



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11) **EP 1 584 697 A2**

(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
12.10.2005 Bulletin 2005/41

(51) Int Cl.7: **C22C 14/00, C22F 1/18**

(21) Numéro de dépôt: **05290750.8**

(22) Date de dépôt: **05.04.2005**

(84) Etats contractants désignés:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IS IT LI LT LU MC NL PL PT RO SE SI SK TR**
Etats d'extension désignés:
AL BA HR LV MK YU

(30) Priorité: **07.04.2004 FR 0403658**

(71) Demandeur: **ONERA (Office National d'Etudes et
de Recherches Aérospatiales)**
92320 Châtillon (FR)

(72) Inventeurs:
• **Thomas, Marc**
92350 Le Plessis-Robinson (FR)
• **Bachelier-Locq, Agnès**
92350 Le Plessis-Robinson (FR)
• **Naka, Shigehisa**
78350 Jouy-en-Josas (FR)

(74) Mandataire: **Rousset, Jean-Claude**
Cabinet Netter
36, avenue Hoche
75008 Paris (FR)

(54) **Alliage titane-aluminium ductile à chaud**

(57) Alliage du type TiAl1 contenant en atomes 44 à 49 % d'aluminium, 0,5 à 3 % de zirconium, 0,5 à 2 % de fer, 0,5 à 2 % de molybdène, 0,2 à 0,5 % de silicium et 0 à 3 % de niobium.
Utilisation dans les turbomachines aéronautiques.

EP 1 584 697 A2

Description

[0001] L'invention concerne un alliage constitué d'aluminium de titane dans lequel une fraction minoritaire des atomes d'aluminium et de titane est remplacée par d'autres atomes.

[0002] Les alliages intermétalliques du type TiAl trouvent une utilisation avantageuse à haute température dans les turbomachines aéronautiques. TiAl se caractérise par sa faible masse volumique qui lui confère une résistance mécanique à chaud rapportée à la masse volumique supérieure à celle des alliages de titane classiques et même à celle de certains superalliages de nickel. Ceci est dû à une limite d'élasticité qui demeure constante typiquement entre 20 et 700 °C. Néanmoins, la faible ductilité de cet alliage est de nature à compromettre son utilisation pour les pièces tournantes. Des recherches sont donc actuellement menées dans le monde pour la mise au point de gammes de transformation qui ductilisent TiAl pour permettre l'introduction de ce matériau dans les turbomachines aéronautiques. Les travaux portent en parallèle sur le choix des nuances les plus adaptées à telle ou telle gamme de transformation.

[0003] Le but de la présente invention est de fournir un alliage du type TiAl présentant une grande ductilité à chaud, tout en conservant les propriétés mécaniques habituelles pour ces alliages.

[0004] L'invention vise notamment un alliage du genre défini en introduction, et prévoit qu'il contient en atomes 44 à 49 % d'aluminium, 0,5 à 3 % de zirconium, 0,5 à 2 % de fer, 0,5 à 2 % de molybdène, 0,2 à 0,5 % de silicium et 0 à 3 % de niobium.

[0005] Il a été proposé d'ajouter du fer (US-A-6 165 414 et US-A-6 174 495) pour améliorer la coulabilité des alliages TiAl, du zirconium (US-A-4 983 357, US-A-5 207 982 et US-A-5 997 808) pour améliorer le compromis résistance-ductilité, la ténacité, la tenue à l'oxydation et la résistance mécanique à chaud, du molybdène (US-A-5 350 466 et US-A-6 214 133) pour améliorer la tenue à chaud. Cependant, aucun de ces documents ne suggère une combinaison des éléments Fe, Zr et Mo.

[0006] Des caractéristiques optionnelles de l'alliage selon l'invention, complémentaires ou de substitution, sont énoncées ci-après:

- Il contient en atomes 45 à 48 % d'aluminium, environ 1 % de zirconium, environ 1 % de fer, environ 1 % de molybdène et environ 0,2 % de silicium.

- Il est composé exclusivement d'aluminium, de titane, de zirconium, de fer, de molybdène, de silicium et le cas échéant de niobium, sous réserve d'impuretés éventuelles.

[0007] L'invention a également pour objet un procédé de traitement thermique d'un alliage tel que défini ci-dessus, dans lequel on met en solution ses éléments constitutifs par chauffage à une température comprise entre 1200 °C et 1350 °C, on refroidit à la température ambiante et on recuit à une température comprise entre 800 °C et 950 °C.

[0008] Avantageusement, la mise en solution est effectuée à 1250 °C environ pendant 4 heures environ et le recuit à 900 °C environ pendant 4 heures environ.

[0009] Les caractéristiques et avantages de l'invention sont exposés plus en détail dans la description ci-après, avec référence au dessin annexé, qui représente sous forme de graphique la variation de certaines propriétés de l'alliage selon l'invention en fonction de sa teneur en aluminium.

[0010] Dans la présente description, sauf indication contraire, toutes les proportions sont données en atomes.

[0011] Il a été constaté que les nuances d'alliages du type TiAl (ou plus brièvement "alliages TiAl") à forte teneur en aluminium telle que 48 % sont plus ductiles et moins résistantes que les nuances à faible teneur en aluminium telle que 44 %. Toutefois, pour des teneurs supérieures à 48 % la tendance s'inverse rapidement avec une ductilité plus réduite alors que la tenue au fluage et la résistance à l'oxydation se trouvent améliorées. Ainsi, la teneur en aluminium doit être enfermée dans une fenêtre de composition très étroite (47-48 %) pour assurer un bon compromis de propriétés. Cependant, cette forte sensibilité de la teneur en aluminium des alliages TiAl constitue un handicap sérieux pour leur élaboration qui nécessite une très grande précision dans les quantités d'éléments ajoutés. Un lingot de plusieurs kilogrammes peut ainsi présenter des variations de teneurs en aluminium supérieures à 1% en différents endroits, avec comme conséquence des propriétés différentes, pouvant s'écarter des spécifications des utilisateurs. En outre, l'aluminium est volatil au cours de la fusion, provoquant une perte de concentration en aluminium qui est dépendante du nombre de fusions. C'est une raison supplémentaire pour laquelle il est difficile de respecter scrupuleusement les teneurs en aluminium nominales.

[0012] Le fer a pour effet d'agrandir la fenêtre de teneur en aluminium pour laquelle le bon compromis de propriétés est respecté. Autrement dit, les propriétés de ductilité et de résistance mécanique demeurent constantes sur un plus large intervalle de teneur en aluminium, rendant ainsi moins délicate la fabrication des alliages pour obtenir les propriétés voulues.

[0013] Les alliages TiAl contenant du fer se singularisent d'une autre manière. Alors que la quasi-totalité des alliages TiAl à l'état coulé ne se déforment plastiquement qu'à des températures supérieures à 800 °C, les nuances contenant

du fer peuvent se déformer plastiquement à plus basse température. La température de transition fragile-ductile est en effet très brutale pour tous les alliages TiAl qui peuvent donc être classés en fonction de cette caractéristique. Un grand nombre d'additifs élémentaires se sont avérés inefficaces dans le passé pour améliorer la ductilité à des températures inférieures à 800 °C. Or, il a été constaté que l'addition conjointe de fer et de zirconium rend les alliages TiAl encore plus ductiles à 800 °C. L'avantage qui en est alors retiré est de pouvoir les fabriquer en recourant à des procédés de mise en forme traditionnels utilisant des températures compatibles avec les outils courants.

[0014] Le seul effet pénalisant du fer qui a été constaté est une diminution de la tenue au fluage, qui peut conduire à limiter l'addition de fer à des quantités faibles (autour de 1 %). L'utilisation du silicium dans la présente invention peut compenser cet effet en procurant un gain extrêmement rapide sur la tenue au fluage, ce qui permet de limiter sa concentration à 0,5 %. En effet des teneurs en silicium supérieures sont déconseillées car elles provoquent la précipitation de siliciures qui sont connus pour être préjudiciables pour la ductilité.

[0015] En ce qui concerne le zirconium, il a été constaté qu'une teneur élevée (5 %) avait pour effet de repousser la transition fragile-ductile vers les hautes températures et donc de contrecarrer l'effet bénéfique du fer. Par conséquent, la teneur en zirconium à utiliser doit être nettement inférieure à 5 %. Il est aussi préférable de limiter la teneur en zirconium pour des raisons de masse volumique. Enfin, les propriétés macroscopiques de TiAl peuvent être affectées en présence de zirconium en raison d'effets stériques qui prédominent sur les effets électroniques. Les travaux réalisés par les inventeurs ont permis de vérifier qu'il n'était pas souhaitable d'incorporer plus de 2 à 3 % de zirconium pour conserver un compromis acceptable résistance-ductilité.

[0016] Une addition réduite de molybdène (1 %) conjointement avec les éléments fer et zirconium permet d'obtenir un gain supplémentaire de ductilité à 800 °C, ce qui était le résultat recherché. Cependant, une teneur plus élevée n'est pas souhaitable car cet élément provoque une augmentation de la résistance mécanique à chaud, ce qui nécessite alors l'emploi d'une force plus élevée de la presse pour le déformer. Il faut aussi retenir que la tenue au fluage s'en trouve également améliorée par rapport aux alliages ne contenant pas cette addition de molybdène, effet qu'il sera possible de moduler par l'addition conjointe de Mo et de Si.

[0017] Les alliages selon l'invention répondent à l'état coulé aux exigences de grande ductilité à chaud permettant leur mise en forme par forgeage anisotherme.

[0018] Les alliages décrits dans les exemples ci-après ont été fabriqués en utilisant la fusion à arc sous vide. Les lingotins ont ensuite subi un compactage isostatique à 1250 °C destiné à la fermeture des porosités et retassures. La caractérisation comparative des alliages a eu lieu après compactage et traitement thermique. Le traitement thermique comprend une mise en solution de 4 heures à 1250 °C suivie d'un refroidissement du four et d'un recuit de détensionnement de 4 heures à 900 °C. Ce traitement a pour but de générer deux types de structures suivant la concentration en aluminium. Il permet de stabiliser la structure lamellaire biphasée $\gamma+\alpha_2$ (TiAl+Ti₃Al) pour les nuances les plus riches en titane et de stabiliser la structure duplex composée de grains lamellaires et de grains monolithiques de phase γ (TiAl) pour les nuances les plus riches en aluminium. Cette structure biphasée γ/α_2 qui est bénéfique pour la ductilité ne peut toutefois pas être obtenue pour des concentrations en aluminium supérieures à 49 %, l'alliage demeurant alors monophasé γ même après traitement thermique. Ce traitement permet également une redistribution plus uniforme dans l'ensemble de la structure de certains éléments tels que le zirconium qui peuvent avoir tendance à ségréger dans les dernières zones liquides au cours de la solidification.

[0019] Les alliages selon l'invention comportent d'une part une addition de zirconium, et d'autre part des additions d'éléments W, Mo, Fe et Cr qui sont connus comme éléments β -gènes, en ce sens qu'ils stabilisent la formation de la phase β . La ductilité à chaud est déterminée par les propriétés de traction à 800 °C. Ces alliages devant conserver une ductilité à froid suffisante pour permettre l'usinage et la manutention des pièces, les propriétés de traction à 20 °C ont également été déterminées.

[0020] L'invention est illustrée ci-après par la description d'essais portant sur divers alliages, pour chacun desquels sont indiqués successivement un numéro d'identification, la composition en atomes et la composition en masse.

[0021] Une première série d'essais a pour but de tester l'association d'éléments durcissants (W, Mo) et d'un élément ductilisant (Zr). On prépare des alliages contenant soit 2 % W, soit 1 % W + 1 % Mo, avec pour chacune de ces combinaisons deux valeurs de Al + Mo, la teneur en aluminium étant choisie ainsi légèrement plus faible en présence de molybdène en raison du plus faible pouvoir β -gène du molybdène par rapport à celui du tungstène.

1029	Ti-45Al-2W-2Zr	(Ti-28,9Al-8,7W-4,3Zr)
1017	Ti-48Al-2W-2Zr	(Ti-30,4Al-8,8W-4,4Zr)
1027	Ti-44Al-1W-1Mo-2Zr	(Ti-28,7Al-4,4W-4,4Zr-2,3Mo)
1028	Ti-47Al-1W-1Mo-2Zr	(Ti-31,1Al-4,5W-4,5Zr-2,3Mo)

[0022] Les résultats de traction à 20 et 800 °C révèlent que l'introduction des éléments durcissants est fortement pénalisante pour la ductilité puisque les allongements à 20 °C et à 800 °C ne dépassent pas 1,2 % et 2,9 % respec-

EP 1 584 697 A2

tivement (tableau 1). Le molybdène apparaît en tout cas plus bénéfique que le tungstène pour cette propriété. Quant au durcissement évalué à partir de la limite d'élasticité, il est certes appréciable avec en particulier l'ajout de molybdène, mais ne justifie pas de sacrifier autant la ductilité. En résumé, la substitution de 1 Mo à 1 W apparaît favorable pour le compromis résistance-ductilité à 20 et 800 °C.

Tableau 1:

Caractéristiques de traction des alliages Ti-45Al-2W-2Zr (1029), Ti-48Al-2W-2Zr (1017), Ti-44Al-1W-1Mo-2Zr (1027) et Ti-47Al-1W-1Mo-2Zr (1028)				
Alliage	T (°C)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	A (%)
1029	20	545	594	0,40
	800	430	516	1,20
1017	20	431	509	0,76
	800	390	458	0,98
1027	20	603	640	0,36
	800	472	569	1,96
1028	20	500	626	1,21
	800	462	588	2,88

[0023] La deuxième série de nuances se caractérise par les compositions suivantes:

1031	Ti-45Al-2W-2Cr-1Zr	(Ti-29,1Al-8,8W-2,5Cr-2,2Zr)
1032	Ti-47Al-2W-2Cr-1Zr	(Ti-30,7Al-8,9W-2,5Cr-2,2Zr)
1033	Ti-46Al-1Fe-1W-1Zr	(Ti-30,5Al-1,4Fe-4,6W-2,3Zr)
1034	Ti-48Al-1Fe-1W-1Zr	(Ti-32,6Al-1,4Fe-4,6W-2,3Zr)

[0024] Cette série a pour but de tester l'association d'un seul élément durcissant (W) et de plusieurs éléments ductilisants (Cr, Fe, Zr), ce qui a conduit à réduire à 1 % la teneur en zirconium (tableau 2). Les résultats de ductilité révèlent que les allongements ne dépassent pas 1 % à 20 °C. Le tungstène apparaît clairement comme responsable de cette fragilité à basse température, ce qui confirme les résultats de la première série. D'autre part, une réduction à 1 % de la teneur en élément durcissant (W) se traduit conformément par un adoucissement. Il est à remarquer que les deux nuances contenant du fer se caractérisent par la même ductilité à 20 °C en dépit de la différence de teneur en aluminium, un comportement qui tranche par rapport aux autres couples de nuances. Un autre point intéressant concerne les allongements à 800 °C qui atteignent près de 28 % pour l'alliage Ti-48Al-1W-1Fe-1Zr, mettant manifestement en évidence l'effet bénéfique du fer sur la ductilité à chaud.

Tableau 2:

Caractéristiques de traction des alliages Ti-45Al-2W-2Cr-1Zr (1031), Ti-47Al-2W-2Cr-1Zr (1032), Ti-46Al-1W-1Fe-1Zr (1033) et Ti-48Al-1W-1Fe-1Zr (1034)				
Alliage	T (°C)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	A (%)
1031	20	522	570	0,41
	800	418	511	3,62
1032	20	498	532	0,35
	800	422	520	1,72
1033	20	474	574	0,87
	800	390	456	3,80
1034	20	357	431	0,84
	800	338	440	27,52

[0025] La figure unique représente, pour les alliages des deux séries précédentes, la limite d'élasticité et l'allongement à rupture à 20 °C en fonction de la teneur en aluminium. Les points correspondant à chaque propriété sont situés approximativement sur une droite. Il se dégage ainsi clairement une relation inverse entre la ductilité et la limite d'élasticité. L'augmentation de la ductilité et la diminution de la limite d'élasticité telles qu'elles sont observées sur les compositions plus riches en aluminium sont liées à deux changements microstructuraux. La nuance plus riche en aluminium possède tout d'abord une fraction volumique de phase γ monolithique plus élevée (et corrélativement une fraction lamellaire plus basse); or, il est connu que les structures duplex sont plus ductiles et moins résistantes que les structures entièrement lamellaires. De plus, cette nuance est moins riche en phase β . La nuance Ti-48Al-1Fe-1W-1Zr est majoritairement composée de phase γ monolithique et la fraction volumique trop faible de lamelles ne permet plus de fractionner la taille de grains, ce qui explique le niveau de ductilité légèrement plus réduit à température ambiante que pour d'autres additions. En contrepartie, l'incorporation de fer produit un effet particulier puisqu'elle permet d'atteindre un certain niveau de ductilité pour le traitement thermique standard, en l'occurrence 0,8 % pour l'alliage Ti-46Al-1Fe-1W-1Zr, ce qui n'est pas le cas pour les autres nuances riches en titane. À l'état standard, la nuance Ti-46Al-1Fe-1W-1Zr se caractérise par la présence d'une quantité élevée de phase β alors que la nuance Ti-48Al-1Fe-1W-1Zr présente une majorité de phase γ monolithique et une minorité de phase β .

[0026] La troisième série de nuances se caractérise par des ajouts de fer, de zirconium et de molybdène. Deux nuances correspondent à une substitution de Mo à W par rapport aux nuances préférées ci-dessus. Les deux autres nuances se caractérisent par l'absence de molybdène:

1144	Ti-46Al-1Fe-1Zr-0,2Si	(Ti-32Al-1,4Fe-2,4Zr-0,2Si)
1145	Ti-47Al-1Fe-1Zr-0,2Si	(Ti-32,9Al-1,4Fe-2,4Zr-0,2Si)
1147	Ti-46Al-1Fe-1Mo-1Zr-0,2Si	(Ti-31,6Al-1,4Fe-2,5Mo-2,3Zr-0,2Si)
1146	Ti-47Al-1Fe-1Mo-1Zr-0,2Si	(Ti-32,5Al-1,4Fe-2,5Mo-2,3Zr-0,2Si)

[0027] L'ajout de silicium est effectué pour contrebalancer l'éventuelle faiblesse apportée par le fer vis-à-vis de la tenue au fluage. La comparaison des résultats avec les précédentes séries révèle que la substitution individuelle du fer ou du molybdène au tungstène diminue la fragilité des alliages. Le niveau de ductilité à froid est tout à fait satisfaisant avec des allongements compris entre 1 et 2 % (tableau 3). Les résultats antérieurs sont confirmés en ce sens qu'en présence de fer, la ductilité est relativement peu sensible à la teneur en Al. L'effet bénéfique du molybdène sur la ductilité à chaud est également confirmé, alors que cet effet était bien moins visible sur les alliages de la première série en présence de tungstène. Il apparaît donc un effet de synergie entre les éléments fer et molybdène quant à leur action sur la ductilité à chaud. Ainsi, la comparaison des quatre dernières nuances révèle que l'ajout de molybdène permet d'augmenter les allongements à 800 °C de 27 % en moyenne à 73 % en moyenne. Un tel niveau de ductilité à 800 °C permet d'escompter une bonne déformabilité au cours du forgeage ultérieur, d'autant que celui-ci est réalisé en débutant à une température plus élevée, typiquement 1000 °C. Un examen du faciès de rupture des éprouvettes s'allongeant de 73 % en moyenne révèle que la structure est composée de nombreux petits grains lamellaires, sans recristallisation dynamique sous forme de grains monolithiques, ce qui laisse prévoir un bon comportement en fluage.

Tableau 3:

Caractéristiques de traction des alliages Ti-46Al-1Fe-1Zr-0,2Si (1144), Ti-47Al-1Fe-1Zr-0,2Si (1145), Ti-46Al-1Fe-1Mo-1Zr-0,2Si (1147) et Ti-47Al-1Fe-1Mo-1Zr-0,2Si (1146)				
Alliage	T (°C)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	A (%)
1144	20	442	539	1,26
	800	396	480	21,0
1145	20	391	486	1,14
	800	357	445	33,0
1147	20	438	565	1,23
	800	380	451	60,0
1146	20	371	506	1,40
	800	354	438	76,0

[0028] Des essais de fluage ont également été réalisés à 750 °C sous 200 MPa sur la plupart des alliages des trois séries précédentes afin de les tester dans les conditions les plus proches de l'utilisation dans des turbomachines

aéronautiques.

[0029] Les résultats de fluage de la première série reflètent de façon plus marquée la forte influence de la teneur en aluminium et indirectement de la microstructure sur la tenue au fluage que l'effet de la substitution de Mo à W (tableau 4). En effet, la comparaison des nuances TiAl+2W+2Zr ayant des teneurs en aluminium différentes (1017 et 1029) révèle la forte sensibilité de la tenue au fluage vis-à-vis de l'aluminium. Il existe presque un ordre de grandeur entre les vitesses de fluage secondaires à l'avantage de la nuance riche en aluminium. Pour les nuances à faible teneur en aluminium, la phase β résiduelle est assez grossière. En revanche, pour les nuances à forte teneur en aluminium, la phase β est plus réduite et se caractérise par une précipitation dense dans les lamelles. Ces précipités agissent comme des obstacles à la déformation et permettent d'expliquer l'amélioration inattendue en fluage. Pour la différence de propriétés observée entre 1017 et 1028, il est difficile alors d'incriminer la présence non bénéfique du molybdène car la teneur en aluminium est légèrement inférieure pour la nuance contenant du molybdène. D'une façon générale, les propriétés de fluage obtenues sur ces quatre nuances sont excellentes par rapport aux alliages connus à base de TiAl.

Tableau 4:

Caractéristiques de fluage des alliages Ti-45Al-2W-2Zr (1029), Ti-48Al-2W-2Zr (1017), Ti-44Al-1W-1Mo-2Zr (1027) et Ti-47Al-1W-1Mo-2Zr (1028)					
Alliage	Durée (h)		Primaire		Secondaire $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)
	A = 0,2 %	A = 0,5 %	A (%)	Durée (h)	
1029	33	153	0,13	12	5,0.10 ⁻⁹
1017	392	1160	-	-	0,9. 10 ⁻⁹
1027	18	129	0,32	46	3,7.10 ⁻⁹
1028	85	574	0,15	52	0,67.10 ⁻⁹

[0030] Les résultats de fluage obtenus sur trois des nuances des deuxième et troisième séries révèlent l'effet néfaste pour la résistance au fluage des éléments ductilisants chrome et fer (tableau 5). Toutefois, l'ajout de 0,2 % de silicium pour une nuance de la troisième série permet de diminuer nettement la vitesse de fluage secondaire, pour atteindre un niveau comparable à celui de la première série.

Tableau 5:

Caractéristiques de fluage des alliages Ti-45Al-2W-2Cr-1Zr (1031), Ti-46Al-1W-1Fe-1Zr (1033) et Ti-46Al-1Fe-1Zr-0,2Si (1144)					
Alliage	Durée (h)		Primaire		Secondaire $\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)
	A = 0,2 %	A = 0,5 %	A (%)	Durée (h)	
1031	17	77	0,22	22	11.10 ⁻⁹
1033	2,5	32	0,38	20	26.10 ⁻⁹
1144	30	250	0,50	250	2,5.10 ⁻⁹

[0031] Indépendamment de la présente invention, les alliages utilisés dans les turbomachines aéronautiques doivent également avoir une bonne résistance à l'oxydation. Dans cette optique, la résistance à l'oxydation des alliages préférés peut, si nécessaire, être améliorée par l'introduction d'une certaine quantité de niobium, élément connu pour son action favorable sur cette propriété.

Revendications

- Alliage constitué d'aluminium de titane dans lequel une fraction minoritaire des atomes d'aluminium et de titane est remplacée par d'autres atomes, **caractérisé en ce qu'il** contient en atomes 44 à 49 % d'aluminium, 0,5 à 3 % de zirconium, 0,5 à 2 % de fer, 0,5 à 2 % de molybdène, 0,2 à 0,5 % de silicium et 0 à 3 % de niobium.
- Alliage selon la revendication 1, qui contient en atomes 45 à 48 % d'aluminium, environ 1 % de zirconium, environ

EP 1 584 697 A2

1 % de fer, environ 1 % de molybdène et environ 0,2 % de silicium.

3. Alliage selon la revendication 2, qui contient en atomes environ 46 % d'aluminium.

5 4. Alliage selon la revendication 2, qui contient en atomes environ 47 % d'aluminium.

5. Alliage selon l'une des revendications précédentes, qui est composé exclusivement d'aluminium, de titane, de zirconium, de fer, de molybdène, de silicium et le cas échéant de niobium, sous réserve d'impuretés éventuelles.

10 6. Procédé de traitement thermique d'un alliage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on met en solution ses éléments constitutifs par chauffage à une température comprise entre 1200 °C et 1350 °C, on refroidit à la température ambiante et on recuit à une température comprise entre 800 °C et 950 °C.

15 7. Procédé selon la revendication 4, dans lequel la mise en solution est effectuée à 1250 °C environ pendant 4 heures environ et le recuit à 900 °C environ pendant 4 heures environ.

20

25

30

35

40

45

50

55

