

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 995 028**

51 Int. Cl.:

**C22C 19/05** (2006.01)

**C22C 1/04** (2013.01)

**C22F 1/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **01.07.2020 PCT/DE2020/100577**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.01.2021 WO21004581**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.07.2020 E 20739847 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.09.2024 EP 3994288**

54 Título: **Procedimiento para la producción de un polvo de una aleación de níquel-cobalto**

30 Prioridad:

**05.07.2019 DE 102019118224**

**26.06.2020 DE 102020116868**

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

**05.02.2025**

73 Titular/es:

**VDM METALS INTERNATIONAL GMBH (100.00%)  
Plettenberger Straße 2  
58791 Werdohl, DE**

72 Inventor/es:

**GEHRMANN, BODO;  
HENRICH, TATIANA;  
SCHMIDT, CHRISTINA y  
BRUNNERT, KATRIN**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

ES 2 995 028 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 la producción de un polvo de una aleación de níquel-cobalto

La invención se refiere a un procedimiento para la producción de un polvo a partir de una aleación de níquel-cobalto y su modificación para aumentar las propiedades a altas temperaturas, como resistencia y estabilidad a la oxidación a temperaturas de aplicación más altas y, al mismo tiempo, buena procesabilidad.

Las aleaciones de níquel y níquel-cobalto alloy 718, Waspaloy, Udimet 720, alloy 939, alloy 738LC se utilizan ampliamente debido a su excelente resistencia mecánica (gracias a la solidificación de cristales mixtos y al endurecimiento por precipitación) en combinación con la estabilidad a la oxidación y la corrosión a través de la capa de óxido de Cr a mayores temperaturas de hasta aproximadamente 900 °C (dependiendo del material). Estas aleaciones se desarrollaron y se optimizaron continuamente para su procesamiento mediante fundición y forjado o simplemente fusión y las condiciones de solidificación presentes en la misma.

El efecto de endurecimiento por precipitación predominante en aleaciones de níquel y níquel-cobalto se basa en la fase  $\gamma'$  (fase gamma') con estequiometría nominal  $Ni_3Al$  y la estructura reticular  $L1_2$ , que no necesita ubicaciones preferentes debido al ligero desajuste y se elimina de forma homogénea en los granos. A través de una variedad de posibilidades de sustitución, los átomos de Ni y Al en los materiales con correspondientes contenidos de aleación pueden ser reemplazados por Co, Ti, Ta y Nb. Con el aumento del contenido de Al, Ti, Ta, Nb, etc., la temperatura de solvus y la fracción volumétrica de la fase  $\gamma'$  aumentan, también la cinética de precipitación aumenta normalmente, de modo que en aleaciones con un alto contenido en  $\gamma'$  (gamma'), como la aleación 939 o 738LC, la precipitación de la fase  $\gamma'$  es inevitable incluso en el caso de enfriamiento rápido.

En los procedimientos de fabricación generativos, no sólo la composición química de la aleación sino también la cinética de precipitación de la fase  $\gamma'$  juegan un papel importante, ya que existe el riesgo de formación de grietas durante el procesamiento debido a los efectos de eliminación y tensiones adicionales causadas por la precipitación de la fase  $\gamma'$ . Esto dificulta generalmente la soldadura de aleaciones de níquel y níquel-cobalto que contienen  $\gamma'$ .

Los elementos altamente segregantes como B, Zr, Ti y Mn reducen la soldabilidad de las aleaciones de níquel y níquel-cobalto. B y Zr se utilizan para la mejora de las propiedades a altas temperaturas. Para la desoxidación de la masa fundida se utilizan Ti y Mn. Además, la capacidad de procesamiento de los procedimientos de fabricación aditiva se deteriora por elementos menores como S, O, N, P y Pb.

El documento DE 10 2015 016 729 A1 divulga un procedimiento para la fabricación de productos semiacabados metálicos a partir de una aleación con más de 50 % de níquel, que incluye las siguientes etapas de procedimiento:

- se genera un electrodo por VIM,

- se somete el electrodo a un tratamiento térmico en un horno para la reducción de tensiones y sobrevejecimiento en el intervalo de temperatura entre 400 y 1250 °C durante un período de 10 a 336 horas,

- se enfría el electrodo al aire o en el horno, según las dimensiones, en especial según el diámetro, hasta una temperatura entre temperatura ambiente y menos de 1250 °C, en especial menos de 900 °C,

- se refunde el electrodo enfriado para dar un bloque VAR mediante VAR con una tasa de refundición de 3,0 a 10 kg/minuto,

- se trata térmicamente el bloque VAR en un horno en un intervalo de temperatura entre 400 y 1250°C durante un período de 10 a 336 horas,

- se enfría el bloque VAR al aire o en el horno, según las dimensiones, en especial según el diámetro, hasta una temperatura entre temperatura ambiente y menos de 1250 °C, en especial menos de 900 °C,

- se refunde el bloque VAR con una tasa de refundición de 3,0 a 10 kg/minuto,

- se somete el bloque VAR refundido a un tratamiento térmico en el intervalo de temperatura entre 400 y 1250°C durante un período de 10 a 336 horas,

- a continuación se lleva el bloque VAR a la forma de producto y las dimensiones deseadas mediante conformado en caliente y/o en frío.

El documento EP 2949768 A1 divulga la composición adaptada de la aleación Alloy 738LC con una fracción volumétrica  $\gamma'$  entre 60 y 70 % para la producción de componentes casi exentos de grietas mediante reducción de elementos altamente segregantes. Para ello se utilizan las siguientes fórmulas:  $C/B=10-32$ ,  $C/Hf>2$ ,  $C/Zr>8$ ,  $C/Si>1$ .

El documento CA 2704874 A1 divulga una aleación a base de níquel y componentes formados a partir de ella con el ejemplo "Componente producido mediante pulvimetalurgia para la aplicación en la turbina de gas", que se caracteriza por una vida útil mejorada a alta temperatura que incluye comportamiento de fluencia y crecimiento de grietas por

fluencia, constituida por (en % en peso) Co 16,0-30,0 %, Cr 11,5-15,0 %, Ta 4,0-6,0 %, Al 2,0-4,0 %, Ti 1,5-6,0 %, W hasta 5,0 %, Mo 1,0-7,0 %, Nb hasta 3,5 %, Hf hasta 1,0 %, C 0,02-0,20 %, B 0,01-0,05 %, Zr 0,02-0,10 % resto Ni, en este caso, relación Ti:Al entre 0,5 y 2,0.

5 El documento CA 1253363 divulga una aleación a base de níquel con la fracción volumétrica  $\gamma'$  entre 42 % y 48 %, constituida por (en % en peso) Co 10,0-14,0 %, Cr 14,0-18,0 %, Ta hasta 3,0 %, Al 2,0-3,0 %, Ti 2,0-3,0 %, W 3,0-5,0 %, Mo 3,0-5,0 %, Nb 2,0-3,0 %, Hf hasta 50 ppm, C hasta 0,1 %, B 0,01-0,05 %, Zr 0,02-0,08 %, S hasta 50 ppm, Mg hasta 50 ppm, resto Ni.

10 El documento US 2008/0166258 A1 divulga una aleación a base de níquel para la producción de resortes de alambre estables al calor, constituida por (en % en peso) Co 5,0-18,0 %, Cr 13,0-25,0 %, Al 0,1-3,0 %, Ti 0,5-4,0 %, W 0,15-2,5 %, Mo 1,5-7,0 %, Nb 0,3-6,0 %, Cu 0,03-2,0 %, Fe hasta 5,0 %, C hasta 0,1 %, P hasta 0,01 %, B 0,001-0,02 %, Zr 0,01-0,3 %, S hasta 0,01 %, N hasta 0,1 %, Mn hasta 1,5 %, Si hasta 1,0 %, Mg hasta 0,05 %, Ca hasta 0,05 %, O hasta 0,1 %, H hasta 0,05 % resto Ni.

15 El documento CA 2874304 C divulga una aleación a base de níquel con resistencia a la fluencia mejorada y estabilidad al agrietamiento por recalentamiento, constituida por (en % en peso) Co 5,0-25,0 %, Cr 15,0-28,0 %, Ta hasta 8,0 %, Al 0,2-2,0 %, Ti 0,2-3,0 %, W hasta 15,0 %, Mo 3,0-15,0 %, Nb hasta 3,0 %, Fe hasta 15,0 %, Re hasta 8,0 %, C 0,001-0,15 %, Hf hasta 1,0 %, B 0,0005-0,01 %, Zr hasta 2,0 %, Y hasta 0,5 %, La hasta 0,5 %, Ce hasta 0,5 %, Nd hasta 0,5 %, S hasta 0,01 %, N hasta 0,03 %, Mn 0,01-3,0 %, Si 0,01-2,0 %, Mg hasta 0,05 %, Ca hasta 0,05 %, resto Ni.

20 El documento GB 813948 A divulga una aleación sinterizada a base de níquel constituida por ( % en peso) Co hasta 55,0 %, Cr 4,0-30,0 %, Al 0,3-8,0 %, Ti 0,5-8,0 %, W hasta 5,0 %, Mo hasta 20,0 %, Nb hasta 5,0 %, Fe hasta 40,0 %, C 0,01-0,5 %, B 0,01-0,8 %, Zr hasta 0,5 %, resto Ni.

25 Los documentos DE 2108978 A y DE 2108973 A describen un procedimiento para la producción de superaleaciones atomizando masa fundida metálica mediante un haz de argón; las gotitas formadas se enfrían rápidamente mediante una gran reserva de agua que se encuentra en el fondo. Después del proceso de atomización, el polvo se lava varias veces con acetona, después se seca y se fracciona en un tamiz de malla 80, a continuación se forja con martillo a altas temperaturas.

30 El documento WO 2014/124626 A1 divulga una aleación de NiCo para uso en motores de aviones. La aleación presenta la siguiente composición (en % en peso): Ni 30,0-65,0 %, Fe hasta 10,0 %, Co 12,0-35,0 %, Cr 13,0-23,0 %, Mo 1,0-6,0 %, W hasta 4,0 %, Nb + Ta 4,0-6,0 %, Al hasta 3,0 %, Mn hasta 1,0 %, Ti 2,0 %, Si hasta 1,0 %, C hasta 0,1 %, P hasta 0,03 %, Mg hasta 0,01 %, hasta 0,02 %, Zr hasta 0,1 %. Esta aleación, también denominada alloy 780, presenta una excelente resistencia a altas temperaturas de hasta 750 °C, estabilidad a la oxidación, así como conformabilidad y soldabilidad. La buena conformabilidad, así como soldabilidad de VDM Alloy 780 se basa, entre otras cosas, en un desajuste relativamente grande (0,48 % en comparación con - de 0,04 % a +0,34 % Udimet 720 y otras aleaciones de alto contenido en  $\gamma'$ ) (R. A. Ricks, A. J. Porter, R. C. Ecob, Acta Metall., 31, 43-53 (1983).).

35 Por el documento EP 2314725 A1 se ha dado a conocer un procedimiento para la producción de un lingote de VAR, en donde el procedimiento comprende lo siguiente:

- verter una aleación que es una superaleación a base de níquel en un molde de fusión
- recocer y sobreendurecer la aleación mediante calentamiento de la aleación a al menos 649 °C durante al menos 10 horas
- refundir por electroescoria la aleación con una tasa de fusión de al menos 3,63 kg/min
- 40 - transferir en caliente de la aleación a un horno de calentamiento
- mantener la aleación en el horno de calentamiento a una primera temperatura de 316-982°C durante al menos 10 horas
- aumentar la temperatura del horno desde la primera temperatura hasta una segunda temperatura de al menos 1163°C de manera que se supriman las tensiones térmicas en la aleación
- 45 - mantener la segunda temperatura durante al menos 10 horas
- refundir por arco eléctrico en vacío de un electrodo VAR la aleación con una tasa de fusión de 3,63 a 5 kg/min para proporcionar el lingote VAR.

50 La invención se basa en la tarea de proporcionar un polvo para la fabricación generativa de componentes basados en VDM Alloy 780, así como su modificación para aumentar las propiedades a altas temperaturas como resistencia, estabilidad a la oxidación a temperaturas de aplicación más altas con procesabilidad simultáneamente buena para procedimientos de fabricación generativos (producción de componentes sin grietas) y su producción de alta calidad y económica. En este caso, no solo son importantes los requisitos especiales de distribución del tamaño de partícula, forma de partícula y fluidez de polvo, sino también ajustar a medida las combinaciones óptimas de elementos de

## ES 2 995 028 T3

aleación para que las modificaciones de la aleación se adapten a los requisitos del componente final o la procesabilidad.

Esta tarea se resuelve mediante un procedimiento para la producción de un polvo a partir de una aleación de níquel-cobalto, definiéndose los contenidos (en % en peso) como sigue:

C	> 0 - máx. 0,1 %
S	máx. 0,015 %
Cr	13 - 23 %
Ni	Resto (>30 %)
Mn	máx. 1,0 %
Si	máx. 1,0 %
Mo	1-6 %
Ti	> 0-3,0 %
Nb+Ta	3-8 %
Cu	máx. 0,5 %
Fe	> 0 - máx. 10 %
Al	> 0 - < 4,0 %
V	hasta 4 %
Zr	> 0 - máx. 0,1 %
Co	> 12 - < 35 %
W	hasta 4 %
Hf	hasta 3,0 %
O	máx. 0,1 %
N	> 0 - máx. 0,1 %
Mg	> 0 - máx. 0,01 %
B	> 0 - máx. 0,02 %
P	> 0 - máx. 0,03 %
Ar	0 - máx. 0,08 %
Se	máx. 0,0005 %
Bi	máx. 0,00005 %
Pb	máx. 0,002 %

- 5
- fundiéndose una aleación en un horno VIM,
  - manteniéndose la masa fundida líquida durante 5 minutos a 2 horas, en especial 20 minutos a 2 horas, para la homogeneización,
- 10
- ajustándose una instalación de atomización cerrada con un gas suministrado a un punto de rocío de -10°C a -120°C,
  - insuflándose la masa fundida a través de una boquilla en una corriente de gas con un caudal de gas de 2 m<sup>3</sup>/min a 150 m<sup>3</sup>/min
  - recogiendo las partículas de polvo solidificadas en un recipiente hermético a gases, en donde
  - las partículas tienen un tamaño de partícula de 5 µm a 250 µm,
- 15
- las partículas de polvo son esféricas,
  - el polvo tiene inclusiones de gas de 0,0 a 4 % del área de poros (poros > 1 µm) en proporción con el área total de los objetos evaluados,
  - el polvo tiene una densidad aparente de 2 hasta la densidad de la aleación de aproximadamente 8 g/cm<sup>3</sup>,
  - el polvo se envasa herméticamente bajo una atmósfera de gas protector con argón.

## ES 2 995 028 T3

Ventajosamente, los siguientes elementos se pueden ajustar como sigue (datos en % en peso):

C	máx. 0,05 %
S	máx. 0,010 %
Cr	16-22 %
Mn	máx. 0,6 %
Si	máx. 0,4 %
Mo	2-6 %
Fe	>0-5 %
Ti	0,0005-2,0 %, especialmente hasta < 1 %
Al	1,6-3,5 %
Co	15-27 %
Ni	resto (>30)

A continuación se presenta un ejemplo de un polvo elaborado a partir de una aleación de níquel-cobalto a base de Alloy 780 (datos en % en peso):

Ni	30-65 %
Fe	> 0 - máx. 5 %
Co	> 15 - < 27 %
Cr	16-22 %
Mo	2-6 %
W	hasta 4 %
Hf	hasta 2,5 %
Nb + Ta	5-7,5 %
Al	1,6-3,5 %
Mn	máx. 0,6 %
Ti	0,0005-2,0 %, especialmente < 1,0 %
Si	0,0005-0,4 %
C	> 0 - máx. 0,05 %
P	> 0 - máx. 0,025 %
N	> 0 - máx. 0,1 %
Mg	> 0 - máx. 0,008 %
B	> 0 - máx. 0,02 %
Ar	máx. 0,05 %
Zr	> 0 - máx. 0,1 %

5

Deben cumplirse las siguientes relaciones:

$$\text{Mo} + \text{W} \geq 2,5$$

$$0,0005 < \text{B} + \text{Zr} + \text{P} < 0,15$$

$$\text{S} + \text{Se} + \text{Bi} + \text{Pb} < 0,1$$

10

$$900^{\circ}\text{C} < \text{solvus } \gamma' < 1130^{\circ}\text{C}$$

20 % < fracción volumétrica de  $\gamma'$  < 45 % en estado recocido por precipitación

15

En la Tabla 1 se citan las aleaciones de referencia convencionales como estado de la técnica, que pueden reemplazarse mediante adaptación y modificación según la invención de la composición química de VDM Alloy 780 en la aplicación en procedimientos de fabricación generativos a través de mejores propiedades a alta temperatura y/o procesabilidad. En este caso, se presta especial atención al contenido en volumen de  $\gamma'$ , ya que juega un papel importante en la resistencia a altas temperaturas. Además, es necesaria una subdivisión adicional en el intervalo de altas temperaturas (grupos nº 2 y 3, así como 4 y 5). A este respecto, dependiendo del uso del componente, es útil un diseño de la estructura ya sea en el intervalo de resistencia a la fluencia o de la resistencia al cambio de carga. Esto

## ES 2 995 028 T3

se consigue mediante la estabilidad de la fase delta. La fase delta precipita en los límites de grano, los inmoviliza y ralentiza claramente la propagación de grietas.

Tabla 1. Agrupación de aleaciones

Aleación de referencia	Alloy 718 Waspaloy Udimet 720	VDM Alloy 780	Alloy 939		Alloy 738LC	
Requisitos para la estructura	25 %<Vol. y'( %). <30 %, Vol. Delta<6 %	25 %<Vol. y'( %)<30 %, Vol. Delta<6 % sin fase eta	30 %<Vol. y'( %) ≤35 %, sin fase eta		35 %<Vol. y'( %) ≤45 %, sin fase eta	
			Con Delta Ph.	Sin Delta-Ph.	Con Delta Ph.	Sin Delta-Ph.
Grupo nº	0	1	2	3	4	5

5 El contenido en oxígeno debe ser menor o igual a 0,100 % para garantizar la capacidad de fabricación y utilización de la aleación. Si el contenido de oxígeno es demasiado bajo, los costes aumentarán. Por tanto, el contenido de oxígeno es  $\geq 0,00001$  %. Son concebibles las siguientes restricciones sobre el contenido de oxígeno:

- 0,00001-0,1
- 0,00002-0,1
- 10 - 0,00005-0,1
- 0,00008-0,1
- 0,0001-0,1
- 0,0002-0,1
- 0,0005-0,1
- 15 - 0,0008-0,1
- 0,001-0,1
- 0,002-0,1
- 0,005-0,1
- 0,008-0,1
- 20 - 0,010-0,1
- 0,00001-0,10
- 0,00001-0,08
- 0,00001-0,05
- 0,00001-0,03
- 25 - 0,00001-0,02

El nitrógeno debe ser menor o igual a 0,100 % para garantizar la capacidad de fabricación y utilización de la aleación. Un contenido demasiado alto de nitrógeno conduce a la formación de nitruros, que afectan negativamente a las propiedades de la aleación. Un contenido de nitrógeno demasiado bajo aumenta los costes. Por tanto, el contenido de nitrógeno es  $\geq 0,00001$  %. Son concebibles las siguientes restricciones sobre el contenido de nitrógeno:

- 30 - 0,00001-0,1
- 0,00002-0,1
- 0,00005-0,1
- 0,00008-0,1

## ES 2 995 028 T3

- 0,0001-0,1
- 0,0002-0,1
- 0,0005-0,1
- 0,0008-0,1
- 5 - 0,001-0,1
- 0,002-0,1
- 0,005-0,1
- 0,008-0,1
- 0,010-0,1
- 10 - 0,00001-0,10
- 0,00001-0,08
- 0,00001-0,05
- 0,00001-0,03
- 0,00001-0,02
- 15 Tanto en el polvo como en los componentes fabricados (muestras impresas en 3D), los tamaños de partícula tanto de nitruros como de carburos y/o carbonitruros son muy pequeños (aproximadamente  $<8 \mu\text{m}$ ). En algunos casos, es posible que las partículas citadas anteriormente no estén presentes o que solo se vuelvan visibles después del tratamiento térmico. Los tamaños de partícula pequeños de precipitados que contienen N tienen un efecto positivo sobre propiedades a alta temperatura, ya que los precipitados que contienen N actúan como puntos de iniciación de grietas en aleaciones producidas convencionalmente.
- 20 El contenido en argón debe ser inferior o igual a 0,08 % para garantizar la productibilidad y la utilizabilidad de la aleación. El argón no se puede disolver en la matriz y, por lo que puede influir negativamente en las propiedades mecánicas del componente, ya que las inclusiones de argón pueden actuar como punto de iniciación de grietas. Si el contenido en argón demasiado bajo aumenta los costes. Por tanto, el contenido de argón es  $\geq 0,0000001 \%$  ( $\geq 1 \text{ ppb}$ ).
- 25 Son concebibles las siguientes limitaciones del contenido en argón, en donde están incluidos contenidos en argón tanto de la producción de polvo como de la producción de componentes:
  - 0,0000001-0,05
  - 0,0000002-0,05
  - 0,0000001-0,005
- 30 - 0,0000001-0,002
- 0,0000001-0,001
- La aleación de Hf en caso necesario hasta un máximo de 3,0 % puede tener un efecto positivo en la solidificación de la fase  $\gamma'$ . Además, se puede utilizar la aleación de Hf para evitar la formación de grietas durante el proceso de solidificación.
- 35 En el caso de requisitos elevados en propiedades mecánicas a temperaturas más altas, el contenido en V puede aumentarse en caso necesario. En este caso, V tiende a concentrarse en los límites de grano y tiene una influencia positiva sobre las propiedades mecánicas a temperaturas más altas.
- El procedimiento según la invención para la producción de un polvo descrito anteriormente a partir de una aleación de níquel-cobalto se presenta a continuación
- 40 - fundiéndose una aleación en un horno VIM,
- manteniéndose la masa fundida líquida durante 5 minutos a 2 horas, en especial 20 minutos a 2 horas, para la homogeneización,
- ajustándose un sistema de atomización cerrado con un gas suministrado a un punto de rocío de  $-10^\circ\text{C}$  a  $-120^\circ\text{C}$ ,

- insuflándose la masa fundida a través de una boquilla en una corriente de gas con un caudal de gas de 2 m<sup>3</sup>/min hasta 150 m<sup>3</sup>/min
- recogiénose las partículas de polvo solidificadas en un recipiente hermético a gases, en donde
- las partículas tienen un tamaño de partícula de 5 µm a 250 µm,
- 5 - las partículas de polvo son esféricas,
- el polvo tiene inclusiones de gas de 0,0 a 4 % del área de poros (poros > 1 µm) en proporción con el área total de los objetos evaluados,
- el polvo tiene una densidad aparente de 2 hasta la densidad de la aleación de aproximadamente 8 g/cm<sup>3</sup>,
- el polvo se envasa herméticamente bajo una atmósfera de gas protector con argón.
- 10 Se pueden encontrar perfeccionamientos ventajosos del procedimiento según la invención en las reivindicaciones subordinadas según el procedimiento.

Son concebibles los siguientes pasos de fabricación iniciales:

- se produce un bloque de aleación maestra con análisis químico definido mediante fusión en el horno VIM, VIM/ESU, VIM/ESU/VAR, VIM/VAR, VOD o VLF con, en caso necesario, refundición posterior en ESU y/o VAR según requisitos de pureza del material,
- 15 - el bloque de aleación principal se separa en piezas pequeñas mediante serrado,
- las piezas de la aleación maestra se funden en un horno VIM, o
- los elementos de aleación de peso definido se funden en un horno VIM correspondientemente al análisis químico,
- la combinación entre material de aleación maestra, desechos relacionados con el proceso (incluidos desechos de clientes, como polvos reciclados, así como estructuras de soporte o componentes defectuosos), así como nuevos elementos de aleación en proporción de 0 a 100 %. En cada caso se considera la proporción exacta, considerando aspectos cualitativos, económicos y ecológicos. Puede ser ventajoso que el bloque de aleación maestra se someta a un procesamiento de la superficie (por ejemplo mediante cepillado, esmerilado, decapado, corte, pelado, etc.) antes del corte. Aquí se pueden eliminar errores que no pueden eliminarse mediante la refundición adicional y que pueden ser perjudiciales para aplicaciones posteriores. Además, el uso de posibles aleaciones maestras conlleva el cumplimiento de los más altos requisitos de calidad en la pureza química del polvo, que sólo pueden garantizarse mediante procesos previos de refundición,
- 20 - la masa fundida líquida se mantiene durante 5 minutos a 2 horas, en particular 20 minutos a 2 horas para la homogeneización,
- 25 - se ajusta una instalación de atomización cerrada con gas argón a un punto de rocío de -10°C a -120°C, preferiblemente en el intervalo de -30°C a -100°C,
- la masa fundida se insufla a través de una boquilla hacia una corriente de gas argón con un caudal de gas de 2 m<sup>3</sup>/min a 150 m<sup>3</sup>/min,
- las partículas de polvo solidificadas se recogen en un recipiente hermético a gases,
- 30 - las partículas tienen un tamaño de partícula de 5 µm a 250 µm, situándose los intervalos preferidos entre 5 y 150 µm, o bien 10 y 150 µm,
- las partículas del polvo son esféricas,
- el polvo presenta inclusiones de gas de 0,0 a 4 % de área de poros (poros > 1 µm) en proporción con el área total de los objetos evaluados, situándose los intervalos preferidos en 0,0 a 2 %. La cantidad de inclusiones de gas en el polvo posibilita una baja porosidad residual de las partes producidas,
- 35 - el polvo tiene una densidad aparente de 2 hasta la densidad de la aleación de aproximadamente 8 g/cm<sup>3</sup>, situándose los intervalos preferidos en valores de 4 a 5 g/cm<sup>3</sup>,
- el polvo se envasa herméticamente bajo una atmósfera de gas protector con argón.
- 40 - el polvo se envasa herméticamente bajo una atmósfera de gas protector con argón.

45 El polvo se produce preferentemente en una instalación de atomización con gas inerte al vacío (VIGA). En esta instalación, la aleación se funde en un horno de fusión por inducción al vacío (VIM), se dirige a un embudo de fusión,

que conduce a una boquilla de gas en la que el metal fundido se atomiza para dar partículas metálicas bajo presión elevada de 5 a 100 bar con gas inerte. La masa fundida se calienta en el crisol a 5 hasta 400 °C por encima del punto de fusión. El caudal de metal durante la atomización se sitúa en 0,5 a 80 kg/min y el caudal de gas se sitúa en 2 a 150 m<sup>3</sup>/min. Debido al rápido enfriamiento, las partículas de metal se solidifican en forma esférica (partículas esféricas). El gas inerte utilizado durante la atomización puede contener entre 0,01 y 100 % de nitrógeno, en caso necesario. Después se separa la fase gaseosa del polvo en un ciclón y a continuación se envasa el polvo.

Alternativamente, el polvo se puede producir mediante el denominado procedimiento EIGA en lugar de VIGA. En este caso, un bloque de aleación prefabricado en forma de un electrodo giratorio se funde sin contacto mediante una bobina de inducción. La masa fundida gotea desde el electrodo directamente en la corriente de gas de una boquilla de gas.

El bloque de aleación para EIGA puede producirse a su vez mediante los procedimientos de fusión VIM, ESU, VAR, VOD, o bien VLF y sus combinaciones y someterse opcionalmente a procesos de conformado en caliente, como forjado y laminado. Es ventajosa una limpieza de la superficie del bloque mediante un tratamiento como esmerilado o/y pelado antes de uso en el procedimiento EIGA.

El gas inerte en la producción de polvo puede ser opcionalmente argón, o bien una mezcla de argón con 0,01 a 100 % de nitrógeno. Las posibles limitaciones del contenido en nitrógeno pueden ser:

- 0,01 a 80 %
- 0,01 a 50 %
- 0,01 a 30 %
- 0,01 a 20 %
- 0,01 a 10 %
- 0,01 a 10 %
- 0,1 a 5 %
- 0,5 a 10 %
- 1 a 5 %
- 2 a 3 %

Alternativamente, se puede utilizar helio como gas inerte.

Preferentemente, el gas inerte puede tener una pureza de al menos 99,996 % en volumen. En especial, el contenido en nitrógeno debe ser de 0,0 a 10 ppmv, el contenido de oxígeno debe ser de 0,0 a 4 ppmv y tener un contenido en H<sub>2</sub>O de ≤ 5 ppmv.

En especial, el gas inerte puede tener preferentemente una pureza de al menos 99,999 % en volumen. En particular, el contenido en nitrógeno debe ser de 0,0 a 5 ppmv, el contenido de oxígeno debe ser de 0,0 a 2 ppmv y tener un contenido en H<sub>2</sub>O de ≤ 3 ppmv. El punto de rocío en la instalación se sitúa en el intervalo de -10 a -120°C. Preferiblemente se sitúa en el intervalo de -30 a -100°C.

La presión durante la atomización de polvo puede situarse preferentemente en 10 a 80 bares.

Las piezas estructurales y componentes, o bien capas de piezas estructurales y componentes producidos mediante fabricación aditiva se construyen a partir de espesores de capa de 5 a 500 µm y, directamente después de la producción, tienen una estructura texturizada con granos estirados en el sentido de construcción de un tamaño de grano medio de 0,5 µm a 2000 µm. El intervalo preferido se sitúa entre 5 µm y 500 µm. Además, en caso necesario, el polvo descrito anteriormente se puede utilizar para la producción de piezas estructurales mediante prensado isostático en caliente (HIP) o procedimientos convencionales de sinterización y extrusión. Además es posible la combinación de procedimientos de fabricación aditiva y subsiguiente tratamiento HIP. En este caso, es posible aplicar los pasos de reprocesamiento para piezas estructurales HIP descritos a continuación.

Las piezas estructurales y componentes, o bien capas de piezas estructurales y componentes producidos mediante fabricación aditiva pueden someterse opcionalmente a un recocido de homogeneización, baja tensión, disolución y/o precipitación. En caso dado, los tratamientos térmicos pueden realizarse bajo gas protector, como por ejemplo argón o hidrógeno, seguido de un enfriamiento en el horno, en caso dado bajo gas protector, al aire, en la atmósfera de recocido en baño de agua agitado.

En caso necesario, las piezas estructurales se recuecen a temperaturas entre 300 °C y 600 °C durante 0,5 h a 10 h y entre 1000 °C y 1250 °C durante 1 h a 300 h bajo aire o gas protector para la homogeneización o para el alivio de tensión. A continuación, en caso necesario, las piezas estructurales se recuecen en disolución o con baja tensión a

temperaturas entre 850 °C y 1.250 °C durante 0,5 h a 30 h bajo aire o gas inerte. El recocido por precipitación puede efectuarse en caso necesario en una o dos etapas y a temperaturas entre 600°C y 850°C durante 1 hora a 30 horas bajo aire o gas inerte.

5 A continuación, las superficies se pueden limpiar o procesar mediante decapado, granallado, esmerilado, torneado, pelado y fresado. Un procesamiento de este tipo puede tener lugar opcionalmente de manera parcial o completamente antes del recocido.

Las piezas estructurales y componentes, o bien capas de piezas estructurales y componentes producidos mediante fabricación aditiva tienen un tamaño de grano medio de 2 µm a 2000 µm después de un recocido. El intervalo preferido se sitúa entre 20 µm y 500 µm.

10 El polvo fabricado según este procedimiento, así como los componentes fabricados a partir de este polvo (muestras impresas en 3D) están exentos de nitruros, así como de carburos y/o carbonitruración. No obstante, si están presentes nitruros y carburos, estos tienen un tamaño de partícula en diámetro de < 100 nm, en especial < 50 nm.

15 Después de un tratamiento térmico de los componentes fabricados a partir de este polvo (muestras impresas en 3D) para homogeneización, recocido por difusión por encima de 900 °C, especialmente por encima de 1000 °C, idealmente por encima de 1100 °C durante más de 1 hora, pueden aparecer nitruros, así como carburos y/o carbonitruros en los componentes fabricados (muestras impresas en 3D). Éstos tienen un tamaño de partícula en diámetro de <8 µm, o bien <5 µm, idealmente <1 µm, en especial <500 nm.

20 Las piezas estructurales y componentes, o bien capas sobre piezas estructurales y componentes producidas mediante fabricación aditiva a partir del polvo generado según la invención deben usarse preferiblemente en áreas en las que el material también se usa como aleación forjada o fundida con análisis relacionado. El término "fabricación aditiva/generativa" se puede subdividir en prototipado rápido, mecanizado rápido, fabricación rápida o similares según nivel de aplicación.

Aquí se diferencian en general:

- impresión 3D con polvos,
- 25 sinterización por láser selectiva,
- fusión por láser selectiva,
- fusión por haz de electrones
- soldadura por deposición láser
- soldadura por haz de electrones selectiva o similares.

30 Las abreviaturas utilizadas aquí se definen de la siguiente manera:

- VIM Fusión por inducción en vacío
- VIGA Instalación de atomización de gas inerte en vacío (fusión por inducción en vacío y atomización de gas inerte)
- VAR Refundición por arco en vacío
- VOD Descaburización de oxígeno en vacío
- 35 VLF Horno de cuchara en vacío
- EIGA Atomización de gas de fusión por inducción de electrodos

El intervalo de dispersión para el tamaño de partícula del polvo se sitúa entre 5 y 250 µm, en donde los intervalos preferidos se sitúan entre 5 y 150 µm, o bien 10 y 150 µm.

40 El polvo tiene inclusiones de gas de 0,0 a 4 % de área de poros (poros > 1 µm) en proporción con el área total de los objetos evaluados, en donde los intervalos preferidos se sitúan en

- 0,0 a 2 %
- 0,0 a 0,5 %
- 0,0 a 0,2 %
- 0,0 a 0,1 %
- 45 0,0 a 0,05 %

El polvo tiene una densidad aparente de 2 hasta la densidad de la aleación de aproximadamente 8 g/cm<sup>3</sup>, en donde los intervalos preferidos se pueden situar en los siguientes valores:

- 4-5 g/cm<sup>3</sup>
- 2-8 g/cm<sup>3</sup>
- 5 2-7 g/cm<sup>3</sup>
- 3-6 g/cm<sup>3</sup>

La cantidad de inclusiones de gas en el polvo posibilita una baja porosidad residual de las partes producidas.

10 En comparación con el estado de la técnica, se prescinde del procedimiento de centrifugación, de este modo se optimiza el tiempo de funcionamiento de la instalación. Los posteriores procesos de refinado optimizan la calidad del polvo para la fabricación aditiva. Además, se realiza la optimización de la composición de la aleación VDM Alloy 780 para la aplicación en procedimientos de fabricación generativos, así como la optimización de la composición para la aplicación a temperaturas más altas con procesabilidad constante.

En la Tabla 2 se indican composiciones químicas del polvo producido con el procedimiento según la invención (datos en % en peso).

15 Se obtienen polvos con un tamaño de partícula de 5 µm a 250 µm.

Un tamaño de partícula demasiado pequeño, inferior a 5 µm, empeora el comportamiento de flujo y, por tanto, debe evitarse, un tamaño de partícula demasiado grande, superior a 250 µm, empeora el comportamiento en la fabricación aditiva.

20 Una densidad aparente demasiado baja de 2 g/cm<sup>2</sup> empeora el comportamiento en la fabricación aditiva. La mayor densidad aparente posible de aproximadamente 8 g/cm<sup>3</sup> viene dada por la densidad de la aleación.

Los polvos fabricados según este procedimiento se pueden utilizar en la fabricación aditiva para la construcción de componentes que tengan las propiedades de las aleaciones base (VDM Alloy 780 y su modificación a alta temperatura). VDM Alloy 780 estándar se puede fabricar sin grietas en la ventana de parámetros del proceso en el procedimiento SLM de alloy 718. En este caso, se alcanza la densidad relativa de 99,98 %.

25 En los procedimientos de fabricación generativa, los parámetros del proceso se pueden describir con ayuda de varios parámetros. La densidad de energía volumétrica se considera frecuentemente característica de los procedimientos SLM y en parte EBM. En principio, la densidad de energía volumétrica se calcula mediante la fórmula [LA Al-Juboori, T. Niendorf, F. Brenne; On the Tensile Properties of Inconel 718 Fabricated by EBM for As-Built and Heat-Treated Components; Metallurgical and Material Transactions B, volumen 49B, 2018]:

30 
$$E = \frac{P}{v \cdot d \cdot h}$$

en J/mm<sup>3</sup>

con potencia de láser (P), velocidad de escaneo (v), espesor de capa (d) y distancia de trayectoria (h)

Para Alloy 718 se utiliza en la mayor parte de los casos una densidad de energía entre 40 y 120 J/mm<sup>3</sup>. Un valor típico se sitúa alrededor de 90 J/mm<sup>3</sup> para ambos procedimientos.

35 En la determinación de parámetros para las composiciones en polvo de Alloy 780 P10047, P10048, P10056, P10085, así como P10086, se utilizaron las densidades de energía en el intervalo de Alloy 718 entre 40 y 120 J/mm<sup>3</sup>, con las densidades relativas superiores a 99 %. Por ejemplo, la densidad de energía puede alcanzar la densidad relativa de 99,98 % en aproximadamente 80 J/mm<sup>3</sup>. En las variantes de alta temperatura de la aleación en polvo 780 (composiciones 1 a 57, así como N1 a N5) se pueden variar densidades de energía de 40 a 600 J/mm<sup>3</sup> para garantizar la alta densidad relativa del material. Sin embargo, los parámetros del proceso pueden variar en gran medida según el proceso.

Las muestras se prepararon con material del lote P10056 según el procedimiento SLM. Aparte de los poros aislados relacionados con el proceso, se pueden conseguir estructuras sin grietas.

45 Dependiendo de los distintos tratamientos térmicos se obtuvo una estructura uniforme con tamaños de grano de, por ejemplo, aproximadamente 75 µm (aproximadamente ASTM 4,5). También se pueden ajustar tamaños de grano más pequeños o más grandes mediante parámetros de tratamiento térmico definidos.a)b)

Tabla 2: composiciones químicas de lotes de polvo generados por atomización.

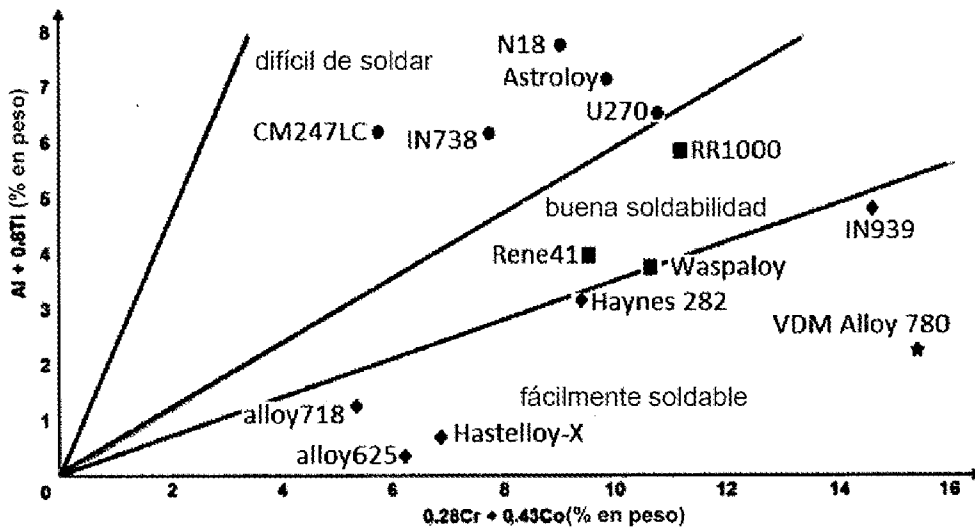
Lote	P10047	P10048	P10056	P10085	P10086
C	0,022	0,0214	0,024	0,022	0,022
S	0,0005	0,0003	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,007	0,0068	0,007	0,006	0,005
Cr	17,86	17,76	17,81	17,64	17,64
Ni	45,2	45,08	45,18	46,1	46,15
Mn	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Si	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
Mo	3,05	3,15	2,91	2,95	2,98
Ti	0,3	0,3	0,3	0,31	0,31
Nb	5,24	5,45	5,53	5,39	5,42
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,88	0,75	0,72	0,64	0,63
P	0,013	0,013	0,013	0,014	0,011
Al	2,12	2,12	2,08	2,18	2,13
Mg	0,0002	0,00003	0,0003	0,001	0,001
Ca	0,0005	0,0001	0,0003	0,000	0,0002
V	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Zr	0,01	0,002	0,01	0,01	0,01
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	25,15	25,21	25,28	24,61	24,57
B	0,004	0,0035	0,004	0,004	0,004
Ta	0,005	0,01	0,005	0,005	0,005
Se	0,0003		0,0003	0,0003	0,0003
Te	0,00005		0,00005	0,00005	0,00005
Bi	0,00003		0,00003	0,00003	0,00003
O	0,002	0,001			
Sb	0,0005		0,0005	0,0005	0,0005
Ag	0,0001		0,0001	0,0001	0,0001

Una composición química típica de un lote ejemplar generado industrialmente (número de lote 420420) de la aleación Alloy 780 para palanquillas forjadas en caliente se enumera, por ejemplo, en la Tabla 3 (y en otras tablas). La composición química de este lote 420420 generado industrialmente en los contenidos, en especial de los elementos Co, Al, Ti y Nb, se elige de modo que la temperatura de solvus gamma sea tan alta (determinada experimentalmente en aproximadamente 990°C) que exista estabilidad estructural hasta temperaturas correspondientemente altas. Además, la fracción volumétrica gamma' es claramente mayor que la de la aleación estándar Alloy 718. Esto da como resultado una posible temperatura de aplicación claramente más alta con valores de resistencia altos. Por otra parte, debido a la composición química bien definida, la temperatura del solvus gamma no es demasiado alta. Por lo tanto, la aleación todavía se puede conformar en caliente desde un bloque de refundición hasta una palanquilla, es decir, se puede forjar fácilmente. Con aproximadamente un 2,1 % de Al y un 0,3 % de Ti, la composición química de este lote 420420 (material de referencia para las consideraciones adicionales), generado a escala industrial para productos forjados, se encuentra en el intervalo analítico de un material que se puede soldar bien (véase diagrama 1). Esto se demostró experimentalmente mediante ensayos de soldadura con haz de electrones y plasma. Esto también se corresponde muy bien con la observación de que no se produjo ningún tipo de grietas en la impresión 3D de cuerpos de ensayo con polvo producido a través de atomización de polvo mediante una instalación VIGA, que tiene una composición química comparable. Esto da ahora como resultado el potencial de adaptar la composición química utilizada para productos forjados en el caso de productos en polvo para procedimientos de fabricación aditivos, como la fusión por láser selectiva, dentro de los análisis límite descritos en el documento de patente, de modo que las aleaciones con composiciones químicas adaptadas puedan ser imprimibles sin grietas mediante fusión por láser selectiva, pero, por ejemplo, se pueda aumentar la temperatura de solvus gamma y también la fracción volumétrica gamma. Esto da como resultado materiales con composiciones químicas que, en el caso de componentes impresos

en 3D, se pueden utilizar con valores de resistencia aún mayores a temperaturas más altas.

Además, en este caso se utiliza un concepto de aleación VDM Alloy 780 con optimización simultánea según la invención para los procedimientos de fabricación generativos:

- (a) el alto contenido de Cr garantiza una estabilidad a la oxidación mejorada del material a altas temperaturas;
- 5 (b) el alto contenido de Co aumenta la energía del error de apilamiento, sustituye los sitios de Ni en la fase  $\gamma'$ , aumenta la constante de red de la fase  $\gamma'$ ;
- (c) el bajo contenido de Ti ralentiza la sustitución de Al en la fase  $\gamma'$  y por tanto la cinética de precipitación, lo que también mejora la soldabilidad (véase diagrama 1). Además, se mejora la estabilidad a la oxidación a alta temperatura. La reducción del contenido de Ti tiene un efecto positivo sobre la desestabilización de la fase  $\eta$  y de los precipitados incoherentes que contienen N y  $\gamma$ , por tanto, mejora las propiedades a altas temperaturas;
- 10 (d) los contenidos adaptados de Nb y Ta, así como las adiciones de Hf ralentizan la simplificación excesiva de la fase  $\gamma'$  a temperaturas más altas, aumentan el desajuste y solidifican la fase  $\gamma'$ ;
- (e) la reducción de elementos menores mejora la procesabilidad de la aleación y permite producir componentes exentos de grietas también en fracciones volumétricas elevadas de fase  $\gamma'$ ;



15

Diagrama 1: Intervalo analítico de aleaciones y su soldabilidad

(según M. M. Attallah et al. "Additive manufacturing of Ni-based superalloys: The outstanding issues", MRS Bull., vol. 41, no., pp. 758-764, 201

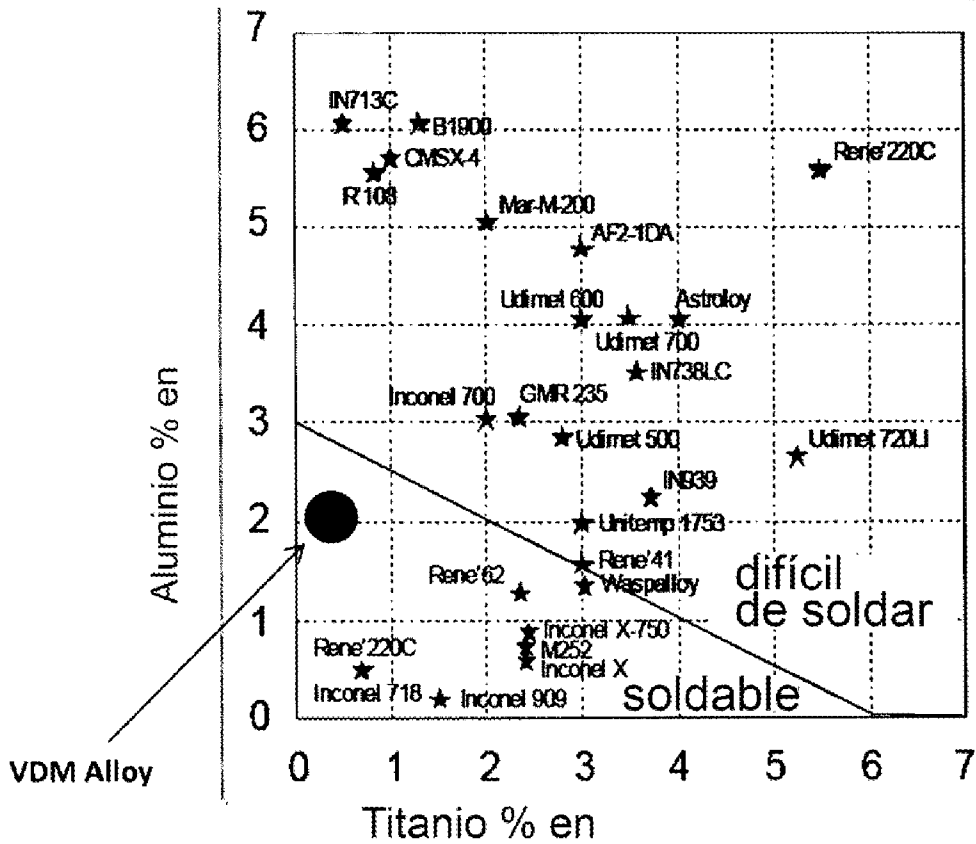


Diagrama 2: sensibilidad al agrietamiento en caliente debido a la fase gamma' (según Cam & Sekhar).

Con la ayuda de simulaciones termodinámicas (JMatPro y ThermoCalc) con la base de datos TTNi8, se calculó una extensa matriz de ensayo con variación de las composiciones químicas y, por lo tanto, se determinaron las temperaturas de solvus gamma' y las fracciones volumétricas gamma' de estas aleaciones (véase la siguientes tablas, diagramas de las páginas siguientes).

En este caso se variaron los siguientes elementos y contenidos de elementos:

Cr: 16 / 18 / 20 %

Ni: de 43 % a 55,5 % (elemento residual)

10 Mo: 3 / 3,5 / 4 / 6 %

Ti: 0,1 / 0,3 / 0,6 / 0,9 / 1,2 / 1,6 / 2,1 % (hasta 3 %)

Nb: 3,5 / 4,0 / 5,0 / 5,4 %

Ta: 0,5 / 1 / 2 %

Al: 1,6 / 1,9 / 2,2 / 2,4 / 2,5 / 2,6 / 2,8 / 3,1 / 3,5 / 4,0 %

15 Co: 15 / 17,5 / 20 / 22,5 / 24,5 / 27,5 %

W: 0,5 / 1 / 2 %

Hf: 0,5 / 1 / 2 %

Las Tablas 3a a 3d contienen análisis de aleaciones seleccionadas con variación de los contenidos de Al y propiedades de fase calculadas con un contenido de Co constante de 24,5 % (Tab. 3a y 3b-1) y 20 % (Tab. 3c y 3d-1).

## ES 2 995 028 T3

Tabla 3a: Selección de análisis de aleaciones con variación del contenido de Al con un contenido de Co constante del 24,5 % (análisis nº 17, 18, 19, 25, 26; nº de referencia 420420 y 1 así como análisis N1 y N2)

Variante	420420	1	17	18	19	25	26	N1	N2
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	45,718	45,418	45,118	46,318	46,618	44,718	44,218
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nb	5,41	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,5	2,8	3,1	1,9	1,6	3,5	4,0
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
Hf	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Variante	420420	1	17	18	19	25	26	N1	N2
T sol. $\gamma$ (°C)	990	1016	1035	1053	1067	980	950	1083	1104
Vol. $\gamma$ (%) a 600°C	26	29	33,5	38	41	24,3	19,7	44,6	49,6
T sol. eta (°C)	1020	996	1008	0	0	998	966	0	0
Vol. máx eta (%)	2,5	2,8	0,9	0	0	1,9	1,4	0	0
T sol. eta (°C)		970	969	0	0	957	936	0	0
T sol. Delta (°C)	1060	1014	978	908	0	1022	1031	0	0
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	2,4	0,7	0	6,7	8,2	0	0
T sol. sigma (°C)	-	774	811	850	881	734	699	819	861
Vol. sigma (%) a 500°C	-	8,6	11,8	14	16	5,9	3,3	19,2	22,6

Tabla 3b-1: Propiedades de fase calculadas de los análisis de aleación de la Tabla 3a

- 5 Además de las proporciones [% en peso] y los tamaños de partícula [nm] de la fase gamma', se calcularon los valores de límites elásticos Rp0,2 [MPa] con el programa JMatPro (versión 11.1) en función de la temperatura de prueba [°C]. Para estos cálculos, se utilizó como parámetro para el recocido en disolución la temperatura de 1100°C con una tasa de enfriamiento de 10K/s. Para análisis de aleaciones en los que la temperatura de solvus gamma' es superior a 1100 °C, la temperatura de recocido en disolución se ajustó a 1150 °C. En el tratamiento térmico de precipitación siguiente al recocido en disolución, en las siguientes tablas se enumeran los resultados para Rp0,2 para los parámetros de recocido 700 °C / 8 h, 850 °C / 8 h y 850 °C / 24 h para la mayoría de las variantes de aleación. En el caso de variantes de aleación seleccionadas, los resultados para Rp0,2 para las temperaturas de precipitación 650°C, 700°C, 750°C, 800°C, 850°C y 900°C para el periodo de recocido 8 h se enumeran con más detalle; para temperaturas de precipitación a las que Rp0,2 muestra un valor máximo para la aleación respectiva, también se añaden los resultados
- 10

para los tiempos de recocido por precipitación de 16 h y 24 h. Las fracciones y los tamaños de partícula de la fase gamma' dependen, además de la composición química, también de los parámetros de recocido por precipitación. De esto resulta la influencia sobre los valores del límite elástico Rp0,2. Además, los valores del límite elástico Rp0,2 también dependen del tamaño de grano de la estructura (en las tablas se indica el tamaño de grano en tamaños ASTM). En este caso, un tamaño de grano ASTM 4,5 corresponde aproximadamente a un tamaño de grano más grueso para una temperatura de recocido en disolución de 1100°C. Por el contrario, ASTM 12 corresponde a un tamaño de grano más fino, que se puede ajustar a una temperatura de recocido en disolución más baja (por ejemplo, alrededor de 1000 °C).

En las Tablas 3b-2 a 3b-7 se enumeran las proporciones y los tamaños de partícula calculados de la fase gamma' y los valores calculados de límite elástico Rp0,2 en función de los parámetros de recocido y los tamaños de grano descritos anteriormente para las aleaciones en la Tab. 3a.

Variante	1	17	18	19	25	26	N1	N2
Gamma' [%]	31	34	36,6	39	29	26	43	47
Gamma' [nm]	24	25	25	26	23	21	27	27
Rp0,2 [MPa]								
650°C	871	905	920	951	834	781	983	993
700°C	875	910	926	957	824	784	989	1001
750°C	848	882	898	927	812	759	957	965
800°C	690	745	791	842	633	570	920	927
850°C	474	515	547	583	431	382	627	802
900°C	328	361	387	415	292	229	448	478

Tabla 3b-2: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3a.

Variante	1	17	18	19	25	26	N1	N2
Gamma' [%]	31	34	36,6	39	29	26	43	47
Gamma' [nm]	24	25	25	26	23	21	27	27
Rp0,2 [MPa]								
650°C	919	954	969	999	883	830	1031	1041
700°C	923	958	974	1005	887	833	1037	1048
750°C	896	930	945	974	860	807	1005	1013
800°C	690	745	791	842	633	570	967	974
850°C	474	515	547	583	431	382	627	802
900°C	328	361	387	415	292	229	448	478

Tabla 3b-3: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 12 de análisis de aleación de la Tab. 3a.

De los valores de la Tabla 3b-2 se desprende que la fracción de fase gamma' aumenta con contenidos de Al crecientes; el tamaño de partícula aumenta ligeramente. También el límite elástico Rp0,2 aumenta con contenido de Al creciente de la aleación, es decir, con contenido creciente de fase gamma'. Además, del curso de los valores Rp0,2 en función de la temperatura de prueba se desprende que en las aleaciones N1 y N2, es decir, con contenidos de Al más altos de 3,5 % y 4,0 %, el gradiente de Rp0,2 más pronunciado que se produce a temperaturas de prueba más elevadas se desplaza hacia una temperatura de prueba más alta de 800°C. En el caso de las aleaciones con un menor contenido de Al, el gradiente más pronunciado en Rp0,2 ya se puede observar a una temperatura de prueba más baja de alrededor de 750°C. En comparación, de los datos de la Tabla 3b-3 se desprende que en el caso del tamaño de grano más fino ASTM 12 en comparación con el tamaño de grano más grueso ASTM 4,5, los valores de límite elástico Rp0,2 son claramente mayores. En las Tablas 3b-2 y 3b-3 se enumeran los datos de resultados para el tratamiento térmico por precipitación a 700 °C / 8 h.

Variante	1	17	18	19	25	26	N1	N2
Gamma' [%]	25	28,1	31,1	34,5	21,2	17,1	38	42,2
Gamma' [nm]	45	44	45	44	45	45	45	45
Rp0,2 [MPa]								
650°C	896	966	1016	1082	824	742	1135	1154
700°C	886	954	1004	1070	815	734	1123	1161
750°C	852	936	991	1056	764	670	1108	1164
800°C	643	706	762	826	577	506	896	1153
850°C	502	552	595	646	450	393	701	901
900°C	348	392	429	468	303	236	511	565

Tabla 3b-4: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3a.

Variante	1	17	18	19	25	26	N1	N2
Gamma' [%]	25	28,1	31,1	34,5	21,2	17,1	38	42,2
Gamma' [nm]	45	44	45	44	45	45	45	45
Rp0,2 [MPa]								
650°C	944	1014	1064	1130	872	791	1183	1201
700°C	933	1002	1052	1117	863	782	1170	1208
750°C	852	936	1011	1095	764	670	1155	1211
800°C	643	706	762	826	577	506	896	1178
850°C	502	552	595	646	450	393	701	901
900°C	348	392	429	468	303	236	511	565

Tabla 3b-5: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 12 de análisis de aleación de la Tab. 3a.

Después del tratamiento térmico por precipitación a 850 °C / 8 h, las fracciones de fase gamma' son menores que después del tratamiento térmico por precipitación a 700 °C / 8 h, pero las partículas de precipitado de fase gamma' son mayores (los datos asociados se enumeran en las Tablas 3b-4 y 3b-5). El efecto positivo del mayor tamaño de partícula sobre el límite elástico Rp0,2 supera el efecto negativo de la fracción de fase más pequeña. El nivel de límite elástico Rp0,2 después del tratamiento térmico por precipitación a 850 °C / 8 h es claramente más elevado que después del recocido a 700 °C / 8 h.

Después de un período de recocido más largo de 24 h a la temperatura de precipitación de 850 °C, el nivel de los valores de límite elástico Rp0,2 es claramente menor que después de un período de recocido de 8 h a la misma temperatura de recocido por precipitación de 850 °C. Al parecer, esto se debe al mayor tamaño de partícula de la fase gamma'. Estos datos de resultados se enumeran en las dos Tablas 3b-6 y 3b-7 para los tamaños de grano ASTM 4,5 y ASTM 12.

Variante	1	17	18	19	25	26	N1	N2
Gamma' [%]	25*(21)	28,1	31,1	34,5	21,2	17,1	38	42,2
Gamma' [nm]	64	62	62	61	64	64	62	62
Rp0,2 [MPa]								
650°C	807	872	923	982	743	672	1033	1093
700°C	797	861	912	970	735	664	1021	1080
750°C	787	850	900	957	725	646	1007	1066
800°C	613	675	730	791	551	483	858	1049
850°C	472	521	564	612	424	371	664	860
900°C	324	365	401	437	282	221	478	529

Tabla 3b-6: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3a.

Variante	1	17	18	19	25	26	N1	N2
Gamma' [%]	24,8	28,1	31,1	34,5	21,2	17,1	38	42,2
Gamma' [nm]	64	62	62	61	64	64	62	62
Rp0,2 [MPa]								
650°C	855	920	971	1030	792	720	1080	1141
700°C	845	909	960	1018	783	712	1068	1128
750°C	822	897	947	1005	737	647	1054	1113
800°C	613	675	730	791	551	483	858	1096
850°C	473	52	564	612	424	371	664	860
900°C	324	365	401	437	282	221	478	529

Tabla 3b-7: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 12 de análisis de aleación de la Tab. 3a.

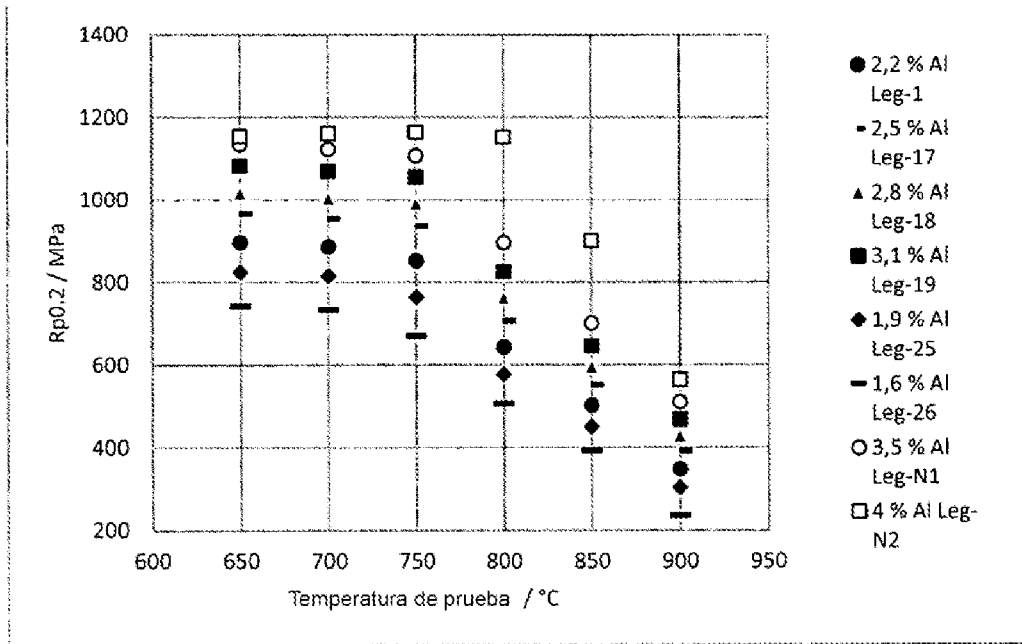


Diagrama 2a: Valores calculados de límite elástico mecánico  $R_{p0,2}$  en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3a.

- 5 Del diagrama 2a se desprende que el límite elástico  $R_{p0,2}$  aumenta a temperaturas más altas con contenido de Al creciente. Además, un gradiente más pronunciado del límite elástico  $R_{p0,2}$  con mayores contenidos de Al sólo es visible a temperaturas superiores a 800 °C.

Tabla 3c-1: Selección de análisis de aleaciones con variación de los contenidos de Al con contenido de Co constante de 20 % (nº de análisis 8, 9, 10, 11, 36, 37; nº de referencia 420420 y 1)

Variante	420420	1	8	9	10	11	36	37
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	50,518	50,118	50,818	51,118	49,218	48,718
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nb	5,41	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,2	2,6	1,9	1,6	3,5	4
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

ES 2 995 028 T3

Variante	420420	1	8	9	10	11	36	37
Co	24,63	24,5	20	20	20	20	20	20
Hf	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 3c-2: Selección de análisis de aleaciones HT1, HT2, HT1-a y HT2-a con 20 % de Co, o bien 24,5 % de Co, y contenidos de Al de 3,0 %, o bien 3,8 %, y análisis del nº de referencia 420420 y 1).

Variante	420420	1	HT1	HT2	HT1-a	WT2-a
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	49,718	48,918	45,218	44,418
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nb	5,41	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	3	3,8	3	3,8
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	20	20	24,5	24,5
Hf	0	0	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

5

Tabla 3d-1: Propiedades de fase calculadas de los análisis de aleación de la Tabla 3c-1.

Variante	420420	1	8	9	10	11	36	37
T sol. $\gamma'$ (°C)	990	1016	1013	1040	989	956	1086	1106
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	26	29	29	35	24	20	45,5	50
T sol. $\eta$ (°C)	1020	996	0	0	0	0	0	0
Vol. máx. $\eta$ (%)	2,5	2,8	0	0	0	0	0	0
T sol. $\eta$ (°C)		970	0	0	0	0	0	0
T sol. Delta (°C)	1060	1014	1000	960	1013	1021	0	0
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	4,8	2,4	6,5	8,3	0	0
T sol. sigma (°C)	-	774	747	799	708	642	905	954
Vol. sigma (%) a 600°C	-	8,6	6,5	10	4,3	1	17	21

Tabla 3d-2: Propiedades de fase calculadas de los análisis de aleación de la Tabla 3c-2.

Variante	420420	1	HT1	HT2	HT1-a	HT2-a
T sol. $\gamma'$ (°C)	990	1016	1061	1099	1063	1098
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	26	29	40	48	40	48
T sol. $\eta$ (°C)	1020	996	0	0	0	0
Vol. máx. $\eta$ (%)	2,5	2,8	0	0	0	0
T sol. $\eta$ (°C)		970	0	0	0	0
T sol. Delta (°C)	1060	1014	659	0	0	0
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	0,7	0	0	0
T sol. $\sigma$ (°C)	-	774	852,6	933	873	946
Vol. $\sigma$ (%) a 600°C	-	8,6	13,4	19	15,8	21

Variante	1	8	9	10	11	36	37	HT1	HT2	HT1-a	HT2-a
Gamma' [%]	31	28	34,9	23	19	38	42	38	46	39	45
Gamma' [nm]	24	24	25	23	21	27	27	26	27	27	27
Rp0,2 [MPa]											
650°C	871	856	933	852	796	971	1027	973	1022	956	990
700°C	875	847	938	856	799	962	1034	979	1029	970	997
750°C	848	806	914	828	762	911	999	950	994	940	963
800°C	690	608	701	580	518	806	914	765	885	833	925
850°C	474	414	497	402	352	555	645	544	627	578	654
900°C	328	278	356	275	228	386	470	394	457	412	467

5 Tabla 3d-3: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3c-1 y 3c-2

10 También de los valores de la Tab. 3d-3 se desprende que la fracción de fase gamma' aumenta con contenidos de Al crecientes; en este caso, el tamaño de partícula aumenta ligeramente. También el límite elástico Rp0,2 aumenta con contenido de Al creciente de la aleación, es decir, con fracción de fase gamma' creciente. Además, también aquí, del curso de los valores Rp0,2 en función de la temperatura de prueba se desprende que en el caso de las aleaciones 36, 37, HT1, HT2, HT1-a y HT2-a, es decir, con contenidos de Al más elevados de 3 % a 4 %, el gradiente más pronunciado de Rp0,2 que se produce a temperaturas de prueba más altas se desplaza hacia una temperatura de prueba más alta de alrededor de 800°C. En el caso de aleaciones con un menor contenido de Al, el gradiente más pronunciado de Rp0,2 ya es visible a una temperatura de prueba más baja de alrededor de 750°C. En la Tab. 3d-3 se enumeran los datos de resultados para el tratamiento térmico por precipitación a 700 °C / 8 h.

Variante	1	8	9	10	11	36	37	HT1	HT2	HT1-a	HT2-a
Gamma' [%]	25	22	29,3	17	12	33	42	33	41	33	40
Gamma' [nm]	45	45	45	45	45	45	45	44	45	45	46
Rp0,2 [MPa]											
650°C	896	878	987	811	724	1130	1197	1072	1190	1048	1152
700°C	886	863	975	801	716	1112	1204	1059	1178	1036	1149
750°C	852	761	874	684	591	1079	1188	976	1160	1022	1134
800°C	643	579	671	524	452	822	927	750	891	796	939
850°C	502	453	532	414	357	642	740	596	710	622	735
900°C	348	312	383	280	228	458	553	437	530	453	541

Tabla 3d-4: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3c-1 y 3c-2.

5

Después del tratamiento térmico por precipitación a 850°C / 8h, las fracciones de fase gamma' son nuevamente menores que después del tratamiento térmico por precipitación a 700°C / 8h y las partículas de precipitación de fase gamma' son mayores (los datos asociados se enumeran en la Tab. 3d-4). El efecto positivo del mayor tamaño de partícula sobre el límite elástico Rp0,2 supera el efecto negativo de la fracción de fase más pequeña. El nivel de límite elástico Rp0,2 después del tratamiento térmico por precipitación a 850 °C / 8 h es claramente mayor que después del recocido a 700 °C/8 h.

10

Después de un período de recocido más largo de 24 h a la temperatura de precipitación de 850 °C, el nivel de los valores de límite elástico Rp0,2 es claramente menor que después de un período de recocido de 8 h a la misma temperatura de recocido por precipitación de 850 °C. Al parecer, esto se debe al mayor tamaño de las partículas de la fase gamma. Estos datos de resultados se enumeran en la Tab. 3d-5 para tamaños de grano ASTM 4,5.

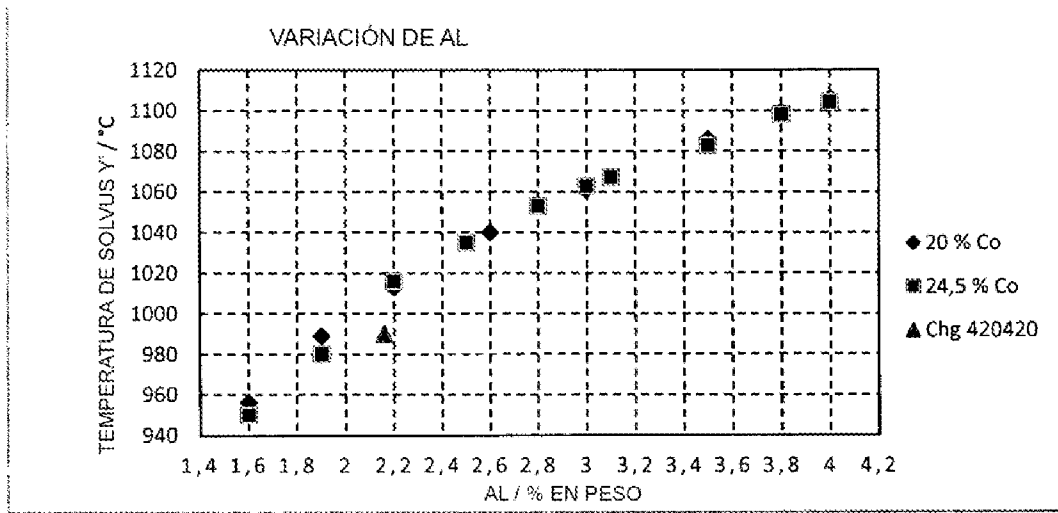
15

Variante	1	8	9	10	11	36	37	HT1	HT2	HT1-a	HT2-a
Gamma' [%]	25	22	29,3	20	12	33	42	33	41	32	40
Gamma' [nm]	64	63	62	64	64	62	62	61	62	63	64
Rp0,2 [MPa]											
650°C	807	794	921	731	656	1029	1108	971	1083	948	1055
700°C	797	781	909	722	648	1011	1095	960	1070	937	1042
750°C	787	734	897	658	568	990	1080	941	1055	924	1028
800°C	613	553	711	498	430	786	884	715	850	761	899
850°C	473	428	549	389	335	612	698	561	670	588	695
900°C	324	291	357	259	212	442	516	407	494	423	506

Tabla 3d-5: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3c-1 y 3c-2.

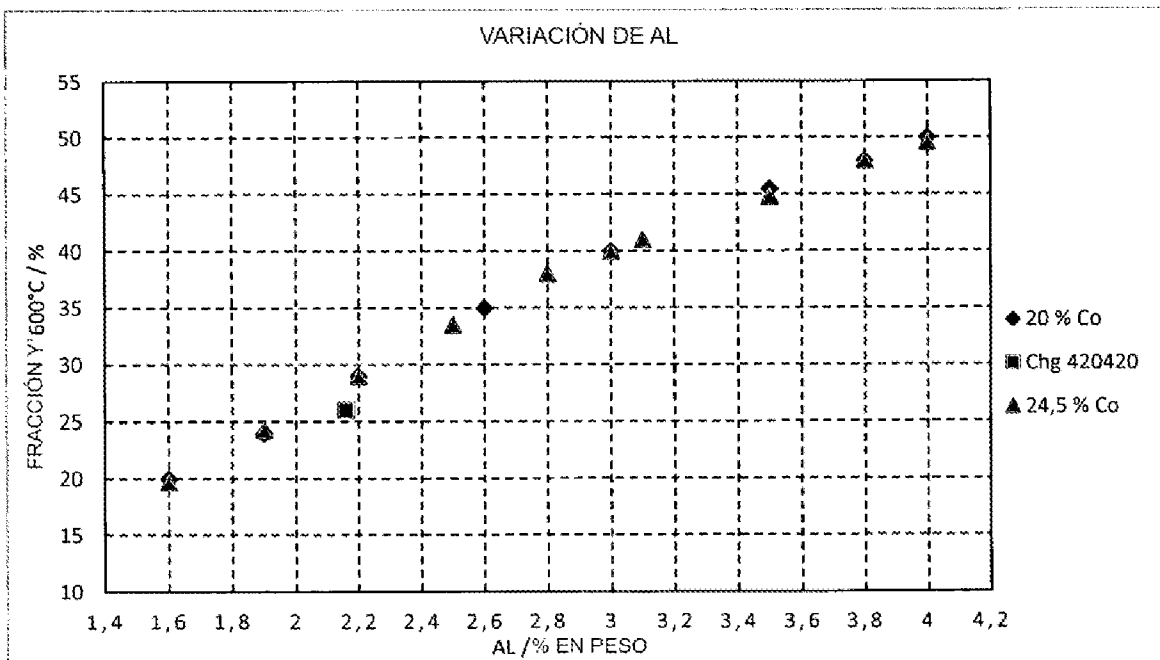
20

Las temperaturas de solvus gamma' calculadas de los análisis de aleaciones de las Tablas 3a a 3d se representan en el diagrama 3 dependiendo del contenido de Al.



5 Diagrama 3: Temperaturas de solvus y' calculadas de análisis de aleación de las Tablas 3a a 3d en función de los contenidos de Al

De esto se desprende que la temperatura de solvus y' se puede aumentar a 1105°C a partir de 1009°C en el caso de la aleación de referencia del lote 420420 con 2,16 % de Al si el contenido de Al se aumenta a 4,0 % de Al.



10 Diagrama 4: Fracciones gamma' calculadas a 600°C (en % en peso) de análisis de aleación de las Tablas 3a a 3d en función de los contenidos de Al

De esto se desprende que la fracción gamma' a 600 °C se puede aumentar a aproximadamente 47,7 % partiendo de 25,3 % en el caso de la aleación de referencia del lote 420420 con 2,16 % de Al si el contenido de Al se aumenta a 4,0 % de Al (véase el ver diagrama 4).

15 De las Tablas 3a a 3d se desprende que la fase y' se estabiliza con aumento del contenido de Al: tanto la temperatura de solvus hasta 1106°C como las fracciones volumétricas se pueden aumentar hasta 50 %. También se desprende que Al puede desestabilizar la fase delta en el caso de contenidos más altos. En el caso de contenidos de Co y Nb simultáneamente altos en combinación con contenidos de Al moderados, la fase delta se estabiliza enormemente.

5 Como ejemplo se considera la aleación 19 en comparación con la alloy 939. Alloy 939 presenta la temperatura de solvus y' a 1110°C con una fracción volumétrica y' máxima en aproximadamente 39,5 %. La fase sigma precipita a 870°C con la fracción volumétrica de 15 % a 600°C. La combinación favorable de la composición de la aleación 19 permite alcanzar una temperatura de solvus y' hasta 1067°C en el caso de una fracción volumétrica ligeramente elevada con 41 %. La reducción de la temperatura de solvus de la fase y' mejora enormemente la procesabilidad de la aleación, además la tendencia al agrietamiento se reduce notablemente mientras las propiedades mecánicas permanecen al menos iguales. Debido a su bajo contenido de Ti, la aleación 19 muestra además una mejor estabilidad a la oxidación que la alloy 939.

10 En la aleación 19, la temperatura de solvus sigma aumenta en 11°C con aumento del 1 % de la fracción volumétrica basado en contenidos de Co y Cr altos en comparación con la alloy 939. En general, la fase sigma presenta una cinética de precipitación muy lenta debido a la incoherencia, por lo que esta fase no estaba presente en la aleación de referencia 420420 incluso después de ensayos de envejecimiento a alta temperatura durante 2000 horas a 800°C. La aleación 1, que presenta una composición casi idéntica en el presente trabajo, la fase sigma muestra su temperatura de solvus a 774°C con una fracción volumétrica de 8,6 % a 600°C. Si el intervalo de estabilidad termodinámica de la fase sigma cambia a temperaturas más altas, en caso dado pueden ser necesarias contramedidas como tratamientos térmicos adaptados.

15 En la Tab. 3d-6 se enumeran tres composiciones químicas seleccionadas que se generaron como masas fundidas de laboratorio. El análisis caracterizado con LB 250756 contiene 2,1 % de IA. Los otros dos análisis LB 250757 y LB 250760 contienen aproximadamente 3 %, o bien 3,8 % de Al.

20 Tabla 3d-6: Análisis de las aleaciones LB 250756, LB 250757 y LB 250760

Variante	LB 250756	LB 250757	LB 250760
C	0,022	0,020	0,019
S	0,0016	0,0010	0,0014
N	0,003	0,003	0,003
Cr	18,15	18,08	17,90
Ni	45,86	45,12	44,54
Mn	<0,01	<0,01	0,018
Si	0,07	0,03	0,01
Mo	2,97	2,95	2,96
Ti	0,27	0,31	0,31
Nb	5,44	5,37	5,39
Ta			
Cu	<0,01	<0,01	<0,01
Fe	0,09	0,11	0,10
P	0,01	0,013	0,013
Al	2,10	2,99	3,78
Mg	0,0005	0,0005	0,0005
Ca			
V	<0,01	<0,01	<0,01
Zr	<0,01	<0,01	<0,01
W	<0,01	0,01	0,01
Co	24,95	24,94	24,91
Hf	0	0	0
B	0,005	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002

25 En las Tablas 3d-7 a 3d-18, los valores de la fracción y del tamaño de partícula de la fase gamma', así como el límite elástico Rp0,2 dependiente de la temperatura de prueba después de los tratamientos térmicos por precipitación, son 650 °C/8h, 700°C/8, 750 °C/8h, 800°C/8h, 850°C/8h y 900°C/8h para los tamaños de grano ASTM 4,5 y ASTM 12 enumerados. A algunas temperaturas de recocido por precipitación, se añaden los resultados de los dos tiempos de recocido adicionales de 16 h y 24 h.

Temperatura de endurecimiento 650 °C/8h			
Variante	LB 250756	LB 250757	LB 250760
Gamma' [%]	27	39	46
Gamma' [nm]	24	26	27
Rp0,2 [Mpa]			
650°C	880	975	1026
700°C	861	951	995
750°C	835	921	962
800°C	680	839	924
850°C	465	579	794
900°C	319	410	469

Tabla 3d-7: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 650°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

5

Temperatura de endurecimiento 700 °C/8h			
Variante	LB 250756	LB 250757	LB 250760
Gamma' [%]	31	38	45
Gamma' [nm]	23	26	27
Rp0,2 [Mpa]			
650°C	844	949	993
700°C	848	955	1000
750°C	823	925	967
800°C	677	840	929
850°C	462	580	795
900°C	317	411	471

Tabla 3d-8: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

10

Temperatura de endurecimiento 750 °C/8h			
Variante	LB 250756	LB 250757	LB 250760
Gamma' [%]	29	37	44
Gamma' [nm]	24	27	28
Rp0,2 [Mpa]			
650°C	840	940	980
700°C	844	945	987
750°C	845	947	990
800°C	684	847	950
850°C	468	587	803
900°C	321	417	477

Tabla 3d-9: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 750°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

5

Temperatura de endurecimiento 800°C					
	8h			16h	24h
Variante	LB 250756	LB 250757	LB 250760	LB 250756	LB 250756
Gamma' [%]	27	36	42	23	23
Gamma' [nm]	30	31	32	35	39
Rp0,2 [Mpa]					
650°C	898	974	1015	959	983
700°C	902	979	1022	963	971
750°C	902	980	1024	963	959
800°C	715	872	1022	735	730
850°C	495	609	829	513	505
900°C	343	436	500	356	349

Tabla 3d-10: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 800°C / 8 h, o bien 16 h y 24 h, para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

10

Variante	Temperatura de endurecimiento						
	850 °C/8h			16h	24h	16h	24h
	LB 250756	LB 250757	LB 250760	LB 250757	LB 250757	LB 250760	LB 250760
Gamma' [%]	24	33	32	33	31	40	40
Gamma' [nm]	45	45	46	55	62	56	64
Rp0,2 [Mpa]							
650°C	875	1056	1167	995	959	1104	1060
700°C	865	1044	1156	983	948	1091	1048
750°C	835	1030	1141	970	935	1077	1033
800°C	630	814	1123	793	780	1060	1017
850°C	490	634	880	613	601	856	839
900°C	336	456	544	438	427	522	508

Tabla 3d-11: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h, o bien 16 h y 24 h, para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

5

Variante	Temperatura de endurecimiento 900 °C/8h		
	LB 250756	LB 250757	LB 250760
Gamma' [%]	19	28	37
Gamma' [nm]	73	72	74
Rp0,2 [Mpa]			
650°C	677	854	959
700°C	696	844	948
750°C	660	832	935
800°C	492	667	788
850°C	378	514	610
900°C	300	411	490

Tabla 3d-12: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 900°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

10

Temperatura de endurecimiento 550 °C/8h			
Variante	LB 250756	LB 250757	LB 250760
Gamma' [%]	32	39	46
Gamma' [nm]	24	26	27
Rp0,2 [Mpa]			
650°C	928	1023	1074
700°C	909	999	1042
750°C	883	969	1009
800°C	680	839	971
850°C	465	579	793
900°C	319	410	469

Tabla 3d-13: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 650°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 12 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

5

Temperatura de endurecimiento 700 °C/8h			
Variante	LB 250756	LB 250757	LB 250760
Gamma' [%]	31	38	45
Gamma' [nm]	23	26	27
Rp0,2 [Mpa]			
650°C	893	997	1041
700°C	897	1002	1048
750°C	871	973	1015
800°C	677	840	976
850°C	462	580	795
900°C	317	411	471

Tabla 3d-14: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 12 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

10

Temperatura de endurecimiento 750 °C/8h			
Variante	LB 250756	LB 250757	LB 250760
Gamma' [%]	29	37	44
Gamma' [nm]	24	27	28
Rp0,2 [Mpa]			
650°C	888	988	1028
700°C	892	993	1035
750°C	892	995	1037
800°C	684	847	997
850°C	468	587	803
900°C	322	417	477

Tabla 3d-15: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 750°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 12 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

5

Variante	Temperatura de endurecimiento 800°C 8h			16h	24h
	LB 250756	LB 250757	LB 250760	LB 250756	LB 250756
Gamma' [%]	27	36	42	27	23
Gamma' [nm]	30	31	32	35	39
Rp0,2 [Mpa]					
650°C	947	1021	1063	1007	1031
700°C	950	1027	1069	1011	1020
750°C	950	1028	1071	973	971
800°C	715	872	1069	735	730
850°C	495	609	828	513	505
900°C	343	436	500	356	349

Tabla 3d-16: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 800°C / 8 h, o bien 16 h y 24 h, para un tamaño de grano ASTM 12 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

10

Temperatura de endurecimiento							
	850°C/8h			16h	24h	16h	24h
	LB	LB	LB	LB	LB	LB	LB
Variante	250756	250757	250760	250757	250757	250760	250760
Gamma' [%]	24	33	40	33	31	40	32
Gamma' [nm]	45	45	46	55	62	56	64
Rp0,2 [Mpa]							
650°C	924	1104	1214	1043	1007	1152	1108
700°C	913	1091	1203	1031	995	1139	1095
750°C	835	1077	1188	1017	982	1124	1080
800°C	630	814	1155	793	780	1107	1064
850°C	490	634	880	613	601	856	839
900°C	363	456	544	438	427	522	508

Tabla 3d-17: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h, o bien 16 h y 24 h, para un tamaño de grano ASTM 12 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

5

Temperatura de endurecimiento 900			
	°C/8h		
	LB	LB	LB
Variante	250756	250757	250760
Gamma' [%]	19	30	37
Gamma' [nm]	73	72	74
Rp0,2 [Mpa]			
650°C	725	902	1007
700°C	717	891	995
750°C	661	880	982
800°C	492	667	788
850°C	378	514	610
900°C	300	411	490

Tabla 3d-18: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 900°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 12 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

10

De las tablas se desprende que cuanto mayor es el contenido de Al del análisis de aleación, mayor es el límite elástico Rp0,2. Además, cuanto mayor es el contenido de Al, más se desplaza el gradiente más fuerte de límite elástico Rp0,2 a una temperatura de ensayo más alta. Estos efectos están relacionados, por un lado, con la mayor proporción de fase gamma' con contenido creciente de Al (en el caso de tamaño de partícula optimizado de la fase gamma') y, por otro lado, con la mayor temperatura de solvus de la fase gamma' con contenido de Al creciente.

En el caso de la aleación LB 250756, que contiene 2,1 % de Al, a las temperaturas de precipitación consideradas, el límite elástico máximo Rp0,2 se sitúa a la temperatura de recocido por precipitación de 800 °C (considerada en comparación con el periodo de recocido de 8 horas).

Para las otras dos aleaciones LB 250757 y LB 250760, que contienen 3 %, o bien 3,8 % de Al, el máximo de límite elástico Rp0,2 se sitúa en la temperatura de recocido por precipitación de 850°C. A la temperatura de recocido por precipitación de 900°C, considerada adicionalmente aquí, los valores de límite elástico Rp0,2 son más bajos; es decir, por lo tanto, se ha superado la temperatura de recocido por precipitación óptima para los valores más altos de límite elástico Rp0,2 (para otras propiedades mecánicas, no obstante, también podría ser conveniente y razonable una temperatura de recocido por precipitación superior a 850 °C).

En comparación con los tamaños de grano considerados, de las tablas se puede extraer que, en el caso de tamaño de grano más pequeño ASTM 12, se presentan valores de límite elástico Rp0,2 claramente mayores que en el caso de tamaño de grano más grueso ASTM 4,5.

En el caso de la aleación LB 250756, que contiene 2,1 % de Al y en la que el máximo de límite elástico Rp0,2 se produce después de la temperatura de recocido por precipitación considerada 8h, se puede observar que, en el caso de tiempos de recocido más largos 16h y 24h, los valores de límite elástico Rp0,2 aumentan (véanse Tablas 3d-10 y 3d-16). Por el contrario, los valores de límite elástico Rp0,2 disminuyen con periodos de recocido más largos de 16 h y 24 h a la temperatura de recocido por precipitación considerada de 850 °C en el caso de las dos aleaciones LB 250757 y LB 250760.

Se consideran aleaciones con un contenido máximo de Al de 4 %. En el caso de aleaciones con un contenido de Al superior al 4 %, el riesgo aumenta en tal medida que el comportamiento de soldadura y solidificación se ve tan negativamente afectado que tanto los procesos de procedimientos de impresión aditivos como los tratamientos térmicos posteriores conducen a defectos considerables, es decir, grietas en la estructura.

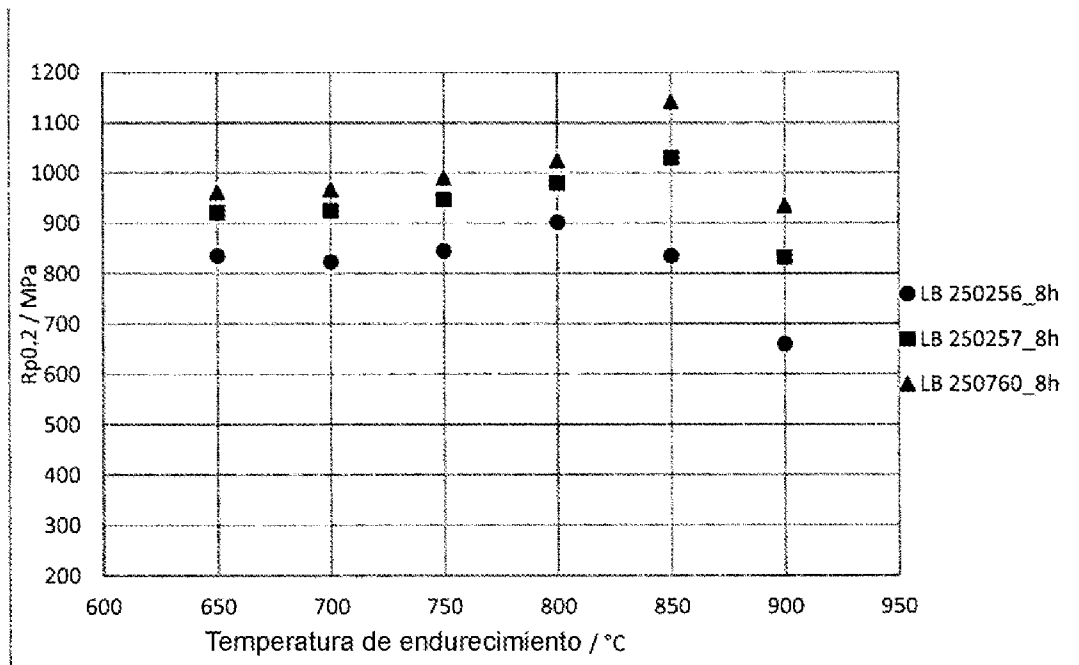


Diagrama 4a: Valores calculados de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de endurecimiento de 650°C a 900°C tras 8 h a una temperatura de prueba de 750°C para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 3d-6.

El diagrama 4a muestra que el máximo de límite elástico Rp0,2 que se puede alcanzar se desplaza a temperaturas de endurecimiento más altas con contenido de Al creciente. Mientras que el límite elástico más alto Rp0,2 se alcanza en el caso de un contenido de Al de 2,1 % (LB 250256) a una temperatura de endurecimiento de 800 °C, una temperatura de endurecimiento de 850 °C en el caso de un contenido de Al de 3 % y 3,8 % proporciona el valor más alto a las temperaturas aquí consideradas. A una temperatura de 900 °C, los valores de límite elástico Rp0,2 vuelven

a disminuir en las tres composiciones. Sin embargo, no se puede descartar que una temperatura entre 850 y 900 °C provoque un aumento adicional del límite elástico Rp0,2 en el caso de mayores contenidos de Al (3 % y 3,8 %).

En la Tabla 3d-19 se enumeran composiciones químicas de LB 250756 en comparación con P10231, que presentan contenidos analíticos muy similares.

5

Tabla 3d-19: Análisis de las aleaciones LB 250756 y P10231.

Variante	LB 250756	P10231
C	0,022	0,024
S	0,0016	0,0029
N	0,003	0,004
Cr	18,15	17,7
Ni	45,86	46,49
Mn	<0,01	<0,01
Si	0,07	0,01
Mo	2,97	2,96
Ti	0,27	0,29
Nb	5,44	5,42
Ta		0,008
Cu	<0,01	<0,01
Fe	0,09	0,08
P	0,01	0,012
Al	2,10	2,14
Mg	0,0005	<0,001
Ca		0,0002
V	<0,01	<0,01
Zr	<0,01	<0,01
W	<0,01	<0,01
Co	24,95	24,79
Hf	0	
B	0,005	0,003
O	0,002	0,012

10 Como ya se describió anteriormente, para el análisis LB 250756 se calcularon valores de límite elástico dependientes de la temperatura de prueba. En la Tabla 3d-20 se enumeran extractos de la Tabla 3d-6 a temperaturas de prueba de 650 °C y 700 °C para los tratamientos térmicos por precipitación de 800 °C/8 h y 650 °C/8 h. Se llevaron a cabo ensayos de tracción en caliente en muestras impresas (en las tres orientaciones espaciales 45°, 90° y 180°C) de P10231 a 650°C y 700°C y, por consiguiente, se midieron valores de límite elástico Rp0,2. Antes de los ensayos de tracción en caliente, las muestras impresas se sometieron a un tratamiento térmico por precipitación de dos etapas 800°C/8h + 650°C/8h. También en el caso de recocido en disolución seleccionado de las muestras de P10231, la estructura presenta un tamaño de grano de aproximadamente ASTM 4,5. Los valores de Rp0,2 medidos para P10231 se enumeran en la Tab 3d-20 como comparación.

15

Los valores de límites elásticos Rp0,2 de LB 250756 calculados se sitúan en un nivel muy similar a los valores de Rp0,2 de P10231 medidos.

Variante Rp0,2 [Mpa]	800°C 8h	650°C 8h	Orientación de impresión		Rp0,2 [MPa]
	LB 250756	LB 250756	P10231		P10231
650°C	898	880	45°		890
			90°		868
			180°		895
700°C	902	861	45°		881
			90°		840
			180°		879

5 Tabla 3d-20: Valores de límite elástico Rp0,2 calculados para el análisis LB 250756 de la Tab. 3d-6 a temperaturas de prueba de 650°C y 700°C para los tratamientos térmicos por precipitación de 800°C/8h y 650°C/8h (extractos de las Tablas 3d-10 y 3d-7) en comparación con los valores de límite elástico Rp0,2 medidos en muestras impresas de P10231 del análisis de la Tab. 3d-19, en los que se llevó a cabo un tratamiento térmico por precipitación de dos etapas 800°C/8h + 650°C/8h. También en el caso del recocido en disolución seleccionado de las muestras de P10231, la estructura presenta un tamaño de grano de aproximadamente ASTM 4,5.

10 Las tablas 4a a 11c-3 contienen propiedades calculadas de las fases y límites elásticos mecánicos de otras aleaciones seleccionadas.

Tabla 4a: Análisis de aleaciones seleccionados con variación de contenidos de Cr, Ni y Co.

Variante	420420	1	2	3	4
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	16	20	20
Ni	45,96	46,018	48,018	44,018	46,018
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	0,3	0,3	0,3
Nb	5,41	5,4	5,4	5,4	5,4
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,2	2,2	2,2
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	24,5	24,5	22,5
Hf	0	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 4b: Propiedades calculadas de las fases y aleaciones de la Tab. 4a.

Variante	420420	1	2	3	4
T sol. $\gamma'$ (°C)	990	1016	1008	1010	1022
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	26	29	28	29	29
T sol. eta (°C)	1020	996	1005	1032	0
Vol. máx. eta. (%)	2,5	2,8	0,8	3,4	0
eta sol. T-r (°C)		970	985	958	0
T sol. Delta (°C)	1060	1014	988	1119	1022
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	4,5	4,5	4,8
T sol. sigma (°C)	-	774	0	865	853
Vol. sigma (%) a 600°C	-	8,6	0	16	15

5 De las tablas se desprende que entre 16 y 20 % de Cr, tanto la temperatura de solvus gamma' como la fracción gamma' a 600°C aumentan ligeramente con contenido de Cr creciente. También se debe tener en cuenta que la reducción del contenido de Cr desestabiliza la fase sigma (véase la Tab. 4b Aleación 2).

10 Otro efecto del contenido de Cr importante para la aplicación es la mejora de la estabilidad a la oxidación a alta temperatura de estas aleaciones. En ensayos de oxidación realizados experimentalmente a 800°C y 900°C, el análisis de aleación del lote de referencia 420420 con 17,75 % Cr mostró un aumento de masa menor aproximadamente en el factor 10 que la aleación Alloy 720 LI, que contiene aproximadamente 16 % de Cr. Con un contenido de Cr de 20 %, la estabilidad a la oxidación de las nuevas aleaciones basadas en Alloy 780 podría aumentar aún más.

En las Tablas 4c-1 a 4c-3 se enumeran los valores calculados de fracciones y tamaños de partícula de la fase gamma', así como los valores de límite elástico Rp0,2 dependientes de la temperatura de prueba de las aleaciones de la Tab. 4a para los tratamientos térmicos por precipitación 700°C/8h, 850°C/8h y 850°C/24h para el tamaño de grano ASTM 4,5.

Variante	1	2	3	4
Gamma' [%]	31	31	32	28
Gamma' [nm]	24	24	24	24
Rp0,2 [MPa]				
650°C	871	870	870	880
700°C	875	874	875	884
750°C	848	847	847	857
800°C	690	635	753	722
850°C	474	439	511	496
900°C	328	304	352	345

15 Tabla 4c-1: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 4a.

Variante	1	2	3	4
Gamma' [%]	25	23	26	26
Gamma' [nm]	45	46	44	44
Rp0,2 [MPa]				
650°C	896	861	920	920
700°C	886	851	909	909
750°C	852	763	897	897
800°C	643	582	706	678
850°C	502	458	544	527
900°C	348	315	380	370

Tabla 4c-2: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 4a.

5

Variante	1	2	3	4
Gamma [%]	25	23	22	26
Gamma [nm]	64	66	62	62
Rp0,2 [MPa]				
650°C	807	773	831	831
700°C	797	763	822	821
750°C	787	734	811	810
800°C	613	553	676	649
850°C	472	430	516	498
900°C	324	292	355	345

Tabla 4c-3: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 4a.

10

De las Tablas 4c-1 a 4c-3 se desprende que las dos aleaciones 3 y 4, que contienen un contenido de Cr mayor en 20 % que las dos aleaciones 1 y 2, alcanzan valores de límite elástico Rp0,2 más altos.

## ES 2 995 028 T3

Tabla 5a: Análisis de aleaciones seleccionados con variación de contenidos de Ni y Co

Variante	420420	1	5	6	7	8	16
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	48,018	55,518	53,018	50,518	43,018
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nb	5,41	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	22,5	15	17,5	20	27,5
Hf	0	0	0	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 5b: Propiedades calculadas de las fases y aleaciones de la Tab. 5a.

Variante	420420	1	5	6	7	8	16
T sol. $\gamma'$ (°C)	990	1016	1015	1005	1010	1013	944
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	26	29	29	29	29	29	29
T sol. $\eta$ (°C)	1020	996	0	0	0	0	1048
Vol. máx. $\eta$ (%)	2,5	2,8	0	0	0	0	14,5
T sol. $\eta$ (°C)		970	0	0	0	0	770
T sol. $\Delta$ (°C)	1060	1014	1007	985	992	1000	932
Vol. $\Delta$ (%) a 600°C	2	4,5	4,6	4,8	5	4,8	3,8
T sol. $\sigma$ (°C)	-	774	763	705	720	747	788
Vol. $\sigma$ (%) a 600°C	-	8,6	7,7	4,8	6,2	6,5	10

Tabla 5b: Propiedades calculadas de las fases y aleaciones de la Tabla 5a.

Variante	420420	1	5	6	7	8	16
T sol. $\gamma'$ (°C)	990	1016	1015	1005	1010	1013	944
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	26	29	29	29	29	29	29
T sol. $\epsilon$ (°C)	1020	996	0	0	0	0	1048
Vol. máx. $\epsilon$ (%)	2,5	2,8	0	0	0	0	14,5
T sol. $\epsilon$ (°C)		970	0	0	0	0	770
T sol. Delta (°C)	1060	1014	1007	985	992	1000	932
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	4,6	4,8	5	4,8	3,8
T sol. sigma (°C)	-	774	763	705	720	747	788
Vol. sigma (%) a 600°C	-	8,6	7,7	4,8	6,2	6,5	10

5 En las Tablas 5a y b se desprende que con contenido de Co reducido, la temperatura de solvus  $\gamma'$  sólo cae pocos grados Celsius y las fases delta y sigma se desestabilizan. De este modo es posible crear una nueva aleación basada en Alloy 780 que es más rentable desde una perspectiva comercial debido a un valor de metal más bajo con contenidos de Co reducidos. Además, con contenido de Co reducido, la fase  $\epsilon$  se desestabiliza, lo que tiene un efecto positivo sobre las propiedades mecánicas a temperaturas más altas.

10 En las tablas 5c-1 a 5c-3 se enumeran los valores calculados de fracciones y tamaños de partícula de la fase  $\gamma'$ , así como los valores de límite elástico  $R_{p0,2}$  dependientes de la temperatura de prueba de las aleaciones de la Tab. 5a para los tratamientos térmicos por precipitación 700°C/8h, 850°C/8h y 850°C/24h para el tamaño de grano ASTM 4,5.

Variante	1	5	6	7	8	16
$\gamma'$ [%]	31	31	31	31	31	31
$\gamma'$ [nm]	24	24	24	24	24	24
$R_{p0,2}$ [MPa]						
650°C	871	880	911	901	891	857
700°C	875	884	915	905	895	861
750°C	848	857	823	868	868	834
800°C	690	666	581	607	635	732
850°C	474	462	415	430	445	494
900°C	328	322	294	303	313	336

Tabla 5c-1: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación  $\gamma'$  y valores de límite elástico mecánico  $R_{p0,2}$  en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 5a.

15

Variante	1	5	6	7	8	16
Gamma' [%]	25	25	24	24	25	25
Gamma' [nm]	45	45	45	45	45	46
Rp0,2 [MPa]						
650°C	896	894	874	881	895	889
700°C	886	884	864	870	885	879
750°C	852	814	681	724	768	867
800°C	643	619	531	560	590	678
850°C	502	486	426	446	467	523
900°C	348	340	298	312	326	357

Tabla 5c-2: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 5a.

5

Variante	1	5	6	7	8	16
Gamma' [%]	25	25	24	24	25	25
Gamma' [nm]	64	64	63	63	64	65
Rp0,2 [MPa]						
650°C	807	805	789	796	805	803
700°C	797	795	780	786	796	793
750°C	787	784	653	696	738	783
800°C	613	589	503	532	560	649
850°C	472	457	399	419	438	495
900°C	324	315	276	290	302	334

Tabla 5c-3: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 5a.

10

Si se observa primero las temperaturas de prueba de 650 °C y 700 °C en las Tablas 5c-1 a 5c-3, se ve que los valores de límites elásticos Rp0,2 apenas cambian dentro de la temperatura de prueba en función del contenido de Co. Por el contrario, a las temperaturas de prueba superiores a 700°C se puede identificar que los valores de límite elástico Rp0,2 aumentan dentro de una temperatura de prueba con contenido de Co creciente (en estas aleaciones con un contenido de Al de 2,2 %).

15

En el caso de la aleación 6 con el contenido de Co más bajo del 15 % considerado aquí, se pueden alcanzar valores más altos de límite elástico Rp0,2 en el tratamiento térmico por precipitación a 700 °C/8 h; por el contrario, se presentan valores de límites elásticos Rp0,2 más altos para la aleación 16, que contiene el mayor contenido de Co del 27,5 % dentro de las aleaciones aquí consideradas, en el tratamiento térmico por precipitación a 850 °C/8 h.

20

En las Tablas 6a-1 y 6a-2 se enumeran composiciones químicas en las que el contenido de Ti varía en el caso de dos

## ES 2 995 028 T3

contenidos de Al diferentes.

Tabla 6a-1: Análisis de aleaciones seleccionados con 20 %, o bien 24,5 % de Co y variación de los contenidos de Ni y Ti

Variante	420420	1	20	22	23	24	11	12	13	14	15
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	46,218	45,718	45,418	45,118	51,118	50,818	50,518	49,818	49,318
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	0,1	0,6	0,9	1,2	0,3	0,6	0,9	1,6	2,1
Nb	5,41	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	20	20	20	20	20
Hf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

5

Tabla 6a-2: Análisis de aleaciones seleccionados con variación de contenidos de Ni y Ti

Variante	420420	1	N3	N4	N5
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	46,218	45,718	45,718
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	1,0	2,0	3,0
Nb	5,41	5,4	5,4	5,4	5,4
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,2	2,2	2,2
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008

## ES 2 995 028 T3

Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	24,5	24,5	24,5
Hf	0	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

De las Tablas 6a-1 y 6b se desprende que tanto la temperatura de solvus gamma' como la fracción gamma' a 600°C aumentan como se esperaba con contenidos de Ti crecientes. Sin embargo, mayores contenidos de Ti estabilizan las fases eta y sigma a expensas de las fases Delta e y'. Si se desea desestabilizar la fase eta o mantener la fracción de fase eta lo más baja posible, el contenido de Ti debería ser lo más pequeño posible.

5

Tabla 6b: Propiedades calculadas de las fases y aleaciones de la Tab. 6a-1.

Variante	420420	1	20	22	23	24	11	13	14	15	N3	N4	N5
T sol. $\gamma$ (°C)	990	1016	1000	995	986	979	956	978	948	931	985	964	961,7
Vol. $\gamma$ (%) a 600°C	26	29	28	30,4	32,5	35	20	24	28	32	33	39	33,5
T sol. $\epsilon$ (°C)	1020	996	0	1060	1090	1120	0	1032	1100	1140	1100	1175	1222
Vol. máx $\epsilon$ (%)	2,5	2,8	0	9,8	15	19	0	5,5	18,5	25	16,5	27,7	35,6
T sol. $\epsilon$ (°C)		970	0	844	770	715	0	910	740	637	752	602	RT
T sol. Delta (°C)	1060	1014	1011	956	889	801	1021	1015	951	885	856	663	0
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	4,7	4,3	3,3	3,1	8,3	7,4	6,5	6	3,3	2,4	0
T sol. sigma (°C)		774	756	803	825	849	642	722	784	825	832	918	1000
Vol. sigma (%) a 600°C	-	8,6	7,2	10	11,7	13,7	1	4,5	8,8	11,4	12,5	18	22

En las Tablas 6c-1 a 6c-3 se enumeran los valores calculados de fracciones y tamaños de partícula de la fase gamma', así como los valores de límite elástico Rp0,2 dependientes de la temperatura de las aleaciones de la tabla 6a-, que dependen de la temperatura. 1 para los tratamientos térmicos de precipitación 700°C/8h, 850°C/8h y 850°C/24h para el tamaño de grano ASTM 4,5.

Variante	1	20	22	23	24	11	12	13	14	15
Gamma' [%]	31	30	33	35	36	19	27	29	33	36
Gamma' [nm]	24	23	24	25	25	21	22	23	24	24
Rp0,2 [MPa]										
650°C	871	824	913	976	1021	796	864	914	1077	1156
700°C	875	828	918	981	1027	799	868	918	1082	1162
750°C	848	802	892	956	1002	762	829	898	1051	1137
800°C	690	651	740	795	847	518	573	614	750	829
850°C	474	443	504	560	597	352	390	450	551	613
900°C	328	300	363	400	435	228	280	322	408	463

5

Tabla 6c-1: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 6a-1.

Variante	1	20	22	23	24	11	12	13	14	15
Gamma' [%]	25	23	28	30	32	16	16	22	28	32
Gamma' [nm]	45	46	44	44	42	45	45	44	42	41
Rp0,2 [MPa]										
650°C	896	845	972	1024	1095	724	781	886	1059	1170
700°C	886	836	961	1012	1083	716	772	875	1046	1156
750°C	852	800	928	998	1068	591	645	740	905	1023
800°C	643	603	702	753	813	452	495	569	698	789
850°C	502	470	549	589	637	357	391	452	557	631
900°C	348	319	388	424	467	228	276	318	411	475

10

Tabla 6c-2: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 6a-1.

15

Variante	1	20	22	23	24	11	12	13	14	15
Gamma' [%]	25	23	28	26	25	12	19	22	24	22
Gamma' [nm]	64	65	62	61	60	64	63	61	58	57
Rp0,2 [MPa]										
650°C	807	764	877	927	982	656	732	802	957	1054
700°C	797	755	866	916	970	648	723	792	945	1041
750°C	787	745	854	903	957	569	640	713	870	982
800°C	613	577	670	720	774	430	486	542	664	749
850°C	472	444	518	557	599	335	380	425	523	591
900°C	324	297	361	396	433	212	258	296	381	440

Tabla 6c-3: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 6a-1.

5

De los datos de las Tablas 6c-1 a 6c-3 se desprende que para las dos series de aleaciones con 24,5 % y 20 % de Co, las dos aleaciones con los contenidos totales más altos de los elementos Al y Ti alcanzan respectivamente los valores de límite elástico Rp0,2 más altos. Para 24,5 % de Co estas son las dos aleaciones 23 con 2,2 % de Al y 0,9 % de Ti y 24 con 2,2 % de Al y 1,2 % de Ti consideradas, así como en la serie con 20 % de Co las aleaciones 14 con 1,6 % de Al y 1,6 % de Ti y 15 con 1,6 % de Al y 2,1 % de Ti. En el caso de las dos aleaciones 23 y 24, el tratamiento térmico por precipitación a 850°C/8h conduce a valores de límite elástico Rp0,2 ligeramente superiores en comparación con el tratamiento térmico a 700°/8. En el caso de las dos aleaciones 14 y 15, el nivel de valores de límite elástico Rp0,2 se encuentra en un nivel comparable en el caso de estos dos tratamientos térmicos por precipitación. Una temperatura de recocido por precipitación entre 700 °C y 850 °C en el caso de un periodo de recocido de 8 horas podría aumentar aún más el nivel de valores de límite elástico. En el caso de las cuatro aleaciones consideradas aquí, el nivel de valores de límite elástico después del tratamiento térmico por precipitación de 850°C/24h es menor en comparación con los otros dos tratamientos térmicos.

10

15

En las Tablas 6c-4 a 6c-7 se enumeran los valores calculados de fracciones y tamaños de partícula de la fase gamma', así como los valores de límite elástico Rp0,2 dependientes de la temperatura de prueba de las aleaciones de la tabla 6a-2 para los tratamientos térmicos por precipitación 650°C/8h, 700°C/8h, 850°C/8h y 850°C/24h para el tamaño de grano ASTM 4,5.

20

	1	N3	N4	N5
Gamma' [%]	32	36	42	46
Gamma' [nm]	24	25	24	24
Rp0,2				
650	891	1001	1137	1257
700	870	977	1109	1227
750	844	970	1080	1194
800	689	812	1044	1155
850	473	573	698	1012
900	327	413	508	712

Tabla 6c-4: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 650°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 6a-2.

5

	1	N3	N4	N5
Gamma' [%]	31	35	41	46
Gamma' [nm]	24	25	24	23
Rp0,2 [MPa]				
650	871	992	1108	1200
700	875	997	1114	1207
750	848	972	1085	1169
800	690	812	1049	1131
850	474	574	700	1004
900	328	413	509	704

Tabla 6c-5: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 6a-2.

10

Variante	1	N3	N4	N5
Gamma' [%]	25	30	37	43
Gamma' [nm]	45	43	43	42
Rp0,2 [MPa]				
650	896	933	1230	1386
700	886	938	1215	1369
750	852	939	1198	1350
800	643	747	970	1329
850	502	582	757	1088
900	348	424	557	786

Tabla 6c-6: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 6a-2.

5

	1	N3	N4	N5
Gamma' [%]	25	30	37	43
Gamma' [nm]	64	61	59	59
Rp0,2 [MPa]				
650	807	941	1114	1246
700	797	930	1100	1230
750	787	917	1085	1213
800	613	735	928	1193
850	473	568	716	1035
900	324	408	521	738

Tabla 6c-7: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 6a-2.

10

De los datos de las Tablas 6c-4 a 6c-7 se desprende que para la serie de aleaciones con contenidos de Ti más altos, la aleación con el contenido total más alto de los elementos Al y Ti alcanza el valor de límite elástico Rp0,2 más alto. A una temperatura de precipitación de 850 °C, las aleaciones N4 y N5 alcanzan los valores de límite elástico Rp0,2 más altos. Sin embargo, un tiempo de precipitación de 8 horas es más conveniente que 24 horas. Esto podría deberse al tamaño de partícula más pequeño de alrededor de 40 nm en contraste con aproximadamente 60 nm en el caso de 24 h. En el caso de un contenido de titanio de 1 %, el límite elástico Rp0,2 más alto se alcanza con un tratamiento térmico por precipitación de 700 °C/8 h. Con un contenido de Ti de 3 %, el nivel de resistencia a 850 °C sigue siendo muy alto, con más de 1000 MPa. Además, el gradiente más pronunciado se desplaza a temperaturas más altas por encima de 800 °C en el caso de un contenido total más alto de los elementos Al y Ti, e incluso por encima de 850 °C con un contenido de Ti de 3 %.

15

20

## ES 2 995 028 T3

Tabla 7a: Análisis de aleaciones seleccionados con 24,5 % de Co y variación de los contenidos de Ni, Ti y Al

Variante	420420	1	20	21	22	23	24	25	26
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	46,218	46,018	45,718	45,418	45,118	46,318	46,618
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	0,1	0,1	0,6	0,9	1,2	0,3	0,3
Nb	5,41	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,2	2,4	2,2	2,2	2,2	1,9	1,6
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
Hf	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 7b: Propiedades calculadas de las fases y aleaciones de la Tabla 7a

Variante	420420	1	20	21	22	23	24	25	26
T sol. $\gamma'$ (°C)	990	1016	1000	1013	995	986	979	980	950
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	26	29	28	30,5	30,4	32,5	35	24,3	19,7
T sol. eta (°C)	1020	996	0	0	1060	1090	1120	998	966
Vol. máx. eta (%)	2,5	2,8	0	0	9,8	15	19	1,9	1,4
T sol. eta (°C)		970	0	0	844	770	715	957	936
T sol. Delta (°C)	1060	1014	1011	1002	956	889	801	1022	1031
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	4,7	3,7	4,3	3,3	3,1	6,7	8,2
T sol. sigma (°C)	-	774	756	784	803	825	849	734	699
Vol. sigma (%) a 600°C	-	8,6	7,2	9,4	10	11,7	13,7	5,9	3,3

- 5 De las Tablas 6 y 7 se desprende que, como se describió ya anteriormente, la temperatura de solvus gamma' y la fracción gamma' a 600 °C aumentan con contenido de Ti creciente. En el caso de 0,3 % de Ti, tanto las temperaturas de solvus gamma como las fracciones gamma a 600 °C aumentan con contenidos de Al crecientes. En el caso de

5 contenido de Ti aún más reducido y un contenido de Al mayor de 2,4 %, la temperatura de solvus gamma' permanece casi igual, la fracción gamma' a 600 °C aumenta ligeramente. De las tablas se puede extraer además que la combinación de un alto contenido de Ti con un alto contenido de Nb y Co estabiliza extremadamente la fase Eta. En este caso se puede observar claramente que en el presente también se han tenido en cuenta los intervalos límite. La coordinación de composiciones basada en la comprensión de los efectos de elementos individuales se puede extraer de las siguientes tablas. Las aleaciones no presentan ninguna fase eta en comparación con la aleación 420420.

En las Tablas 7c-1 a 7c-3 se enumeran los valores calculados de fracciones y tamaños de partícula de la fase gamma', así como los valores de límite elástico Rp0,2 dependientes de la temperatura de prueba de las aleaciones de la Tab. 7a para los tratamientos térmicos por precipitación 700°C/8h, 850°C/8h y 850°C/24h para el tamaño de grano ASTM 4,5.

Variante	1	20	21	22	23	24	25	26
Gamma' [%]	31	31	32	33	35	36	29	26
Gamma' [nm]	24	23	24	24	25	25	23	21
Rp0,2 [MPa]								
650°C	871	823	854	913	976	1021	835	781
700°C	875	827	858	918	981	1027	838	784
750°C	848	800	831	892	954	999	812	758
800°C	690	650	688	739	795	846	633	568
850°C	474	442	471	514	559	595	432	380
900°C	328	300	325	313	402	433	282	246

10 Tabla 7c-1: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 7a.

Variante	1	20	21	22	23	24	25	26
Gamma' [%]	25	23	25	28	30	32	21	17
Gamma' [nm]	45	46	46	44	44	43	45	45
Rp0,2 [MPa]								
650°C	896	845	891	972	1026	1088	824	742
700°C	886	834	880	960	1014	1076	814	733
750°C	852	799	856	928	1000	1061	763	669
800°C	643	603	645	702	754	811	576	505
850°C	502	470	503	549	590	635	449	393
900°C	348	318	347	378	425	463	294	252

15 Tabla 7c-2: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 7a.

Variante	1	20	21	22	23	24	25	26
Gamma' [%]	25	23	25	28	30	32	21	12
Gamma' [nm]	64	65	65	62	61	60	64	65
Rp0,2 [MPa]								
650°C	807	801	804	876	928	982	743	669
700°C	797	792	794	866	917	970	734	660
750°C	787	781	784	854	904	954	725	645
800°C	613	622	616	670	721	775	550	481
850°C	472	476	475	518	558	599	424	370
900°C	324	297	324	352	397	431	274	234

Tabla 7c-3: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 7a.

5

De los datos de las Tablas 7c-1 a 7c-3 también se desprende que para las composiciones químicas aquí consideradas, las dos aleaciones con el contenido total más alto de los elementos Al y Ti alcanzan los valores de límite elástico Rp0,2 más altos. Para 24,5 % de Co, estas son las aleaciones 23 con 2,2 % de Al y 0,9 % de Ti y 24 con 2,2 % de Al y 1,2 % de Ti ya consideradas en la Tab. 7a.

10

Tabla 8a: Análisis de aleaciones seleccionados con variación de contenidos de Ni, Nb, Ti y Al.

Variante	420420	1	27	28	29
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	46,418	46,018	46,218
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	0,3	0,3	0,1
Nb	5,41	5,4	5	5	5
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,2	2,6	2,6
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	24,5	24,5	24,5

Variante	420420	1	27	28	29
Hf	0	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 8b: Propiedades calculadas de las fases y aleaciones de la Tabla 8a.

Variante	420420	1	27	28	29
T sol. $\gamma'$ (°C)	990	1016	1012	1032	1015
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	26	29	29	33,4	32
T sol. eta (°C)	1020	996	0	0	0
Vol. máx. eta (%)	2,5	2,8	0	0	0
T sol. eta (°C)		970	0	0	0
T sol. Delta (°C)	1060	1014	976	930	952
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	3,3	1,6	1,9
T sol. sigma (°C)	-	774	748	791	772
Vol. sigma (%) a 600°C	-	8,6	6,5	9,4	8,4

5 De las Tablas 8a y 8b se desprende que en el caso de 0,3 % de Ti y 2,2 % de Al, la temperatura de solvus gamma' desciende pocos grados Celsius de 5,4 a 5,0 % de Nb. La fracción gamma a 600°C permanece casi inalterada. En el caso de 5,0 % de Nb y 0,3 % de Ti, la temperatura de solvus gamma' aumenta significativamente con el mayor contenido de Al de 2,6 %, así como la fracción gamma' a 600 °C. En el caso de combinación de 5,0 % de Nb, 2,6 % de Al y el menor contenido de Ti de 0,1 %, la temperatura de solvus gamma aumenta solo ligeramente, pero la fracción gamma a 600 °C aumenta claramente en comparación con la aleación con 5,0 % de Nb, 0,3 % de Ti y 2,2 % de Al.

10 En las Tablas 8c-1 a 8c-3 se enumeran los valores calculados de fracciones y tamaños de partícula de la fase gamma', así como los valores de límite elástico Rp0,2 dependientes de la temperatura de prueba de las aleaciones de la Tab. 8a para los tratamientos térmicos por precipitación 700°C/8h, 850°C/8h y 850°C/24h para el tamaño de grano ASTM 4,5.

Variante	1	27	28	29
Gamma' [%]	31	30,1	33,9	32,9
Gamma' [nm]	24	24	25	25
Rp0,2 [MPa]				
650°C	871	868	907	880
700°C	875	872	912	884
750°C	848	844	883	853
800°C	690	671	736	701
850°C	474	463	511	484
900°C	328	317	361	338

15 Tabla 8c-1: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 8a.

Variante	1	27	28	29
Gamma' [%]	25	23,7	28,1	26
Gamma' [nm]	45	45	45	45
Rp0,2 [MPa]				
650°C	896	874	958	909
700°C	886	864	947	899
750°C	852	823	928	876
800°C	643	622	700	661
850°C	502	485	547	516
900°C	348	332	388	361

Tabla 8c-2: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 8a.

5

Variante	1	27	28	29
Gamma' [%]	25	23,7	28,1	26
Gamma' [nm]	64	64	63	63
Rp0,2 [MPa]				
650°C	807	787	866	822
700°C	797	778	855	813
750°C	787	767	844	802
800°C	613	593	669	632
850°C	472	457	517	487
900°C	324	309	362	337

Tabla 8c-3: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 8a.

10

De los datos de las Tablas 8c-1 a 8c-3 se desprende que la aleación 28, que presenta el contenido total más alto de los elementos Al (2,6 %) y Ti (0,3 %) en esta serie de aleaciones, obtiene los valores de límite elástico Rp0,2 más altos en comparación con las otras aleaciones aquí consideradas. Si bien la aleación 29 contiene igualmente el mismo contenido más alto de Al de 2,6 % que la aleación 28, el contenido de Ti en esta aleación 29 se reduce a 0,1 %.

15

## ES 2 995 028 T3

Tabla 9a: Análisis de aleaciones seleccionados con variación de contenidos de Ni, Nb y Mo

Variante	420420	1	30	31	32	33	34	35
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	45,518	45,918	45,018	45,418	43,018	43,418
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3,5	3,5	4	4	6	6
Ti	0,31	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nb	5,41	5,4	5,4	5	5,4	5	5,4	5
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 9b: Propiedades calculadas de las fases y aleaciones de la Tab. 9a.

Variante	420420	1	30	31	32	33	34	35
T sol. $\gamma'$ (°C)	990	1016	1006	1009	1002	1009	996	1006
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	26	29	29	29	29,5	29	30	30
T sol. $\eta$ (°C)	1020	996	1021	0	1024	0	1020	1004
Vol. máx. $\eta$ (%)	2,5	2,8	2,9	0	3,3	0	4,7	0,9
T sol. $\eta$ (°C)		970	968	0	953	0	915	946
T sol. Delta (°C)	1060	1014	1000	971	993	964	981	956
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	4,7	2,6	4,4	2,8	4,6	2,6
T sol. $\sigma$ (°C)	-	774	800	779	837	808	931	910
Vol. $\sigma$ (%) a 600°C	-	8,6	8,5	7	9,3	7	11	8,9

De las Tablas 9a y 9b se desprende que la temperatura de solvus gamma' disminuye ligeramente con contenido de Mo creciente. La fracción gamma' a 600°C aumenta ligeramente con contenido de Mo creciente. El aumento del contenido de Mo en el caso de contenido de Nb constante estabiliza las fases Delta, eta, así como sigma. Por esta razón, el contenido de Nb debe adaptarse si las aleaciones requieren altos contenidos de solidificador de cristales mixtos para la solidificación de la matriz y a altas temperaturas.

5

En las Tablas 9c-1 a 9c-3 se enumeran los valores calculados de fracciones y tamaños de partícula de la fase gamma', así como los valores de límite elástico Rp0,2 dependientes de la temperatura de prueba de las aleaciones de la Tab. 9a para los tratamientos térmicos por precipitación 700°C/8h, 850°C/8h y 850°C/24h para tamaño de grano ASTM 4,5.

Variante	1	30	31	32	33	34	35
Gamma' [%]	31	31,4	30,7	31,5	30,8	31,9	30,7
Gamma' [nm]	24	24	24	24	24	24	24
Rp0.2 [MPa]							
650°C	871	873	868	875	871	882	880
700°C	875	877	872	879	875	886	884
750°C	848	850	844	852	846	855	853
800°C	690	696	676	701	682	726	706
850°C	474	477	465	480	468	489	478
900°C	328	329	321	331	322	332	325

10 Tabla 9c-1: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 9a.

Variante	1	30	31	32	33	34	35
Gamma' [%]	25	24,9	22,6	25	23,5	25,1	23,8
Gamma' [nm]	45	45	45	45	45	45	45
Rp0.2 [MPa]							
650°C	896	900	849	904	874	914	890
700°C	886	890	839	894	864	904	880
750°C	852	860	806	867	835	893	867
800°C	643	648	607	653	629	673	651
850°C	502	505	473	509	490	522	505
900°C	348	350	336	351	339	355	343

15 Tabla 9c-2: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 9a.

Variante	1	30	31	32	33	34	35
Gamma' <sup>v</sup> [%]	25	24,9	22,6	25	23,5	25,1	23,8
Gamma' <sup>v</sup> [nm]	64	64	64	64	64	64	64
650	807	811	766	815	788	826	804
700	797	801	756	805	779	817	795
750	787	791	746	795	769	806	785
800	613	619	580	624	601	644	623
850	472	576	446	480	462	493	477
900	324	326	313	327	315	331	320

Tabla 9c-3: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 9a.

5

Los contenidos de Mo más elevados de las aleaciones 30 a 35 de 3,5 %, 4 % y 6 % (en el caso de dos contenidos de Nb diferentes de 5,4 % y 5 %) apenas muestran un efecto perceptible sobre el nivel de valores de límite elástico Rp0,2 en comparación con la aleación de referencia 1, que presenta un contenido de Mo de 3 %.

10

En la Tabla 10a, además de los análisis del lote de referencia 420420 y los análisis de referencia números 1 y 9, se consideran análisis adicionales con variaciones en los contenidos de Nb, Ta, W y Hf. Estos son los números de análisis 38 a 48. En la Tabla 10b se enumeran los resultados de los cálculos para estas variaciones de análisis. En comparación con VDM Alloy 780 estándar, la fracción volumétrica y' aumenta hasta un máximo de 36,5 %. Además, todas las aleaciones enumeradas no tienen fase eta. En estas aleaciones, se puede alcanzar un volumen de fase y' casi igual a una temperatura de solvus y' claramente menor. Mediante la aleación de Ta, además de la solidificación de la fase y', se puede realizar un desajuste más alto y una cinética de precipitación lenta, asociada al mismo, de la fase y'. En el caso de las aleaciones 9, 39, 43-48 pueden precipitar pequeñas cantidades de fase Delta en los límites de grano a 900 °C, lo que tiene un efecto positivo sobre las propiedades a altas temperaturas, ya que los límites de grano se solidifican. Además, la estabilidad de la fase sigma es claramente menor en comparación con alloy 939.

15

Tabla 10a: Análisis de aleaciones seleccionados con variación de contenidos de Ni, Nb, Ta, W y Hf.

Variante	420420	1	9	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	50,118	51,508	49,618	51,018	50,518	49,518	49,628	49,128	48,128	49,608	49,108	48,108
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Ti	0,31	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Nb	5,41	5,4	5,4	4	5,4	4	4	4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,5	0,5	1	2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,5	1	2	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Hf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	1	2
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 10x: Propiedades calculadas de las fases y aleaciones de la Tabla 10a.

Variante	420420	1	9	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
T sol. $\gamma$ (°C)	990	1016	1040	1022	1044	1030	1037	1046	1038	1039	1039	1045	1048	1060
Vol. $\gamma$ (%) a 600°C	26	29	35	33	35	33,7	34,6	36,5	35,1	35,3	35,8	35	36	36
T sol. eta (°C)	1020	996	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vol. máx eta (%)	2,5	2,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T sol. eta (°C)		970	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T sol. Delta (°C)	1060	1014	960	0	972	0	0	0	958	956	950	968	968	964
Vol. Delta (%) a 600°C	2	4,5	2,4	0	2,7	0	0	0	2,3	2,6	2,5	2,3	2,3	2,3
T sol. sigma (°C)		774	799	719	818	744	762	798	816	826	852	819	838	875
Vol. sigma (%) a 600°C		8,6	10	5,3	11	6,5	7,4	10	10,6	11,7	13	11,7	12,5	15

En las Tablas 10c-1 a 10c-3 se enumeran los valores calculados de fracciones y tamaños de partícula de la fase gamma', así como los valores de límite elástico Rp0,2 dependientes de la temperatura de prueba de las aleaciones de la Tab. 10a para los tratamientos térmicos por precipitación 700°C/8h, 850°C/8h y 850°C/24h para el tamaño de grano ASTM 4,5.

Variante	1	9	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Gamma [%]	31	34,9	30,4	35,8	31,3	32,7	34,4	35,2	35,5	36,1	36	36,8	38,6
Gamma [nm]	24	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Rp0,2 [MPa]													
650°C	871	933	917	935	922	925	929	935	936	937	936	938	943
700°C	873	938	921	940	927	930	934	940	941	942	941	943	948
750°C	848	914	888	914	895	898	908	912	913	914	914	916	922
800°C	690	701	635	721	652	669	706	707	713	726	714	737	778
850°C	474	497	447	510	465	476	504	500	503	508	508	520	548
900°C	328	356	323	365	334	340	365	357	359	361	365	373	394

Tabla 10c-1. Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 10a.

5

Variante	1	9	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Gamma [%]	25	29,3	22,8	30,5	24,9	26,4	28,9	29,6	29,9	30,4	30	31,4	33,7
Gamma [nm]	45	45	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
Rp0,2 [MPa]													
650°C	896	987	857	1015	903	935	986	999	1004	1015	1007	1033	1077
700°C	886	975	847	1005	893	924	974	887	993	1003	995	1021	1065
750°C	852	874	754	909	793	829	891	886	895	914	900	936	1007
800°C	643	671	577	698	607	635	682	680	686	699	690	718	770
850°C	502	532	455	554	480	502	540	539	544	553	547	569	609
900°C	348	383	328	400	347	358	393	387	390	396	398	412	444

Tabla 10c-2. Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 10a.

Variante	1	9	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Gamma [%]	25	29,3	22,8	30,5	24,9	26,4	28,9	29,6	29,9	30,4	30	31,4	33,7
Gamma [nm]	64	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
650	807	921	773	917	814	842	888	901	906	917	908	932	973
700	797	909	763	906	805	832	878	890	896	906	897	921	961
750	787	897	726	875	763	798	859	852	861	890	868	901	948
800	613	711	549	664	578	604	650	637	653	666	657	683	733
850	472	509	428	520	451	472	507	507	511	521	514	535	573
900	324	357	305	371	322	333	365	359	362	368	369	382	413

Tabla 10c-3. Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab. 10a.

5 Consideremos primero las aleaciones 9 y 38 a 42, que presentan contenidos constantes de Co (20 %), Al (2,6 %) y Ti (0,3 %) y varían en los contenidos de los elementos Nb y Ta. De estas, las aleaciones 9 y 39, que presentan un contenido de Nb ligeramente más alto de 5,4 %, obtienen los valores de límite elástico Rp0,2 más altos. En el caso del tratamiento térmico por precipitación a 850°C/8h, la aleación 39, que presenta con 0,5 % un contenido de Ta más alto que la aleación 9, tiene valores de límite elástico Rp0,2 ligeramente mayores. El nivel de valores de límite elástico de las aleaciones 38, 40 y 41 es menor en comparación con el de las dos aleaciones 9 y 39. Las aleaciones 38, 40 y 41 presentan con 5 % de Nb un contenido de Nb ligeramente más bajo que las dos aleaciones 9 y 39. Entre las tres aleaciones 38, 40 y 41, la aleación 41 alcanza obtiene de límite elástico ligeramente más altos. La aleación presenta con 1 % un contenido de Ta ligeramente más alto. Los valores de límite elástico de la aleación 42 son casi comparables al nivel de valores de límite elástico de la aleación 9, aunque la aleación 42 presenta un contenido de Nb más bajo, pero con 2 % también el contenido de Ta más alto en esta serie de aleaciones.

15 Consideremos ahora las aleaciones 43, 44 y 45 con contenidos de W de 0,5 %, 1 % y 2 % en comparación con la aleación 9, que con 0,02 % sólo presenta un contenido de W muy bajo. En el caso del tratamiento térmico por precipitación de 850 °C/8 h, el nivel de los valores de límite elástico de las aleaciones 43, 44 y 45 aumenta sólo ligeramente con contenido de W creciente en comparación con el nivel de valores de límite elástico de la aleación 9.

20 Consideremos ahora las aleaciones 46, 47 y 48 con contenidos de Hf de 0,5 %, 1 % y 2 % en comparación con la aleación 9, que no contiene Hf. En el caso del tratamiento térmico por precipitación de 850°C/8h, el nivel de valores de límite elástico aumenta con contenido de Hf creciente, de modo que los valores de límite elástico de la aleación 48, es decir, con el contenido de Hf más alto en esta serie de aleaciones (2 %), son claramente más altos en comparación con la aleación 9 exenta de Hf.

25 Además de los análisis del lote de referencia 420420 y el número de análisis de referencia 1, en la Tabla 11a se consideran análisis adicionales con variaciones en los contenidos de Nb, Ta y W. Estos son los números de análisis 50 a 57. En la Tabla 11b se enumeran los resultados de los cálculos para estas variaciones de análisis. Dependiendo de los requisitos de los componentes, se pueden producir altas cargas termomecánicas para aplicaciones de alta temperatura, para estas aplicaciones puede ser aconsejable reemplazar parcialmente Nb por Ta; Además de la sustitución de Al en la fase  $\gamma'$ , Ta ralentiza los procesos de difusión en la aleación. Además, esto aumenta considerablemente. En este caso, la cinética de precipitación se deteriora de forma conveniente para la procesabilidad. En las aleaciones 50-52 y 57, la fase Delta se puede utilizar para la solidificación de límites de grano a alta temperatura.

Tabla 11 a: Análisis de aleaciones seleccionadas con variación de contenidos de Ni, Nb, Ta, W

Variante	420420	1	50	51	52	53	54	55	56	57
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,018	0,018	0,018
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Ni	45,96	46,018	<b>49,038</b>	<b>49,238</b>	<b>48,738</b>	<b>49,218</b>	<b>50,818</b>	<b>49,318</b>	49,218	49,518
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
Ti	0,31	0,3	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
Nb	5,41	5,4	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4,5</b>	<b>3,5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
Ta	0,01	0,01	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>2,6</b>	<b>3,5</b>	<b>3</b>	<b>3,1</b>	<b>2,8</b>
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>
Hf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ES 2 995 028 T3

Variante	420420	1	50	51	52	53	54	55	56	57
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 11b: Propiedades calculadas de las fases y aleaciones de la Tabla 11a.

Variante	420420	1	50	51	52	53	54	55	56	57
T sol. y' (°C)	990	1016	1040	1027	1026	1020	1065	1058	1064	1046
Vol. y' ( %) a 600°C	26	29	36	34,2	34,4	34,4	40	40,2	41	37,5
T sol. eta (°C)	1020	996	0	0	0	0	0	0	0	0
Vol. máx. eta ( %)	2,5	2,8	0	0	0	0	0	0	0	0
T sol. eta (°C)		970	0	0	0	0	0	0	0	0
T sol. Delta (°C)	1060	1014	916	936	930	0	0	0	0	888
Vol. Delta. ( %) a 600°C	2	4,5	1,6	1,9	1,6	0	0	0	0	0,75
T sol. sigma (°C)	-	774	840	823	850	829	806	846	860	824
Vol. sigma ( %) a 600°C	-	8,6	10,8	10	10,5	8,8	11	13,4	13,7	12

5 En las tablas 11c-1 a 11c-3 se enumeran los valores calculados de fracciones y tamaños de partícula de la fase gamma', así como los valores de límite elástico Rp0,2 dependientes de la temperatura de prueba de las aleaciones de la Tab. 11a para los tratamientos térmicos por precipitación 700°C/8h, 850°C/8h y 850°C/24h para el tamaño de grano ASTM 4,5.

Variante	1	50	51	52	53	54	55	56	57
Gamma' [%]	31	35,1	34,2	34,3	32,5	36,8	37,9	39	36,4
Gamma' [nm]	24	23	23	23	23	27	26	26	25
Rp0,2 [MPa]									
650°C	871	899	873	875	872	968	950	957	920
700°C	875	904	877	880	876	973	956	962	925
750°C	848	877	849	852	847	937	927	930	897
800°C	690	700	671	677	653	707	756	764	720
850°C	474	492	469	471	457	509	535	541	508
900°C	328	351	330	331	322	374	386	391	364

10 Tabla 11c-1: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 700°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab.11a.

Variante	1	50	51	52	53	54	55	56	57
Gamma' [%]	25	29,4	27,4	27,5	25,6	29,9	32,4	33,4	30,4
Gamma' [nm]	45	45	45	45	45	45	44	44	44
Rp0,2 [MPa]									
650°C	896	991	943	947	910	982	1043	1061	1005
700°C	886	980	932	937	899	971	1031	1049	993
750°C	852	891	845	853	814	882	960	982	912
800°C	643	682	646	651	621	677	735	752	698
850°C	502	540	510	514	490	537	582	596	553
900°C	348	388	364	366	348	398	429	437	404

Tabla 11c-2: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 8 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab.11a.

5

Variante	1	50	51	52	53	54	55	56	57
Gamma' [%]	25	29,4	27,4	27,5	25,6	29,9	32,4	33,4	30,4
Gamma' [nm]	64	63	63	63	63	62	61	61	61
Rp0,2 [MPa]									
650°C	807	896	853	857	823	891	946	962	911
700°C	797	885	843	847	813	880	934	951	900
750°C	787	859	815	822	785	851	922	938	879
800°C	613	650	616	621	593	646	701	717	667
850°C	472	508	481	484	462	506	549	562	552
900°C	324	361	339	340	324	371	400	407	376

Tabla 11c-3: Fracciones y tamaños de partícula calculados de la fase de precipitación gamma' y valores de límite elástico mecánico Rp0,2 en función de las temperaturas de prueba de 650°C a 900°C tras un tratamiento térmico por precipitación de 850°C / 24 h para un tamaño de grano ASTM 4,5 de análisis de aleación de la Tab.11a.

10

En especial, si se consideran los datos de la Tab. 11c-2, es decir, en el caso de tratamiento térmico por precipitación de 850°C/8h, se puede observar que las aleaciones 54, 55, 56 y 57, que con 3,5 %, 3 %, 3,1 % y 2,8 % presentan los contenidos de Al más altos en esta serie de aleaciones, obtienen un alto nivel de valores de límite elástico. Las aleaciones 54 a 57 presentan además un contenido de Ta más alto con 0,5 %, o bien 1 %; sin embargo, con solo 0,1 % presenta un bajo contenido de Ti. La aleación 50, que con 2,6 % presenta un contenido de Al no tan alto, obtiene igualmente un nivel bastante alto de valores de límite elástico. Además de 0,5 % de Ta, la aleación 50 presenta con 0,3 % un contenido de Ti ligeramente más alto.

15

En la Tabla 12 se representan los análisis de ejemplo según la invención, que pueden sustituir las aleaciones de referencia convencionales con las mismas y/o mejores propiedades a alta temperatura a través de composiciones adaptadas debido a la procesabilidad mejorada:

20

Tabla 12

Aleación de referencia	Alloy 718 Waspaloy Udimet 720	VDM Alloy 780	Alloy 939		Alloy 738LC	
Requisitos en la estructura	25 %<Vol. y' (%)<30 %, Vol. Delta<6 %	25 %<Vol. y' (%)<30 %, Vol. Delta<6 % sin fase eta	30 %<Vol. y' (%)≤35 %, sin fase eta		35 %<Vol. y' (%)≤45 %, sin fase eta	
			Con f. Delta	Sin f. Delta	Con f. Delta	Sin f. Delta
Grupo nº	0	1	2	3	4	5
Aleaciones	1;27	5; 6; 7; 8;	9; 28; 29; 39; 46; 51; 52	38; 40; 41; 53	43; 44; 45; 47; 48; 50; 57	42; 55; 56
Intervalos de elementos basados en VDM Alloy 780		1,8-2,4 Al 15-23Co	2,3-2,8 Al 19-25 Co 4,5-5,5 Nb 3,0-5,0 Mo	2,4-3,0 Al 18-22 Co 3,5-5,0 Nb	2,4-3,0 Al 18-22 Co 4,5-6,0 Nb	2,4-3,3 Al 18-22 Co 3,8-6,0 Nb 0,5-2,5 Te

Grupo 0: VDM Alloy 780 estándar (Tabla 13)

5 Grupo 1: Composiciones adaptadas de polvo de VDM Alloy 780 - Tabla 14 (a,b) con procesabilidad y estabilidad estructural mejoradas.

10 Grupo 2: Composiciones optimizadas de polvo de VDM Alloy 780HT para las aplicaciones a temperaturas más altas en comparación con polvo de VDM Alloy 780 estándar. Estas aleaciones presentan una fracción volumétrica de y' aumentada, aunque limitada a 35 %. En este grupo se representan a modo de ejemplo las aleaciones que presentan fracciones reducidas de fase Delta en el intervalo de temperatura entre 800°C y 900°C (Tabla 15).

Grupo 3: Composiciones optimizadas de polvo de VDM Alloy 780HT para las aplicaciones a temperaturas más altas en comparación con polvo de VDM Alloy 780 estándar. Estas aleaciones presentan una fracción volumétrica de y' aumentada, aunque limitada a 35 %. En este grupo se representan a modo de ejemplo las aleaciones que no presentan fase Delta en comparación con el grupo 2 (Tabla 16).

15 Grupo 4 y 5: Composiciones optimizadas de polvo de VDM Alloy 780HT para las aplicaciones de a temperaturas más altas en comparación con polvo VDM Alloy 780. Estas aleaciones presentan fracciones volumétricas más altas de fase y'. De manera análoga a los grupos 2 y 3 se resumen las aleaciones con y sin fase Delta. En los 5 grupos, la fase eta no está presente, o bien no es termodinámicamente estable (Tablas 17 y 18).

20

Tabla 13: Grupo 0

Variante	420420	1	27
C	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008
Cr	17,75	18	18
Ni	45,96	46,018	46,518
Mn	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065
Mo	2,94	3	3
Ti	0,31	0,3	0,3
Nb	5,41	5,4	4,9
Cu	0,01	0,01	0,01
Fe	0,67	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011
Al	2,16	2,2	2,2

## ES 2 995 028 T3

Mg	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,0004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02
Co	24,63	24,5	24,5
B	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002

Tabla 14a: Grupo 1

Variante	5	6	7	8
C	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	18	18	18	18
Ni	48,018	55,518	53,018	50,518
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	3	3	3	3
Ti	0,3	0,3	0,3	0,3
Nb	5,4	5,4	5,4	5,4
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,2	2,2	2,2	2,2
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002
W.	0,02	0,02	0,02	0,02
Co	22,5	15	17,5	20
B	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 14b: Grupo 1

Variante	5	6	7	8
T sol. y' (°C)	1015	1005	1010	1013
Vol. y' ( %) a 600°C	29	29	29	29
T sol. eta (°C)	0	0	0	0
Vol. máx. eta ( %)	0	0	0	0
T sol. eta (°C)	0	0	0	0
T sol. Delta (°C)	1007	985	992	1000
Vol. Delta ( %) a 600°C	4,6	4,8	5	4,8
T sol. sigma (°C)	763	705	720	747
Vol. sigma ( %) a 600°C	7,7	4,8	6,2	6,5

Variante	9	28	29	39	46	51	52
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	18	18	18	18	18	18	18
Ni	50,118	46,218	46,418	49,518	49,608	49,238	48,738
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	3	3	3	3	3	3,5	4
Ti	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1
Nb	5,4	4,9	4,9	5,4	5,4	5	5
Ta	0	0	0	0,5	0,01	0,5	0,5
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,6	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,6
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,5	0,5
Co	20	24,5	24,5	20	20	20	20
Hf	0	0	0	0	0,5	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 15a: Grupo 2

## ES 2 995 028 T3

Tabla 15b: Grupo 2

Variante	9	28	29	39	46	51	52
T sol. $\gamma'$ (°C)	1040	1032	1015	1044	1045	1027	1026
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	35	33,4	32	35	35	34,2	34,4
T sol. $\eta$ (°C)	0	0	0	0	0	0	0
Vol. máx. $\eta$ (%)	0	0	0	0	0	0	0
T sol. $\eta$ (°C)	0	0	0	0	0	0	0
T sol. Delta (°C)	960	930	952	972	968	936	930
Vol. Delta (%) a 600°C	2,4	1,6	1,9	2,7	2,3	1,9	1,6
T sol. $\sigma$ (°C)	799	791	772	818	819	823	850
Vol. $\sigma$ (%) a 600°C	10	9,4	8,4	11	11,7	10	10,5

Tabla 16a: Grupo 3

Variante	38	40	41	53
C	0,021	0,021	0,021	0,021
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	18	18	18	18
Ni	51,508	51,018	50,518	49,218
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	3	3	3	4
Ti	0,3	0,3	0,3	0,1
Nb	4	4	4	4,5
Ta	0,01	0,5	1	0,5
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,6	2,6	2,6	2,6
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02	0,5
Co	20	20	20	20
Hf	0	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002

## ES 2 995 028 T3

Tabla 16b: Grupo 3

Variante	38	40	41	53
T sol. y' (°C)	1022	1030	1037	1020
Vol. y' (%) a 600°C	33	33,7	34,6	34,4
T sol. eta (°C)	0	0	0	0
Vol. máx. eta (%)	0	0	0	0
T sol. eta (°C)	0	0	0	0
T sol. Delta (°C)	0	0	0	0
Vol. Delta (%) a 600°C	0	0	0	0
T sol. sigma (°C)	719	744	762	829
Vol. sigma (%) a 600°C	5,3	6,5	7,4	8,8

Tabla 17a: Grupo 4

Variante	43	44	45	47	48	50	57
C	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,018
S	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Cr	18	18	18	18	18	18	18
Ni	49,628	49,128	48,128	49,108	48,108	49,038	49,518
Mn	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Mo	3	3	3	3	3	3,5	3
Ti	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1
Nb	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5	5
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,5	1
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Al	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,8
Mg	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
W	0,5	1	2	0,02	0,02	0,5	0,02
Co	20	20	20	20	20	20	20
Hf	0	0	0	1	2	0	0
B	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

## ES 2 995 028 T3

Tabla 17b: Grupo 4

Variante	43	44	45	47	48	50	57
T sol. y' (°C)	1038	1039	1039	1048	1060	1040	1046
Vol. y' (%) a 600°C	35,1	35,3	35,8	36	36	36	37,5
T sol. eta (°C)	0	0	0	0	0	0	0
Vol. máx. eta (%)	0	0	0	0	0	0	0
T sol. eta (°C)	0	0	0	0	0	0	0
T sol. Delta (°C)	958	956	950	968	964	916	888
Vol. Delta (%) a 600°C	2,3	2,6	2,5	2,3	2,3	1,6	0,75
T sol. sigma (°C)	816	826	852	838	875	840	824
Vol. sigma (%) a 600°C	10,6	11,7	13	12,5	15	10,8	12

Tabla 18a: Grupo 5

Variante	42	55	56
C	0,021	0,018	0,018
S	0,0005	0,0005	0,0005
N	0,008	0,008	0,008
Cr	18	18	18
Ni	49,518	49,318	49,218
Mn	0,018	0,018	0,018
Si	0,065	0,065	0,065
Mo	3	3	3
Ti	0,3	0,1	0,1
Nb	4	5	5
Ta	2	1	1
Cu	0,01	0,01	0,01
Fe	0,43	0,43	0,43
P	0,011	0,011	0,011
Al	2,6	3	3,1
Mg	0,0008	0,0008	0,0008
Ca	0,004	0,004	0,004
V	0,002	0,002	0,002
Zr	0,002	0,002	0,002
W	0,02	0,02	0,02
Co	20	20	20
Hf	0	0	0
B	0,004	0,004	0,004
O	0,002	0,002	0,002

Tabla 18b: Grupo 5

Variante	42	55	56
T sol. $\gamma'$ (°C)	1045	1058	1064
Vol. $\gamma'$ (%) a 600°C	36,5	40,2	41
T sol. eta (°C)	0	0	0
Vol. máx. eta (%)	0	0	0
T sol. eta (°C)	0	0	0
T sol. Delta (°C)	0	0	0
Vol. Delta (%) a 600°C	0	0	0
T sol. sigma (°C)	798	846	860
Vol. sigma (%) a 600°C	10	13,4	13,7

La aleación en polvo tiene una procesabilidad y estabilidad estructural mejoradas en comparación con el polvo de VDM Alloy 780 si se cumplen los siguientes requisitos y criterios:

Al 1,8-2,4 % en peso  
Co 15-23 % en peso

5 Gracias a una composición optimizada del polvo de VDM Alloy 780 HT, la aleación en polvo es adecuada para la aplicación a temperaturas más altas en comparación con el polvo de VDM Alloy 780 estándar. Esta aleación presenta fracciones volumétricas de  $\gamma'$  más altas, aunque limitadas a 35 %. En el intervalo de temperatura entre 800° y 900°C están presentes fracciones reducidas de fase Delta. La aleación presenta una combinación especialmente buena de procesabilidad y resistencia al cambio de carga a temperaturas más altas. Se deben cumplir los siguientes requisitos y criterios.

Al 2,3-2,8 % en peso  
Co 19-25 % en peso  
Nb 4,5-5,5 % en peso  
Mo 3,0-5,0 % en peso

15 Gracias a una composición optimizada del polvo de VDM Alloy 780 HT, la aleación en polvo es adecuada para la aplicación a temperaturas más altas en comparación con el polvo de VDM Alloy 780 estándar. Esta aleación presenta fracciones volumétricas de  $\gamma'$  más altas, aunque limitadas a 35 %. En el intervalo de temperatura entre 800° y 900°C están presentes fracciones reducidas de fase Delta. Esta aleación presenta asimismo tiene una combinación especialmente buena de procesabilidad y resistencia al cambio de carga a temperaturas más altas. Se deben cumplir los siguientes requisitos y criterios.

Al 2,4-3,0 % en peso  
Co 18-22 % en peso  
Nb 3,5-5,0 % en peso

20 Gracias a una composición optimizada del polvo VDM de Alloy 780 HT, la aleación en polvo es adecuada para la aplicación a temperaturas más altas en comparación con el polvo de VDM Alloy 780 estándar. Esta aleación presenta fracciones volumétricas de  $\gamma'$  más altas, aunque limitadas a 35 %. En el intervalo de temperatura entre 800° y 900°C están presentes fracciones reducidas de fase Delta. También esta aleación presenta una combinación especialmente buena de procesabilidad y resistencia al cambio de carga a temperaturas más altas. Se deben cumplir los siguientes requisitos y criterios.

Al 2,4-3,0 % en peso  
Co 18-22 % en peso  
Nb 4,5-6,0 % en peso

5 Gracias a una composición optimizada del polvo de VDM Alloy 780 HT, la aleación en polvo es adecuada para la aplicación a temperaturas más altas en comparación con el polvo de VDM Alloy 780 estándar. Esta aleación presenta fracciones volumétricas de  $\gamma'$  más altas, aunque limitadas a 35 %. En el intervalo de temperatura entre 800° y 900°C están presentes fracciones reducidas de fase Delta. La aleación presenta una combinación especialmente buena de procesabilidad y resistencia al cambio de carga a temperaturas más altas. Se deben cumplir los siguientes requisitos y criterios.

Al	2,4-3,3 % en peso
Co	18-22 % en peso
Nb	3,8-6,0 % en peso
Te	0,5-2,5 % en peso

10 Gracias a una composición optimizada del polvo de VDM Alloy 780 HT, la aleación en polvo es adecuada para la aplicación a temperaturas más altas en comparación con el polvo de VDM Alloy 780 estándar. Esta aleación presenta fracciones volumétricas de  $\gamma'$  más altas. La aleación presenta una combinación especialmente buena de procesabilidad y alta resistencia mecánica a temperaturas más altas. Se deben cumplir los siguientes requisitos y criterios.

Al	2,4-4 % en peso
Co	12-35 % en peso
Nb	3,8-6,0 % en peso
Ti	0-1 % en peso

15 Gracias a una composición optimizada del polvo de VDM Alloy 780 HT, la aleación en polvo es adecuada para la aplicación a temperaturas más altas en comparación con el polvo de VDM Alloy 780 estándar. Esta aleación presenta fracciones volumétricas de  $\gamma'$  más altas. La aleación tiene una combinación especialmente buena de procesabilidad y alta resistencia mecánica a temperaturas más altas. Se deben cumplir los siguientes requisitos y criterios.

Al	2,4-3,2 % en peso
Co	12-35 % en peso
Nb	3,8-6,0 % en peso
Ti	0,5-3,0 % en peso

20 Las aleaciones en polvo Alloy 780 HT descritas obtienen un nivel de resistencia igual o claramente mayor que el análisis de referencia estándar anterior Alloy 780, que se determina mediante los valores de límite elástico Rp0,2 dependientes de la temperatura. En particular, en el caso de aleaciones que presentan una temperatura de solvus gamma' más alta (por ejemplo aleaciones con contenidos de Al claramente más altos que 2,2 %), el fuerte gradiente del límite elástico Rp0,2 se desplaza a temperaturas de prueba más altas. Esto es especialmente interesante para una posible temperatura de aplicación más alta de un componente.

25 Dentro de una composición química definida, varios parámetros influyen en el nivel de resistencia mecánica dependiente de la temperatura de prueba:

30 - La temperatura de recocido y el periodo de recocido del tratamiento térmico por precipitación, así como la velocidad de enfriamiento después del tratamiento térmico en disolución, influyen tanto en la proporción como en el tamaño de partícula de la fase gamma'. Estas magnitudes en combinación influyen a su vez en el nivel de resistencia dependiente de la temperatura de prueba.

- El tamaño de grano de la estructura influye en el nivel de resistencia dependiente de la temperatura de prueba. La estructura y, en particular, el tamaño de grano se ven influenciados, entre otras cosas, por la temperatura de recocido y el periodo de recocido del tratamiento térmico en disolución.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para la producción de un polvo de una aleación de níquel-cobalto, en donde los contenidos (en % en peso) se definen como sigue:

C	> 0 - máx. 0,1 %
S	máx. 0,015 %
Cr	13-23 %
Ni	resto (> 30 %)
Mn	máx. 1,0 %
Si	máx. 1,0 %
Mo	1-6 %
Ti	> 0-3,0 %
Nb+Ta	3-8 %
Cu	máx. 0,5 %
Fe	> 0 - máx. 10 %
Al	> 0 - < 4,0 %
V	hasta 4 %
Zr	> 0 - máx. 0,1 %
Co	> 12 - < 35 %
W	hasta 4 %
Hf	hasta 3,0 %
O	máx. 0,1 %
N	> 0 - máx. 0,1 %
Mg	> 0 - máx. 0,01 %
B	> 0 - máx. 0,02 %
P	> 0 - máx. 0,03 %
Ar	0 - máx. 0,08 %
Sí	máx. 0,0005 %
Bi	máx. 0,00005 %
Pb	máx. 0,002 %,

- 5 - fundiéndose una aleación en un horno VIM,
- manteniéndose la masa fundida líquida durante 5 minutos a 2 horas, en especial 20 minutos a 2 horas, para la homogeneización,
- ajustándose una instalación de atomización cerrada con un gas suministrado a un punto de rocío de -10 °C a -120 °C,
- 10 - insuflándose la masa fundida a través de una boquilla en una corriente de gas con un caudal de gas de 2 m<sup>3</sup>/min a 150 m<sup>3</sup>/min,
- recogándose las partículas de polvo solidificadas en un recipiente hermético a gases, en donde
- las partículas tienen un tamaño de partícula de 5 µm a 250 µm,
- las partículas del polvo son esféricas,
- 15 - el polvo tiene inclusiones de gas que constituyen del 0,0 al 4 % del área de poros (poros > 1 µm) en proporción al área total de los objetos evaluados,
- el polvo tiene una densidad aparente de 2 hasta la densidad de la aleación de aproximadamente 8 g/cm<sup>3</sup>,
- el polvo se envasa herméticamente bajo una atmósfera de gas protector con argón.

2. Procedimiento según la reivindicación 1 con contenidos (en % en peso) que se definen como sigue:

Fe	> 0 - máx. 5 %
Co	> 15 - < 27 %
Cr	16 - 22 %
Mo	2 - 6 %
W	hasta 4 %
Hf	hasta 2,5 %
Nb+Ta	3,5-7,5 %
Al	1,6-3,5 %
Mn	máx. 0,6 %
Ti	0,0005 - < 2 %, especialmente < 1,0 %
Si	0,0005-0,4 %
C	> 0 - máx. 0,05 %
P	> 0 - máx. 0,025 %
N	> 0 - máx. 0,1 %
Mg	> 0 - máx. 0,008 %
B	> 0 - máx. 0,02 %
Zr	> 0 - máx. 0,1 %
Ar	máx. 0,05 %
Ni	resto (> 30 %)

3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, en el que se deben cumplir los siguientes requisitos y criterios:

$$\begin{aligned}
 & \text{Mo} + \text{W} \geq 2,5 \\
 & 0,0005 < \text{B} + \text{Zr} + \text{P} < 0,15 \\
 & \text{S} + \text{Se} + \text{Bi} + \text{Pb} < 0,1 \\
 & 900^{\circ}\text{C} < \text{solvus } y' < 1130^{\circ}\text{C} \\
 & 20 \% < \text{fracción volumétrica de } y' < 45 \% \text{ en estado recocido por precipitación}
 \end{aligned}$$

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3 con contenidos (en % en peso): Al 1,8-2,4; Co 15-23.

10 5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4 con contenidos (en % en peso): Al 2,3-2,8; Co 19-25, Nb 4,5-5,5; Mo 3,0-5,0.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5 con contenidos (en % en peso): Al 2,4-3,0; Co 18-22; Nb 3,5-5,0.

15 7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6 con contenidos (en % en peso): Al 2,4-3,0; Co 18-22, Nb 4,5-6,0.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7 con contenidos (en % en peso): Al 2,4-3,3; Co 18-22, Nb 3,8-6,0; Ta 0,5-2,5.

9. Método según una de las reivindicaciones 1 a 8, en donde

20 - la aleación se produce primero como un bloque de aleación maestra con análisis químico definido mediante fusión en el horno VIM, VIM/ESU, VIM/ESU/VAR, VIM/VAR VOD o VLF con posterior refundición en el ESU y/o VAR en caso necesario,

- el bloque de aleación maestra se separa en piezas pequeñas mediante serrado,

- las piezas de aleación maestra se funden en un horno VIM.

10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado porque el gas suministrado es un gas inerte.

11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado porque el gas suministrado es argón.
12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 11, caracterizado porque la corriente de gas en la que se atomiza es argón.
- 5 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 12, caracterizado porque la corriente de gas en la que se atomiza es nitrógeno.
14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 13, caracterizado porque la corriente de gas en la que se atomiza es una mezcla de nitrógeno y argón.
15. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 14, caracterizado porque la atomización se efectúa con 0,5 a 80 kg/min.
- 10 16. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 15, con recocidos de baja tensión a realizar sobre componentes impresos a partir de los mismos entre 300 °C y 600 °C con tiempos de recocido de 0,5 h a 10 h y temperaturas de recocido en disolución entre 850 °C y 1250 °C con periodos de recocido entre 30 minutos y 30 horas y tratamientos térmicos por precipitación de una o dos etapas con temperaturas de recocido en el intervalo entre 600 °C y 900 °C y periodo de recocido en el intervalo de 1 a 30 horas, para ajustar tamaños de grano definidos de 0,5 μm - 2000 μm, proporciones (> 25 %) y tamaños de partícula (10-300 nm) de la fase gamma' y propiedades de resistencia mecánica elevadas (iguales o más altas en comparación con la aleación 1).
- 15 17. Utilización de un polvo producido según el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 16, producido para la fabricación aditiva o HIPen de componentes o piezas estructurales.
18. Utilización de un polvo producido según el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 16, producido para la fabricación aditiva o HIPen de capas sobre componentes o piezas estructurales.
- 20 19. Utilización de un polvo producido según el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 16, producido para la fabricación de componentes de turbinas.
20. Utilización de un polvo producido según el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 16, producido para la fabricación de componentes para la industria del petróleo y del gas.
- 25 21. Utilización de un polvo producido según el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 16, producido para la fabricación de válvulas o bridas.
22. Utilización de un polvo producido según el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 16, producido para la fabricación de componentes para la industria del automóvil.
- 30 23. Utilización de un polvo producido según el procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 16, producido para la fabricación de componentes para la industria de procesos químicos y la construcción de hornos.