

⑲ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
—
PARIS
—

⑪ N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 646 171

⑳ N° d'enregistrement national :

90 04113

⑤① Int Cl⁵ : C 22 C 19/03.

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

⑫② Date de dépôt : 30 mars 1990.

⑫③ Priorité : US, 10 avril 1989, n° 335,353.

⑫④ Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 43 du 26 octobre 1990.

⑫⑥ Références à d'autres documents nationaux apparentés :

⑦① Demandeur(s) : *GENERAL ELECTRIC COMPANY.* — US.

⑦② Inventeur(s) : Thomas Joseph Kelly.

⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) : Alain Catherine, General Electric France.

⑫⑤ Superalliages contenant du titane et procédé pour améliorer les propriétés de résistance mécanique à haute température d'un superalliage à base de nickel contenant du niobium.

⑫⑦ Des superalliages à base de nickel contenant du niobium pour favoriser le renforcement par les précipités γ'' sont améliorés par remplacement du niobium par du tantale atome pour atome, puis traitement thermique à des températures supérieures à celles classiquement utilisées pour les superalliages contenant du niobium. Les alliages contenant du tantale obtenus présentent une résistance mécanique accrue et une plus grande stabilité des phases par rapport aux alliages contenant du niobium correspondants.

FR 2 646 171 - A1

D

La présente invention concerne des superalliages contenant du titane et un procédé pour améliorer les propriétés de résistance mécanique à haute température d'un superalliage à base de nickel contenant du niobium.

5 Plus particulièrement, l'invention concerne des alliages perfectionnés à base de nickel associant d'excellentes propriétés de résistance mécanique et de ductilité dans une gamme des températures s'étendant d'environ la température ordinaire à environ 816°C. L'amélioration est assurée par l'incorporation d'une quantité
10 sensible de tantale dans l'alliage, généralement par remplacement atome pour atome du niobium, puis traitement thermique de l'alliage à des températures très élevées pendant des périodes prolongées.

Les superalliages à base de nickel de l'art antérieur, bien qu'ils soient régulièrement améliorés, présentent des inconvénients
15 du point de vue de la résistance mécanique ou de la ductilité, en particulier aux températures élevées, c'est-à-dire au-dessus d'environ 649°C. Ces alliages sont généralement à base de nickel en combinaison avec un ou plusieurs éléments choisis parmi le chrome, le fer et le cobalt. De plus, ils peuvent contenir divers éléments
20 en un grand nombre de combinaisons pour produire des effets souhaitables. Certains des éléments, qui ont été utilisés dans les superalliages à base de nickel pour conférer ou améliorer une ou plusieurs des propriétés suivantes, sont : pour la résistance mécanique (Mo, Ta, W et Re), pour la résistance à l'oxydation (Cr et

Al), pour la stabilité des phases (Ni) ou pour accroître le volume des fractions de précipités secondaires favorables (Co). On ajoute d'autres éléments pour former des précipités de durcissement, tels que γ' (Al, Ti) et γ'' (Nb). On ajoute des éléments mineurs (C, B) pour former des carbures et des borures et d'autres (Ce, Mg) sont ajoutés pour limiter les éléments indésirables. Certains éléments (B, Zr, Hf) sont également ajoutés pour favoriser des effets favorables au niveau des joints de grains. De nombreux éléments (par exemple Co, Mo, W, Cr), bien qu'ils soient ajoutés en raison de leurs qualités favorables d'alliage, peuvent participer dans certaines circonstances à la formation de phases indésirables (par exemple, σ , μ , Laves).

On considère généralement que le précipité γ' est un précipité de renforcement de Ni_3Nb ordonné, tétragonal, centré, qui est formé lorsque du niobium est présent dans les superalliages à base de nickel. Un superalliage présentant un renforcement par un précipité γ'' est l'Inconel 718 qui entre dans le cadre du brevet US n° 3 046 108 (Eiselstein). Eiselstein indique que l'alliage doit contenir environ 4 à environ 8 % en poids de niobium et que le niobium dans l'alliage peut être remplacé en partie par du tantale en une proportion d'au maximum 4 % de l'alliage. Dans le remplacement partiel du niobium de l'alliage par le tantale, Eiselstein indique qu'il faut utiliser un poids double de tantale pour obtenir le même effet sur les propriétés. Il enseigne également que seuls les alliages dépourvus de tantale et/ou les alliages dans lesquels pas plus de 50 % du niobium sont remplacés par du tantale sont ductiles dans l'essai sur éprouvette entaillée aux températures élevées. Eiselstein indique donc que le tantale et le niobium ont la même action sur les alliages à base de nickel, sous réserve que seule une quantité limitée de tantale soit présente.

La phase γ'' n'est normalement pas une phase stable, car elle peut être transformée en phase γ' ou δ par exposition prolongée à des températures élevées. Les alliages durcis avec la phase γ'' acquièrent une résistance élevée à la traction et de très bonnes propriétés de rupture en fluage, mais la conversion de la phase γ''

en γ' ou δ au-dessus d'environ 677°C provoque une diminution brusque de la résistance (Donachie, M.J., "Relationship of properties to Microstructure in Superalloys" in Superalloys Source Book, American Society for Metals, 1984).

5 La demanderesse a découvert que le tantale n'agit pas de la même façon que le niobium dans les superalliages à base de nickel. Le tantale s'est révélé produire un alliage présentant une plus grande stabilité des phases et des relations différentes entre les phases par rapport à l'alliage correspondant contenant du niobium.
10 Cette différence de la stabilité des phases rend les alliages contenant du tantale bien plus résistants à des températures bien plus élevées que les alliages contenant du niobium. De plus, la phase γ'' des alliages de l'invention n'est pas facilement transformée en phase δ , contrairement à ce qui se produit dans les
15 alliages équivalents contenant du niobium.

 La présente invention concerne particulièrement un alliage à base de nickel qui comprend au moins environ 30 % en poids de nickel, environ 8 à environ 16 % en poids de tantale et qui est sensiblement dépourvu de niobium. Les éléments additionnels contenus
20 dans l'alliage sont principalement choisis dans le groupe constitué du chrome, du fer, du cobalt, du molybdène, du titane, du zirconium, du tungstène, de l'hafnium, de l'aluminium, du bore et du carbone et de leurs combinaisons. De plus, d'autres éléments, tels que le manganèse, le silicium, le phosphore, le soufre, le plomb, le
25 bismuth, le tellure, le sélénium, le niobium et l'argent, peuvent également être présents comme impuretés fortuites.

 L'invention concerne également, de façon générale, un procédé pour améliorer les propriétés de résistance à haute température des superalliages à base de nickel contenant du niobium,
30 par remplacement sensiblement de la totalité du niobium qu'ils contiennent par du tantale atome pour atome.

 L'invention concerne également un procédé pour améliorer les propriétés de résistance à haute température des superalliages à base de nickel contenant du tantale de l'invention, par des
35 traitements thermiques à des températures plus élevées et pendant

une durée plus longue que celles utilisées pour leurs équivalents contenant du niobium.

Le mode de réalisation préféré de l'invention va maintenant être décrit.

5 Les alliages de l'invention contiennent au moins environ 30 % de nickel (tous les pourcentages exprimés dans la présente description et dans les revendications sont en poids, sauf indication contraire) et environ 8 à environ 16 % de tantale. Le reste de l'alliage est constitué d'autres éléments que l'on allie
10 classiquement au nickel pour former des superalliages, tels que les éléments choisis dans le groupe constitué du chrome, du fer, du cobalt, du molybdène, du titane, du zirconium, du tungstène, de l'hafnium, de l'aluminium, du bore, du carbone et leurs combinaisons. De plus, d'autres éléments, tels que le manganèse, le
15 silicium, le phosphore, le soufre, le plomb, le bismuth, le tellure, le sélénium et l'argent, peuvent également être présents dans l'alliage comme impuretés fortuites. Ces alliages sont sensiblement dépourvus de niobium, c'est-à-dire contiennent moins d'environ 1 %, de préférence moins de 0,5 % et tout préférentiellement moins d'environ
20 0,1 % de niobium.

Généralement, l'alliage contient, en plus du nickel et du tantale, au maximum environ 25 % de chrome, au maximum environ 40 % de fer, au maximum environ 25 % de cobalt, au maximum environ 8 % de molybdène, au maximum environ 3 % de titane, au maximum environ 2 %
25 d'aluminium, au maximum environ 7 % de tungstène, environ 30 à environ 150 ppm de bore et au maximum environ 0,1 % de carbone. D'autres éléments, tels que les éléments d'alliage mentionnés ci-dessus, peuvent être présents en des proportions chacune d'environ 1 % à un maximum total d'environ 5 %.

30 Un alliage préféré est constitué essentiellement d'environ 8 à environ 16 % de tantale, environ 17 à environ 22 % de chrome, au maximum environ 25 % de fer, au maximum environ 16 % de cobalt, pas moins de 12 % au total de fer et de cobalt, environ 2 à environ 6 % de molybdène, environ 1 à environ 5 % de titane, environ 0,1 à
35 environ 5 % d'aluminium, environ 30 à environ 150 ppm de bore,

environ 0,01 à environ 0,1 % de carbone, le complément étant du nickel (y compris les impuretés fortuites), la proportion totale de fer et de cobalt étant d'environ 12 à environ 25 %.

Un second alliage préféré est constitué essentiellement
5 d'environ 8,5 à environ 10 % de tantale, environ 18 à environ 20 %
de chrome, environ 17 à environ 19 % de fer, environ 2,5 à environ 4
% de molybdène, environ 0,75 à environ 2,5 % de titane, environ 0,25
à environ 0,75 % d'aluminium, environ 30 à environ 60 ppm de bore
lorsque l'alliage doit être coulé, ou environ 80 à environ 150 ppm
10 de bore lorsque l'alliage doit être forgé, environ 0,03 à environ
0,05 % de carbone, le complément étant du nickel. Une version
particulièrement préférée de cet alliage est constituée
essentiellement d'environ 9 % de tantale, environ 19 % de chrome,
environ 1 % de fer, environ 3 % de molybdène, environ 1 % de titane,
15 environ 0,5 % d'aluminium, environ 30 à environ 60 ppm de bore
lorsque l'alliage doit être coulé, ou environ 80 à environ 100 ppm
de bore lorsque l'alliage doit être forgé, environ 0,05 % de
carbone, le complément étant du nickel.

Un troisième alliage préféré est constitué essentiellement
20 d'environ 30 à environ 40 % de nickel, environ 30 à environ 40 % de
fer, environ 15 à environ 23 % de cobalt, environ 8 à environ 16 %
de tantale et environ 30 à environ 150 ppm de bore. Une version
préférable de cet alliage est constitué essentiellement d'environ 35
à environ 38 % de nickel, environ 35 à environ 38 % de fer, environ
25 17 à environ 20 % de cobalt, environ 8 à environ 10 % de tantale et
environ 30 à environ 60 ppm de bore lorsque l'alliage doit être
coulé, ou environ 80 à environ 100 ppm de bore lorsque l'alliage
doit être forgé. Une version tout particulièrement préférée de cet
alliage est constituée essentiellement d'environ 36 à environ 37 %
30 de nickel, environ 36 à environ 37 % de fer, environ 17 à environ
19 % de cobalt, environ 8,5 à environ 9,5 % de tantale et environ 30
à environ 60 ppm de bore lorsque l'alliage doit être coulé, ou
environ 80 à environ 100 ppm de bore lorsque l'alliage doit être
forgé.

35 Les alliages de l'invention peuvent être coulés ou forgés et

peuvent être produits selon des procédés classiques.

5 Pour que les alliages de l'invention présentent l'amélioration de leurs propriétés à haute température, ils doivent être soumis à un traitement thermique. Le traitement thermique est effectué à une température plus élevée et pendant une période sensiblement plus longue qu'on ne le fait classiquement pour les alliages semblables contenant du niobium.

10 Le cycle de traitement thermique actuellement préféré pour le second alliage préféré comprend un chauffage à environ 1 093°C pendant environ 1 heure, suivi d'une compression isostatique à chaud à environ 1 121°C et à une pression d'environ 8,3 à 10,3 daN/mm² (83-103MPa) pendant environ 3 à environ 5 heures, suivie d'un chauffage à environ 1052°C pendant environ 4 heures, puis d'un chauffage à environ 871°C pendant environ 2 heures. Un chauffage additionnel (vieillissement) à environ 732°C pendant environ 8 heures peut être utile pour assurer des propriétés optimales à certains alliages. Le traitement thermique classique de cet alliage dans sa version contenant du niobium ne comprend pas l'étape à 871°C et doit comprendre une étape de vieillissement à une température plus basse d'environ 1 150°C pendant environ 4 à 8 heures.

20 Grâce à l'emploi de tantale sensiblement en l'absence de niobium, en combinaison avec les conditions de traitement thermique à températures plus élevées, on produit des alliages dont le renforcement par la phase γ est accru par rapport aux alliages classiques contenant du niobium. Les alliages de l'invention sont susceptibles de durcissement structural, sont maléables et sont caractérisés par une association de propriétés élevées de résistance et de ductilité, en particulier à hautes températures. Il semble de plus que la quantité d'aluminium et de titane, lorsqu'on en incorpore à l'alliage, peut être accrue au-delà de celle classiquement présente dans les alliages contenant du niobium, sans pour cela provoquer de fissuration par vieillissement sous contrainte des soudures. Un autre avantage de l'emploi de tantale au lieu de niobium dans les alliages est l'amélioration de la soudabilité. Cela est dû à un accroissement de la résistance à la

25

30

35

microfissuration de la zone modifiée par le chauffage, par suite de la température plus élevée de l'eutectique Ta-Ni par rapport à celle de l'eutectique Nb-Ni.

Les exemples non limitatifs suivants sont présentés pour illustrer la préparation des alliages de l'invention et l'amélioration de leurs propriétés, en particulier aux températures élevées.

EXEMPLE I

On prépare un alliage contenant du titane de type 718 par fusion d'une composition faite de 48,6 % de nickel, 19,2 % de chrome, 18,0 % de fer, 0,02 % de niobium, 9,1 % de tantale, 3,0 % de molybdène, 1,04 % de titane, 0,47 % d'aluminium, 0,0043 % de bore, 0,044 % de carbone et 0,02 % de silicium, dans un four à induction sous vide. On coule l'alliage fondu dans des moules de céramique pour former des brames de 50 x 100 x 6,4 mm. On soumet des échantillons des brames au traitement thermique suivant : 1 093°C pendant 1 heure, compression isostatique à chaud à 1 121°C et à 10,1 daN/mm² pendant 3 heures, 1 052°C pendant 4 heures, 871°C pendant 2 heures, puis 732°C pendant 8 heures.

On produit de la même façon que ci-dessus un alliage 718 classique ayant la même composition, mais ne contenant essentiellement pas de titane, mais environ 4,6 % de niobium, et on le soumet à un traitement thermique comme il est habituel pour un alliage 718 (comme indiqué dans le nota 1 du tableau I ci-dessous).

La microstructure de l'alliage contenant du tantale se révèle avoir, lors de la solidification, une phase de Laves égale ou moins stable que celle de l'alliage 718 classique. De plus, l'alliage contenant du tantale ne forme pas de phase δ après exposition à une température dans la gamme de 871°C à 902°C, traitement thermique que l'on utilise pour déterminer la ségrégation des éléments dans les alliages 718 (formation d'une phase δ). La microstructure de l'alliage contenant du tantale présente une excellente distribution des précipités γ' et γ'' dont la taille assure un effet de renforcement raisonnable. Les précipités γ' et γ'' , dans l'alliage contenant du tantale, sont répartis bien plus

uniformément dans les interstices et les noyaux centraux des dendrites que dans l'alliage coulé 718 classique.

On a évalué des échantillons des deux alliages pour déterminer leurs propriétés mécaniques à la température ordinaire (TO) et à température élevée. Les résultats obtenus sont les suivants :

10

15

20

25

30

35

TABLEAU I

	Alliage Ta 718 ^{1,3} coulé		Alliage Nb 718 ¹ coulé		Alliage Ta 718 ^{2,4} coulé			
	TO	$\frac{649^{\circ}\text{C}}{896}$	$\frac{704^{\circ}\text{C}}{841}$	TO	$\frac{649^{\circ}\text{C}}{806}$	TO	$\frac{649^{\circ}\text{C}}{1018}$	$\frac{760^{\circ}\text{C}}{918}$
Résistance à la traction MPa	107	896	841	104	806	1228	1018	918
Limite élastique à 0.2 % MPa	814	784	734	916	717	982	812	776
Allongement, %	19	11,5	9	15	11	12	11	6
Striction, %	29,1	22,5	21,5	29	29	18	8	6

- 1 1 093°C/1 h ; compression isostatique à chaud à 1 121°C/ 10,1 daN/mm²
 (101 MPa)/3 ; 1 052°C/1 h ; 732°C/8 h ; 621°C/8 h.
 2 1 093°C/1 h ; compression isostatique à chaud à 1 121°C/ 10,1 daN/mm²
 (101 MPa)/3 ; 1 052°C/1 h ; 871°C/2 h ; 732°C/8 h.
 3 Moyenne de 2 échantillons.
 4 Un échantillon.

5
 10 Comme le montre le tableau I, le superalliage contenant du tantale de type 718 présente une amélioration de la résistance mécanique aux températures élevées par rapport à son équivalent contenant du niobium et ces propriétés sont encore améliorées par l'application du traitement thermique préféré.

EXEMPLE II

15 On reprend le mode opératoire de l'exemple I avec un alliage composé de 36,6 % de nickel, 36,6 % de fer, 17,7 % de cobalt, 9,1 % de tantale et 45 ppm de bore. On prépare également, à titre comparatif, l'alliage classique correspondant dans lequel le tantale est remplacé par du niobium atome pour atome, c'est-à-dire dont la teneur en niobium est de 4,5 %. On évalue les propriétés mécaniques des alliages comme dans l'exemple I. Les résultats sont les
 20 suivants.

TABLEAU II

	Alliage Ta coulé		Alliage Nb coulé	
	TO	649°C	TO	649°C
Résistance à la traction (MPa)	1257	977	930	744
25 Limite élastique à 0,2 % (MPa)	1098	886	827	613
Allongement, %	4,5	3,0	4,0	7,0
Striction, %	6,5	6,5	7,0	13,0

30 Il est évident que l'alliage contenant du tantale de l'invention présente une amélioration importante de la résistance à la traction et de la limite d'élasticité, une striction réduite et un allongement semblable relativement au même alliage contenant du niobium.

35 Les évaluations des divers alliages démontrent à nouveau la

supériorité de l'alliage contenant du tantale de l'invention par rapport à l'alliage comparable contenant du niobium.

EXEMPLE III

Bien que l'alliage 718 classique de l'exemple I présente une
5 grande résistance à la fissuration par vieillissement sous
contrainte au cours de la détente des contraintes de soudage,
l'alliage peut être sujet à la fois à une fissuration par liquation
dans la zone de soudage modifiée par la chaleur et, dans des
conditions de forte contention, à une fissuration par solidification
10 dans la zone de fusion de la soudure. Pour évaluer l'effet du
remplacement du niobium par le tantale de l'invention, on répète les
étapes de formation d'alliage de l'exemple I pour produire des
échantillons d'essai de soudabilité coulés aux dimensions, épais de
5 mm. Avant l'essai de soudabilité, on soumet tous les échantillons
15 à un traitement thermique sous vide à 1 093°C pendant 1 heure et on
les refroidit à 649°C en 20 minutes. On utilise les essais de
soudabilité Spot Varestraint et Mini Varestraint pour évaluer la
sensibilité à la fissuration par liquation dans la zone modifiée par
le chauffage et par solidification dans la zone de fusion. Dans
20 l'essai Spot Varestraint, on applique une contrainte à une soudure
par points à l'arc au tungstène aux gaz pour, immédiatement après la
coupure de l'arc, pour limiter la fissuration à la zone modifiée par
le chauffage soudée. Au cours de l'essai Mini Varestraint, une
déformation se produit lors de la formation d'une soudure continue à
25 l'arc au tungstène aux gaz, des fissures se formant principalement
dans la zone de fusion préalablement solidifiée. On utilise la
longueur totale des fissures comme mesure quantitative de la
sensibilité à la fissuration.

Comme le montre le tableau III, l'alliage contenant du
30 tantale présente la sensibilité minimale à la fissuration de la zone
modifiée par chauffage soudée dans la gamme totale des déformations
étudiées, c'est-à-dire un accroissement des contraintes de 0,25 à
3 %, selon l'essai Spot Varestraint.

TABLEAU III

Alliage 718 coulé

Alliage Ta 718
coulé

	<u>Déformation</u>	<u>Fissures</u>	<u>LTF</u>	<u>LMF</u>	<u>Fissures</u>	<u>LTF</u>	<u>LMF</u>
5	0,29 %	24	0,422	0,032	12	0,214	0,025
	0,29 %	26	0,493	0,033	12	0,240	0,028
	1,16 %	33	0,671	0,040	19	0,391	0,034
	1,16 %	35	0,775	0,040	20	0,462	0,034
	2,9 %	42	1,008	0,055	30	0,664	0,039
	2,9 %	48	1,108	0,053	30	0,669	0,045

10 Fissures : nombre de fissures par soudure

LTF : longueur totale des fissures

LMF : longueur maximale des fissures.

Bien que la présente invention ait été décrite relativement
à des exemples et à des modes de réalisation spécifiques, il
convient de noter que le spécialiste de l'art peut leur apporter des
modifications sans s'écarter de l'esprit de l'invention tel qu'il
est défini dans les revendications annexées.

20

25

30

35

RENDICATIONS

1. Alliage à base de nickel, caractérisé en ce qu'il comprend au moins environ 30 % en poids de nickel, environ 8 à environ 16 % en poids de tantale, environ 30 à environ 150 ppm de bore et en ce qu'il est sensiblement dépourvu de niobium.
5
2. Alliage selon la revendication 1 dont le complément est constitué d'un ou plusieurs éléments choisis dans le groupe constitué par le chrome, le fer, le cobalt, le molybdène, le titane, l'aluminium, le tungstène et le carbone.
10
3. Alliage selon la revendication 2 qui contient de plus du zirconium et/ou de l'hafnium.
15
4. Superalliage à base de nickel, caractérisé en ce qu'il est constitué essentiellement d'environ 8 à environ 16 % de tantale, environ 17 à environ 22 % de chrome, au maximum environ 25 % de fer, au maximum environ 16 % de cobalt, environ 2 à environ 6 % de molybdène, environ 1 à environ 5 % de titane, environ 0,1 à environ 5 % d'aluminium, environ 30 à environ 150 ppm de bore, environ 0,01 à environ 0,1 % de carbone, le complément étant du nickel, et dans lequel la teneur totale en fer plus cobalt n'est pas inférieure à environ 12 %.
20
5. Superalliage à base de nickel, caractérisé en ce qu'il est constitué essentiellement d'environ 8,5 % à environ 10 % de tantale, environ 18 à environ 20 % de chrome, environ 17 à environ 19 % de fer, environ 2,5 à environ 4 % de molybdène, environ 0,75 à environ 2,5 % de titane, environ 0,25 à environ 0,75 % d'aluminium, environ 30 à environ 60 ppm de bore lorsque l'alliage doit être coulé, ou environ 80 à environ 100 ppm de bore lorsque l'alliage doit être forgé, et environ 0,03 à environ 0,05 % de carbone, le complément étant du nickel.
25
6. Alliage selon la revendication 5, qui est constitué essentiellement d'environ 9 % de tantale, environ 19 % de chrome, environ 18 % de fer, environ 3 % de molybdène, environ 1 % de titane, environ 0,5 % d'aluminium, environ 30 à environ 60 ppm de bore lorsque l'alliage doit être coulé, ou environ 80 à environ 100 ppm de bore lorsque l'alliage doit être forgé, et environ 0,05 %
30
35

de carbone, le complément étant du nickel.

5 7. Superalliage à base de nickel, constitué essentiellement d'environ 30 à environ 40 % de nickel, environ 30 à environ 40 % de fer, environ 15 à environ 23 % de cobalt, environ 8 à environ 16 % de tantale et environ 30 à environ 150 ppm de bore.

10 8. Alliage selon la revendication 7, qui est constitué essentiellement d'environ 35 à environ 38 % de nickel, environ 35 à environ 38 % de fer, environ 17 à environ 20 % de cobalt, environ 8 à environ 10 % de tantale et environ 30 à environ 60 ppm de bore lorsque l'alliage doit être coulé, ou environ 80 à environ 100 ppm de bore lorsque l'alliage doit être forgé.

15 9. Alliage selon la revendication 8, qui est constitué essentiellement d'environ 36 à environ 37 % de nickel, environ 36 à environ 37 % de fer, environ 17 à environ 19 % de cobalt, environ 8,5 à environ 9,5 % de tantale et environ 30 à environ 60 ppm de bore lorsque l'alliage doit être coulé, ou environ 80 à environ 100 ppm de bore lorsque l'alliage doit être forgé.

20 10. Procédé pour améliorer les propriétés de résistance mécanique à haute température d'un superalliage à base de nickel contenant du niobium, caractérisé en ce qu'il consiste à remplacer sensiblement tout le niobium qui est contenu par du tantale atome pour atome.

25 11. Procédé selon la revendication 10, dans lequel l'alliage comprend au moins environ 30 % en poids de nickel, environ 8 à environ 16 % en poids de tantale et un ou plusieurs éléments choisis dans le groupe constitué par le chrome, le fer, le cobalt, le molybdène, le titane, l'aluminium, le tungstène, le bore et le carbone.

30 12. Procédé selon la revendication 11, dans lequel l'alliage contient de plus du zirconium et/ou de l'hafnium.

35 13. Procédé selon la revendication 11, dans lequel l'alliage a été traité à chaud à environ 1 093°C pendant environ 1 heure, puis soumis à une compression isostatique à chaud à environ 1 121°C sous une pression d'environ 83 à environ 103 MPa pendant environ 3 à environ 5 heures, puis chauffé à environ 1 052°C pendant environ

4 heures, puis chauffé à environ 871°C pendant environ 2 heures.

14. Procédé selon la revendication 13, dans lequel l'alliage est de plus traité à chaud à environ 732°C pendant environ 8 heures.

5 15. Procédé de traitement thermique d'un superalliage à base de nickel contenant du tantale sensiblement dépourvu de niobium, comprenant les étapes de chauffage dudit superalliage à environ 1 093°C pendant environ 1 heure, puis compression isostatique à chaud à environ 1 121°C avec une pression d'environ 83 à environ 103 MPa pendant environ 3 à environ 8 heures, puis chauffage à 10 environ 1 052°C pendant environ 4 heures, puis chauffage à environ 871°C pendant environ 2 heures.

16. Procédé selon la revendication 15, dans lequel l'alliage est de plus traité à chaud à environ 732°C pendant environ 8 heures.

15

20

25

30

35