. 3 muestra un ejemplo de una microestructura libre de grietas como resultado de un procedimiento según la invención, con cordones de soldadura claramente visibles de sección transversal o relación de profundidad a anchura adecuadas, respectivamente, mientras que las Figs. 4 y 5 muestran, en comparación con la Fig. 3, ejemplos de cordones de soldadura con una relación de sección transversal desfavorable, que conduce a una microestructura con grietas por solidificación.

20 Es ventajoso realizar antes de dicha etapa de fusión una etapa de prefusión para fundir o presinterizar junto de forma no compacta el polvo de la capa 18 de polvo, y dicha etapa de fusión densificará después la capa de polvo para obtener un artículo tridimensional denso.

25 Las etapas d) a g) del procedimiento se llevan a cabo preferiblemente en una atmósfera de gas protector dentro del compartimiento 11. Un contingente de dicho gas protector consiste en hidrógeno u otros gases adecuados, para generar de ese modo una atmósfera reductora.

Preferiblemente, dicha placa 13 de sustrato se enfría para eliminar calor del procedimiento y de ese modo reducir el tiempo requerido para la solidificación del cordón 21 de soldadura.

30 El procedimiento se puede mejorar cuando se aplica un post-tratamiento térmico para optimizar adicionalmente la microestructura después de que se ha construido el artículo tridimensional. Especialmente, tal tratamiento térmico es prensado isostático en caliente (HIP). En consecuencia, los parámetros del procedimiento para el prensado isostático en caliente, tales como la temperatura, la presión, el tiempo de permanencia, las velocidades de calentamiento y enfriamiento, se ajustan al material específico reforzado por precipitación gamma-prima.

Como ejemplo, una superaleación a procesar a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima consiste en

35 3,2 - 4,2% en peso de Al

2,8 - 3,8% en peso de Ti

14,5 - 17% en peso de Cr

7,8 - 9,0% en peso de Co

1,2 - 1,9% en peso de Mo

40 2,1 - 3,5% en peso de W

1,0-2,0% en peso de Ta

0,5 - 1,5% en peso de Nb

<0,15 % en peso de C

<0,02% en peso de B

45 siendo el resto Ni e impurezas inevitables.

LISTADO DE NÚMEROS DE REFERENCIA

10 aparato de SLM

ES 2 525 453 T3

	11	compartimiento
	12	unidad de desplazamiento de la placa de sustrato
	13	placa de sustrato
	14	capa de polvo procesada
5	15	fuentes de láser
	16	unidad de enfoque y desplazamiento del haz de láser
	17	haz de láser
	18	capa de polvo (no procesada)
	19	unidad de control
10	20	punto focal
	21	cordón de soldadura
	22	entrada de medio de enfriamiento
	23	salida de medio de enfriamiento
	d	diámetro del foco
15	h	profundidad
	w	anchura
	SM	modelo cortado en rebanadas

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un procedimiento para la producción de artículos tridimensionales densos y libres de grietas hechos de una superaleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima, que comprende más de 6% en peso de [2 veces una concentración de Al (% en peso) + Ti (% en peso)], mediante fusión selectiva por láser (SLM), que comprende las etapas de:
- a) proporcionar un aparato (10) de SLM con una unidad (19) de control de SLM;
 - b) proporcionar un modelo tridimensional cortado en rebanadas (SM) de dicho artículo con secciones transversales calculadas, que se hace pasar a y se almacena en dicha unidad (19) de control de SLM;
 - 10 c) preparar polvo de dicho material de aleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima, que se necesita para dicho procedimiento de SLM;
 - d) preparar una capa (18) de polvo con un grosor regular y uniforme sobre una placa (13) de sustrato de dicho aparato (10) de SLM, o sobre una capa de polvo procesada previamente (14);
 - e) fundir dicha capa de polvo preparada (18) barriendo con un haz de láser enfocado (17) un área que corresponde a una sección transversal de dicho artículo según el modelo tridimensional cortado en rebanadas (SM) almacenado en dicha unidad (19) de control;
 - 15 f) rebajar la placa (13) de sustrato en un grosor de una capa;
 - g) repetir las etapas d) a f) hasta alcanzar la última sección transversal según el modelo tridimensional cortado en rebanadas (SM);

20 en el que para dicha etapa e) de fusión, la potencia del láser, el diámetro (d) del foco del punto focal (20) y la velocidad de barrido de dicho haz de láser enfocado (17) se ajustan para obtener una relación de aspecto del cordón de soldadura (21) de profundidad (h) a anchura (w) más pequeña que 0,5, preferiblemente entre 0,3 y 0,1, aplicando los siguientes parámetros

	Potencia del láser:	50-150 W
	Velocidad de barrido:	80-700 mm/s
25	Distancia de trama:	0,01-0,5 mm
	Diámetro del foco:	0,1-0,5 mm

y en el que dicho ajuste de dicho diámetro (d) del foco se realiza usando una unidad (16) de enfoque y desplazamiento del láser específica, o desplazando dicha placa (13) de sustrato con una unidad (12) de desplazamiento de placa de sustrato.

- 30 2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que para dicha etapa e) de fusión se usa una fuente (15) de láser en modo pulsado, y la frecuencia de pulso se ajusta para obtener soldadura por disipación de calor.
3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 ó 2, caracterizado por que la distribución de tamaños de partículas del polvo se ajusta con respecto al grosor de la capa (18) de polvo, de manera que conduce a una buena capacidad de fluidez y una densidad aparente >60% necesarias para preparar capas de polvo con un grosor regular y uniforme y para reducir los efectos de la contracción.
- 35 4. Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado por que la distribución exacta de tamaños de partículas se obtiene tamizando y/o aventando (separación por aire).
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-4, caracterizado por que el polvo se obtiene mediante procedimiento de atomización por gas o de electrodo giratorio fundido por plasma.
- 40 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-5, caracterizado por que dicha superaleación a base de níquel reforzada por precipitación gamma-prima consiste en
- 3,2 - 4,2% en peso de Al
 - 2,8 - 3,8% en peso de Ti
 - 14,5 - 17% en peso de Cr
 - 45 7,8 - 9,0% en peso de Co
 - 1,2 - 1,9% en peso de Mo

2,1 - 3,5% en peso de W

1,0-2,0% en peso de Ta

0,5 - 1,5% en peso de Nb

<0,15 % en peso de C

5 <0,02% en peso de B

siendo el resto Ni e impurezas inevitables.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-6, caracterizado por que dichas etapas d) a g) se realizan en una atmósfera de gas protector.

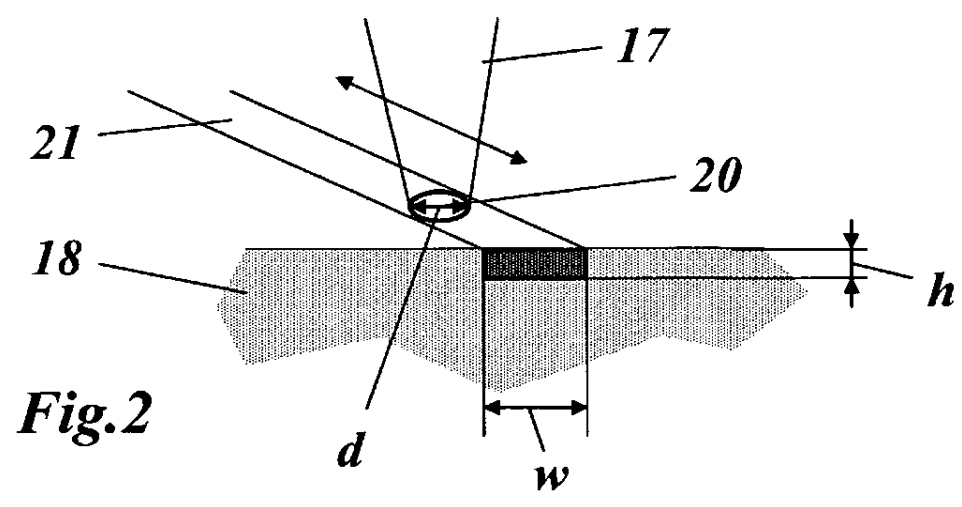
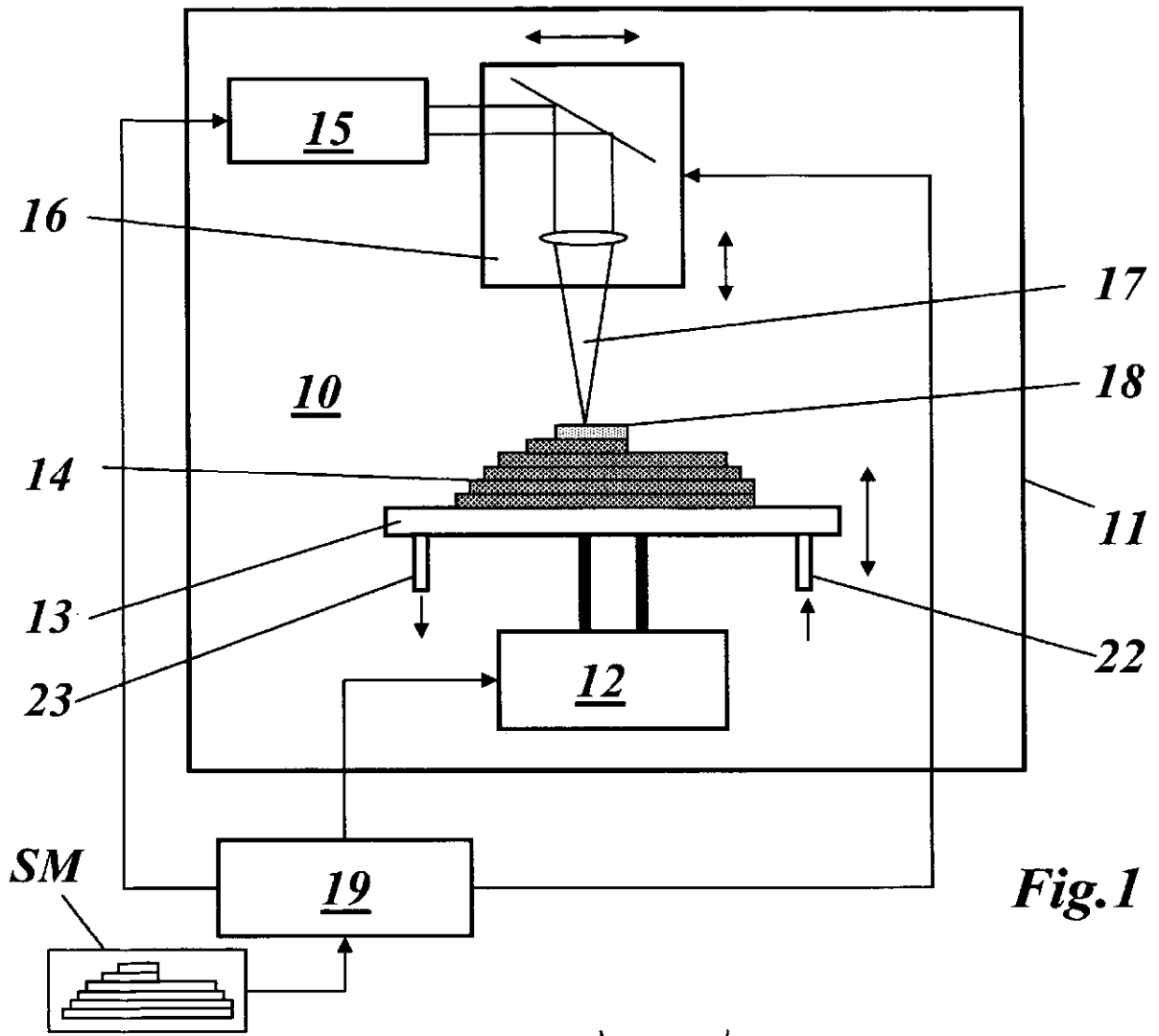
10 8. Procedimiento según la reivindicación 7, caracterizado por que dicha atmósfera de gas protector comprende nitrógeno o argón, u otro gas adecuado para establecer una atmósfera reductora.

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-8, caracterizado por que dicha placa (13) de sustrato se enfría para eliminar calor del procedimiento y reducir de ese modo el tiempo requerido para la solidificación del cordón (21) de soldadura.

15 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-9, caracterizado por que, antes de dicha etapa e) de fusión, se lleva a cabo una etapa de prefusión para fundir o presinterizar junto de forma no compacta el polvo de dicha capa (18) de polvo, y dicha etapa e) de fusión densificará después la capa (18) de polvo para obtener un artículo tridimensional denso.

20 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1-9, caracterizado por que se aplica un post-tratamiento térmico a dicho artículo para optimizar adicionalmente la microestructura después de que se construye el artículo tridimensional.

12. Procedimiento según la reivindicación 11, caracterizado por que dicho tratamiento térmico es prensado isostático en caliente (HIP).



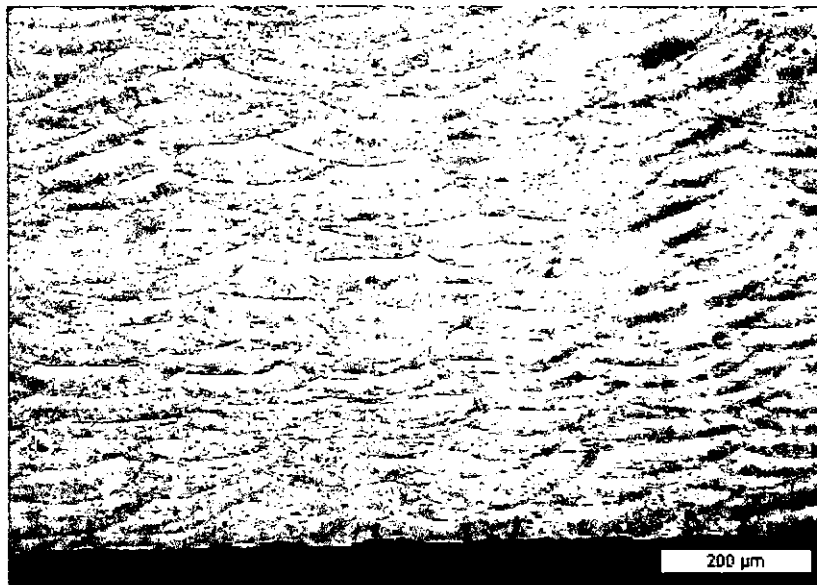


Fig.3

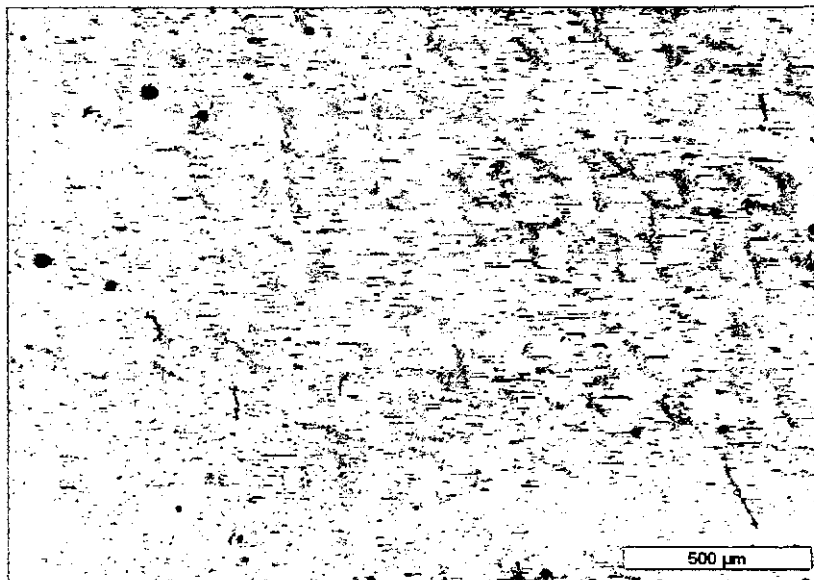


Fig.4

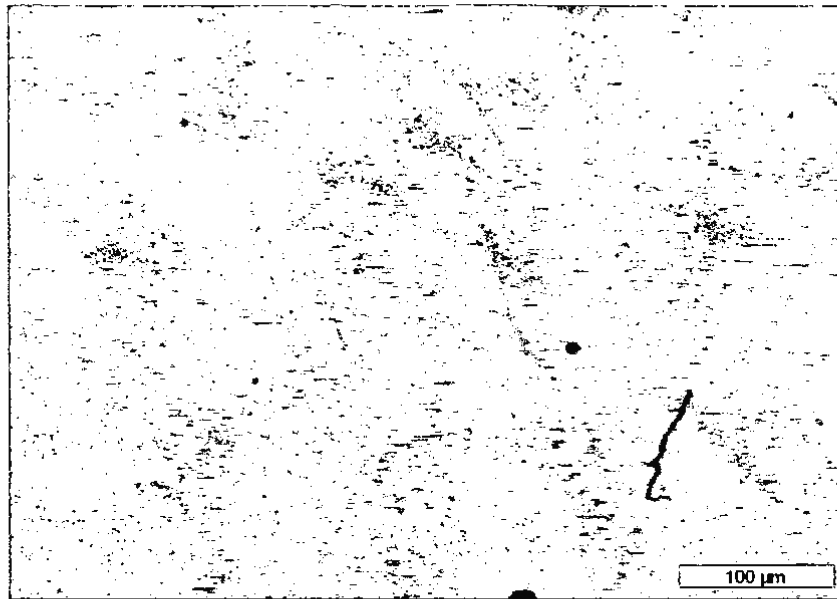
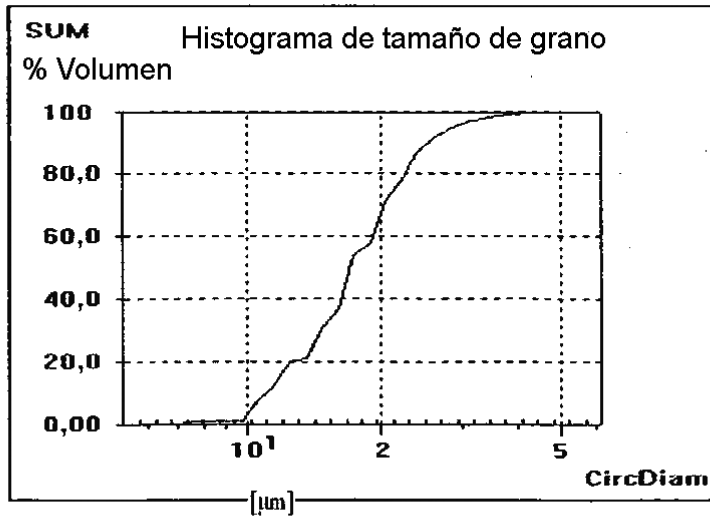


Fig.5



Percentil	
0,0	[%]
5,3076	[μm]
5,0	[%]
10,5207	[μm]
10,0	[%]
11,8835	[μm]
50,0	[%]
17,4062	[μm]
90,0	[%]
26,3599	[μm]
95,0	[%]
29,9095	[μm]
100,0	[%]
61,2098	[μm]

Fig.6