



(11) **EP 3 710 611 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:

10.01.2024 Bulletin 2024/02

(21) Numéro de dépôt: **18821711.1**

(22) Date de dépôt: **14.11.2018**

(51) Classification Internationale des Brevets (IPC):
C22C 19/05 (2006.01)

(52) Classification Coopérative des Brevets (CPC):
C22C 19/057

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2018/052840

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2019/097163 (23.05.2019 Gazette 2019/21)

(54) **SUPERALLIAGE A BASE DE NICKEL, AUBE MONOCRISTALLINE ET TURBOMACHINE**
SUPERLEGIERUNG AUF NICKELBASIS, EINKRISTALLSCHAUFEL UND TURBOMASCHINE
NICKEL-BASED SUPERALLOY, SINGLE-CRYSTAL BLADE AND TURBOMACHINE

(84) Etats contractants désignés:

**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

(30) Priorité: **14.11.2017 FR 1760675**

(43) Date de publication de la demande:
23.09.2020 Bulletin 2020/39

(73) Titulaires:

- **Safran**
75015 Paris (FR)
- **Office National d'Etudes et de Recherches
Aérospatiales**
91120 Palaiseau (FR)

(72) Inventeurs:

- **RAME, Jérémie**
77550 Moissy-Cramayel (FR)
- **JAQUET, Virginie**
77550 Moissy-Cramayel (FR)
- **DELAUTRE, Joël**
77550 Moissy-Cramayel (FR)
- **GUEDOU, Jean-Yves**
77550 Rond-Point René (FR)

- **CARON, Pierre**
91940 Les Ulis (FR)
- **LAVIGNE, Odile**
75013 Paris (FR)
- **LOCQ, Didier**
92350 Le Plessis Robinson (FR)
- **PERRUT, Mikael**
92130 Issy-Les-Moulineaux (FR)

(74) Mandataire: **Cabinet Beau de Loménie**
158, rue de l'Université
75340 Paris Cedex 07 (FR)

(56) Documents cités:

EP-A1- 0 971 041 EP-B1- 0 971 041
WO-A1-2017/021685 US-A1- 2013 129 522
US-A1- 2015 322 550 US-B1- 6 419 763

- **GREGORI A ET AL: "Welding and deposition of
nickel superalloys 718, waspaloy and single
crystal alloy CMSX-10", WELDING IN THE
WORLD, SPRINGER, vol. 51, no. 11/12, 1
novembre 2007 (2007-11-01), pages 34-47,
XP001518318, ISSN: 0043-2288**

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

[0001] Le présent exposé concerne des superalliages à base de nickel pour des turbines à gaz, notamment pour les aubes fixes, aussi appelées distributeurs ou redresseurs, ou mobiles d'une turbine à gaz, par exemple dans le domaine de l'aéronautique.

[0002] Il est connu d'utiliser des superalliages à base de nickel pour la fabrication d'aubes monocristallines fixes ou mobiles de turbines à gaz pour moteurs d'avion ou d'hélicoptère. Gregori et al. montre par exemple. une superalliage à base de nickel: CMSX-10 en "Welding in the World", Springer, Vol. 51, No. 11/12, pages 34-47.

[0003] Ces matériaux ont pour principaux avantages de combiner à la fois une résistance au fluage élevée à haute température ainsi qu'une résistance à l'oxydation et à la corrosion.

[0004] Au cours du temps, les superalliages à base de nickel pour aubes monocristallines ont subi d'importantes évolutions de composition chimique, dans le but notamment d'améliorer leurs propriétés en fluage à haute température tout en conservant une résistance à l'environnement très agressif dans lesquels ces superalliages sont utilisés.

[0005] Par ailleurs, des revêtements métalliques adaptés à ces alliages ont été développés afin d'augmenter leur résistance à l'environnement agressif dans lequel ces alliages sont utilisés, notamment la résistance à l'oxydation et la résistance à la corrosion. De plus, un revêtement céramique de faible conductivité thermique, remplissant une fonction de barrière thermique, peut être ajouté pour réduire la température à la surface du métal.

[0006] Typiquement, un système de protection complet comporte au moins deux couches.

[0007] La première couche, aussi appelée sous-couche ou couche de liaison, est directement déposée sur la pièce à protéger en superalliage à base de nickel, aussi appelée substrat, par exemple une aube. L'étape de dépôt est suivie d'une étape de diffusion de la sous-couche dans le superalliage. Le dépôt et la diffusion peuvent également être réalisés lors d'une seule étape.

[0008] Les matériaux généralement utilisés pour réaliser cette sous-couche comprennent des alliages métalliques aluminifères de type MCrAlY (M = Ni (nickel) ou Co (cobalt)) ou un mélange de Ni et de Co, Cr = chrome, Al = aluminium et Y = yttrium, ou des alliages de type aluminure de nickel (Ni_xAl_y), certains contenant également du platine ($Ni_xAl_yPt_z$).

[0009] La deuxième couche, généralement appelée barrière thermique ou « TBC » conformément à l'acronyme anglais pour « Thermal Barrier Coating », est un revêtement céramique comprenant par exemple de la zircone yttrée, aussi appelée « YSZ » conformément à l'acronyme anglais pour « Yttria Stabilized Zirconia » ou « YPSZ » conformément à l'acronyme anglais pour « Yttria Partially Stabilized Zirconia » et présentant une structure poreuse. Cette couche peut être déposée par différents procédés, tels que l'évaporation sous faisceau d'électrons (« EB-PVD » conformément à l'acronyme anglais pour « Electron Beam Physical Vapor Déposition »), la projection thermique (« APS » conformément à l'acronyme anglais pour « Atmospheric Plasma Spraying » ou « SPS » conformément à l'acronyme anglais pour « Suspension Plasma Spraying »), ou tout autre procédé permettant d'obtenir un revêtement céramique poreux à faible conductivité thermique.

[0010] Du fait de l'utilisation de ces matériaux à haute température, par exemple de 650°C à 1150°C, il se produit des phénomènes d'inter-diffusion à l'échelle microscopique entre le superalliage à base de nickel du substrat et l'alliage métallique de la sous-couche. Ces phénomènes d'inter-diffusion, associés à l'oxydation de la sous-couche, modifient notamment la composition chimique, la microstructure et par conséquent les propriétés mécaniques de la sous-couche dès la fabrication du revêtement, puis pendant l'utilisation de l'aube dans la turbine. Ces phénomènes d'inter-diffusion modifient également la composition chimique, la microstructure et par conséquent les propriétés mécaniques du superalliage du substrat sous le revêtement. Dans les superalliages très chargés en éléments réfractaires, notamment en rhénium, il peut ainsi se former dans le superalliage sous la sous-couche une zone de réaction secondaire (ZRS) sur une profondeur de plusieurs dizaines, voire centaines, de micromètres. Les caractéristiques mécaniques de cette ZRS sont nettement inférieures à celles du superalliage du substrat. La formation de ZRS est indésirable car elle conduit à une réduction significative de la résistance mécanique du superalliage.

[0011] Ces évolutions de la couche de liaison, associées aux champs de contraintes liés à la croissance de la couche d'alumine qui se forme en service à la surface de cette couche de liaison, aussi appelée « TGO » conformément à l'acronyme anglais pour « Thermally Grown Oxide », et aux écarts de coefficients de dilatation thermique entre les différentes couches, génèrent des décohésions dans la zone interfaciale entre la sous-couche et le revêtement céramique, qui peuvent conduire à l'écaillage partiel ou total du revêtement céramique. La partie métallique (substrat en superalliage et sous-couche métallique) est alors mise à nu et exposée directement aux gaz de combustion, ce qui augmente les risques d'endommagement de l'aube et donc de la turbine à gaz.

[0012] De plus, la complexité de la chimie de ces alliages peut conduire à une déstabilisation de leur microstructure optimale avec l'apparition de particules de phases indésirables lors de maintiens à haute température des pièces formées à partir de ces alliages. Cette déstabilisation a des conséquences négatives sur les propriétés mécaniques de ces alliages. Ces phases indésirables de structure cristalline complexe et de nature fragile sont dénommées phases topologiquement compactes (« PTC ») ou phases « TCP » conformément au sigle anglais pour « Topologically Close-

Packed ».

[0013] En outre, des défauts de fonderie sont susceptibles de se former dans les pièces, telles que des aubes, lors de leur fabrication par solidification dirigée. Ces défauts sont généralement des grains parasites du type « Freckle », dont la présence peut provoquer une rupture prématurée de la pièce en service. La présence de ces défauts, liés à la composition chimique du superalliage, conduit généralement au rejet de la pièce, ce qui entraîne une augmentation du coût de production.

Objet et résumé de l'invention

[0014] Le présent exposé vise à proposer des compositions de superalliages à base de nickel pour la fabrication de composants monocristallins, présentant des performances accrues en terme de durée de vie et de résistance mécanique et permettant de réduire les coûts de production de la pièce (diminution du taux de rebut) par rapport aux alliages existants. Ces superalliages présentent une résistance au fluage à haute température supérieure à celle des alliages existants tout en montrant une bonne stabilité microstructurale dans le volume du superalliage (faible sensibilité à la formation de PTC), une bonne stabilité microstructurale sous la sous-couche de revêtement de la barrière thermique (faible sensibilité à la formation de ZRS), une bonne résistance à l'oxydation et à la corrosion tout en évitant la formation de grains parasites du type « Freckle ».

[0015] A cet effet, le présent exposé concerne un superalliage à base de nickel comprenant, en pourcentages massiques, 4,0 à 5,5 % de rhénium, 3,5 à 12,5 % de cobalt, 0,30 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 5,5 % de chrome, 3,5 à 5,5 % de tungstène, 4,5 à 6,0 % d'aluminium, 0,35 à 1,50 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,16 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,17 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,18 à 0,30 % de hafnium, encore plus de préférence 0,20 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, de préférence 0,08 à 0,12 % de silicium, encore plus de préférence 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables..

[0016] Ce superalliage est destiné à la fabrication de composants monocristallins de turbine à gaz, tels que des aubes fixes ou mobiles.

[0017] Grâce à cette composition du superalliage à base de nickel (Ni), la résistance au fluage est améliorée par rapport aux superalliages existants, en particulier à des températures pouvant aller jusqu'à 1200°C.

[0018] Cet alliage présente donc une résistance au fluage à haute température améliorée. Cet alliage présente également une résistance à la corrosion et à l'oxydation améliorée.

[0019] Ces superalliages présentent une masse volumique inférieure ou égale à 9,00 g/cm³ (gramme par centimètre cube).

[0020] Une pièce monocristalline en superalliage à base de nickel est obtenue par un procédé de solidification dirigée sous gradient thermique en fonderie à la cire perdue. Le superalliage monocristallin à base de nickel comprend une matrice austénitique de structure cubique à faces centrées, solution solide à base de nickel, dite phase gamma (« γ »). Cette matrice contient des précipités de phase durcissante gamma prime (« γ' ») de structure cubique ordonnée L1₂ de type Ni₃Al. L'ensemble (matrice et précipités) est donc décrit comme un superalliage γ/γ' .

[0021] Par ailleurs, cette composition du superalliage à base de nickel autorise la mise en oeuvre d'un traitement thermique qui remet en solution les précipités de phase γ' et les phases eutectiques γ/γ' qui se forment lors de la solidification du superalliage. On peut ainsi obtenir un superalliage monocristallin à base de nickel contenant des précipités γ' de taille contrôlée, de préférence comprise entre 300 et 500 nanomètres (nm), et contenant une faible proportion de phases eutectiques γ/γ' .

[0022] Le traitement thermique permet également de contrôler la fraction volumique des précipités de phase γ' présente dans le superalliage monocristallin à base de nickel. Le pourcentage en volume des précipités de phase γ' peut être supérieur ou égal à 50%, de préférence supérieur ou égal à 60%, encore plus de préférence égal à 70%.

[0023] Les éléments d'addition majeurs sont le cobalt (Co), le chrome (Cr), le molybdène (Mo), le rhénium (Re), le tungstène (W), l'aluminium (Al), le titane (Ti) et le tantale (Ta).

[0024] Les éléments d'addition mineurs sont le hafnium (Hf) et le silicium (Si), pour lesquels la teneur massique maximale est inférieure à 1 % en masse.

[0025] Parmi les impuretés inévitables, on peut citer le soufre (S), le carbone (C), le bore (B), l'yttrium (Y), le lanthane (La) et le cérium (Ce). On définit comme impuretés inévitables les éléments qui ne sont pas ajoutés de manière intentionnelle dans la composition et qui sont apportés avec d'autres éléments.

[0026] L'addition de tungstène, de chrome, de cobalt, de rhénium ou de molybdène permet principalement de renforcer la matrice austénitique γ de structure cristalline cubique à faces centrées (cfc) par durcissement en solution solide.

[0027] L'addition d'aluminium, de titane ou de tantale (Ta) favorise la précipitation de la phase durcissante γ' -Ni₃(Al, Ti, Ta).

[0028] Le rhénium permet de ralentir la diffusion des espèces chimiques au sein du superalliage et de limiter la coalescence des précipités de phase γ' en cours de service à haute température, phénomène qui entraîne une réduction

de la résistance mécanique. Le rhénium permet ainsi d'améliorer la résistance au fluage à haute température du superalliage à base de nickel. Toutefois, une concentration trop élevée de rhénium peut entraîner la précipitation de phases intermétalliques PTC, par exemple phase σ , phase P ou phase μ , qui ont un effet négatif sur les propriétés mécaniques du superalliage. Une concentration trop élevée en rhénium peut également provoquer la formation d'une zone de réaction

secondaire dans le superalliage sous la sous-couche, ce qui a un effet négatif sur les propriétés mécaniques du superalliage.
[0029] L'addition simultanée de silicium et de hafnium permet d'améliorer la tenue à l'oxydation à chaud des superalliages à base de nickel en augmentant l'adhérence de la couche d'alumine (Al_2O_3) qui se forme à la surface du superalliage à haute température. Cette couche d'alumine forme une couche de passivation en surface du superalliage à base de nickel et une barrière à la diffusion de l'oxygène venant de l'extérieur vers l'intérieur du superalliage à base de nickel. Toutefois on peut ajouter du hafnium sans ajouter également de silicium ou inversement ajouter du silicium sans ajouter également du hafnium et quand même améliorer la tenue à l'oxydation à chaud du superalliage.

[0030] Par ailleurs, l'addition de chrome ou d'aluminium permet d'améliorer la résistance à l'oxydation et à la corrosion à haute température du superalliage. En particulier, le chrome est essentiel pour augmenter la résistance à la corrosion à chaud des superalliages à base de nickel. Toutefois, une teneur trop élevée en chrome tend à réduire la température de solvus de la phase γ' du superalliage à base de nickel, c'est-à-dire la température au-dessus de laquelle la phase γ' est totalement dissoute dans la matrice γ , ce qui est indésirable. Aussi, la concentration en chrome est comprise entre 3,5 à 5,5% en masse afin de conserver une température élevée de solvus de la phase γ' du superalliage à base de nickel, par exemple supérieure ou égale à 1250°C mais également pour éviter la formation de phases topologiquement compactes dans la matrice γ fortement saturée en éléments d'alliages tels que rhénium, le molybdène ou le tungstène.

[0031] L'addition de cobalt, qui est un élément proche du nickel et qui se substitue partiellement au nickel, forme une solution solide avec le nickel dans la matrice γ . Le cobalt permet de renforcer la matrice γ , de réduire la sensibilité à la précipitation de PTC et à la formation de ZRS dans le superalliage sous le revêtement de protection. Cependant, une teneur trop élevée en cobalt tend à réduire la température de solvus de la phase γ' du superalliage à base de nickel, ce qui est indésirable.

[0032] L'addition d'éléments réfractaires, tels que le molybdène, le tungstène, le rhénium ou le tantale permet de ralentir les mécanismes contrôlant le fluage des superalliages à base de nickel et qui dépendent de la diffusion des éléments chimiques dans le superalliage.

[0033] Une teneur très basse en soufre dans un superalliage à base de nickel permet d'augmenter la résistance à l'oxydation et à la corrosion à chaud ainsi que la tenue à l'écaillage de la barrière thermique. Ainsi, une faible teneur en soufre, inférieure à 2 ppm en masse (partie par million en masse), voire idéalement inférieure à 0,5 ppm en masse, permet d'optimiser ces propriétés. Une telle teneur massique en soufre peut être obtenue par élaboration d'une coulée mère à bas soufre ou par un procédé de désulfurisation réalisé après la coulée. Il est notamment possible de maintenir un bas taux de soufre en adaptant le procédé d'élaboration du superalliage.

[0034] On entend par superalliages à base de nickel, des superalliages dont le pourcentage massique en nickel est majoritaire. On comprend que le nickel est donc l'élément dont le pourcentage massique dans l'alliage est le plus élevé.

[0035] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,0 à 5,5 % de rhénium, 3,5 à 8,5 % de cobalt, 0,30 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 5,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 4,5 à 6,0 % d'aluminium, 0,50 à 1,50 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,17 à 0,30 % de hafnium, encore plus de préférence 0,20 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0036] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,0 à 5,5 % de rhénium, 3,5 à 12,5 % de cobalt, 0,30 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 5,5 % de chrome, 3,5 à 5,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,35 à 1,50 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,17 à 0,30 % de hafnium, encore plus de préférence 0,20 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0037] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,5 à 5,5 % de rhénium, 4,0 à 6,0 % de cobalt, 0,30 à 1,00 % de molybdène, 3,5 à 4,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 4,5 à 6,0 % d'aluminium, 0,50 à 1,50 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,17 à 0,30 % de hafnium, encore plus de préférence 0,20 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0038] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,5 à 5,5 % de rhénium, 3,5 à 12,5 % de cobalt, 0,50 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 4,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,50 à 1,50 % de titane, 8,0 à 9,0 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,17 à 0,30 % de hafnium, encore plus de préférence 0,20 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0039] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,5 à 5,5 % de rhénium, 7,0 à 9,0 % de cobalt, 0,50 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 4,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,50 à 1,50

% de titane, 8,0 à 9,0 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,17 à 0,30 % de hafnium, encore plus de préférence 0,20 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0040] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,2 à 5,3 % de rhénium, 6,0 à 8,0 % de cobalt, 0,30 à 1,00 % de molybdène, 3,5 à 4,5 % de chrome, 4,5 à 5,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,35 à 1,30 % de titane, 8,0 à 9,0 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,17 à 0,30 % de hafnium, encore plus de préférence 0,20 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés éventuelles.

[0041] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,0 à 5,0 % de rhénium, 4,0 à 6,0 % de cobalt, 0,30 à 1,00 % de molybdène, 4,5 à 5,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,35 à 1,30 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, de préférence 0,17 à 0,30 % de hafnium, encore plus de préférence 0,20 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0042] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 5,2 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0043] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 5,2 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,17 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0044] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 5,2 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,1 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 10,0 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0045] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 5,0 % de rhénium, 12,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0046] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 5,0 % de rhénium, 4,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0047] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,9 % de rhénium, 8,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,2 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0048] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,9 % de rhénium, 8,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,2 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,17 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0049] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,9 % de rhénium, 8,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,2 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,16 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0050] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,7 % de rhénium, 7,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 5,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 0,80 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0051] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,5 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 5,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0052] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,5 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 5,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 0,55 % de titane, 10,0 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0053] Le superalliage peut comprendre, en pourcentages massiques, 4,3 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

[0054] Le présent exposé concerne également une aube monocristalline pour turbomachine comprenant un superalliage tel que défini précédemment.

[0055] Cette aube présente donc une résistance au fluage à haute température améliorée.

[0056] L'aube peut comprendre un revêtement de protection comportant une sous-couche métallique déposée sur le superalliage et une barrière thermique céramique déposée sur la sous-couche métallique.

[0057] Grâce à la composition du superalliage à base de nickel, la formation d'une zone de réaction secondaire dans le superalliage résultant des phénomènes d'inter-diffusion entre le superalliage et la sous-couche est évitée, ou limitée.

[0058] La sous-couche métallique peut être un alliage de type MCrAlY ou un alliage de type aluminure de nickel.

[0059] La barrière thermique céramique peut être un matériau à base de zircone yttrée ou tout autre revêtement

céramique (à base de zircone) à faible conductivité thermique.

[0060] L'aube peut présenter une structure orientée selon une direction cristallographique $\langle 001 \rangle$.

[0061] Cette orientation confère généralement les propriétés mécaniques optimales à l'aube.

[0062] Le présent exposé concerne aussi une turbomachine comprenant une aube telle que définie précédemment.

Brève description des dessins

[0063] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, en référence à la figure unique annexée, sur lesquelles :

- la figure 1 est une vue schématique en coupe longitudinale d'une turbomachine ;
- la figure 2 est un graphique représentant le paramètre NFP (No-Freckles Parameter) pour différents superalliages ;
- la figure 3 est un graphique représentant la fraction volumique de phase γ' à différentes températures et pour différents superalliages.

Description détaillée de l'invention

[0064] Les superalliages à base de nickel sont destinés à la fabrication d'aubes monocristallines par un procédé de solidification dirigée dans un gradient thermique. L'utilisation d'un germe monocristallin ou d'un sélecteur de grain en début de solidification permet d'obtenir cette structure monocristalline. La structure est orientée par exemple selon une direction cristallographique $\langle 001 \rangle$ qui est l'orientation qui confère, en général, les propriétés mécaniques optimales aux superalliages.

[0065] Les superalliages monocristallins à base de nickel bruts de solidification ont une structure dendritique et sont constitués de précipités γ' $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Ta})$ dispersés dans une matrice γ de structure cubique à faces centrées, solution solide à base de nickel. Ces précipités de phase γ' sont répartis de façon hétérogène dans le volume du monocristal du fait de ségrégations chimiques résultant du procédé de solidification. Par ailleurs, des phases eutectiques γ/γ' sont présentes dans les régions inter-dendritiques et constituent des sites préférentiels d'amorçage de fissures. Ces phases eutectiques γ/γ' se forment en fin de solidification. De plus, les phases eutectiques γ/γ' sont formées au détriment des fins précipités (taille inférieure au micromètre) de phase durcissante γ' . Ces précipités de phase γ' constituent la principale source de durcissement des superalliages à base de nickel. Aussi, la présence de phases eutectiques γ/γ' résiduelles ne permet pas d'optimiser la tenue au fluage à chaud du superalliage à base de nickel.

[0066] Il a en effet été montré que les propriétés mécaniques des superalliages, en particulier la résistance au fluage, étaient optimales lorsque la précipitation des précipités γ' était ordonnée, c'est-à-dire que les précipités de phase γ' sont alignés de manière régulière, avec une taille allant de 300 à 500 nm, et lorsque la totalité des phases eutectiques γ/γ' était remise en solution.

[0067] Les superalliages à base de nickel bruts de solidification sont donc traités thermiquement pour obtenir la répartition désirée des différentes phases. Le premier traitement thermique est un traitement d'homogénéisation de la microstructure qui a pour objectif de dissoudre les précipités de phase γ' et d'éliminer les phases eutectiques γ/γ' ou de réduire de manière significative leur fraction volumique. Ce traitement est réalisé à une température supérieure à la température de solvus de la phase γ' et inférieure à la température de fusion commençante du superalliage (T_{solidus}). Une trempe est ensuite réalisée à la fin de ce premier traitement thermique pour obtenir une dispersion fine et homogène des précipités γ' . Des traitements thermiques de revenu sont ensuite réalisés en deux étapes, à des températures inférieures à la température de solvus de la phase γ' . Lors d'une première étape, pour faire grossir les précipités γ' et obtenir la taille désirée, puis lors d'une seconde étape, pour faire croître la fraction volumique de cette phase jusqu'à environ 70% à température ambiante.

[0068] La figure 1 représente, en coupe selon un plan vertical passant par son axe principal A, un turboréacteur à double flux 10. Le turboréacteur à double flux 10 comporte, d'amont en aval selon la circulation du flux d'air, une soufflante 12, un compresseur basse pression 14, un compresseur haute pression 16, une chambre de combustion 18, une turbine haute pression 20, et une turbine basse pression 22.

[0069] La turbine haute pression 20 comprend une pluralité d'aubes mobiles 20A tournant avec le rotor et de redresseurs 20B (aubes fixes) montés sur le stator. Le stator de la turbine 20 comprend une pluralité d'anneaux 24 de stator disposés en vis-à-vis des aubes mobiles 20A de la turbine 20.

[0070] Ces propriétés font ainsi de ces superalliages des candidats intéressants pour la fabrication de pièces monocristallines destinées aux parties chaudes des turboréacteurs.

[0071] On peut donc fabriquer une aube mobile 20A ou un redresseur 20B pour turbomachine comprenant un superalliage tel que défini précédemment.

[0072] On peut également fabriquer une aube mobile 20A ou un redresseur 20B pour turbomachine comprenant un superalliage tel que défini(e) précédemment revêtu(e) d'un revêtement de protection comprenant une sous-couche

EP 3 710 611 B1

métallique

Une turbomachine peut notamment être un turboréacteur tel qu'un turboréacteur à double flux 10. La turbomachine peut également être un turboréacteur à simple flux, un turbopropulseur ou un turbomoteur.

5 Exemples

[0073] Dix superalliages monocristallins à base de nickel du présent exposé (Ex 1 à Ex 10) ont été étudiés et comparés à quatre superalliages monocristallins commerciaux CMSX-4 (Ex 11), CMSX-4PlusC (Ex 12), CMSX-10 (Ex 13) et René N6 (Ex 14). La composition chimique de chacun des superalliages monocristallins est donnée dans le tableau 1, la composition Ex 13 comportant de plus 0,10 % en masse de niobium (Nb) et la composition Ex 14 comportant en outre 0,05 % en masse de carbone (C) et 0,004 % en masse de bore (B). Tous ces superalliages sont des superalliages à base de nickel, c'est-à-dire que le complément à 100 % des compositions présentées est constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

Tableau 1

	Re	Co	Mo	Cr	W	Al	Ti	Ta	Hf	Si
Ex 1	5,2	5,0	0,50	4,0	4,0	5,4	1,00	8,5	0,25	0,10
Ex 2	5,2	5,0	0,50	4,0	4,0	5,1	1,00	10,0	0,25	0,10
Ex 3	5,0	12,0	1,00	4,0	4,0	5,4	1,00	8,5	0,25	0,10
Ex 4	5,0	4,0	1,00	4,0	4,0	5,4	1,00	8,5	0,25	0,10
Ex 5	4,9	8,0	1,00	4,2	4,0	5,4	1,00	8,5	0,25	0,10
EX 6	4,9	8,0	1,00	4,2	4,0	5,4	1,00	8,5	0,16	0,10
Ex 7	4,7	7,0	0,50	4,0	5,0	5,4	0,80	8,5	0,25	0,10
Ex 8	4,5	5,0	0,50	5,0	4,0	5,4	1,00	8,5	0,25	0,10
Ex 9	4,5	5,0	0,50	5,0	4,0	5,4	0,55	10,0	0,25	0,10
Ex 10	4,3	5,0	0,50	4,0	4,0	5,4	1,00	8,5	0,25	0,10
Ex 11	3,0	9,6	0,60	6,5	6,4	5,6	1,00	6,5	0,10	0,00
Ex 12	4,8	10,0	0,60	3,5	6,0	5,7	0,85	8,0	0,10	0,00
Ex 13	6,0	3,0	0,40	2,0	5,0	5,7	0,20	8,0	0,03	0,00
Ex 14	5,3	12,2	1,10	4,4	5,7	6,0	0,00	7,5	0,15	0,00

Masse volumique

[0074] La masse volumique à température ambiante de chaque superalliage a été estimée à l'aide d'une version modifiée de la formule de Hull (F.C. Hull, *Metal Progress*, Novembre 1969, pp139-140). Cette équation empirique a été proposée par Hull. L'équation empirique est basée sur la loi des mélanges et comprend des termes correctifs déduits d'une analyse par régression linéaire de données expérimentales (compositions chimiques et masses volumiques mesurées) concernant 235 superalliages et aciers inox. Cette formule de Hull a été modifiée, notamment pour tenir compte d'éléments comme le rhénium et le ruthénium. La formule de Hull modifiée est la suivante :

$$(1) D = 27,68 \times [D_1 + 0,14037 - 0,00137 \%Cr - 0,00139 \%Ni - 0,00142 \%Co - 0,00140 \%Fe - 0,00186 \%Mo - 0,00125 \%W - 0,00134 \%V - 0,00119 \%Nb - 0,00113 \%Ta + 0,0004 \%Ti + 0,00388 \%C + 0,0000187 (\%Mo)^2 - 0,0000506 (\%Co) \times (\%Ti) - 0,00096 \%Re - 0,001131 \%Ru]$$

où

$$D_1 = 100 / [(\%Cr/D_{Cr}) + (\%Ni/D_{Ni}) + \dots + (\%X/D_X)]$$

où D_{Cr} , D_{Ni} , ..., D_X sont les masses volumiques des éléments Cr, Ni, ..., X exprimées en lb/in³ (livre par pouce

EP 3 710 611 B1

cube) et D est la masse volumique du superalliage exprimé en g/cm³.

où %Cr, %Ni, ...%X sont les teneurs, exprimées en pourcentages massiques, des éléments du superalliage Cr, Ni, ..., X.

[0075] Les masses volumiques calculées pour les alliages de l'invention et pour les alliages de référence sont inférieures à 9,00 g/cm³ (voir Tableau 2).

[0076] La comparaison entre les masses volumiques estimées et mesurées (voir tableau 2) permet de valider le modèle de Hull modifié (équation (1)). Les masses volumiques estimées et mesurées sont cohérentes.

[0077] Le tableau 2 présente différents paramètres pour les superalliages Ex 1 à Ex 14.

Tableau 2

	Masse volumique estimée (1) (g/cm ³)	Masse volumique mesurée (g/cm ³)	NFP	RGP	$\bar{M}_d$	[ZRS(%)] ^{1/2}
Ex 1	8,89	8,82	0,84	0,393	0,98	5,3
Ex 2	9,00	8,98	0,99	0,460	0,98	5,2
Ex 3	8,86	-	0,89	0,393	0,99	1,0
Ex 4	8,88	-	0,89	0,393	0,98	3,8
Ex 5	8,86	8,86	0,90	0,393	0,98	3,4
Ex 6	-	-	0,88	0,393	-	3,4
Ex 7	8,91	-	0,82	0,386	0,98	3,6
Ex 8	8,83	8,79	0,92	0,393	0,98	-5,9
Ex 9	8,91	-	1,10	0,388	0,98	-6,5
Ex 10	-	-	0,94	0,393	-	3,4
Ex 11	8,71	-	0,65	0,358	0,99	-24
Ex 12	8,91	-	0,68	0,371	0,99	8,5
Ex 13	8,99	-	0,67	0,299	0,96	28
Ex 14	8,87	-	0,69	0,256	0,98	1,1

No-Freckles Parameter (NFP)

[0078]

$$(2) \quad NFP = [\%Ta + 1,5 \%Hf + 0,5 \%Mo - 0,5\% \%Ti)]/[\%W + 1,2 \%Re]$$

où %Cr, %Ni, ...%X sont les teneurs, exprimées en pourcentages massiques, des éléments du superalliage Cr, Ni, ..., X.

[0079] Le paramètre NFP permet de quantifier la sensibilité à la formation de grains parasites de type « Freckles » au cours de la solidification dirigée de la pièce (document US 5,888,451). Pour éviter la formation de défauts de type « Freckles », le paramètre NFP doit être supérieur ou égal à 0,7.

[0080] Comme on peut le voir dans le tableau 2 et sur la figure 2, les superalliages Ex 1 à Ex 10 présentent tous un paramètre NFP supérieur ou égal à 0,7 alors que les superalliages commerciaux Ex 11 à Ex 14 présentent un paramètre NFP inférieur à 0,7.

Résistance Gamma Prime (RGP)

[0081] La résistance mécanique intrinsèque de la phase γ' augmente avec la teneur en éléments venant se substituer à l'aluminium dans le composé Ni₃Al, comme le titane, le tantale et une partie du tungstène. Le composé de phase γ' peut donc s'écrire Ni₃(Al, Ti, Ta, W). Le paramètre RGP permet d'estimer le niveau de durcissement de la phase γ' :

$$(3) \quad RGP = [C_{Ti} + C_{Ta} + (C_W/2)]/C_{Al}$$

où C_{Ti} , C_{Ta} , C_W et C_{Al} sont les concentrations, exprimées en pourcentage atomique, respectives des éléments Ti, Ta, W et Al dans le superalliage.

[0082] Un paramètre RGP plus élevé est favorable à une meilleure résistance mécanique du superalliage. On peut voir dans le tableau 2 que le paramètre RGP calculé pour les superalliages Ex 1 à Ex 10 est supérieur au paramètre RGP calculé pour les superalliages commerciaux Ex 11 à Ex 14.

10 Sensibilité à la formation de PTC ($\bar{M}d$)

[0083] Le paramètre $\bar{M}d$ est défini comme suit :

$$(4) \quad \bar{M}d = \sum_{i=1}^n X_i (Md)_i$$

où X_i est la fraction de l'élément i dans le superalliage exprimée en pourcentage atomique, $(Md)_i$ est la valeur du paramètre Md pour l'élément i .

[0084] Le tableau 3 présente les valeurs de Md pour les différents éléments des superalliages.

Tableau 3

Elément	Md	Elément	Md
Ti	2,271	Hf	3,02
Cr	1,142	Ta	2,224
Co	0,777	W	1,655
Ni	0,717	Re	1,267
Nb	2,117	Al	1,9
Mo	1,55	Si	1,9
Ru	1,006		

[0085] La sensibilité à la formation de PTC est déterminée par le paramètre $\bar{M}d$, selon la méthode New PHACOMP qui a été développée par Morinaga et al. (Morinaga et al., New PHACOMP and its application to alloy design, Superalloys 1984, édité par M Gell et al., The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA, USA (1984) pp. 523-532). Selon ce modèle, la sensibilité des superalliages à la formation de PTC augmente avec la valeur du paramètre $\bar{M}d$.

[0086] Comme on peut le constater dans le tableau 2, les superalliages Ex 1 à Ex 14 présentent des valeurs du paramètre $\bar{M}d$ sensiblement égales. Ces superalliages présentent donc des sensibilités similaires à la formation de PTC, sensibilités qui sont relativement faibles.

Sensibilité à la formation de ZRS

[0087] Pour estimer la sensibilité de superalliages à base de nickel contenant du rhénium à la formation de ZRS, Walston (document US 5,270,123) a établi l'équation suivante :

$$(5) \quad [ZRS(\%)]^{1/2} = 13,88 (\%Re) + 4,10 (\%W) - 7,07 (\%Cr) - 2,94 (\%Mo) - 0,33 (\%Co) + 12,13$$

où $ZRS(\%)$ est le pourcentage linéique de ZRS dans le superalliage sous le revêtement et où les concentrations des éléments d'alliage sont en pourcentages atomiques.

[0088] Cette équation (5) a été obtenue par analyse par régression linéaire multiple à partir d'observations faites après vieillissement de 400 heures à 1093°C (degré centigrade) d'échantillons de divers alliages de compositions proches de la composition Ex 12 sous un revêtement NiPtAl.

[0089] Plus la valeur du paramètre $[ZRS(\%)]^{1/2}$ est élevée, plus le superalliage est sensible à la formation de ZRS.

EP 3 710 611 B1

Ainsi, comme on peut le voir dans le tableau 2, pour les superalliages Ex 1 à Ex 10, les valeurs du paramètre $[ZRS(\%)]^{1/2}$ sont soit négatives, soit faiblement positives et ces superalliages présentent donc une faible sensibilité à la formation de ZRS sous un revêtement NiPtAl, tout comme le superalliage commercial Ex 14 qui est connu pour sa faible sensibilité à la formation de ZRS. A titre d'exemple, le superalliage commercial EX 13, qui est connu pour être très sensible à la formation de ZRS sous un revêtement NiPtAl, présente une valeur du paramètre $[ZRS(\%)]^{1/2}$ relativement élevée.

Température de solvus de la phase γ'

[0090] Le logiciel ThermoCalc (base de donnée Ni25) basé sur la méthode CALPHAD a été utilisé pour calculer la température de solvus de la phase γ' à l'équilibre.

[0091] Comme on peut le constater dans le tableau 4, les superalliages Ex 1 à Ex 10 présentent une température de solvus γ' supérieure à la température de solvus γ' des superalliages Ex 11, Ex 12 et Ex 14.

Fraction volumique de phase γ'

[0092] Le logiciel ThermoCalc (base de donnée Ni25) basé sur la méthode CALPHAD a été utilisé pour calculer la fraction volumique (en pourcentage volumique) de phase γ' à l'équilibre dans les superalliages Ex 1 à Ex 14 à 950°C, 1050°C et 1200°C.

[0093] Comme on peut le constater dans le tableau 4 et sur la figure 3, les superalliages Ex 1 à Ex 10 contiennent des fractions volumiques de phase γ' supérieures ou comparables aux fractions volumiques de phase γ' des superalliages commerciaux Ex 11 à Ex 14.

[0094] Ainsi, la combinaison d'une température de solvus γ' élevée et de fractions volumiques de phase γ' élevées pour les superalliages Ex 1 à Ex 10 est favorable à une bonne résistance au fluage à haute température et très haute température, par exemple à 1200°C. Cette résistance doit être ainsi supérieure à la résistance au fluage des superalliages commerciaux Ex 11 à Ex 14 et proche de celle du superalliage commercial Ex 13.

Tableau 4

	$T_{\text{solvus } \gamma'} (^{\circ}\text{C})$	Fraction volumique de phase γ' (% vol)		
		950°C	1050°C	1200°C
Ex 1	1347	64	59	44
Ex 2	1353	66	61	47
Ex 3	1280	67	62	44
Ex 4	1346	68	63	47
Ex 5	1328	61	55	38
Ex 6	1314	64	57	36
Ex 7	1328	64	58	38
Ex 8	1342	63	58	43
Ex 9	1347	65	60	46
Ex 10	1336	66	61	43
Ex 11	1290	58	48	25
Ex 12	1320	63	57	36
Ex 13	1374	65	60	46
Ex 14	1283	60	51	24

Fraction volumique de PTC de type σ

[0095] Le logiciel ThermoCalc (base de donnée Ni25) basé sur la méthode CALPHAD a été utilisé pour calculer la fraction volumique (en pourcentage volumique) de phase σ à l'équilibre dans les superalliages Ex 1 à Ex 14 à 950°C et 1050°C (voir tableau 5).

[0096] Les fractions volumiques calculées de phase σ sont relativement faibles, ce qui traduit une faible sensibilité à

EP 3 710 611 B1

la précipitation de PTC. Ces résultats corroborent donc les résultats obtenus avec la méthode New PHACOMP (paramètre $\bar{M}_d$).

Concentration massique de chrome dissous dans la matrice γ

[0097] Le logiciel ThermoCalc (base de donnée Ni25) basé sur la méthode CALPHAD a été utilisé pour calculer teneur en chrome (en pourcentage massique) dans la phase γ à l'équilibre dans les superalliages Ex 1 à Ex 14 à 950°C, 1050°C et 1200°C.

[0098] Comme on peut le constater dans le tableau 5, les concentrations en chrome dans la phase γ sont supérieures pour les superalliages Ex 1 à Ex 10, comparées aux concentrations en chrome dans la phase γ pour les superalliages commerciaux Ex 12 à Ex 14, ce qui est favorable à une meilleure résistance à la corrosion et à l'oxydation à chaud.

Tableau 5

	Fraction volumique de PTC de type σ (en % vol)		Teneur en chrome dans la phase γ (en % massique)		
	950°C	1050°C	950°C	1050°C	1200°C
Ex 1	1,1	0,5	8,63	7,65	5,79
Ex 2	1,4	0,7	9,02	8,03	6,25
Ex 3	1,2	0,6	8,63	7,64	5,79
Ex 4	1,4	0,7	8,77	7,82	5,96
Ex 5	1,2	0,1	8,86	7,81	6,05
Ex 6	0,9	0,1	11,00	9,50	6,80
Ex 7	0,8	0,6	8,35	7,30	5,45
Ex 8	0,9	0,2	10,83	9,63	7,57
Ex 9	1,2	0,5	11,25	9,95	7,71
Ex 10	0,4	0,0	10,40	9,20	6,80
Ex 11	0,7	-	12,80	10,90	7,84
Ex 12	1,2	0,5	7,40	6,43	4,82
Ex 13	0,9	0,4	3,62	3,36	2,77
Ex 14	1,0	0,3	8,37	7,10	5,25

Propriété en fluage à très haute température

[0099] Des essais en fluage ont été réalisés sur les superalliages Ex 2, Ex 5, Ex 6, Ex 11, Ex 13 et Ex 14. Les essais de fluage sont réalisés à 1200°C et 80 MPa selon la norme NF EN ISO 204 d'août 2009 (Guide U125_J).

[0100] On a présenté dans le tableau 6 les résultats des essais en fluage dans lesquels les superalliages ont été mis sous charge (80 MPa) à 1200°C. Les résultats représentent le temps en heure (h) à la rupture de l'éprouvette.

Tableau 6

	Temps à rupture (heure)
Ex 2	41
Ex 5	65
Ex 6	50
Ex 10	54
Ex 11	9
Ex 13	59
Ex 14	13

EP 3 710 611 B1

[0101] Les superalliages Ex 2, Ex 5, Ex 6 et Ex 10 présentent un meilleur comportement en fluage que les alliages Ex 11 et Ex 14. Le superalliage Ex 13 présente également de bonnes propriétés en fluage.

Propriété en oxydation cyclique à 1150°C

[0102] Les superalliages sont soumis à un des cycles thermiques tels que décrits dans INS-TTH-001 et INS-TTH-002 : Méthode d'essai de cyclage oxydant (Essai de perte de masse et Barrière thermique).

[0103] Une éprouvette du superalliage testé (pion ayant un diamètre de 20 mm et une hauteur de 1 mm) est soumise à un cyclage thermique dont chaque cycle comprend une montée à 1150°C en moins de 15 min (minutes), un palier à 1150°C de 60 min et un refroidissement turbiné de l'éprouvette pendant 15 min.

[0104] Le cycle thermique est répété jusqu'à observation d'une perte de masse de l'éprouvette égale à 20 mg/cm² (milligrammes par centimètres carrés).

[0105] La durée de vie des superalliages testés est présentée au tableau 7.

Tableau 7

	Durée de vie (heures)
Ex 2	1310
Ex 5	> 1700
Ex 10	> 1700
Ex 11	~ 230
Ex 12	~ 480
Ex 13	~ 100

[0106] On constate que les superalliages Ex 2, Ex 5 et Ex 10 présentent une durée de vie bien supérieure à celle des superalliages Ex 11, Ex 12 et Ex 13. On notera que les propriétés en oxydation du superalliage Ex 13 sont beaucoup moins bonnes que celle des superalliages Ex 2, Ex 5 et Ex 10.

Stabilité microstructurale

[0107] Après un vieillissement de 300 heures à 1050°C, aucune phase PTC n'est observée pour le superalliage Ex 6 par analyse d'image en microscopie électronique à balayage.

Sensibilité à la formation de défauts de fonderie

[0108] Après la mise en forme par procédé de type cire perdue et solidification dirigée en four Bidgman, aucun défaut résultant du procédé de fonderie, notamment de type « Freckles », n'a été observé dans les superalliages Ex 2, Ex 5, Ex 6 et Ex 10. Les défauts de type « Freckels » sont observés après immersion de l'éprouvette dans une solution à base de HNO₃/H₂SO₄.

[0109] Quoique le présent exposé ait été décrit en se référant à un exemple de réalisation spécifique, il est évident que différentes modifications et changements peuvent être effectués sur ces exemples sans sortir de la portée générale de l'invention telle que définie par les revendications. En outre, des caractéristiques individuelles des différents modes de réalisation évoqués peuvent être combinées dans des modes de réalisation additionnels. Par conséquent, la description et les dessins doivent être considérés dans un sens illustratif plutôt que restrictif.

Revendications

1. Superalliage à base de nickel comprenant, en pourcentages massiques, 4,0 à 5,5 % de rhénium, 3,5 à 12,5 % de cobalt, 0,30 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 5,5 % de chrome, 3,5 à 5,5 % de tungstène, 4,5 à 6,0 % d'aluminium, 0,35 à 1,50 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
2. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,0 à 5,5 % de rhénium, 3,5 à 8,5 % de cobalt, 0,30 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 5,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 4,5 à 6,0 % d'aluminium,

EP 3 710 611 B1

0,50 à 1,50 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

- 5 3. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,0 à 5,5 % de rhénium, 3,5 à 12,5 % de cobalt, 0,30 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 5,5 % de chrome, 3,5 à 5,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,35 à 1,50 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 10 4. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,5 à 5,5 % de rhénium, 4,0 à 6,0 % de cobalt, 0,30 à 1,00 % de molybdène, 3,5 à 4,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 4,5 à 5,0 % d'aluminium, 0,50 à 1,50 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 15 5. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,5 à 5,5 % de rhénium, 3,5 à 12,5 % de cobalt, 0,50 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 4,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,50 à 1,50 % de titane, 8,0 à 9,0 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 20 6. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,5 à 5,5 % de rhénium, 7,0 à 9,0 % de cobalt, 0,50 à 1,50 % de molybdène, 3,5 à 4,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,50 à 1,50 % de titane, 8,0 à 9,0 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 25 7. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,2 à 5,3 % de rhénium, 6,0 à 8,0 % de cobalt, 0,30 à 1,00 % de molybdène, 3,5 à 4,5 % de chrome, 4,5 à 5,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,35 à 1,30 % de titane, 8,0 à 9,0 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 30 8. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,0 à 5,0 % de rhénium, 4,0 à 6,0 % de cobalt, 0,30 à 1,00 % de molybdène, 4,5 à 5,5 % de chrome, 3,5 à 4,5 % de tungstène, 5,0 à 6,0 % d'aluminium, 0,35 à 1,30 % de titane, 8,0 à 10,5 % de tantale, 0,15 à 0,30 % de hafnium, 0,05 à 0,15 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 35 9. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 5,2 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 40 10. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 5,2 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,17 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 45 11. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 5,2 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,1 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 10,0 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 50 12. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 5,0 % de rhénium, 12,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 55 13. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 5,0 % de rhénium, 4,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
14. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,9 % de rhénium, 8,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,2 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.

15. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,9 % de rhénium, 8,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,2 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,17 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 5 16. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,9 % de rhénium, 8,0 % de cobalt, 1,00 % de molybdène, 4,2 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,16 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 10 17. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,7 % de rhénium, 7,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 5,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 0,80 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 15 18. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,5 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 5,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 20 19. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,5 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 5,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 0,55 % de titane, 10,0 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 25 20. Superalliage selon la revendication 1, comprenant, en pourcentages massiques, 4,3 % de rhénium, 5,0 % de cobalt, 0,50 % de molybdène, 4,0 % de chrome, 4,0 % de tungstène, 5,4 % d'aluminium, 1,00 % de titane, 8,5 % de tantale, 0,25 % de hafnium, 0,10 % de silicium, le complément étant constitué par du nickel et des impuretés inévitables.
- 30 21. Aube (20A, 20B) monocristalline pour turbomachine comprenant un superalliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 20.
- 35 22. Aube (20A, 20B) selon la revendication 21, comprenant un revêtement de protection comportant une sous-couche métallique déposée sur le superalliage et une barrière thermique céramique déposée sur la sous-couche métallique.
23. Aube (20A, 20B) selon la revendication 21 ou 22, présentant une structure orientée selon une direction cristallographique <001>.
24. Turbomachine comprenant une aube (20A, 20B) selon l'une quelconque des revendications 21 à 23.

Patentansprüche

- 40 1. Superlegierung auf Basis von Nickel, umfassend, in Massenanteilen, 4,0 bis 5,5 % Rhenium, 3,5 bis 12,5 % Kobalt, 0,30 bis 1,50 % Molybdän, 3,5 bis 5,5 % Chrom, 3,5 bis 5,5 % Wolfram, 4,5 bis 6,0 % Aluminium, 0,35 bis 1,50 % Titan, 8,0 bis 10,5 % Tantal, 0,15 bis 0,30 % Hafnium, 0,05 bis 0,15 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
- 45 2. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,0 bis 5,5 % Rhenium, 3,5 bis 8,5 % Kobalt, 0,30 bis 1,50 % Molybdän, 3,5 bis 5,5 % Chrom, 3,5 bis 4,5 % Wolfram, 4,5 bis 6,0 % Aluminium, 0,50 bis 1,50 % Titan, 8,0 bis 10,5 % Tantal, 0,15 bis 0,30 % Hafnium, 0,05 bis 0,15 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
- 50 3. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,0 bis 5,5 % Rhenium, 3,5 bis 12,5 % Kobalt, 0,30 bis 1,50 % Molybdän, 3,5 bis 5,5 % Chrom, 3,5 bis 5,5 % Wolfram, 5,0 bis 6,0 % Aluminium, 0,35 bis 1,50 % Titan, 8,0 bis 10,5 % Tantal, 0,15 bis 0,30 % Hafnium, 0,05 bis 0,15 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
- 55 4. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,5 bis 5,5 % Rhenium, 4,0 bis 6,0 % Kobalt, 0,30 bis 1,00 % Molybdän, 3,5 bis 4,5 % Chrom, 3,5 bis 4,5 % Wolfram, 4,5 bis 6,0 % Aluminium, 0,50 bis 1,50 % Titan, 8,0 bis 10,5 % Tantal, 0,15 bis 0,30 % Hafnium, 0,05 bis 0,15 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.

EP 3 710 611 B1

- 5
- 6
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55
5. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,5 bis 5,5 % Rhenium, 3,5 bis 12,5 % Kobalt, 0,50 bis 1,50 % Molybdän, 3,5 bis 4,5 % Chrom, 3,5 bis 4,5 % Wolfram, 5,0 bis 6,0 % Aluminium, 0,50 bis 1,50 % Titan, 8,0 bis 9,0 % Tantal, 0,15 bis 0,30 % Hafnium, 0,05 bis 0,15 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 6. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,5 bis 5,5 % Rhenium, 7,0 bis 9,0 % Kobalt, 0,50 bis 1,50 % Molybdän, 3,5 bis 4,5 % Chrom, 3,5 bis 4,5 % Wolfram, 5,0 bis 6,0 % Aluminium, 0,50 bis 1,50 % Titan, 8,0 bis 9,0 % Tantal, 0,15 bis 0,30 % Hafnium, 0,05 bis 0,15 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 7. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,2 bis 5,3 % Rhenium, 6,0 bis 8,0 % Kobalt, 0,30 bis 1,00 % Molybdän, 3,5 bis 4,5 % Chrom, 4,5 bis 5,5 % Wolfram, 5,0 bis 6,0 % Aluminium, 0,35 bis 1,30 % Titan, 8,0 bis 9,0 % Tantal, 0,15 bis 0,30 % Hafnium, 0,05 bis 0,15 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 8. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,0 bis 5,0 % Rhenium, 4,0 bis 6,0 % Kobalt, 0,30 bis 1,00 % Molybdän, 4,5 bis 5,5 % Chrom, 3,5 bis 4,5 % Wolfram, 5,0 bis 6,0 % Aluminium, 0,35 bis 1,30 % Titan, 8,0 bis 10,5 % Tantal, 0,15 bis 0,30 % Hafnium, 0,05 bis 0,15 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 9. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 5,2 % Rhenium, 5,0 % Kobalt, 0,50 % Molybdän, 4,0 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 1,00 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,25 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 10. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 5,2 % Rhenium, 5,0 % Kobalt, 0,50 % Molybdän, 4,0 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 1,00 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,17 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 11. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 5,2 % Rhenium, 5,0 % Kobalt, 0,50 % Molybdän, 4,0 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,1 % Aluminium, 1,00 % Titan, 10,0 % Tantal, 0,25 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 12. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 5,0 % Rhenium, 12,0 % Kobalt, 1,00 % Molybdän, 4,0 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 1,00 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,25 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 13. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 5,0 % Rhenium, 4,0 % Kobalt, 1,00 % Molybdän, 4,0 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 1,00 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,25 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 14. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,9 % Rhenium, 8,0 % Kobalt, 1,00 % Molybdän, 4,2 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 1,00 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,25 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 15. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,9 % Rhenium, 8,0 % Kobalt, 1,00 % Molybdän, 4,2 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 1,00 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,17 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 16. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,9 % Rhenium, 8,0 % Kobalt, 1,00 % Molybdän, 4,2 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 1,00 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,16 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 17. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,7 % Rhenium, 7,0 % Kobalt, 0,50 % Molybdän, 4,0 % Chrom, 5,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 0,80 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,25 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
 18. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,5 % Rhenium, 5,0 % Kobalt, 0,50 % Molybdän, 5,0 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 1,00 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,25 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei

der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.

19. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,5 % Rhenium, 5,0 % Kobalt, 0,50 % Molybdän, 5,0 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 0,55 % Titan, 10,0 % Tantal, 0,25 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
20. Superlegierung nach Anspruch 1, umfassend, in Massenanteilen, 4,3 % Rhenium, 5,0 % Kobalt, 0,50 % Molybdän, 4,0 % Chrom, 4,0 % Wolfram, 5,4 % Aluminium, 1,00 % Titan, 8,5 % Tantal, 0,25 % Hafnium, 0,10 % Silizium, wobei der Rest aus Nickel und unvermeidbaren Unreinheiten besteht.
21. Einkristallschaufel (20A, 20B) für eine Turbomaschine, die eine Superlegierung nach einem der Ansprüche 1 bis 20 umfasst.
22. Schaufel (20A, 20B) nach Anspruch 21, umfassend eine Schutzschicht, die eine metallische Grundierung, die auf der Superlegierung abgeschieden ist, und eine keramische Wärmebarriere, die auf der metallischen Grundierung abgeschieden ist, beinhaltet.
23. Schaufel (20A, 20B) nach Anspruch 21 oder 22, die eine Struktur aufweist, die in einer kristallographischen Richtung <001> ausgerichtet ist.
24. Turbomaschine, umfassend eine Schaufel (20A, 20B) nach einem der Ansprüche 21 bis 23.

Claims

1. A nickel-based superalloy comprising, in percentages by mass, 4.0 to 5.5% rhenium, 3.5 to 12.5% cobalt, 0.30 to 1.50% molybdenum, 3.5 to 5.5% chromium, 3.5 to 5.5% tungsten, 4.5 to 6.0% aluminum, 0.35 to 1.50% titanium, 8.0 to 10.5% tantalum, 0.15 to 0.30% hafnium, 0.05 to 0.15% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
2. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.0 to 5.5% rhenium, 3.5 to 8.5% cobalt, 0.30 to 1.50% molybdenum, 3.5 to 5.5% chromium, 3.5 to 4.5% tungsten, 4.5 to 6.0% aluminum, 0.50 to 1.50% titanium, 8.0 to 10.5% tantalum, 0.15 to 0.30% hafnium, 0.05 to 0.15% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
3. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.0 to 5.5% rhenium, 3.5 to 12.5% cobalt, 0.30 to 1.50% molybdenum, 3.5 to 5.5% chromium, 3.5 to 5.5% tungsten, 5.0 to 6.0% aluminum, 0.35 to 1.50% titanium, 8.0 to 10.5% tantalum, 0.15 to 0.30% hafnium, 0.05 to 0.15% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
4. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.5 to 5.5% rhenium, 4.0 to 6.0% cobalt, 0.30 to 1.00% molybdenum, 3.5 to 4.5% chromium, 3.5 to 4.5% tungsten, 4.5 to 6.0% aluminum, 0.50 to 1.50% titanium, 8.0 to 10.5% tantalum, 0.15 to 0.30% hafnium, 0.05 to 0.15% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
5. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.5 to 5.5% rhenium, 3.5 to 12.5% cobalt, 0.50 to 1.50% molybdenum, 3.5 to 4.5% chromium, 3.5 to 4.5% tungsten, 5.0 to 6.0% aluminum, 0.50 to 1.50% titanium, 8.0 to 9.0% tantalum, 0.15 to 0.30% hafnium, 0.05 to 0.15% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
6. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.5 to 5.5% rhenium, 7.0 to 9.0% cobalt, 0.50 to 1.50% molybdenum, 3.5 to 4.5% chromium, 3.5 to 4.5% tungsten, 5.0 to 6.0% aluminum, 0.50 to 1.50% titanium, 8.0 to 9.0% tantalum, 0.15 to 0.30% hafnium, 0.05 to 0.15% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
7. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.2 to 5.3% rhenium, 6.0 to 8.0% cobalt, 0.30 to 1.00% molybdenum, 3.5 to 4.5% chromium, 4.5 to 5.5% tungsten, 5.0 to 6.0% aluminum, 0.35 to 1.30% titanium, 8.0 to 9.0% tantalum, 0.15 to 0.30% hafnium, 0.05 to 0.15% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.

impurities.

8. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.0 to 5.0% rhenium, 4.0 to 6.0% cobalt, 0.30 to 1.00% molybdenum, 4.5 to 5.5% chromium, 3.5 to 4.5% tungsten, 5.0 to 6.0% aluminum, 0.35 to 1.30% titanium, 8.0 to 10.5% tantalum, 0.15 to 0.30% hafnium, 0.05 to 0.15% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
9. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 5.2% rhenium, 5.0% cobalt, 0.50% molybdenum, 4.0% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 1.00% titanium, 8.5% tantalum, 0.25% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
10. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 5.2% rhenium, 5.0% cobalt, 0.50% molybdenum, 4.0% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 1.00% titanium, 8.5% tantalum, 0.17% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
11. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 5.2% rhenium, 5.0% cobalt, 0.50% molybdenum, 4.0% chromium, 4.0% tungsten, 5.1% aluminum, 1.00% titanium, 10.0% tantalum, 0.25% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
12. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 5.0% rhenium, 12.0% cobalt, 1.00% molybdenum, 4.0% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 1.00% titanium, 8.5% tantalum, 0.25% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
13. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 5.0% rhenium, 4.0% cobalt, 1.00% molybdenum, 4.0% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 1.00% titanium, 8.5% tantalum, 0.25% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
14. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.9% rhenium, 8.0% cobalt, 1.00% molybdenum, 4.2% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 1.00% titanium, 8.5% tantalum, 0.25% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
15. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.9% rhenium, 8.0% cobalt, 1.00% molybdenum, 4.2% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 1.00% titanium, 8.5% tantalum, 0.17% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
16. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.9% rhenium, 8.0% cobalt, 1.00% molybdenum, 4.2% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 1.00% titanium, 8.5% tantalum, 0.16% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
17. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.7% rhenium, 7.0% cobalt, 0.50% molybdenum, 4.0% chromium, 5.0% tungsten, 5.4% aluminum, 0.80% titanium, 8.5% tantalum, 0.25% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
18. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.5% rhenium, 5.0% cobalt, 0.50% molybdenum, 5.0% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 1.00% titanium, 8.5% tantalum, 0.25% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
19. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.5% rhenium, 5.0% cobalt, 0.50% molybdenum, 5.0% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 0.55% titanium, 10.0% tantalum, 0.25% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
20. The superalloy according to claim 1, comprising, in percentages by mass, 4.3% rhenium, 5.0% cobalt, 0.50% molybdenum, 4.0% chromium, 4.0% tungsten, 5.4% aluminum, 1.00% titanium, 8.5% tantalum, 0.25% hafnium, 0.10% silicon, the balance being nickel and unavoidable impurities.
21. A single-crystal blade (20A, 20B) for a turbomachine comprising a superalloy according to any one of claims 1 to 20.
22. The blade (20A, 20B) according to claim 21, comprising a protective coating comprising a metallic bond coat deposited

on the superalloy and a ceramic thermal barrier deposited on the metallic bond coat.

23. The blade (20A, 20B) according to claim 21 or 22, having a structure oriented in a <001> crystallographic direction.

5 **24.** A turbomachine comprising a blade (20A, 20B) according to any one of claims 21 to 23.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

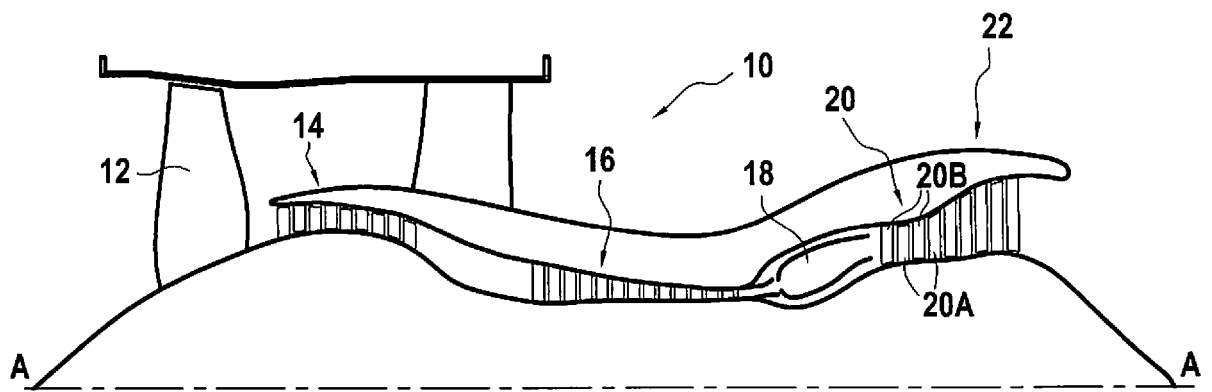


FIG.1

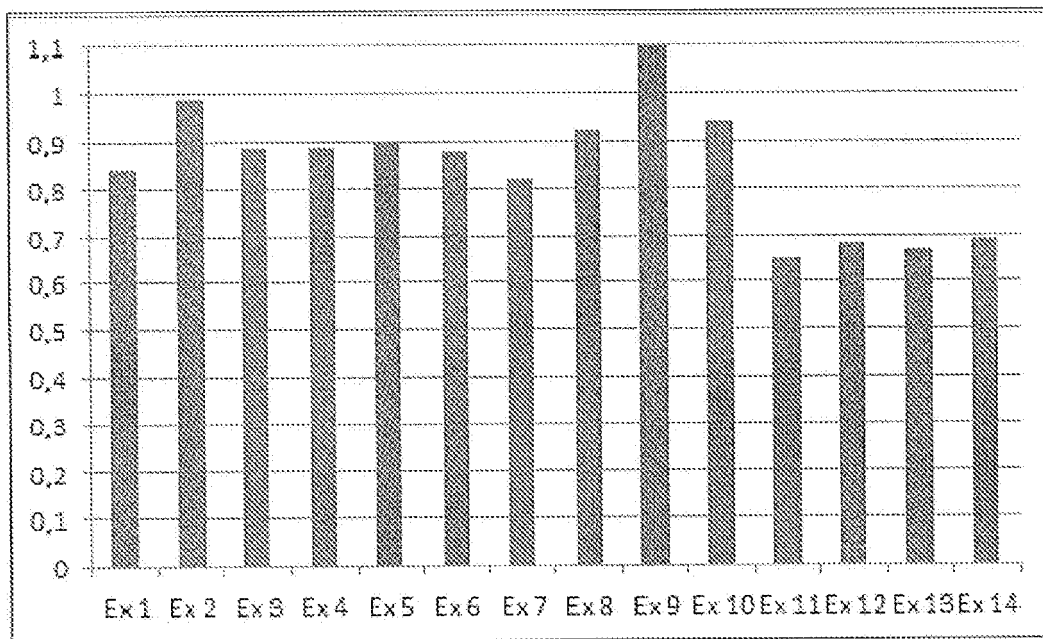


FIG.2

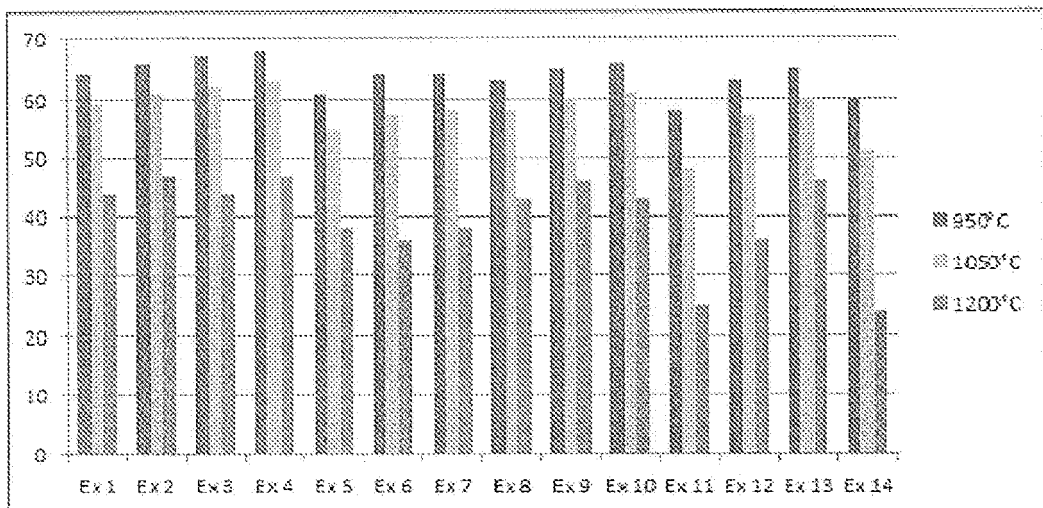


FIG.3

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 5888451 A [0079]
- US 5270123 A [0087]

Littérature non-brevet citée dans la description

- montre par exemple. une superalliage à base de nickel: CMSX-10 en. **GREGORI et al.** Welding in the World. Springer, vol. 51, 34-47 [0002]
- New PHACOMP and its application to alloy design. **MORINAGA et al.** Superalloys. The Metallurgical Society of AIME, 1984, 523-532 [0085]