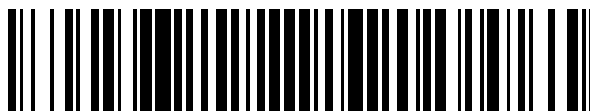


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 753 242**

51 Int. Cl.:

**C22C 14/00** (2006.01)

**C22F 1/18** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.03.2017 E 17160397 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.10.2019 EP 3372700**

54 Título: **Procedimiento para fabricar componentes de TiAl forjados**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**07.04.2020**

73 Titular/es:

**MTU AERO ENGINES AG (100.0%)  
Dachauer Strasse 665  
80995 München, DE**

72 Inventor/es:

**DR. HEUTLING, FALKO;  
KUNZE, CLAUDIA y  
DR. HABEL, ULRIKE**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 753 242 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 componentes de TiAl forjados

**Antecedentes de la invención**

Campo de la invención

5 La presente invención concierne a un procedimiento para fabricar componentes forjados de una aleación de TiAl, especialmente componentes para turbinas de gas, preferiblemente turbinas de aviación y especialmente álabes para turbinas de baja presión.

Estado de la técnica

10 Los componentes de aluminuros de titanio o aleaciones de TiAl son interesantes debido a su pequeño peso específico y sus propiedades mecánicas para su utilización en turbinas de gas, especialmente turbinas de aviación.

Por aluminuros de titanio o aleaciones de TiAl se entienden aquí aleaciones que presentan titanio y aluminio como constituyentes principales, con lo que su composición química presenta aluminio y titanio como constituyentes con las proporciones más altas. Además, las aleaciones de TiAl se caracterizan por la formación de fases intermetálicas como  $\gamma$ -TiAl o  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al, que confieren buenas propiedades de resistencia al material.

15 No obstante, las aleaciones de TiAl no son fáciles de procesar y se tienen que ajustar exactamente las estructuras de materiales de TiAl para lograr las propiedades mecánicas deseadas.

Así, por ejemplo, se conoce por el documento DE 10 2011 110 740 B4 un procedimiento para fabricar componentes de TiAl forjados en el que, después de la forja, se realiza un tratamiento térmico de dos etapas para ajustar una estructura deseada. Los documentos DE 10 2015 103 422 B3 y EP 2 386 663 A1 divulgan también procedimientos para fabricar componentes de aleaciones de TiAl.

20 En la publicación de la solicitud europea EP 2 386 663 A1 se comenta ya la problemática de que en las aleaciones de TiAl se puede plantear frecuentemente el problema de que la estructura es de constitución no homogénea y, por tanto, las propiedades del material de TiAl presentan faltas de homogeneidad. Sin embargo, esto es poco deseable para un uso de las aleaciones de TiAl en turbomáquinas, tales como mecanismos motopropulsores de aviación. El documento EP 2 386 663 A1 propone para ello un tratamiento térmico del material de TiAl conformado para realizar una recristalización. No obstante, no se puede resolver así completamente el problema de la formación de una estructura no homogénea.

**Divulgación de la invención**

Problema de la invención

30 Por este motivo, el problema de la presente invención consiste en proporcionar un procedimiento de fabricación de componentes de materiales de TiAl que puedan utilizarse en turbinas de gas, especialmente turbinas de aviación, preferiblemente en el sector de las turbinas de baja presión, y que presenten una formación de estructura homogénea y, por tanto, un perfil de propiedades homogéneo.

Solución técnica

35 Este problema se resuelve por un procedimiento con las características de la reivindicación 1. Ejecuciones ventajosas son objeto de las reivindicaciones subordinadas.

La invención propone que en un procedimiento de forja para fabricar un componente forjado de una aleación de TiAl se realice una conformación por medio de la forja de modo que tenga lugar una conformación homogénea para todo el componente. En efecto, se ha visto que con una conformación uniforme en todo el componente se puede conseguir de manera sencilla una formación de estructura homogénea del componente forjado, con lo que el perfil de propiedades del componente forjado es también homogéneo en todo el componente. Por consiguiente, se habilita para la forja una pieza bruta cuya forma se elige de modo que la conformación sea sustancialmente igual en todo el volumen de la pieza bruta o del semiproducto forjado a partir de la pieza bruta. A este fin, se ajusta un grado de conformación definido respecto del cual se produce únicamente una desviación de  $\pm 1$  en todo el volumen útil del semiproducto forjado. Por volumen útil del semiproducto forjado se entiende la zona del semiproducto forjado que corresponde al componente forjado a fabricar, por ejemplo la zona o el volumen de un álabe de turbina a fabricar. Por consiguiente, por volumen útil del semiproducto forjado se entiende la zona del semiproducto forjado que permanece como componente terminado después de una mecanización adicional por erosión de material a continuación de la forja. Por tanto, por semiproducto forjado se puede entender especialmente una pieza bruta forjada o un producto intermedio forjado que puede mecanizarse en uno o varios pasos de mecanización hasta obtener un componente terminado, por ejemplo un álabe de turbina. Por pieza bruta se puede entender especialmente un material de utilización en forja que puede procesarse mediante un proceso de forja para obtener el semiproducto.

El grado de conformación  $\phi$  se define aquí, en el caso de una variación unidimensional de dimensiones en un sistema de referencia cartesiano, como el logaritmo natural de la relación de la dimensión final  $x_1$  después de la conformación a la dimensión inicial  $x_0$ . En una conformación tridimensional la conformación se caracteriza por el máximo grado de conformación  $\phi_g$ , que viene dado por

$$\phi_g = |\phi_{\max}| = \frac{1}{2}(|\phi_x| + |\phi_y| + |\phi_z|)$$

en donde  $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_z$  son los grados de conformación en las direcciones x, y y z.

La pieza bruta puede conformarse ahora de modo que, al transformarla en el semiproducto forjado deseado, el grado de conformación presente un valor definido en una de las direcciones del sistema de referencia, es decir, por ejemplo, la dirección x, y o z de un sistema de referencia cartesiano y se desvíe de este valor solamente dentro del margen de fluctuación admisible, o bien que el grado de conformación presente un valor definido en varias direcciones del sistema de referencia o en cualquier dirección, especialmente la dirección principal del sistema de referencia, y se desvíe de este valor solamente dentro del margen de fluctuación admisible. Además, es posible también configurar la pieza bruta de modo que, de entre los grados de conformación de diferentes direcciones, el grado de conformación más grande en valor y/o el grado de conformación más pequeño en valor satisfagan las condiciones prefijadas de la conformación homogénea.

En particular, se puede elegir la forma de la pieza bruta de modo que la conformación a realizar presente un grado de conformación definido que, dentro del volumen útil del semiproducto forjado, se desvíe del valor definido del grado de conformación en como máximo  $\pm 0,5$ , especialmente  $\pm 0,25$ .

El valor definido del grado de conformación puede ser especialmente mayor o igual que 0,7 de modo que tenga lugar una conformación mínima dentro de estas medidas. Preferiblemente, no se cae por debajo del grado de conformación de 0,7 dentro del volumen útil, con lo que todo el material del semiproducto forjado experimenta una conformación mínima por efecto de la forja.

Además, el valor definido del grado de conformación tiene que mantenerse lo más pequeño posible para mantener bajo el gasto de la conformación. Por consiguiente, el valor del grado de conformación puede ser menor o igual que 2,5, especialmente menor o igual que 2,0.

La velocidad de conformación, es decir, la variación del grado de conformación por unidad de tiempo, puede estar durante la forja en el intervalo de 0,01 a 0,5 1/s y especialmente en el intervalo de 0,025 a 0,25 1/s.

Además, se puede elegir la forma de la pieza bruta de modo que a lo largo del eje longitudinal de la pieza bruta, es decir, el eje con la mayor dimensión, se distribuya la masa de modo que esté presente más masa en los dos extremos que en el centro de la pieza bruta. A este fin, la pieza bruta puede subdividirse a lo largo de su eje longitudinal en tres zonas o secciones de igual longitudinal, concretamente una primera y una segunda zonas extremas y una zona central, estando distribuida la masa de la pieza bruta en las zonas de modo que en las zonas extremas haya más masa que en la zona central. Por consiguiente, se puede configurar la pieza bruta de modo que se cumpla:  $M_M < M_{E1} \leq M_{E2}$ , en donde  $M_M$  es la masa de la pieza bruta en la zona central,  $M_{E1}$  es la masa de la pieza bruta en la primera zona extrema y  $M_{E2}$  es la masa de la pieza bruta en la segunda zona extrema.

Asimismo, la pieza bruta puede satisfacer la condición:  $M_M \leq M_{E2}/1,25$ .

Para la fabricación de componentes forjados de aleaciones de TiAl, especialmente para componentes de turbinas de gas, como por ejemplo, álabes de turbinas de baja presión, se pueden emplear sobre todo aleaciones de aluminuro de titanio aleado con niobio y molibdeno. Tales aleaciones se denominan también aleaciones TNM.

Para el presente procedimiento se puede emplear una aleación con 27 a 30 por ciento en peso de aluminio, 8 a 10 por ciento en peso de niobio y 1 a 3 por ciento en peso de molibdeno, pudiendo estar formado el resto por titanio.

El contenido de aluminio puede elegirse especialmente en el intervalo de 28,1 a 29,1 por ciento en peso de aluminio, mientras que pueden estar aleados 8,5 a 9,6 por ciento en peso de niobio y 1,8 a 2,8 por ciento en peso de molibdeno.

Además, la aleación puede estar aleada con boro, concretamente en el intervalo de 0,01 a 0,04 por ciento en peso de boro, especialmente 0,019 a 0,034 por ciento en peso de boro.

Asimismo, la aleación puede presentar impurezas inevitables u otros constituyentes como carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, cromo, silicio, hierro, cobre, níquel e itrio, pudiendo ser su contenido  $\leq 0,05$  por ciento en peso de cromo,  $\leq 0,05$  por ciento en peso de silicio,  $\leq 0,08$  por ciento en peso de oxígeno,  $\leq 0,02$  por ciento en peso de carbono,  $\leq 0,015$  por ciento en peso de nitrógeno,  $\leq 0,005$  por ciento en peso de hidrógeno,  $\leq 0,06$  por ciento en peso de hierro,  $\leq 0,15$  por ciento en peso de cobre,  $\leq 0,02$  por ciento en peso de níquel y  $\leq 0,001$  por ciento en peso de itrio. Otros constituyentes pueden estar contenidos individualmente en el intervalo de 0 a 0,05 por ciento en peso o en conjunto en el intervalo de 0 a 0,2 por ciento en peso.

La forja de la pieza bruta puede realizarse especialmente como una forja isoterma, en la que se puede efectuar

únicamente una conformación en una sola etapa, es decir, únicamente un paso de conformación preferiblemente en tan solo una estampa de forja, sin que se lleve a cabo una conformación o forja adicional en otra estampa de forja. De esta manera, se puede mantener bajo el gasto para la conformación.

5 Por tanto, en una sola etapa significa aquí tanto que el proceso de conformación tiene lugar en un único proceso continuo como también que solamente tiene lugar una única conformación en el procedimiento de fabricación.

10 Por consiguiente, la conformación de la pieza bruta, por ejemplo fundida, aún no conformada, para obtener el semiproducto puede efectuarse en un único paso de forja, sin que sea necesaria una conformación adicional para obtener el componente terminado. Por tanto, no se tiene que realizar un prensado múltiple y desde direcciones diferentes, sino que únicamente es necesaria una prensa o una estampa con dos moldes entre los cuales se coloca la pieza bruta y se conforma ésta al prensar los dos moldes uno contra otro. Por consiguiente, la pieza forjada no tiene aquí que cambiarse de posición o moverse entre pasos de forja diferentes.

15 La forja de los componentes correspondientes puede efectuarse mediante forja en estampa en el intervalo de temperatura del área de la fase  $\alpha+\gamma+\beta$ , pudiendo estar la temperatura de forja en el intervalo de 1150°C a 1200°C. Se puede mantener una estampa correspondiente a esta temperatura mediante su calentamiento durante el proceso de forja. En función del material de la estampa se puede ajustar una atmósfera ambiente inerte durante la forja.

20 Después de la forja se pueden someter los semiproductos forjados a un tratamiento térmico en dos etapas, en el que la primera etapa del tratamiento térmico prevé un recocido de recristalización por debajo de la temperatura de transformación  $\gamma/\alpha$  durante un periodo de tiempo de 50 a 100 minutos. El recocido a una temperatura por debajo de la temperatura de transformación  $\gamma/\alpha$ , a la que, según el diagrama de fases para la aleación de TiAl empleada, se puede transformar  $\alpha$ -titanio en  $\gamma$ -TiAl, puede tener lugar lo más cerca posible de la temperatura de transformación  $\gamma/\alpha$ , no debiendo utilizarse una temperatura que esté un 8%, especialmente un 4%, por debajo de la temperatura de transformación  $\gamma/\alpha$ .

El recocido de cristalización puede realizarse preferiblemente durante 60 a 90 minutos, especialmente 70 a 80 minutos.

25 La primera etapa del tratamiento térmico con el recocido de recristalización puede ir seguida de una segunda etapa de tratamiento térmico con un recocido de estabilización en el intervalo de temperatura de 800°C a 950°C durante 5 a 7 horas.

El recocido de estabilización puede realizarse especialmente en el intervalo de temperatura de 825°C a 925°C, preferiblemente de 850°C a 900°C, con una duración de mantenimiento de 345 minutos a 375 minutos.

30 El enfriamiento durante el recocido de recristalización puede efectuarse mediante enfriamiento por aire, debiendo ser la temperatura de enfriamiento  $\geq 3^\circ\text{C}$  por segundo en el intervalo de temperatura comprendido entre 1300°C y 900°C para ajustar una estructura finamente laminar de  $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al}$  y  $\gamma\text{-TiAl}$  que garantice las propiedades mecánicas necesarias.

35 El enfriamiento en la segunda etapa de tratamiento térmico, es decir, durante el recocido de estabilización, puede efectuarse con velocidades de enfriamiento correspondientes más bajas en el horno.

40 Para el ajuste de la estructura y la reproducibilidad de un ajuste de estructura correspondiente es importante que los pasos de tratamiento térmico se realicen lo más exactamente posible a la temperatura correspondientemente elegida. No obstante, un ajuste crecientemente exacto de la temperatura y un mantenimiento de los componentes a las temperaturas correspondientes están ligados a un gasto creciente, por lo que tiene que encontrarse un compromiso para lograr una mecanización económicamente conveniente. Para el tratamiento térmico de componentes de TiAl forjados se ha manifestado como ventajoso un ajuste de temperatura con una desviación en el intervalo de 5°C a 10°C hacia arriba y hacia abajo respecto de la temperatura nominal. Por consiguiente, la temperatura nominal elegida para los pasos de tratamiento térmico de la presente invención puede ajustarse y mantenerse en una ventana de temperatura correspondiente con 5°C a 10°C de desviación hacia abajo y hacia arriba respecto de la temperatura nominal.

45 Como piezas brutas para la forja se pueden utilizar piezas brutas fundidas y/o prensadas isostáticamente en caliente. Como alternativa a la fundición, el materia previo puede fabricarse también por inyección en molde metálico (MIM), procedimientos pulvimetalúrgicos, procedimientos aditivos (por ejemplo, impresión 3D, soldadura de recargue) o combinaciones de éstos. Con independencia de la fabricación, las piezas brutas o el material previo pueden prensarse isostáticamente en caliente antes de la forja. Puede ser ventajoso mecanizar el material previo antes de la forja en todos sus lados o localmente con un procedimiento de mecanización por erosión de material a fin de descargar zonas de borde de la superficie y/o darle a la pieza bruta la forma deseada para la conformación subsiguiente. Como procedimientos de mecanización por erosión de material puede utilizarse cualquier procedimiento adecuado, especialmente procedimientos de arranque de virutas o procedimientos de mecanización electroquímica.

Las piezas brutas pueden fabricarse por fusión al vacío o bajo gas protector con electrodos autoconsumibles o en

5 crisol refrigerado por medio de fusión por arco voltaico en plasma, pudiendo realizarse una refundición única o múltiple de la aleación. La refundición puede efectuarse por medio de una fusión por inducción en vacío o una refundición por arco voltaico en vacío (VIM vacuum induction melting; VAR vacuum arc remelting) y el material fundido puede prensarse hidrostáticamente en caliente, pudiendo aplicarse temperaturas  $\geq 1200^{\circ}\text{C}$  a una presión  $\geq 100$  MPa y con un tiempo de mantenimiento  $\geq 4$  horas.

10 Después de la forja y antes o preferiblemente después del tratamiento térmico en dos etapas se puede mecanizar adicionalmente el semiproducto forjado con un procedimiento de mecanización por erosión de material para producir el componente terminado. Como procedimiento de mecanización por erosión de material puede utilizarse cualquier procedimiento adecuado, especialmente procedimientos de arranque de virutas o procedimientos de mecanización electroquímicos.

### Breve descripción de las figuras

Las figuras adjuntas muestran de manera puramente esquemática en:

Las figuras 1a y 1b, un desarrollo del procedimiento para fabricar un álabe de turbinas según la presente invención,

La figura 2, un diagrama para ilustrar posibles distribuciones de masa en una pieza bruta para la operación de forja y

15 La figura 3, un diagrama de estado para una aleación de TiAl tal como ésta puede utilizarse en la presente invención, con indicación del campo de fases en el que tiene lugar la forja o la conformación.

### Ejemplos de realización

20 Otras ventajas, rasgos distintivos y características de la presente invención se pondrán claramente de manifiesto en la siguiente descripción detallada de los ejemplos de realización. No obstante, la invención no queda limitada a estos ejemplos de realización.

Las figuras 1a y 1b muestran la secuencia de los pasos del procedimiento durante la ejecución de un ejemplo de realización del procedimiento según la invención.

Al comienzo, se fabrica una pieza bruta 5 cargando una aleación de TiAl fundida en un molde de fundición 1 con una cavidad 2 correspondiente a la forma de la pieza bruta 5 que se debe fabricar.

25 Después del vertido de la aleación de TiAl en el molde 1 y la solidificación de la aleación de TiAl se puede prensar de manera correspondiente la pieza bruta fundida 4 en una instalación 3 para prensado isostático en caliente a fin de compactar la pieza bruta fundida 4 y cerrar posibles rechupes de fundición o similares. Por tanto, el prensado isostático en caliente no sirve para la conformación de la pieza bruta fundida 4, sino únicamente para la compactación del material.

30 Seguidamente, se puede someter adicionalmente la pieza bruta 5 a una mecanización adicional por erosión de material, por ejemplo mediante procedimientos de arranque de virutas o mediante una mecanización electroquímica.

35 La pieza bruta 5 correspondientemente fabricada se forja en una estampa de forja de 6 para obtener un semiproducto forjado 9 cercano a los contornos finales, presentando la estampa de forja 6 dos moldes huecos 7 y 8 que definen entre ellos una cavidad correspondiente a la forma del semiproducto 9 a forjar, tal como se muestra en la representación en línea de trazos de la figura 1b. Mediante la compresión de los moldes huecos 7 y 8 de la estampa con la pieza bruta 5 dispuesta entre ellos se convierte la aleación de TiAl en el semiproducto forjado 9. Mediante un calentamiento correspondiente de los moldes huecos 7 y 8 de la estampa se puede realizar la conversión de la pieza bruta 5 en el semiproducto forjado 9 mediante forja isoterma a una temperatura lo más constante que sea posible. La compresión de los moldes huecos 7 y 8 de la estampa uno contra otro está representada en la figura 1b por medio de las flechas.

40 Después de la forja isoterma se presenta un semiproducto forjado 9 cercano a los contornos finales que puede convertirse en el componente terminado, concretamente un álabe de turbina 10, por medio de una mecanización adicional por erosión de material. La mecanización adicional por erosión de material puede realizarse por medio de procedimientos de arranque de virutas o procedimientos de mecanización electroquímica.

45 Después de la mecanización adicional se presenta un álabe de turbina terminado 10 con una pala de álabe 13, un pie de álabe 11 y una banda de cubierta 12.

50 Como se desprende de las figuras 1a y 1b, en el procedimiento según la invención se puede obtener mediante un único paso de conformación por forja isoterma en una estampa de forja 6 una forma cercana a los contornos finales del componente a fabricar, con lo que se puede minimizar la mecanización adicional. Gracias al empleo según la invención de una pieza bruta 5 para la forja isoterma, que está sintonizada en su forma con la forja en estampa isoterma, se garantiza especialmente que, al convertir la pieza bruta 5 en el semiproducto forjado 9, tenga lugar una conformación lo más uniforme posible en todo el componente, no cayéndose por debajo de una conformación mínima, pero pudiendo mantenerse la conformación lo más pequeña que sea posible. Se puede efectuar así un

ajuste homogéneo de la estructura en la aleación de TiAl de modo que las propiedades del material se presenten homogéneamente en todo el álabe de turbina terminado 10.

5 La figura 2 muestra en los ejemplos 1 a 3 diferentes evoluciones de la distribución de masa a lo largo del eje longitudinal de una pieza bruta 5, tal como ésta puede emplearse en la presente invención. La figura 2 muestra que se puede dividir una pieza bruta 5 en secciones de igual tamaño a lo largo del eje longitudinal de la pieza bruta 5, presentándose masas diferentes de la pieza bruta dentro de estas secciones, concretamente presentándose en los dos extremos del eje longitudinal más masa que en una zona central. La masa de las respectivas zonas en los extremos puede ser igual o diferente.

10 La figura 3 muestra un llamado diagrama de estado cuasibinario de una aleación de TiAl, tal como ésta puede utilizarse en la presente invención. Cuasibinario significa que en el dominio de estado mostrado únicamente varían las proporciones de dos componentes, en el presente caso Ti y Al, y los demás constituyentes de la aleación, en el presente caso Nb y Mo, permanecen constantes. El campo de trabajo 14 dibujado en línea de trazos está en el área de la fase  $\alpha + \beta + \gamma$  e indica el intervalo de temperatura en el que puede realizarse la forja isoterma con la correspondiente composición de la aleación de TiAl. La temperatura de transformación  $\gamma/\alpha$  corresponde en el  
 15 diagrama de fases a la línea entre el área de la fase  $\beta + \alpha$  y el área de la fase  $\alpha + \beta + \gamma$ . Aunque la presente invención se ha descrito detalladamente con ayuda de los ejemplos de realización, es fácilmente comprensible para el experto que la invención no queda limitada a estos ejemplos de realización, sino que, por el contrario, se pueden efectuar variaciones de tal manera que se pueden suprimir algunas características individuales y se pueden materializar otros tipos de combinaciones de características, siempre que no se salga del ámbito de protección de  
 20 las reivindicaciones adjuntas.

**Lista de símbolos de referencia**

- 1 Molde de fundición
- 2 Cavidad
- 3 Instalación para prensado isostático en caliente
- 25 4 Pieza bruta fundida
- 5 Pieza bruta
- 6 Estampa de forja
- 7 Molde hueco de estampa
- 8 Molde hueco de estampa
- 30 9 Semiproducto forjado
- 10 Álabe de turbina
- 11 Pie de turbina
- 12 Banda de cubierta
- 13 Pala de álabe
- 35 14 Campo de trabajo

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para fabricar un componente forjado (10) de una aleación de TiAl, especialmente un álabe de turbina, en el que se habilita una pieza bruta (5) de una aleación de TiAl y se la transforma por forja en un semiproducto forjado (9), estando definido en el semiproducto forjado un volumen útil que corresponde al componente forjado que se debe fabricar,
- 5 caracterizado por que
- se elige la forma de la pieza bruta (5) de modo que el grado de conformación  $\varphi_g$  presente, debido a la forja, dentro del volumen útil del semiproducto forjado un valor definido que en todo el volumen útil se desvíe del valor definido en un máximo de  $\pm 1$ , cumpliéndose que  $\varphi_g = \frac{1}{2}(|\varphi_x| + |\varphi_y| + |\varphi_z|)$ , en donde  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$ ,  $\varphi_z$  son los grados de conformación en las direcciones x, y y z y están definidos cada uno de ellos como el logaritmo natural de la relación de la respectiva dimensión final en la dirección x, y o z, después de la conformación, a la respectiva dimensión inicial en la dirección x, y o z.
- 10
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que el grado de conformación dentro del volumen útil del semiproducto forjado (9) se desvía del valor definido en un máximo de  $\pm 0,5$ , especialmente  $\pm 0,25$ .
- 15
3. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el valor definido del grado de conformación es mayor o igual que 0,7, no cayendo especialmente el grado de conformación por debajo de 0,7 dentro del volumen útil.
4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el valor definido del grado de conformación es menor o igual que 2,5, especialmente menor o igual que 2,0.
- 20
5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la velocidad de conformación está en el intervalo de 0,01 a 0,5 1/s, especialmente 0,025 a 0,25 1/s.
6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se elige la forma de la pieza bruta (5) de modo que, a lo largo del eje longitudinal de la pieza bruta, se subdivide la pieza bruta en tres zonas iguales, concretamente una primera y una segunda zonas extremas y una zona central, cumpliéndose que  $M_M < M_{E1} \leq M_{E2}$  y siendo  $M_M$  la masa de la pieza bruta en la zona central,  $M_{E1}$  la masa de la pieza bruta en la primera zona extrema y  $M_{E2}$  la masa de la pieza bruta en la segunda zona extrema.
- 25
7. Procedimiento según la reivindicación 7, caracterizado por que se cumple que  $M_M \leq M_{E2}/1,25$ .
8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se emplea una aleación de TiAl con niobio y molibdeno, especialmente una aleación con 27 a 30% en peso de aluminio, 8 a 10% en peso de niobio y 1 a 3% en peso de molibdeno.
- 30
9. Procedimiento según la reivindicación 8, caracterizado por que se emplea una aleación con 0,01 a 0,04% en peso de boro.
10. Procedimiento según la reivindicación 8 o 9, caracterizado por que se emplea una aleación que, aparte de impurezas inevitables, presenta al menos un componente adicional del grupo que comprende carbono, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, cromo, silicio, hierro, cobre, níquel e itrio, siendo su contenido  $\leq 0,05\%$  en peso de cromo,  $\leq 0,05\%$  en peso de silicio,  $\leq 0,08\%$  en peso de oxígeno,  $\leq 0,02\%$  en peso de carbono,  $\leq 0,015\%$  en peso de nitrógeno,  $\leq 0,005\%$  en peso de hidrógeno,  $\leq 0,06\%$  en peso de hierro,  $\leq 0,15\%$  en peso de cobre,  $\leq 0,02\%$  en peso de níquel y  $\leq 0,001\%$  en peso de itrio.
- 35
11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, caracterizado por que se emplea una aleación cuya composición química comprende titanio en una cantidad tal que la aleación con los constituyentes restantes de las reivindicaciones 8 a 10 represente un 100% en peso.
- 40
12. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la conformación se efectúa por forja isoterma, especialmente forja en estampa en el intervalo de temperatura del área de la fase  $\alpha+\gamma+\beta$  de la aleación de TiAl, especialmente a una temperatura de forja entre 1150°C y 1200°C.
- 45
13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la aleación de TiAl se somete a un tratamiento térmico en dos etapas después de la conformación por forja isoterma, comprendiendo la primera etapa del tratamiento térmico un recocido de recristalización durante 50 a 100 minutos a una temperatura por debajo de la temperatura de transformación  $\gamma/\alpha$  y comprendiendo la segunda etapa del tratamiento térmico un recocido de estabilización en el intervalo de temperatura de 800°C a 950°C durante 5 a 7 h, y siendo la velocidad de enfriamiento en la primera etapa de tratamiento térmico, en el intervalo de temperatura entre 1300°C y 900°C, mayor o igual que 3°C/s.
- 50
14. Procedimiento según la reivindicación 13, caracterizado por que el recocido de recristalización se realiza durante 60 a 90 minutos, especialmente 70 a 80 minutos, y/o el recocido de estabilización se realiza en el intervalo de

## ES 2 753 242 T3

temperatura de 825°C a 925°C, especialmente 850°C a 900°C, y/o durante 345 a 375 minutos.

15. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la temperatura en el tratamiento térmico se ajusta y se mantiene con una precisión de una desviación de 5°C a 10°C respecto de la temperatura nominal hacia arriba y hacia abajo.
- 5 16. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se emplean como material previo para la forja unas piezas brutas (5) que se han obtenido por al menos uno de los procedimientos del grupo que comprende fundición, inyección en molde metálico (MIM), procedimientos pulvimetalúrgicos, procedimientos aditivos, impresión 3D, soldadura de recargue, prensado isostático en caliente y procedimientos de mecanización por erosión de material.
- 10 17. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la forja isoterma y/o la conformación se efectúan en un paso de conformación en una sola etapa, especialmente en una estampa de forja, y/o la forja isoterma se efectúa como forja en estampa con una estampa calentada.
- 15 18. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la pieza bruta habilitada (5) está sin forjar y se transforma en el semiproducto con un solo paso de forja, ejecutándose el solo un paso de forja especialmente prensando dos moldes de una estampa en solamente una respectiva dirección y uno contra otro para transformar así la pieza situada entre los moldes en el semiproducto (9).
- 20 19. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que se mecaniza adicionalmente el semiproducto forjado (9), que se ha conformado en particular con exclusivamente un paso de forja, con un procedimiento de mecanización por erosión de material, especialmente mediante una mecanización de arranque de virutas, preferiblemente un fresado y/o una mecanización electroquímica, para producir el componente forjado, especialmente sin conformación adicional, y/o por que el componente forjado es un álabe de una turbomáquina, especialmente un álabe de turbina, preferiblemente una turbina de baja presión.



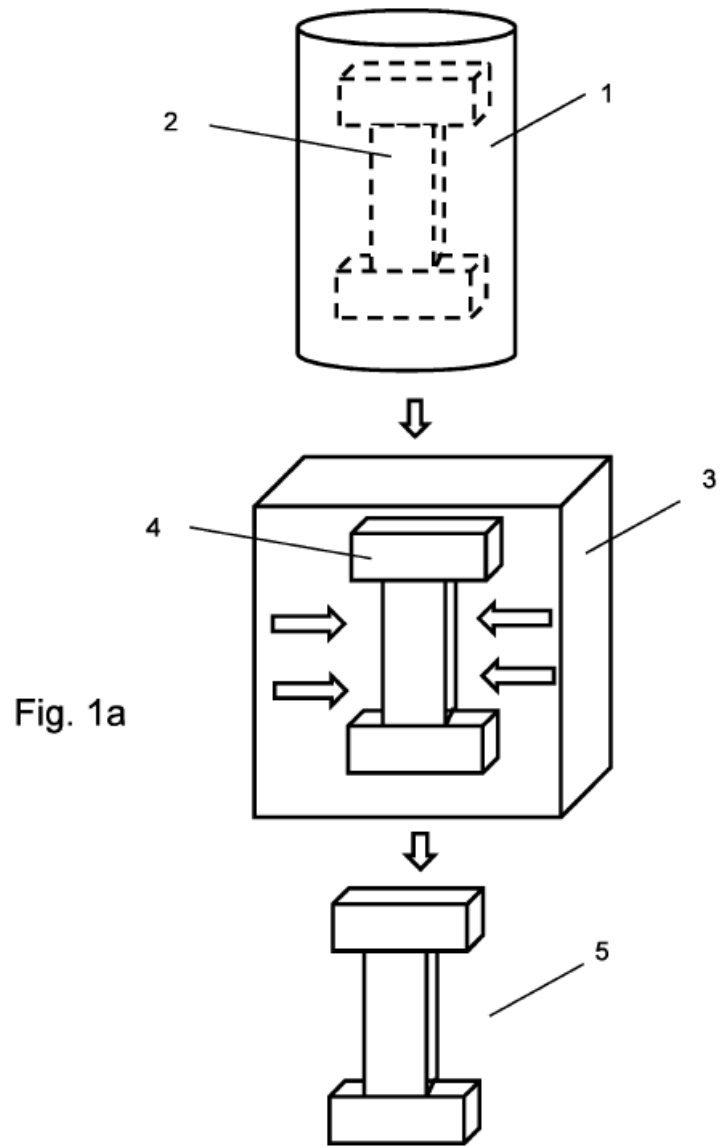


Fig. 1a

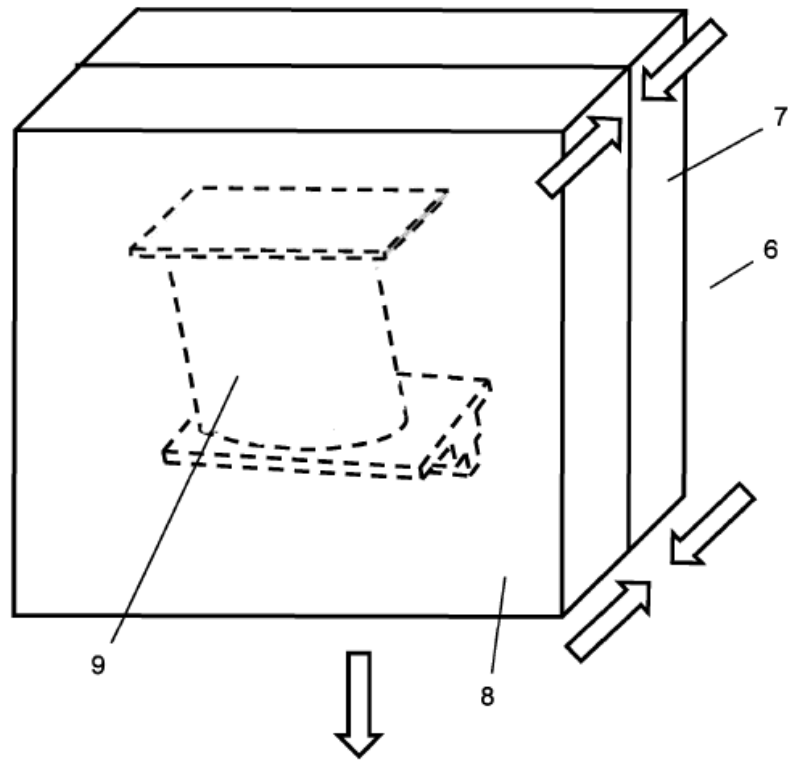
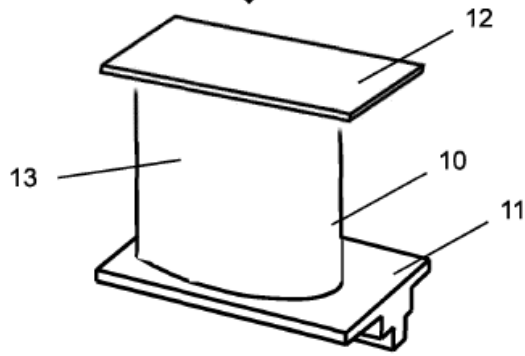


Fig. 1b



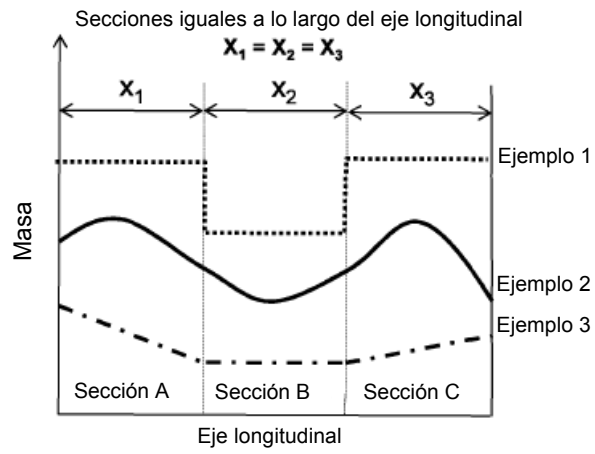


Fig. 2

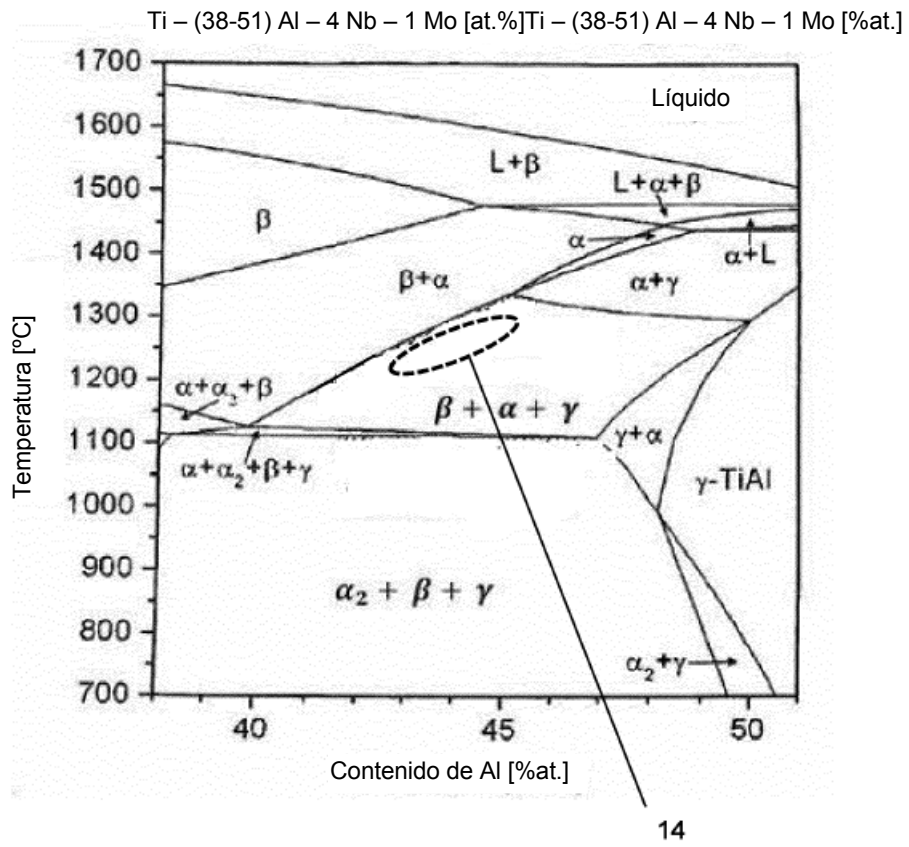


Fig. 3