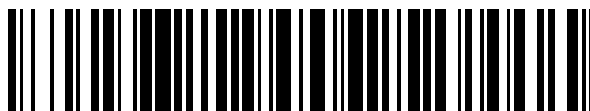


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 381 854**

51 Int. Cl.:  
**B22F 5/04** (2006.01)  
**B22F 3/105** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **07013153 .7**  
96 Fecha de presentación: **05.07.2007**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1878522**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **16.01.2008**

54 Título: **Producción en serie de artículos tridimensionales hechos de compuestos intermetálicos**

30 Prioridad:  
**14.07.2006 EP 06425491**  
**21.11.2006 IT MI20062228**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**01.06.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**01.06.2012**

73 Titular/es:  
**Avioprop S.r.l.**  
**Via Papa Giovanni XXIII 9**  
**28062 Cameri (NO), IT y**  
**AVIO S.p.A.**

72 Inventor/es:  
**Gennaro, Paolo;**  
**Zanon, Giovanni Paolo y**  
**Pasquero, Giuseppe**

74 Agente/Representante:  
**Torner Lasalle, Elisabet**

ES 2 381 854 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

Producción en serie de artículos tridimensionales hechos de compuestos intermetálicos.

## 5 Campo técnico de la invención

La presente invención se refiere a un procedimiento para producir artículos tridimensionales hechos de compuestos intermetálicos usando una técnica "capa a capa".

## 10 Antecedentes técnicos de la invención

El procedimiento según la presente invención puede aplicarse, por ejemplo, en el sector de vehículos a motor y/o aeronáutico para producir componentes específicos tales como válvulas para motores de combustión interna, turbinas de gas, palas y/o rodetes para turbocompresores o similares.

15 Estos tipos de componentes deben tener propiedades notables de resistencia a fluencia y a fatiga a altas temperaturas. Por estos motivos, la investigación se orienta hacia diversos materiales, en particular compuestos intermetálicos, que puedan conferir las propiedades deseadas a cada artículo producido.

20 Los compuestos intermetálicos son compuestos metálicos cuyas estructuras cristalinas difieren de las de los metales de los que están compuestos. Se trata de una clase única de compuestos que están compuestos por fases ordenadas de dos o más materiales metálicos cuyas especies atómicas ocupan sitios específicos en la red cristalina. Estos compuestos se forman porque la fuerza de enlace entre átomos distintos es mayor que la de entre átomos iguales.

25 Los compuestos intermetálicos difieren considerablemente de las aleaciones metálicas convencionales. Éstas últimas se forman esencialmente de una disolución sólida desordenada de uno o más elementos metálicos, no tienen una fórmula química particular y se describen como consistentes en un material de base al que se han añadido porcentajes determinados de otros elementos. Los átomos de aleaciones convencionales están unidos mediante enlaces metálicos relativamente débiles, con núcleos atómicos que flotan en un "gas" de electrones que se mueven de manera relativamente libre.

30 Por el contrario, un compuesto intermetálico es un compuesto químico particular basado en una fórmula química bien definida, con una composición química que está fijada o en cualquier caso muy limitada en variabilidad. Los enlaces en compuestos intermetálicos pueden ser iónicos o covalentes, y por tanto particularmente fuertes. Alternativamente, la unión puede ser también completamente de tipo metálico, pero los átomos de los elementos individuales adoptan posiciones preferidas dentro de la red cristalina.

35 Estas peculiaridades se reflejan en las propiedades de los compuestos intermetálicos, tales como alto punto de fusión, resistencia notable a altas temperaturas pero escasa ductilidad.

40 Los compuestos intermetálicos de titanio y aluminio, y en particular los compuestos definidos con la abreviatura  $\gamma$ TiAl (aluminuros de titanio  $\gamma$ ), representan el grupo de compuestos intermetálicos de mayor interés para su aplicación en el campo de vehículos a motor y aeronáutico debido a sus propiedades de baja densidad y alta resistencia a altas temperaturas. Este grupo de compuestos intermetálicos incluye compuestos de  $\gamma$ TiAl con estructura  $L1_0$  tetragonal centrada en las caras ordenada, y compuestos definidos con la abreviatura  $\alpha_2$ Ti<sub>3</sub>Al con estructura  $DO_{19}$  hexagonal ordenada. En condiciones de equilibrio termodinámico, la fracción de volumen  $\gamma/\alpha_2$  se controla basándose en el contenido en aluminio y en otros elementos adicionales, pero los tratamientos térmicos y/o termomecánicos tienen una alta influencia en la fracción de volumen  $\gamma/\alpha_2$  en compuestos de  $\gamma$ TiAl.

45 En vista del creciente interés por los compuestos intermetálicos de  $\gamma$ TiAl, estudios llevados a cabo en los últimos 10 años han identificado intervalos de composición ideales que proporcionan un contenido en aluminio y titanio casi igual, entre 44% y 48%, junto con pequeños porcentajes de otros elementos que confieren propiedades específicas al compuesto intermetálico resultante. Para información adicional sobre compuestos intermetálicos véanse, por ejemplo, las siguientes publicaciones:

- 50 - G. Sauthoff "Intermetallics", Weinheim, Nueva York (1995); y
- 55 - H. Clemens, F. Appel, A. Bartels, H. Baur, R. Gerling, V. Guther, H. Kestler, "Processing and application of engineering  $\gamma$ -TiAl based alloys", en Ti-2003 Science and Technology, Volumen IV, Wiley-VCH.

60 Las ventajas logradas mediante el uso de compuestos intermetálicos de  $\gamma$ TiAl son principalmente su baja densidad (3,9 a 4,2 g/cm<sup>3</sup> en función de su composición), alto límite de elasticidad específico, alta rigidez específica, resistencia considerable a oxidación y buenas propiedades de fluencia hasta altas temperaturas. No obstante, como se ha mostrado, es difícil obtener un artículo producido con un compuesto intermetálico de  $\gamma$ TiAl con exactamente la composición y estructura deseada.

65 Un típico ejemplo de artículos que pueden producirse ventajosamente con un compuesto intermetálico de  $\gamma$ TiAl considera las palas de turbina de gas. Además de las dificultades ya mencionadas en cuanto a obtener un artículo

5 producido con el material deseado, debe tenerse en cuenta también que estos artículos requieren operaciones de mecanizado extremadamente precisas pero que son difíciles de producir en serie a costes razonables con técnicas metalúrgicas convencionales, sobre todo debido a su geometría extremadamente compleja. Una dificultad adicional radica en el hecho de que artículos de este tipo deben tener un contenido en oxígeno extremadamente bajo, preferiblemente mucho menor que 1.500 ppm.

10 El mecanizado a partir de piezas de trabajo sólidas conlleva costes muy altos y es por tanto inaceptable para la producción en serie. Otras técnicas de fabricación conocidas para este tipo de componente son simplemente igual de poco rentables.

15 Por ejemplo, la técnica de moldeo a la cera perdida puede conllevar a un alto número de descartes, sobre todo debido a las porosidades y grietas que se crean en artículos así producidos y no permite que se obtengan geometrías particularmente complejas.

Otra técnica usada ampliamente es el forjado por presión, pero además de requerir particularmente altas temperaturas y por tanto alto consumo de energía, todavía es difícil obtener geometrías complejas sin requerir varios otros ciclos de mecanizado para cada artículo producido.

20 Ninguna de estas técnicas conocidas es por tanto capaz de garantizar la repetibilidad necesaria en la composición del material, y por tanto de las propiedades mecánicas en artículos producidos en serie. Esto es un requisito esencial, sobre todo para la producción en serie de componentes para motores y/o turbinas, para garantizar un alto nivel de fiabilidad.

25 Se han añadido recientemente técnicas alternativas de fabricación a técnicas convencionales, tales como técnicas de fabricación "capa a capa", que esencialmente usan un haz de luz láser convergente para obtener fusión y/o sinterización de secciones o capas sucesivas de materiales fundidos mediante una luz láser incidente.

30 Estas técnicas, conocidas por ejemplo como "formación directa por láser" (DLF, *Direct Laser Forming*) o "conformación final mediante ingeniería por láser" (LENS, *Laser Engineered Net Shaping*), conllevan un sistema de lanzamiento de los polvos metálicos generalmente solidario con el emisor de luz láser y la inyección simultánea de un chorro de gas inerte (argón), alineado con el haz de láser para proteger la zona de fusión de la oxidación.

35 No obstante, se produce un alto grado de turbulencia en el punto de fusión debido no sólo al chorro de gas inerte, sino también a la evaporación de polvos metálicos, sobre todo en el caso de polvos de aluminio. De hecho, la temperatura en las cámaras de fusión es particularmente baja, del orden de aproximadamente 100°C, pero los polvos metálicos tienen temperaturas de fusión muy altas, a menudo por encima de 1000°C. El haz de la luz láser pierde convergencia haciendo difícil el procedimiento de fusión y la evaporación de parte de las especies químicas con temperaturas de fusión más bajas pone en peligro la composición final del artículo. Además, el chorro de argón solo no puede limitar la oxidación del artículo durante la fabricación a valores aceptables.

40 Consecuentemente, estas técnicas conocidas no pueden utilizarse para la producción en serie, ni pueden usarse para producir artículos hechos de compuestos intermetálicos, sino que, como mucho, pueden usarse para producir recubrimientos de aleaciones metálicas en artículos ya fabricados ("chapado por láser" o "deposición metálica directa").

45 Información adicional sobre estas técnicas puede encontrarse en las siguientes publicaciones:

50 El documento US 6 269 540 B1 se refiere a un procedimiento para producir o reparar una pala de turbina mediante consolidación por láser.

- "Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition" - G. K. Lewis *et al*;

- "Laser forming titanium components" - D. H. Abbot *et al*;

55 - "Producing titanium aerospace components from powder using laser forming" - F. G. Arcella *et al*; y

- "The optimisation of processing parameters and characterisation of microstructures of direct laser fabricated TiAl alloy components" - D. Srivastava *et al*.

60 La solicitud de patente WO-0181031 a nombre de ARCAM AB da a conocer una técnica de fabricación "capa a capa" para producir artículos tridimensionales. La máquina incluye una cámara de fusión en la que está dispuesta una mesa de trabajo móvil en la que se forma el artículo mediante deposiciones sucesivas de capas de polvos. Cada capa de polvos depositada en la cámara se funde usando un haz de electrones según la tecnología conocida como "fusión por haz de electrones" (EBM, *Electron Beam Melting*).

65 En la práctica, después de haber depositado una capa de polvos, se activa la fuente de emisión del haz de electrones para fundir los polvos sólo en una sección transversal del artículo tridimensional que va a formarse. Usando tecnología EBM, la máquina funciona necesariamente en condiciones de alto vacío, reduciendo así el riesgo

de oxidación en el material del artículo. El documento sugiere en particular controlar la temperatura en la zona de fusión y modular la energía del haz de electrones incidente para evitar la vaporización del material fundido.

5 Sin embargo, no se dan sugerencias en cuanto a medidas particulares que deban tomarse para la fabricación de artículos hechos de materiales particularmente críticos, tales como compuestos intermetálicos y, en particular compuestos intermetálicos de  $\gamma$ TiAl.

10 El documento US 2005/186538 da a conocer un método y un aparato para realizar productos dentales usando una técnica capa a capa. Un haz de alta energía, tal como un haz láser o haz de electrones, irradia un material en polvo en posiciones diferentes de cada capa para precalentar cada posición a una temperatura adecuada antes de completar la etapa de fusión o sinterización.

15 El documento EP-A-0289116 se refiere a un método capa a capa y a un aparato en el que un haz de un cañón láser o de electrones se dirige a un polvo fundible para formar cada capa de la forma deseada. Los polvos llevados mediante un flujo de gas se alimentan continuamente a un lecho fluidizado de material fundido.

20 El documento WO 2004/056511 a nombre de ARCAM AB da a conocer un procedimiento capa a capa en el que se detectan continuamente las temperaturas de trabajo de cada zona de una capa fundida. El haz de electrones se controla para realizar un precalentamiento de cada zona antes de la fusión y mantener las zonas fundidas a una temperatura adecuada para evitar cualquier enfriamiento no deseado.

25 Un procedimiento para producir o reparar una pala de turbina o compresor o ventilador, se da a conocer en el documento US 6269540. Un haz láser se mueve con respecto a una superficie metálica y una corriente de metal se suministra a la superficie por medio de un tubo de suministro con el fin de fundir una fina capa del sustrato metálico y el metal suministrado al sustrato. Se sugiere una etapa de post-calentamiento para tratar compuestos de fusión a alta temperatura que tienen características que dependen de la tasa de enfriamiento.

#### Sumario de la invención

30 En general, el objeto de la presente invención es proponer un procedimiento para la producción en serie de artículos tridimensionales producidos con materiales intermetálicos que permite una reducción considerable en los costes de producción con respecto la técnica anterior.

35 Otro objeto de la presente invención es proponer un procedimiento del tipo mencionado anteriormente que permite la producción de artículos hechos de materiales intermetálicos a base de titanio y aluminio, y en particular artículos hechos de compuestos intermetálicos del tipo  $\gamma$ TiAl, también con geometrías particularmente complejas.

40 Estos objetos se logran por medio de la presente invención, que se refiere a un procedimiento para la producción en serie de artículos tridimensionales según la reivindicación 1.

Según el procedimiento propuesto por la presente invención, los polvos son polvos de un compuesto intermetálico a base de titanio y aluminio con la misma composición química que el compuesto intermetálico final con el que se producen los artículos.

45 La tecnología EBM para producciones "capa a capa" en cualquier caso ofrece diversas ventajas con respecto a la tecnología que usa un haz de luz láser. En primer lugar, las operaciones se realizan en condiciones de vacío, reduciendo así la contaminación de los artículos por el oxígeno y es posible funcionar a temperaturas cercanas a los puntos de fusión de los compuestos intermetálicos.

50 Además, los artículos hechos de compuestos intermetálicos de  $\gamma$ TiAl tienen un alargamiento a la rotura de aproximadamente un 1%, pero contracciones térmicas mucho más altas que este porcentaje. Considerando que las temperaturas de fusión de estos compuestos son de aproximadamente 1600°C, la tecnología de fusión que usa un haz de luz de láser no podría aplicarse con éxito debido al gradiente térmico notable entre los artículos que se producen y el entorno circundante que se mantiene aproximadamente a 100°C.

55 Funcionando según las etapas del procedimiento, los artículos se producen sin vaporización de los polvos del material inicial o la aparición de otros problemas que podrían influir en la composición del material deseado y/o en la formación de la estructura atómica deseada.

60 Por tanto, el procedimiento es adecuado particularmente para la producción en serie de artículos hechos de compuestos intermetálicos de  $\gamma$ TiAl.

65 Para aumentar la productividad del procedimiento según la invención, puede proporcionarse una etapa de enfriamiento de los artículos al final de su formación. El enfriamiento puede, por ejemplo, implementarse mediante un flujo de gas inerte, tal como helio o mezclas del mismo, alimentado a la cámara de fusión a una presión preestablecida. De hecho, se ha encontrado que el enfriamiento controlado, una vez que la temperatura de los artículos ha caído por debajo de aproximadamente 1200°C, no influye en la microestructura de los artículos producidos usando compuestos intermetálicos de  $\gamma$ TiAl.

La etapa de precalentamiento d) puede, por ejemplo, implementarse usando sólo el haz de energía convergente. El precalentamiento puede implementarse también calentando la cámara de fusión usando resistencias eléctricas, éstas últimas colocadas fuera de la cámara de fusión, o combinando el calentamiento producido por estas resistencias con el que se genera mediante el haz de energía convergente.

5 La etapa de precalentamiento d) se implementa preferiblemente a una temperatura lo suficientemente alta para provocar la sinterización débil de los polvos al menos en la zona de cada sección transversal de los artículos.

10 En particular, para compuestos intermetálicos de titanio y aluminio, se proporciona una etapa de precalentamiento a una temperatura no inferior a 700°C.

15 Durante las etapas de establecimiento del procedimiento se ha encontrado que la formación mediante fusión sin una etapa de precalentamiento adecuada puede causar la aparición de grietas en los componentes acabados y deformación de las capas moldeadas en ciclos anteriores.

Preferiblemente, la etapa de fusión e) empieza con la fusión realizada mediante el haz de electrones convergente que es guiado a lo largo del perímetro de la zona correspondiente a una sección transversal de los artículos.

20 La etapa de fusión e) continua entonces moviendo el haz de energía convergente a lo largo de una trayectoria de barrido transversal, por ejemplo con un ángulo que oscila desde 60 hasta 90 grados con respecto a aquél con el que se realizó la etapa de fusión de la sección transversal de debajo. En particular, para cada sección transversal que va a formarse, el haz de energía convergente avanza a lo largo de una trayectoria de barrido constituida por longitudes paralelas; las longitudes paralelas de la trayectoria de barrido seguida para formar la sección transversal sucesiva están cruzadas, es decir son perpendiculares, con respecto a las longitudes precedentes.

25 Para producir algunos artículos puede ser necesario proporcionar la formación de una o más partes para soportar las secciones transversales que se forman posteriormente. Estas partes de soporte están constituidas generalmente por estructuras delgadas, o menos densas, que se producen simultáneamente al artículo y se eliminan después cuando se ha formado el artículo.

30 Durante las etapas de establecimiento del procedimiento se ha encontrado, de hecho, que la falta de soportes adecuados puede dar lugar a deformaciones no deseadas.

35 Los polvos de la mezcla tienen un tamaño de grano que oscila desde 20 hasta 150 µm. Por debajo de este tamaño de grano los polvos son demasiado finos y pueden producirse explosiones debido a los fenómenos bien conocidos de ignición espontánea, mientras que por encima de este intervalo hay un aumento excesivo en la rugosidad superficial de los artículos producidos.

40 La elección de tamaño de grano de los polvos es sustancialmente un compromiso entre la velocidad de producción máxima, que sería favorable a polvos con tamaños de grano mayores, y la rugosidad superficial mínima que sería favorable a polvos con tamaños de grano menores. Un tamaño de grano adecuado para la mayoría de procedimientos de producción para artículos destinados a la industria de vehículos a motor y aeronáutica es alrededor de 70 µm.

45 Se usan preferiblemente polvos obtenidos a través de procedimientos de atomización de gas, es decir procedimientos que pueden formar polvos con gránulos sustancialmente esféricos.

50 El procedimiento se realiza repitiendo las etapas desde (c) hasta (f) varias veces, formando durante cada ciclo una sección transversal de los artículos con un espesor que oscila desde 20 hasta 150 µm, es decir superponiendo secciones transversales sucesivas de los artículos hasta que se alcance la última sección.

55 El procedimiento es adecuado ventajosamente para aplicarse para producir artículos hechos de compuestos intermetálicos usados principalmente, aunque no exclusivamente, en fabricación de palas de turbina de gas u otros componentes sometidos a altas temperaturas, tales como turbocompresores, válvulas de motor o similares.

El procedimiento según la presente invención permite producir con extremada precisión una pluralidad de artículos, todos con las mismas propiedades mecánicas, independientemente de la complejidad de la geometría de estos artículos. Además, se realiza en condiciones de alto vacío, permitiendo así que la oxidación del material de los artículos acabados se mantenga muy baja.

60 Una ventaja notable del procedimiento según la invención radica en el uso óptimo del material. De hecho, la mayor parte de los polvos que no han sido sometidos al procedimiento de fusión pueden reutilizarse para ciclos de producción sucesivos. Los costes para la producción en serie de los artículos, independientemente de su geometría y los materiales con los que se producen, por tanto se reducen enormemente.

65 El procedimiento según la presente invención también permite la producción de artículos que cumplen con restricciones de tolerancia relativamente estrictas y que tienen todos las mismas propiedades.

Breve descripción de las figuras

Ventajas y características adicionales de la presente invención serán más evidentes a partir de la descripción a continuación, proporcionada con referencia a los dibujos esquemáticos adjuntos estrictamente a modo de un ejemplo no limitativo, en los que:

- la figura 1 es una vista en alzado de un artículo que puede producirse según la presente invención;
- las figuras 2A a 2D representan algunas etapas del procedimiento según la invención para producir un artículo tal como el representado en la figura 1;
- la figura 3 es una vista en perspectiva de un rodete para una turbina producido con un procedimiento según la presente invención, en el que se destacan las partes de soporte; y
- la figura 4 es una vista en perspectiva del mismo rodete de la figura 3 del que se han eliminado las partes de soporte.

Modos para llevar a cabo la invención

La vista en la figura 1 representa de una forma enormemente simplificada una posible realización de una pala para turbina de gas que comprende un pie 11 de fijación, una pestaña 12 de base y un ala 13.

En el ejemplo, se hace referencia en particular a una pala 10 hecha de un compuesto intermetálico, en particular un compuesto intermetálico a base de titanio y aluminio de la serie  $\gamma$ TiAl que es particularmente crítico de obtener.

Para producir los artículos con el procedimiento según la invención, en primer lugar se genera un modelo tridimensional de los artículos y se almacena en una unidad de control. El modelo matemático de los artículos puede generarse usando un programa de diseño asistido por ordenador (CAD) y transferirse en forma de archivo a la unidad de control de una máquina de fusión por haz de electrones.

Una máquina adecuada para la implementación del procedimiento según la presente invención es, por ejemplo, la identificada con el nombre comercial EBM A2 fabricada y distribuida por ARCAM AB (Suecia), que permite realizar la fusión por haz de electrones convergente en condiciones de alto vacío.

Algunas etapas del procedimiento según la presente invención se representan en las figuras 2A a 2D, en las que por claridad de representación se ha mostrado la producción de una única pala de turbina, con vistas que no están a escala. Sin embargo, en producción en serie real, se producen una pluralidad de palas o, en cualquier caso, una pluralidad de los artículos deseados. Además, aunque no se representa expresamente, debe entenderse que las etapas del procedimiento mostrado en la figura 2A a 2D se llevan a cabo en la cámara de fusión de una máquina EBM en condiciones de alto vacío.

La figura 2A representa una etapa intermedia en la producción de un artículo como el representado en la figura 1. En esta etapa, algunas partes de la pala 10, en particular el pie 11 de fijación, la pestaña 12 de base y una parte 13' del ala se suponen ya producidas, mientras que la parte 13" restante que todavía tiene que producirse se muestra con una línea discontinua.

La pala 10 descansa en un plano 20 de soporte móvil que puede controlarse para moverse a lo largo de la dirección representada por la flecha V. El plano 20 de soporte está hecho de un material que puede resistir las altas temperaturas de fusión de los compuestos intermetálicos de  $\gamma$ TiAl. El plano 20 de soporte puede estar compuesto por aleaciones a base de níquel, tales como la aleación identificada por el nombre comercial Inconel™, que también ofrece la ventaja de no adherirse a artículos compuestos por compuestos intermetálicos de  $\gamma$ TiAl.

Las partes de la pala 10 ya producidas están rodeadas por la masa de polvos 1 que ya se han depositado en capas sucesivas durante las etapas anteriores pero que no se han sometido a fusión. La mayor parte de los polvos que no han sido sometidos a fusión pueden recuperarse entonces y reutilizarse en ciclos de producción posteriores dado que no se produce oxidación de los polvos puesto que el procedimiento se realiza en condiciones de vacío.

Los polvos tienen exactamente la misma composición química que el material con el que van a producirse los artículos. Los polvos tienen un tamaño de grano que oscila desde 20 hasta 150  $\mu$ m, más preferiblemente de aproximadamente 70  $\mu$ m, y se obtienen preferiblemente a través de procedimientos de atomización de gas de modo que se forman granos sustancialmente esféricos.

Los polvos están dispuestos en un dispensador 30 móvil que se mueve horizontalmente (flecha HR) y deposita en la cámara de fusión una capa de polvos 2 con un espesor regular y sustancialmente uniforme, como se muestra a modo de ejemplo en la figura 2B con el espesor de la capa 2 exagerado deliberadamente por motivos de claridad.

La distancia entre el dispensador 30 móvil y la capa superficial del baño de polvo presente en la cámara de fusión puede ajustarse de modo que, durante el movimiento del mismo, sólo se depositan polvos con un tamaño de grano que no exceda el deseado.

5 Los polvos se someten a una etapa de precalentamiento hasta una temperatura en cualquier caso menor que la temperatura de fusión del material usado. La etapa de precalentamiento puede realizarse usando el mismo haz de electrones, o usando en combinación resistencias eléctricas, situadas fuera de la cámara de fusión, para ayudar al precalentamiento suministrado por el haz de electrones solo.

10 El precalentamiento también permite una sinterización débil que tiene lugar entre los polvos, especialmente en la zona de la sección transversal de los artículos que van a someterse a fusión.

Tras completar la capa de polvos 2 (figura 2C), el generador 40 del haz de electrones convergente se activa para realizar inicialmente la fusión de los polvos a lo largo del perímetro de la zona correspondiente a la sección transversal que va a formarse. El haz de energía convergente se guía entonces a lo largo de una trayectoria de barrido que cubre la zona de la sección que va a formarse.

15 La nueva sección 130 transversal se forma por encima de la parte 13' ya producida previamente siguiendo una trayectoria de barrido con longitudes transversales con respecto a aquéllas con las que se formó la sección inmediatamente por debajo.

Al final de la etapa de fusión, la sección 130 se amalgama con la parte de debajo de 13' para formar una nueva parte 130' del ala 13, tal como se muestra en la figura 2D. Con respecto a compuestos intermetálicos a base de titanio y aluminio, las temperaturas requeridas para obtener la fusión de los polvos en la cámara son por lo general aproximadamente no inferiores a 1500°C e incluso pueden alcanzar de 1700 a 1800°C en función del compuesto particular usado.

25 La temperatura en el interior de la cámara de fusión se mantiene bajo control constante, por ejemplo usando un termopar colocado bajo el plano 20 de soporte y extrapolando la temperatura del baño de polvo en la cámara basándose en los datos relativos a la capacidad térmica de los materiales y a la masa de polvos cada vez mayor en la cámara. En función de la temperatura detectada, es posible regular la energía transmitida a los polvos durante las etapas de precalentamiento y/o de fusión. La regulación puede realizarse de varias maneras, tal como mediante "divergencia" del haz de electrones (dispersión de energía por unidad de superficie), variando la corriente de alimentación del emisor de haz de electrones, variando la velocidad de barrido del haz, o mediante cualquier combinación de dos o más de estos métodos.

30 Tras la etapa de fusión, se baja el plano 20 de soporte móvil en una altura preestablecida (flecha V) de manera sustancialmente correspondiente al espesor de la capa de polvos depositada por el dispensador 30 en cada ciclo en la cámara de fusión. La superficie superior de la parte 130', junto con los polvos 1' depositados ahora en la cámara de fusión alrededor de la parte del artículo ya formada, se llevan por tanto al nivel de una altura de referencia fijada (línea Q) con respecto al dispensador 30 móvil.

El dispensador 30 móvil entonces empieza a moverse en la dirección opuesta para depositar una nueva capa de polvos 2' que entonces serán sometidos a fusión. El procedimiento continua de esta manera con la repetición de las etapas para depositar una capa de polvos, precalentamiento, fusión y bajada del plano 20 de soporte móvil, hasta que se alcance la última sección del modelo tridimensional almacenado en la unidad de control, es decir hasta que se complete la parte 130" que falta del ala 13.

35 En cada repetición de las etapas expuestas anteriormente se forma una sección con un espesor que oscila desde 20 hasta 150 µm, en función tanto del tamaño de grano de la mezcla de polvos usada como del espesor de la capa de polvos depositada en la cámara de fusión por el dispensador 30 en cada ciclo.

Al final de la etapa para formar los artículos, puede proporcionarse enfriamiento ventajosamente mediante un flujo de gas inerte en la cámara de fusión. El gas inerte usado es preferiblemente helio alimentado en la cámara a una presión de aproximadamente 2 bar durante un tiempo suficiente para garantizar que se ha alcanzado una temperatura que permite retirar los artículos de la cámara de fusión. Esta etapa permite conseguir una reducción considerable en los tiempos de producción.

40 Los artículos obtenidos al final del procedimiento se someten entonces a un simple mecanizado mecánico para obtener el grado deseado de acabado. Considerando la alta precisión del procedimiento de producción según la invención, sólo se requieren operaciones de mecanizado de acabado superficial simples y rápidas.

La figura 3 muestra un rodete 50 para una turbina después de haberse retirado de la cámara de fusión y separado de otras turbinas idénticas producidas simultáneamente.

65 El rodete 50 comprende las partes 55 de soporte que se producen simultáneamente con el artículo y con el mismo material para facilitar la formación de superficies planas durante el procedimiento de producción.

Las partes 55 de soporte, constituidas por ejemplo por paredes muy delgadas aligeradas con ranuras 56, no obstante son temporales y se eliminan antes de la última etapa de acabado superficial para obtener el rodete tal como se representa en la figura 4.

- 5 Se describe a continuación un ejemplo de implementación de un procedimiento según la invención para la producción en serie de artículos para turbinas.

EJEMPLO 1: Producción de palas de turbina hechas de compuestos intermetálicos mediante fusión por haz de electrones.

- 10 Se prepararon polvos del compuesto intermetálico de  $\gamma$ TiAl 48Al-2Cr-2Nb según las especificaciones suministradas por General Electric Aviation (EE.UU.) para producir palas de turbina de gas de baja presión. El compuesto intermetálico usado tiene una temperatura de fusión de aproximadamente 1550°C.

- 15 Los polvos se cargaron en el dispensador ubicado dentro de la cámara de fusión de una máquina EBM identificada por la abreviatura A2 y fabricada por ARCAM AB (Suecia).

La etapa de precalentamiento se realizó usando sólo el haz de electrones convergente hasta llevar los polvos a una temperatura de aproximadamente 900°C.

- 20 El modelo matemático usado se configuró para la producción simultánea de 30 palas de turbina, todas con las mismas propiedades de forma geométrica y dimensiones.

- 25 El procedimiento de producción, realizado a alto vacío, requirió un total de aproximadamente 30 horas para completar la producción y el enfriamiento en una atmósfera de helio.

- Después se separaron las 30 palas y las partes de soporte (tales como las representadas a modo de ejemplo para el rodete en la figura 3) se eliminaron antes de someter a las palas a operaciones de mecanizado de acabado superficial para eliminar una capa superficial (sobreespesor para mecanizado) de aproximadamente 0,2 mm. Se estimó que, usando un procedimiento según la presente invención, los costes de producción en serie de las palas para turbinas de gas hechas de compuestos intermetálicos de  $\gamma$ TiAl pueden reducirse aproximadamente cuatro veces con respecto a costes de producción en serie usando procedimientos de la técnica anterior.

- 35 Aunque el procedimiento de la presente invención se ha presentado para la producción en serie de componentes para turbinas, debe entenderse que los principios de la presente invención puede aplicarse igualmente a la producción en serie de otros componentes para motores o similares hechos de compuestos intermetálicos, obteniendo las mismas ventajas enumeradas anteriormente en cuanto a coste y calidad de los artículos producidos.



## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la producción en serie de artículos tridimensionales hechos de un compuesto intermetálico a base de titanio y aluminio mediante fusión por haz de electrones, que comprende las etapas de:
- 5 a) generar un modelo matemático tridimensional de dichos artículos y almacenarlo en una unidad de control;
- b) preparar los polvos de dicho compuesto intermetálico con la misma composición química que el compuesto intermetálico final con el que se producen dichos artículos, en el que el tamaño de grano de dichos polvos oscila desde 20 hasta 150  $\mu\text{m}$ ;
- 10 c) depositar una cantidad de dichos polvos en una cámara de fusión para formar una capa de polvos con un espesor regular y sustancialmente uniforme;
- d) precalentar dicha capa de polvos depositada en dicha cámara de fusión a una temperatura no inferior a 700°C pero por debajo del punto de fusión de dichos polvos;
- 15 e) realizar la fusión en condiciones de alto vacío realizando un barrido con un haz de electrones convergente en la zona correspondiente a una sección transversal de dichos artículos según el modelo tridimensional almacenado en dicha unidad de control;
- 20 f) poner la superficie superior de la última sección transversal de dichos artículos así formados al nivel de los polvos ubicados en dicha cámara de fusión y que están dispuestos alrededor de las partes ya formadas de dichos artículos;
- 25 g) repetir dichas etapas desde c) hasta f) hasta que se alcance la última sección transversal de dichos artículos según el modelo tridimensional almacenado en dicha unidad de control; y
- h) proporcionar una etapa de enfriamiento final de dichos artículos al final de su formación en una atmósfera de gas inerte una vez que la temperatura de los artículos ha caído por debajo de aproximadamente 1200°C.
- 30 2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dichos polvos y dichos artículos están hechos de compuestos intermetálicos de  $\gamma\text{TiAl}$ .
3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho gas inerte está constituido por helio o mezclas del mismo.
- 35 4. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de precalentamiento d) se realiza completa o parcialmente realizando un barrido con un haz de electrones convergente.
- 40 5. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de precalentamiento d) se realiza completa o parcialmente calentando dicha cámara de fusión usando resistencias eléctricas.
6. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de precalentamiento d) se realiza a una temperatura lo suficientemente alta para provocar una sinterización débil de los polvos al menos en la zona de cada sección transversal de dichos artículos.
- 45 7. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de fusión c) se realiza moviendo dicho haz de electrones convergente a lo largo de una trayectoria de barrido transversal con un ángulo que oscila desde 60 hasta 90 grados con respecto a aquél con el que se realizó la etapa de fusión de la sección transversal de debajo.
- 50 8. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de fusión e) incluye inicialmente fundir con haz de electrones convergente a lo largo del perímetro de la zona correspondiente a una sección transversal de dichos artículos.
- 55 9. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que durante cada repetición de dichas etapas desde c) hasta f) se proporciona la formación de una o más partes para soportar las secciones transversales que se forman sucesivamente.
10. Procedimiento según la reivindicación 9, en el que se proporciona la eliminación de dicha una o más partes de soporte después de que dichos artículos se hayan formado.
- 60 11. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el tamaño de grano de dichos polvos es de aproximadamente 70  $\mu\text{m}$ .
12. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dichos polvos se obtienen mediante procedimientos de atomización de gas.
- 65 13. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que en cada ciclo de etapas repetidas desde c) hasta f) se forma una sección transversal de dichos artículos con un espesor que oscila desde 20 hasta 150  $\mu\text{m}$ .

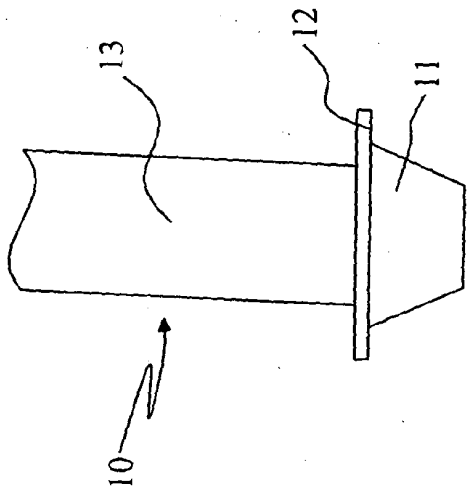


Fig. 1

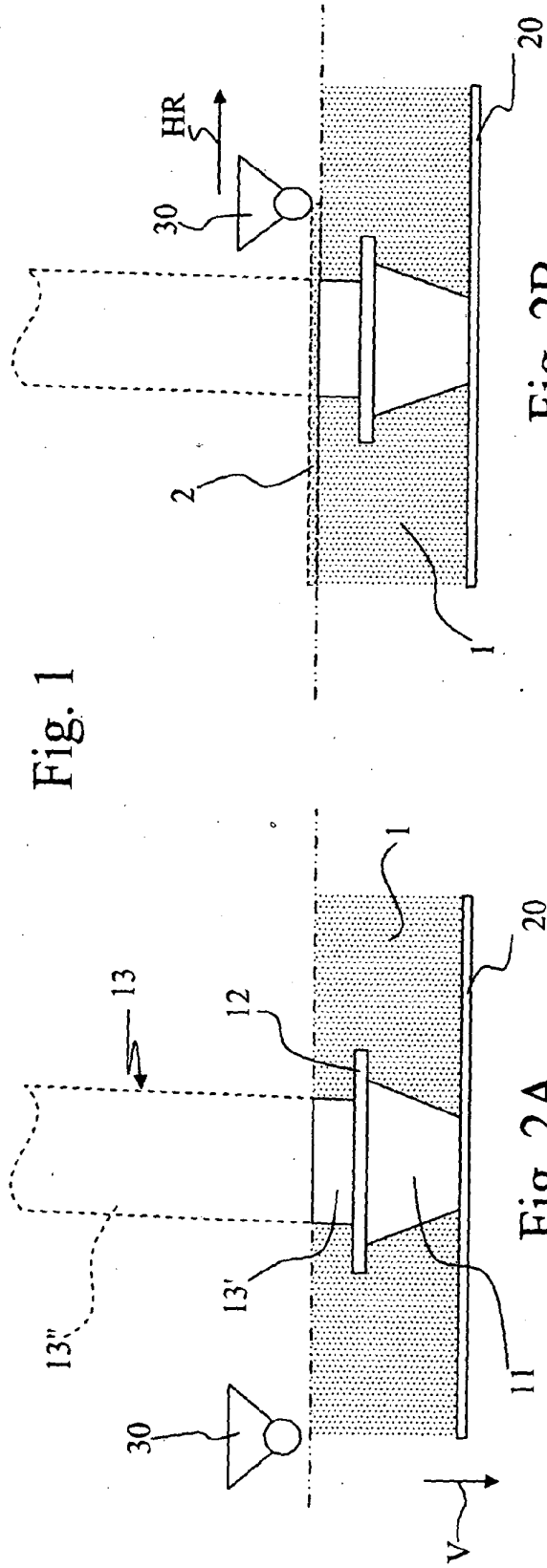


Fig. 2A

Fig. 2B

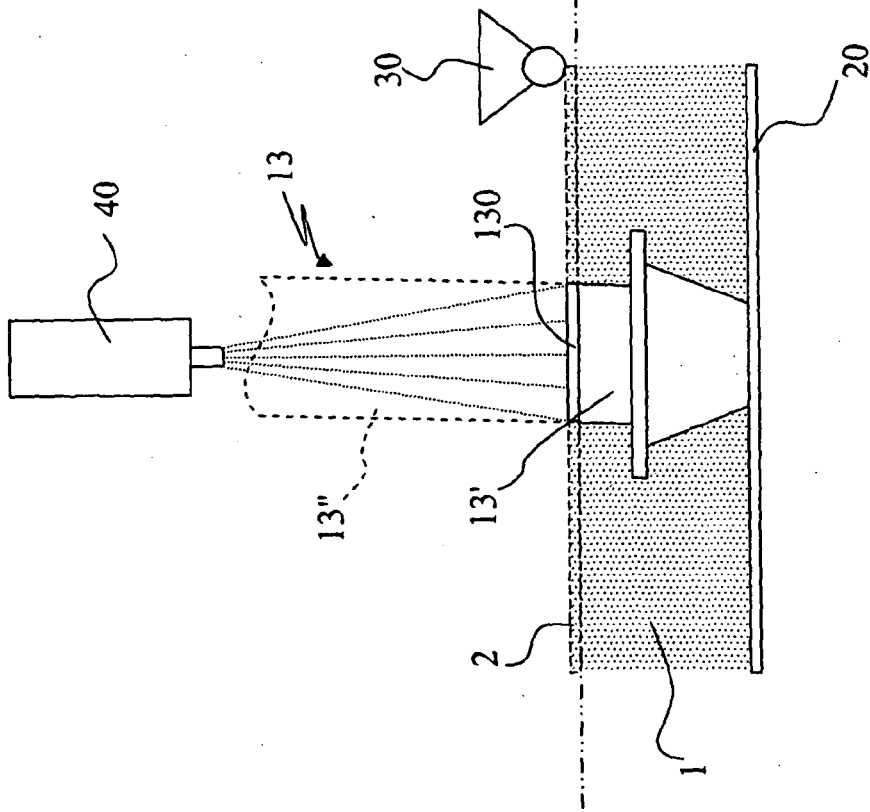


Fig. 2C

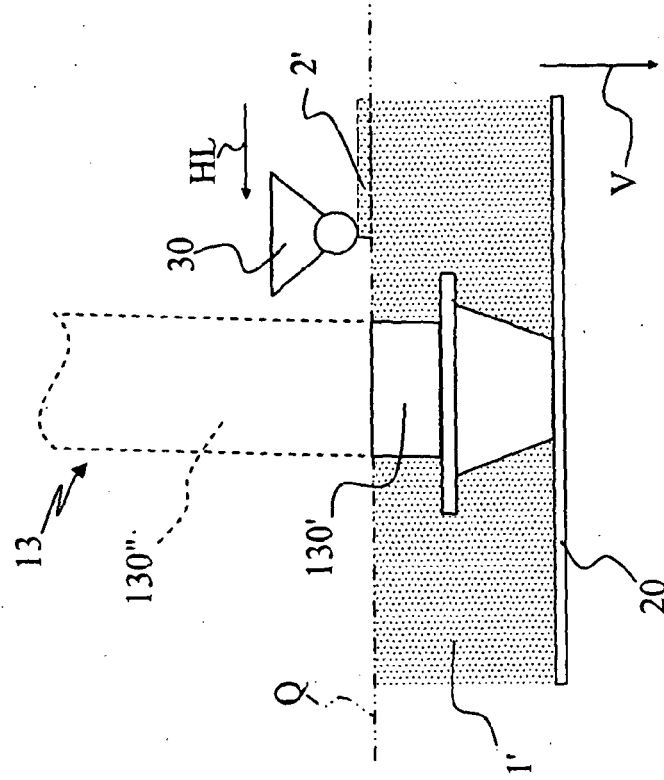


Fig. 2D

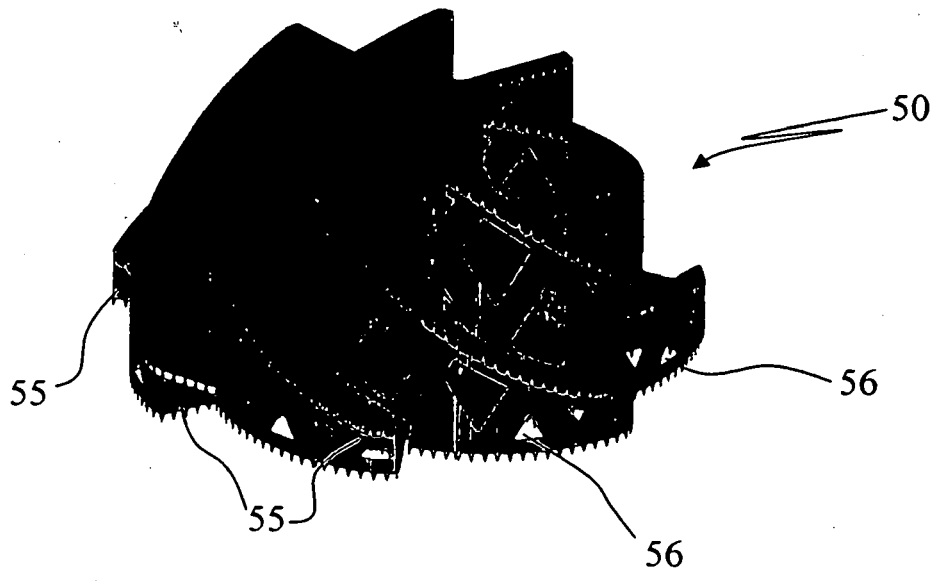


Fig. 3

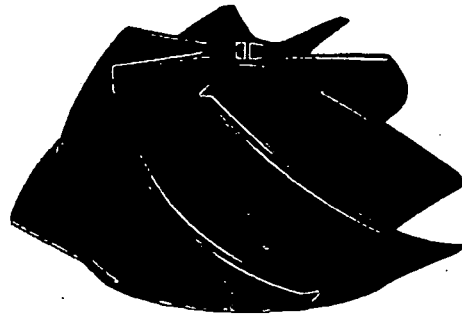


Fig. 4