

⑤④ Alliage de titane.

②② Date de dépôt : 03.06.22.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : SAFRAN Société anonyme —FR,
TIMET SAVOIE Société anonyme FR, CENTRE
NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Etablissement public national à caractère administratif
FR, UNIVERSITE DE LORRAINE Etablissement
public national à caractère scientifique culturel et
professionnel FR et OFFICE NATIONAL D'ETUDES
ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES
Etablissement publique géré par l'état — FR.

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 08.12.23 Bulletin 23/49.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 31.05.24 Bulletin 24/22.

⑦② Inventeur(s) : MENOU Edern, DELFOSSE Jérôme
et MILLET Yvon.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦③ Titulaire(s) : SAFRAN (SA), TIMET SAVOIE (SA),
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (EPA), UNIVERSITE DE LORRAINE
(EPSCP), OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE
RECHERCHES AEROSPATIALES Etablissement
publique géré par l'état.

⑦④ Mandataire(s) : CABINET BEAU DE LOMENIE.



Description

Titre de l'invention : Alliage de titane

Domaine technique

- [0001] L'invention concerne le domaine des alliages métalliques et plus précisément des alliages utilisés dans le domaine aéronautique.

Technique antérieure

- [0002] La réduction des émissions polluantes est un enjeu majeur de l'industrie aéronautique. Un axe souvent avancé pour la réduction de ces émissions est l'augmentation de l'efficacité des systèmes de propulsions utilisés. Toutefois, l'efficacité de ces systèmes est limitée par leur température de fonctionnement, elle-même limitée par les matériaux constitutifs des systèmes propulsifs.
- [0003] En outre, les matériaux constitutifs des systèmes propulsifs doivent présenter, en plus d'une bonne résistance à la température, des caractéristiques mécaniques suffisantes pour l'application dans des systèmes propulsifs, et notamment des turbomachines aéronautiques, notamment en termes de résistance mécanique, de résistance à l'oxydation et de résistance à la fatigue.
- [0004] L'utilisation des alliages de titane est connue pour la fabrication de disques de compresseur, d'aubes de compresseur, de rouets de compresseur ou de tuyères de turbomachine.
- [0005] Au cours du temps, les alliages de titane pour disques, aubes, rouets ou tuyères de turbomachine ont subi d'importantes évolutions de composition chimique, dans le but notamment d'améliorer leur résistance mécanique en température et leur résistance à l'environnement dans lesquels ces alliages servent. La complexité de la chimie de ces alliages peut conduire à une déstabilisation de leur microstructure optimale, de sorte que le choix des éléments d'addition et de leurs teneurs n'est pas trivial.
- [0006] Ces matériaux ont pour principaux avantages de combiner à la fois une résistance mécanique élevée, une masse volumique deux fois moindre que celles des superalliages à base de nickel, ainsi qu'une résistance à l'oxydation et à la corrosion raisonnable, le tout à des températures inférieures à 550 °C.
- [0007] À ce titre, les alliages de titane sont compétitifs par comparaison aux aciers ou aux superalliages base nickel à des températures inférieures à 550 °C. Une augmentation des températures de fonctionnement des turbomachines impose cependant une augmentation de leur résistance à la température, notamment vis-à-vis des alliages de titane commerciaux.
- [0008] Plus précisément, les alliages de titane les plus utilisés dans le domaine aéronautique sont des alliages dit « quasi- α » comprenant une fraction très importante de la phase

hexagonale compacte α et ces derniers présentent généralement une bonne résistance en température. Par exemple, l'alliage Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo est un représentant de cette famille.

- [0009] Néanmoins, les alliages de titane quasi- α ne sont pas compétitifs pour des applications à des températures supérieures à 550 °C, pour plusieurs raisons.
- [0010] Tout d'abord, ces alliages sont sensibles à la fatigue dite « fatigue avec temps de maintien » (ou « fatigue dwell » selon le terme consacré en langue anglaise). Cette fatigue peut se décrire comme un type de fatigue proche du fluage observé dès la température ambiante impliquant une phase de maintien de plusieurs minutes sous contrainte.
- [0011] La sensibilité des alliages quasi- α à la fatigue « dwell » limite actuellement leur durée de vie. En effet, bien que la fatigue dwell ne soit pas observée à haute température, elle peut néanmoins apparaître lors des cycles de refroidissement du moteur. En plus de leur résistance à la fatigue « dwell » le souhait d'augmenter la température de fonctionnement des systèmes propulsifs aéronautiques doit s'assortir d'une augmentation de la résistance à l'oxydation et de la résistance mécanique des matériaux utilisés.
- [0012] En effet, l'augmentation de la température de fonctionnement favorise la ruine des alliages de titane par la corrosion, et en particulier l'oxydation. Par ailleurs, les caractéristiques mécaniques diminuent avec la température et les alliages quasi- α connus ne présentent pas, aux températures cibles supérieures à 550 °C, les résistances requises par les applications futures.
- [0013] Ainsi donc, pour pouvoir augmenter les rendements des systèmes propulsifs aéronautiques, il est nécessaire de développer de nouvelles compositions d'alliage de titane.

Exposé de l'invention

- [0014] L'invention vise précisément à répondre à ce besoin, et propose pour cela des alliages avec des compositions optimisées pour présenter une résistance à la fatigue dwell, une résistance à la corrosion et une résistance mécanique compatibles d'une utilisation dans une turbomachine aéronautique à des températures de fonctionnement allant jusqu'à 650 °C.
- [0015] L'invention concerne pour cela un alliage de titane comprenant, en teneurs massiques :
 - 4,0 % à 5,0 % d'aluminium ;
 - 3,50 % à 4,50 % d'étain ;
 - 1,0 % à 4,0 % de zirconium,
 - 2,0 % à 5,25 % de molybdène ;

- 1,0 % à 2,50 % de niobium ;
- 0,10 % à 0,25 % de silicium ;
- 0,10 % à 0,18 % d'oxygène ;

le complément étant constitué de titane et des impuretés inévitables,

l'alliage présentant une teneur massique en aluminium équivalent, notée Aleq, inférieure ou égale à 8,5 % et calculée par application de la formule suivante :

$A_{eq} = [Al] + [Sn]/3 + [Zr]/6 + 10 * [O]$ où [Al], [Sn], [Zr] et [O] sont les teneurs massiques dans l'alliage respectivement en aluminium, en étain, en zirconium et en oxygène.

[0016] Cet alliage est destiné à la fabrication de composants de turbomachines tels que des disques, aubes, rouets ou tuyères d'échappement.

[0017] Dans toute la demande, et sauf indication contraire, les teneurs données pour un élément sont des teneurs massiques.

[0018] Il est du mérite des inventeurs d'être parvenu aux compositions d'alliages décrites pour lesquelles il est observé des comportements permettant de répondre à la problématique. En effet, et parmi d'autres caractéristiques, les alliages de l'invention présentent :

- [0019]
- une masse volumique contenue, de l'ordre de celle des alliages de titane existants ;
 - des résistances à la corrosion et à l'oxydation compatibles avec les environnements de turbomachines, et cela pour des températures allant au moins jusqu'à 650 °C, et a minima supérieures à celle des alliages commerciaux actuels ;
 - une résistance mécanique, notamment une résistance à la fatigue dwell, supérieure à celle des alliages existants ;
 - une stabilité microstructurale adéquate sur la plage de températures d'usage envisagée, en particulier jusqu'à 650 °C ;
- [0020] - une faible sensibilité à la formation de phases délétères telle la phase ω sur la plage de températures d'usage envisagée, en particulier pour des températures allant au moins jusqu'à 650 °C.

[0021] Les inventeurs ont notamment constaté que le fer, le chrome et le nickel diminuent la résistance au fluage de l'alliage. Ainsi, il est préférable pour des applications à haute température d'éviter la présence de ces éléments comme c'est le cas dans les alliages selon l'invention.

[0022] En outre, les inventeurs ont constaté que la teneur massique en aluminium équivalent inférieure ou égale à 8,5 %, voire inférieure ou égale à 8,0 %, permet de limiter la fraction de la phase α_2 dans l'alliage. La fraction de phase α_2 importante qui peut apparaître pour des alliages dont les teneurs massiques en aluminium équivalent sont supérieures à celles décrites est responsable d'une fragilisation indésirable de l'alliage. En outre, pour des alliages dont la teneur massique en aluminium équivalent est plus importante, il a été observé que la cinétique de transformation de la phase α

sera trop importante, conduisant à une sensibilité accrue de l'alliage à la fatigue dwell, ce que les alliages de l'invention visent précisément à éviter.

- [0023] Les inventeurs sont parvenus d'une part à identifier l'importance du critère de la teneur massique en aluminium équivalent comme un critère important pour les phénomènes en présence, et d'autre part à proposer une optimisation de celle-ci, en ajustant précisément la teneur des autres éléments pour satisfaire aux spécifications techniques d'un alliage utilisable dans une turbomachine aéronautique dont la température de fonctionnement serait d'au moins 550 °C.
- [0024] Dans un mode de réalisation, la teneur massique en aluminium équivalent peut être comprise entre 6,5 % et 8,5 %, voire comprise entre 6,5 % et 8,0 %.
- [0025] Dans un mode de réalisation, l'alliage de l'invention comprend une teneur massique en aluminium comprise entre 4,0% et 4,8%, voire comprise entre 4,0% et 4,7%.
- [0026] Les inventeurs ont constaté que cette limitation supplémentaire de la teneur en aluminium permet d'éviter la précipitation d'une fraction trop importante de la phase α_2 de l'alliage, ce qui améliore la tenue mécanique de l'alliage, en augmentant en particulier sa ductilité.
- [0027] Dans un mode de réalisation, l'alliage de l'invention comprend une teneur massique en molybdène comprise entre 4,50% et 5,25%.
- [0028] Le molybdène stabilise la phase β de l'alliage, et contribue au renforcement par solution solide. La phase β contribue à l'augmentation de la ductilité de l'alliage, et donc de sa capacité de mise en forme.
- [0029] Dans un mode de réalisation, la teneur massique en silicium de l'alliage peut être comprise entre 0,1% et 0,15%.
- [0030] En effet, le silicium contribue au renforcement par solution solide, et à la formation de siliciures, notamment les siliciures de stœchiométries M_3Si et M_5Si_3 où M représente un autre élément, par exemple le titane, le zirconium, le molybdène, le niobium. Ces siliciures sont bénéfiques pour la tenue en fluage des alliages, mais une teneur trop importante en silicium peut au contraire entraîner une précipitation excessive des siliciures qui nuisent alors à la ductilité de l'alliage, et peuvent devenir des points d'amorçage de fissures entraînant la ruine prématurée de l'alliage.
- [0031] Les plages de silicium proposées sont celles pour lesquels un optimum entre ces deux effets a pu être obtenu.
- [0032] Dans un mode de réalisation, la teneur massique en zirconium peut être comprise entre 1,0 % et 2,0 %.
- [0033] Le zirconium tend en effet à améliorer la tenue à l'oxydation de l'alliage. Des additions excessives de zirconium stabilisent toutefois la phase α_2 dont une fraction trop importante diminue la ductilité de l'alliage et les valeurs proposées sont des optimums trouvés entre les deux effets.

- [0034] Selon un autre de ses aspects, l'invention concerne une pièce de turbomachine comprenant un alliage tel qu'il vient d'être décrit.
- [0035] Dans un mode de réalisation, une telle pièce peut être une aube de compresseur, un disque de compresseur, un rouet de compresseur, un carter de turbomachine ou une tuyère de turbomachine.
- [0036] Selon un autre de ses aspects, l'invention concerne une turbomachine comprenant une ou plusieurs pièces de turbomachine telles qu'elles viennent d'être décrites.

Description des modes de réalisation

- [0037] L'invention est à présent décrite au moyen d'exemples, présents à but descriptif pour illustrer certains modes de réalisation de l'invention. Les exemples donnés ne doivent pas être interprétés comme limitant l'invention.
- [0038] Pour caractériser les propriétés de certains alliages particuliers de l'invention, les inventeurs ont choisi d'utiliser des résultats de simulations numériques. Plus précisément, 11 alliages selon l'invention et trois alliages comparatifs ont fait l'objet de mesures prédictives, afin de déterminer leur capacité à produire les capacités attendues pour un alliage.
- [0039] La composition des alliages dont il est question est donnée dans le tableau 1 ci-dessous. Les trois exemples comparatifs sont des alliages de titane quasi- α fréquemment utilisés dans le domaine aéronautique.
- [0040] L'alliage comparatif 1, comp1 correspond à l'alliage dit Ti6242S.
- [0041] L'alliage comparatif 2, comp2 correspond à l'alliage dit Ti6246.
- [0042] L'alliage comparatif 3, comp3 correspond à l'alliage dit IMI-834, par exemple disponible commercialement sous la référence commerciale TIMETAL® 834 de TIMET.

[0043] [Tableaux1]

Référence	Al	Sn	Zr	Mo	Nb	Si	O	Autres
Ex1	5,0	4,0	2,0	2,0	1,9	0,1	0,12	-
Ex2	4,0	4,0	2,0	2,0	1,9	0,1	0,12	-
Ex3	4,8	4,5	2,0	2,0	1,9	0,1	0,12	-
Ex4	4,8	4,0	4,0	2,0	1,9	0,1	0,12	-
Ex5	4,8	4,0	2,0	2,0	1,0	0,1	0,12	-
Ex6	4,8	4,0	2,0	2,0	2,5	0,1	0,12	-
Ex7	4,8	4,0	2,0	2,0	1,9	0,25	0,12	-
Ex8	4,7	3,7	3,3	2,7	1,9	0,13	0,11	-
Ex9	4,7	3,7	3,3	2,7	1,9	0,22	0,11	-
Ex10	4,6	4,1	1,5	4,5	1,9	0,13	0,13	-
Ex11	4,6	4,1	1,5	5,25	1,9	0,13	0,13	-
Comp1	6,0	2,0	4,0	2,0	-	0,10	0,11	-
Comp2	6,0	2,0	4,0	6,0	-	-	0,11	-
Comp3	5,8	4,0	3,5	0,5	0,7	0,35	0,12	0,06C

[0044] Pour comprendre les exemples qui vont suivre, et les conclusions qui pourront être faites, il faut noter qu'un alliage doit être évalué pour l'ensemble de ses propriétés, et non pas pour une propriété prise isolément.

[0045] Ainsi, par exemple, si l'on ne regarde que la masse volumique on aura l'impression que l'alliage comp3 est le plus prometteur, mais cela serait sans compter que cet alliage n'est pas utilisable en température à cause d'une trop faible résistance à la fatigue dwell visible à sa teneur en phase α_2 et sa pente de fraction α au transus β trop importante, comme il apparaîtra à la lecture des tableaux 2 et 5.

[0046] L'optimisation et le choix d'un alliage particulier est toujours le résultat d'un compromis entre les différentes caractéristiques, et il est très important de regarder l'ensemble des paramètres importants qui vont être présentés ci-après pour comprendre l'intérêt particulier des alliages de l'invention pour la résolution du problème technique.

[0047] Les exemples qui suivent visent à proposer des comparaisons entre les différents exemples selon l'invention, et montrer que ces derniers présentent dans l'ensemble de meilleures propriétés que les alliages comparatifs dont aucun n'est apte à une utilisation dans les conditions classiques d'une turbomachine aéronautique ayant une température de fonctionnement comprise entre 550 °C et 650 °C.

[0048] Les inventeurs ont tout d'abord déterminé la masse volumique des différents alliages.

[0049] La masse volumique a été déterminée par une loi des mélanges pondérant la masse volumique de chaque élément par sa teneur massique, l'ensemble étant réduit de 2,5 %. Ainsi, la masse volumique d'un alliage ρ peut s'écrire selon la formule ci-dessous dans laquelle w_i est le pourcentage massique de l'élément i et ρ_i sa masse volumique.

[0050] [Math.1]

$$\rho = 0,975 \times \sum_i w_i \rho_i$$

[0051] Cette formule donne pour les exemples comparatifs comp1 à comp3 des erreurs de l'ordre de 1% qui sont jugées acceptables.

[0052] Les masses volumiques des exemples et des exemples comparatifs sont données dans le tableau 2.

[0053] [Tableaux2]

Référence	ρ (g.cm ⁻³)
Ex1	4,64
Ex2	4,65
Ex3	4,65
Ex4	4,68
Ex5	4,60
Ex6	4,66
Ex7	4,64
Ex8	4,70
Ex9	4,69
Ex10	4,77
Ex11	4,82
Comp1	4,53
Comp2	4,75
Comp3	4,51

[0054] Les différents alliages présentent des masses volumiques comparables à celles des alliages et même bien souvent inférieures.

[0055] Un deuxième élément de comparaison des alliages selon l'invention aux alliages de

l'art antérieur est leur constante parabolique d'oxydation à 650 °C notée k_p .

[0056] Cette constante quantifie la cinétique d'oxydation d'un alliage (gain de masse). Plus elle est élevée et plus l'oxyde de surface se forme rapidement, ou de manière équivalente, plus l'oxygène diffuse rapidement au sein de l'alliage. Ce paramètre est donc souhaité le plus faible possible, pour les applications visées.

[0057] Le tableau 3 recense les constantes paraboliques d'oxydation pour les exemples et exemples comparatifs. Pour les exemples selon l'invention et les exemples comparatifs, les constantes k_p sont obtenues par un modèle de régression basé sur le recueil et l'exploitation de données expérimentales.

[0058] [Tableaux3]

Référence	k_p à 650 °C ($\times 10^{13} \text{ g}^2/\text{cm}^4/\text{s}$)
Ex1	1,68
Ex2	1,68
Ex3	1,53
Ex4	1,68
Ex5	2,26
Ex6	1,34
Ex7	1,14
Ex8	1,60
Ex9	1,32
Ex10	1,49
Ex11	1,49
Comp1	3,56
Comp2	4,35
Comp3	1,52

[0059] Le tableau 3 illustre que les alliages de l'invention présentent une meilleure résistance à l'oxydation à 650 °C que les exemples comparatifs comp1 et comp2.

[0060] En outre, il peut être noté que les valeurs sont au moins comparables au troisième exemple comparatif qui est celui présentant la meilleure résistance à l'oxydation.

[0061] Les alliages selon l'invention sont encore comparés aux exemples comparatifs pour leurs caractéristiques mécaniques à température ambiante et en température.

[0062] Pour cela, les valeurs de résistance en traction R_m divisées par la masse volumique de l'alliage sont rapportées dans le tableau 4. Le tableau 4 comprend en outre

l'allongement à la rupture A% à 20 °C.

[0063] [Tableaux4]

Référence	Rm/ ρ à 20°C (MPa.g ⁻¹ .cm ³)	Rm/ ρ à 650°C (état vieilli – MPa.g ⁻¹ .cm ³)	A% à 20°C (%)
Ex1	224	111	8,4
Ex2	213	95	13,2
Ex3	227	110	8,4
Ex4	229	114	7,7
Ex5	224	109	9,0
Ex6	221	107	9,0
Ex7	232	118	6,7
Ex8	227	111	7,5
Ex9	233	117	6,0
Ex10	252	110	5,7
Ex11	261	112	4,6
Comp1	214	119	9,3
Comp2	264	128	2,6
Comp3	233	140	5,6

[0064] Les valeurs reportées dans le tableau 4 sont obtenues par un modèle de régression basé sur le recueil et l'exploitation de données expérimentales.

[0065] Pour les applications souhaitées, il est préférable que les valeurs de résistance mécanique, ainsi que l'allongement soient les plus élevées possibles.

[0066] Le tableau 4 illustre que les alliages selon l'invention présentent des résistances mécaniques à température ambiante et en température au moins du même ordre que celles des alliages de l'art antérieur.

[0067] Le tableau 4 illustre en outre que les alliages selon l'invention permettent des compromis de caractéristiques qui ne sont pas accessibles pour les alliages de l'art antérieur. Par exemple, même si aucun d'entre eux n'a une résistance mécanique à 650 °C supérieure à celle de l'alliage comp3, quasiment tous ont eu un allongement à la rupture supérieur.

[0068] Enfin, certaines caractéristiques thermodynamiques des alliages de l'invention, qui permettent d'assurer leur bonne tenue en température ont également été évaluées par simulation numériques.

[0069] Les simulations sont faites par calculs d'équilibre thermodynamiques opérés par la

méthode CALPHAD exploitant la base de données thermodynamiques commerciale TCTI3 (Thermo-Calc Software AB, Suède).

[0070] Les différentes caractéristiques thermodynamiques ainsi évaluées sont présentées dans le tableau 5 ci-dessous.

[0071] [Tableaux5]

Référence	Transus β (°C)	$\Delta\alpha$ (%mol.)	Fraction de phase α_2 à 650 °C (%mol.)	Fraction de silicures à 650 °C (%mol.)	Pente de fraction α au transus β (%mol/°C)
Ex1	955	1,7	-	0,4	-0,41
Ex2	938	1,8	-	0,6	-0,37
Ex3	950	1,9	0,2	0,4	-0,34
Ex4	944	1,6	-	0,6	-0,89
Ex5	959	1,6	-	0,4	-0,47
Ex6	946	1,8	-	0,4	-0,36
Ex7	951	1,8	-	1,1	-0,42
Ex8	942	1,5	-	0,8	-0,63
Ex9	942	1,6	-	1,5	-0,63
Ex10	976	2,1	-	0,6	-0,12
Ex11	986	2,5	-	0,6	-0,09
Comp1	998	0,7	-	0,4	-1,34
Comp2	965	2,5	-	-	-0,58
Comp3	992	1,8	15,0	1,6	-1,05

[0072] Dans le tableau 5, le signe « - » signifie que la valeur obtenue n'était pas significative, et que le résultat numérique peut être assimilé à 0.

[0073] La température de transus β caractérise le domaine de stabilité de la phase β . Plus la température de transus β est faible et plus le domaine β est stable.

[0074] La colonne $\Delta\alpha$ représente la différence absolue entre la fraction de phase α à l'équilibre à 700 °C et la fraction de phase α à l'équilibre à 650 °C. Cet indicateur de l'ampleur de la modification de la constitution d'un alliage entre ces deux températures témoigne de la stabilité de l'alliage à des températures proches des températures de service envisagées. L'objectif est de maintenir une variation $\Delta\alpha$ faible, et l'on peut noter que tous les alliages de l'invention ont une valeur $\Delta\alpha$ inférieure à celle de l'exemple comparatif Comp2.

- [0075] Le tableau 5 comprend encore une colonne indiquant la teneur en phase α_2 à l'équilibre à 650 °C.
- [0076] Si une teneur nulle en phase α_2 est souhaitable, une faible teneur n'est toutefois pas interdite, car il a pu être observé que cette phase contribue au renforcement par précipitation.
- [0077] Le tableau 5 comprend également la teneur en siliciures. La présence de siliciures dans l'alliage assure un certain renforcement par précipitation qui est souhaitable, et qui est d'ailleurs observé pour l'ensemble des alliages selon l'invention.
- [0078] Enfin, le tableau 5 décrit la pente de fraction α au transus β . Cette valeur est un indicateur de la cinétique de transformation de la phase β au refroidissement. Il a été observé qu'une valeur trop importante (en valeur absolue) est associée à un alliage dans lequel les précipités α ont une morphologie augmentant la sensibilité de l'alliage à la fatigue dwell.
- [0079] D'ailleurs, les alliages comp1 et comp3 sont connus pour être sensibles à ce mode de fatigue et présentent une valeur de pente α au transus β relativement élevée (en valeur absolue).
- [0080] Inversement il est connu que l'alliage comp2 est beaucoup moins sujet à la fatigue dwell. Puisque les valeurs des alliages selon l'invention sont relativement proches de la valeur de pente de l'alliage comp2, et en tout cas largement inférieures (en valeur absolue) aux valeurs des alliages comp1 ou comp3, il est attendu que les alliages selon l'invention présentent une bonne résistance à la fatigue dwell.
- [0081] Des exemples qui viennent d'être donnés, on voit notamment que les alliages des exemples comparatifs comp1 et comp2 présentent des constantes paraboliques d'oxydation très élevées comparativement au reste des alliages considérés, tandis que les alliages comparatifs comp3 et comp1 ne donnent pas satisfaction pour leurs sensibilités à la fatigue dwell.
- [0082] En revanche, les alliages de l'invention permettent d'avoir un comportement acceptable pour chacune des grandeurs d'importance décrites plus haut, et notamment :
- [0083] - leur comportement en oxydation est plus acceptable que celui des alliages comp1 et comp2 de l'art antérieur, comme en témoignent les constantes paraboliques d'oxydation k_p qui sont largement inférieures à celles des alliages comp1 et comp2 ;
- [0084] - leur comportement mécanique est défini par les constantes R_m/ρ qui sont sensiblement proches de ceux de alliages de l'art antérieur, avec notamment un allongement à la rupture souvent plus élevé que ceux des alliages des exemples comparatifs ;
- [0085] - une résistance accrue à la fatigue dwell par rapport à l'alliage comp3 (et comp1) de l'art antérieur, comme en témoigne la valeur de la pente de fraction α au transus β .
- [0086] Par conséquent, les alliages de l'invention sont de meilleurs candidats pour des ap-

plications à plus haute température que les alliages de l'art antérieur car ils offrent de meilleurs compromis que les alliages de l'art antérieur, pour lesquels une caractéristique au moins ne permet pas leur utilisation à plus haute température.

[0087] Dans l'ensemble de la demande et sauf mention contraire, tous les intervalles de valeurs doivent s'entendre avec les bornes incluses.

Revendications

- [Revendication 1] Alliage de titane comprenant, en teneurs massiques :
- 4,0 % à 5,0 % d'aluminium ;
 - 3,50 % à 4,50 % d'étain ;
 - 1,0 % à 4,0 % de zirconium,
 - 2,0 % à 5,25 % de molybdène ;
 - 1,0 % à 2,50 % de niobium ;
 - 0,10 % à 0,25 % de silicium ;
 - 0,10 % à 0,18 % d'oxygène ;
- le complément étant constitué de titane et des impuretés inévitables, l'alliage présentant une teneur massique en aluminium équivalent, notée Aleq, inférieure ou égale à 8,5 % et calculée par application de la formule suivante : $A_{eq} = [Al] + [Sn]/3 + [Zr]/6 + 10 * [O]$ où [Al], [Sn], [Zr] et [O] sont les teneurs massiques dans l'alliage respectivement en aluminium, en étain, en zirconium et en oxygène.
- [Revendication 2] Alliage de titane selon la revendication 1, dans lequel la teneur massique en aluminium équivalent est comprise entre 6,5 % et 8,0%.
- [Revendication 3] Alliage de titane selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la teneur massique en aluminium est comprise entre 4,0 % et 4,8 %.
- [Revendication 4] Alliage de titane selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la teneur massique en molybdène est comprise entre 4,50% et 5,25%.
- [Revendication 5] Alliage de titane selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel la teneur massique en silicium est comprise entre 0,1 % et 0,15 %.
- [Revendication 6] Alliage de titane selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel la teneur massique en zirconium est comprise entre 1,0 % et 2,0 %.
- [Revendication 7] Pièce de turbomachine comprenant un alliage selon l'une quelconque des revendications 1 à 6.
- [Revendication 8] Pièce de turbomachine selon la revendication 7, laquelle pièce étant choisie parmi une aube de compresseur, un disque de compresseur, un rouet de compresseur, un carter de turbomachine ou une tuyère de turbomachine.
- [Revendication 9] Turbomachine comprenant une pièce selon l'une des revendications 7 ou 8.

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☐ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

EP 0 851 036 A1 (DAIDO STEEL CO LTD [JP])
1 juillet 1998 (1998-07-01)

Foltz John ET AL: "Introduction to
Titanium and Its Alloys"
In: "Heat Treating of Nonferrous Alloys",
1 juin 2016 (2016-06-01), ASM
International, XP093011105,
ISBN: 978-1-62708-169-6
pages 481-497, DOI:
10.31399/asm.hb.v04e.a0006253,

JP H04 202729 A (DAIDO STEEL CO LTD)
23 juillet 1992 (1992-07-23)

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT