



(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2014/09/26
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2015/04/02
(45) Date de délivrance/Issue Date: 2021/07/20
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2016/03/03
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2014/000216
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2015/044538
(30) Priorité/Priority: 2013/09/30 (FR1302273)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *C22C 21/12* (2006.01),
C22C 21/14 (2006.01), *C22C 21/16* (2006.01),
C22F 1/04 (2006.01), *C22F 1/057* (2006.01)
(72) Inventeur/Inventor:
BES, BERNARD, FR
(73) Propriétaire/Owner:
CONSTELLIUM ISSOIRE, FR
(74) Agent: NORTON ROSE FULBRIGHT CANADA
LLP/S.E.N.C.R.L., S.R.L.

(54) Titre : TOLE D'INTRADOS A PROPRIETES DE TOLERANCE AUX DOMMAGES AMELIOREES
(54) Title: UNDERWING SHEET METAL WITH IMPROVED DAMAGE TOLERANCE PROPERTIES

(57) **Abrégé/Abstract:**

L'invention concerne un produit laminé à l'état T351, dont l'épaisseur est comprise entre 15 et 50 mm, en alliage d'aluminium de composition, en % en poids, Cu : 3,85 - 4,15; Mg : 0,95 - 1,25; Mn : 0,45 - 0,57; Zr : 0,09 - 0,16; Ti : 0,005 - 0,1; Fe : < 0,070; Si : < 0,060; avec Cu + Mg ≤ 5,15; autres éléments inférieurs 0,05 chacun et inférieurs à 0,15 au total, reste aluminium. Dans le procédé de fabrication d'un produit laminé selon une l'invention, on élabore et on coule en ajoutant un affinant de type AlTiB ou AlTiC un alliage l'invention pour obtenir une plaque de laminage, optionnellement on homogénéise ladite plaque de laminage à une température comprise entre 480°C et 510°C, on lamine à chaud ladite plaque de laminage optionnellement homogénéisée pour obtenir une tôle d'épaisseur e comprise entre 15 et 50 mm, on met en solution ladite tôle à une température comprise entre 480 et 505 °C pendant une durée t exprimée en heures telle que $t \geq e / 7$, on trempe ladite tôle ainsi mise en solution, on réalise une traction à froid de ladite tôle ainsi trempée avec une déformation comprise entre 1,5 et 3%, on réalise un vieillissement à température ambiante. Les tôles selon l'invention présentent notamment un compromis avantageux entre la résistance mécanique statique, la ténacité et la propagation des fissures en fatigue sous spectre et sont avantageuses pour la fabrication d'éléments d'intrados d'aile d'avion.

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international(43) Date de la publication internationale
2 avril 2015 (02.04.2015)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2015/044538 A1

(51) Classification internationale des brevets :

C22C 21/12 (2006.01) C22F 1/04 (2006.01)
C22C 21/14 (2006.01) C22F 1/057 (2006.01)
C22C 21/16 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR2014/000216

(22) Date de dépôt international :

26 septembre 2014 (26.09.2014)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

1302273 30 septembre 2013 (30.09.2013) FR

(71) Déposant : CONSTELLIUM FRANCE [FR/FR]; 40-44,
rue Washington, F-75008 Paris (FR).(72) Inventeur : BES, Bernard; 34, Avenue Louis Armand, F-
38180 Seyssins (FR).(74) Mandataire : BUTRUILLE, Jean-Rémi; Constellium
CRV, 725, Rue Aristide Bergès, CS10027, F-38341 Vo-
repe (FR).(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU,
TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU,
LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,
SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv))

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))
— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des
revendications, sera republiée si des modifications sont re-
çues (règle 48.2.h))

(54) Title : UNDERWING SHEET METAL WITH IMPROVED DAMAGE TOLERANCE PROPERTIES

(54) Titre : TÔLE D'INTRADOS À PROPRIÉTÉS DE TOLÉRANCE AUX DOMMAGES AMÉLIORÉES

(57) Abstract : The invention relates to a rolled product with state T351, having thickness of between 15 and 50 mm, made from aluminium alloy having the following composition, in % by weight, Cu: 3.85 - 4.15; Mg: 0.95 - 1.25; Mn: 0.45 - 0.57; Zr: 0.09 - 0.16; Ti: 0.005 - 0.1; Fe: < 0.070; Si: < 0.060; with Cu + Mg ≤ 5.15; other lesser elements 0.05 each and less than 0.15 in total, the remainder being aluminium. In the manufacturing method for a rolled product according to the invention, an alloy according to the invention is prepared and poured by adding a refiner of type AlTiB or AlTiC to obtain a rolling plate, optionally, said rolling plate is homogenised at a temperature between 480 °C and 510 °C, said optionally homogenised rolling plate being hot rolled to obtain a sheet of thickness e, between 15 and 50 mm, said sheet is solution heat-treated at a temperature between 480 and 505 °C for a period t, expressed in hours, such that $t \geq e / 7$, said sheet metal solution heat-treated in this way is then quenched, said sheet metal is cold drawn and thus hardened with a deformation of between 1.5 and 3% and aged at room temperature. The metal sheets according to the invention present, in particular, an advantageous compromise between static mechanical strength, toughness and the propagation of fatigue cracks under inspection and are advantageous for the manufacture of underwing elements of an aircraft wing.(57) Abrégé : L'invention concerne un produit laminé à l'état T351, dont l'épaisseur est comprise entre 15 et 50 mm, en alliage d'aluminium de composition, en % en poids, Cu : 3,85 - 4,15; Mg : 0,95 - 1,25; Mn : 0,45 - 0,57; Zr : 0,09 - 0,16; Ti : 0,005 - 0,1; Fe : < 0,070; Si : < 0,060; avec Cu + Mg ≤ 5,15; autres éléments inférieurs 0,05 chacun et inférieurs à 0,15 au total, reste aluminium. Dans le procédé de fabrication d'un produit laminé selon l'invention, on élabore et on coule en ajoutant un affinant de type AlTiB ou AlTiC un alliage l'invention pour obtenir une plaque de laminage, optionnellement on homogénéise ladite plaque de laminage à une température comprise entre 480°C et 510°C, on lamine à chaud ladite plaque de laminage optionnellement homogénéisée pour obtenir une tôle d'épaisseur e comprise entre 15 et 50 mm, on met en solution ladite tôle à une température comprise entre 480 et 505 °C pendant une durée t exprimée en heures telle que $t \geq e / 7$, on trempe ladite tôle ainsi mise en solution, on réalise une traction à froid de ladite tôle ainsi trempée avec une déformation comprise entre 1,5 et 3%, on réalise un vieillissement à température ambiante. Les tôles selon l'invention

[Suite sur la page suivante]

WO 2015/044538 A1

WO 2015/044538 A1



présentent notamment un compromis avantageux entre la résistance mécanique statique, la ténacité et la propagation des fissures en fatigue sous spectre et sont avantageuses pour la fabrication d'éléments d'intrados d'aile d'avion.

Tôle d'intrados à propriétés de tolérance aux dommages améliorées

Domaine de l'invention

- 5 L'invention concerne les produits laminés en alliage aluminium cuivre magnésium plus particulièrement, de tels produits, leurs procédés de fabrication et d'utilisation, destinés notamment à la construction aéronautique et aérospatiale.

Etat de la technique

10

L'augmentation sensible du prix des carburants a récemment conduit les avionneurs à proposer de nouveaux modèles présentant une consommation réduite.

- Notamment, de nouveaux avions monocouloir avec une motorisation améliorée ont été proposés. Cependant, les nouveaux moteurs utilisés étant plus lourds et volumineux les
15 avionneurs sont confrontés à de nouvelles contraintes mécaniques sur les ailes. De plus il est souhaité par les compagnies aériennes de pouvoir davantage espacer les révisions complètes des structures et pour cela il est nécessaire d'améliorer encore les propriétés en fatigue des matériaux utilisés, en particulier pour la partie inférieure des ailes (intrados) qui est sollicitée en traction lors du vol.

- 20 L'alliage 2024 à l'état T3 a été un matériau standard pour la réalisation d'intrados depuis de nombreuses années en raison de sa tolérance aux dommages élevée. Des produits ayant une tolérance aux dommages équivalente mais une résistance mécanique statique plus élevée ont été recherchés.

- L'alliage 2324 à l'état T39 permet d'obtenir une résistance mécanique plus élevée tout en
25 conservant une ténacité similaire à celle de l'alliage 2024 à l'état T3, notamment en réalisant un laminage à froid d'environ 10%.

- Les brevets US 5863359 et US5865914 décrivent un alliage de composition (en % en poids)
Cu : 3,6 – 4,0, Mg : 1,0 – 1,6, Mn : 0,3 – 0,7, Zr : 0,05 – 0,25 pour la réalisation d'éléments
d'intrados. Typiquement le produit est laminé à froid d'environ 9% et détensionné avec un
30 allongement permanent d'environ 1% et présente les propriétés suivantes : $R_{p0,2}$ (TL) d'au moins 414 MPa et K_{IC} (L-T) d'au moins 42 MPa $\sqrt{m}$.

Le brevet EP1026270 décrit un alliage de composition (en % en poids) Fe < 0,15, Si < 0,15,
Cu : 3,8 – 4,4, Mg : 1 – 1,5, Mn : 0,5 – 0,8, Zr : 0,08 – 0,15. Cet alliage est transformé de

façon à ce que les produits laminés, filés ou forgés obtenus présentent un rapport $R_m(L)/R_{0,2}(L)$ supérieur à 1,25.

Le brevet US 6,325,869 décrit un produit extrudé essentiellement non recristallisé en alliage de composition (en % en poids) Fe < 0,1, Si < 0,1, Cu : 3,6 – 4,2, Mg : 1,0 – 1,6, Mn : 0,3 – 0,8, Zr : 0,05 – 0,25.

La demande de brevet FR 2 843 755 décrit un alliage Al-Cu comprenant (en % en poids) Cu : 3,8 – 4,7, Mg : 1,0 – 1,6, Zr : 0,06 – 0,18, Mn : >0 – 0,5, Cr < 0,15, Fe ≤ 0,15, Si ≤ 0,15, avec de préférence Mn compris dans un intervalle de 0,20 à 0,45 % en poids ou mieux encore dans un intervalle allant de 0,25 à 0,30 % en poids.

10 Les produits nécessitant un écrouissage à froid important, typiquement un laminage à froid d'environ 9%, ont l'inconvénient de présenter une différence entre R_m et $R_{0,2}$ faible ce qui entraîne une formabilité à froid plus faible, une moins bonne tenue en propagation de fissures en fatigue sous spectre de chargement à amplitude variable, représentatif du cycle de vie d'un avion (« fatigue sous spectre ») et un taux plus élevé de contraintes résiduelles.

15 Les tôles connues en alliage 2XXX utilisées à l'état T351 c'est-à-dire mis en solution, écrouis avec 1,5 à 3 % de déformation permanent et mûris, c'est-à-dire vieillis à température ambiante jusqu'à obtention d'un état pratiquement stable, ne permettent pas cependant d'atteindre simultanément une résistance mécanique statique et des propriétés de fatigue sous spectre suffisantes.

20 On a également utilisé l'alliage 2419 à l'état T8 pour l'intrados d'avions militaires.

On connaît par ailleurs l'utilisation d'alliages 7XXX pour la réalisation d'intrados d'aile d'avion. Les alliages 7178 à l'état T6 et 7075 à l'état T76 ont été utilisés pour ces éléments dans le passé. On a également proposé l'alliage 7475 à l'état T73 ou l'alliage 7150 à l'état T77.

25 Le brevet US 5865911 décrit un alliage comprenant (en % en poids) Zn : 5,2 -6,8 %, Cu : 1,7 – 2,4 %, Mg : 1,6 – 2,2 %, Zr : 0,03 – 0,3% pour la réalisation d'intrados d'aile d'avion.

Le problème que cherche à résoudre l'invention est d'améliorer les propriétés des produits en alliage AlCuMg, notamment en ce qui concerne le compromis entre la résistance mécanique statique, la ténacité, la propagation des fissures en fatigue sous spectre, la formabilité et le
30 taux de contraintes résiduelles.

Objet de l'invention

Un premier objet de l'invention est un produit laminé à l'état T351, dont l'épaisseur est comprise entre 15 et 50 mm, en alliage d'aluminium de composition, comprenant en % en poids,

Cu : 3,85 – 4,15

Mg : 0,95 – 1,25

Mn : 0,45 – 0,57

Zr : 0,09 – 0,16

10 Ti : 0,005 – 0,1

Fe : < 0,070

Si : < 0,060

avec $Cu + Mg \leq 5,15$

autres éléments inférieurs 0,05 chacun et inférieurs à 0,15 au total, reste aluminium.

15

Un deuxième objet de l'invention est un procédé de fabrication d'un produit laminé selon l'invention dans lequel

- on élabore et on coule en ajoutant un affinant de type AlTiB ou AlTiC un alliage selon la composition de l'invention pour obtenir une plaque de laminage,

20 - optionnellement on homogénéise ladite plaque de laminage à une température comprise entre 480°C et 510°C,

- on lamine à chaud ladite plaque de laminage optionnellement homogénéisée pour obtenir une tôle d'épaisseur e comprise entre 15 et 50 mm,

25 - on met en solution ladite tôle à une température comprise entre 480 et 505 °C pendant une durée t exprimée en heures telle que $t \geq e / 7$,

- on trempe ladite tôle ainsi mise en solution,

- on réalise une traction à froid de ladite tôle ainsi trempée avec une déformation comprise entre 1,5 et 3%,

- on réalise un vieillissement à température ambiante.

30

Encore un autre objet de l'invention est un élément d'intrados d'aile d'avion comprenant une tôle selon l'invention.

Description de l'invention

Sauf mention contraire, toutes les indications concernant la composition chimique des alliages sont exprimées comme un pourcentage en poids basé sur le poids total de l'alliage.

5 L'expression 1,4 Cu signifie que la teneur en cuivre exprimée en % en poids est multipliée par 1,4. La désignation des alliages se fait en conformité avec les règlements de The Aluminium Association, connus de l'homme du métier. Sauf mention contraire les définitions des états métallurgiques indiquées dans la norme européenne EN 515 s'appliquent.

10 Les caractéristiques mécaniques statiques en traction, en d'autres termes la résistance à la rupture R_m , la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2% d'allongement $R_{p0,2}$, et l'allongement à la rupture A%, sont déterminés par un essai de traction selon la norme NF EN ISO 6892-1, le prélèvement et le sens de l'essai étant définis par la norme EN 485-1. Dans le cadre de l'invention, les caractéristiques mécaniques sont mesurées à mi-épaisseur des tôles. Sauf mention contraire, les définitions de la norme EN 12258 s'appliquent. La ténacité est mesurée
15 conformément à la norme ASTM E399.

Les présents inventeurs ont constaté qu'il est possible d'améliorer significativement le compromis entre la résistance mécanique statique, la propagation des fissures en fatigue sous spectre, la formabilité et le taux de contraintes résiduelles grâce à des produits laminés à l'état
20 T351 en alliage 2XXX de composition soigneusement sélectionnée. L'invention concerne des tôles épaisses dont l'épaisseur est comprise entre 15 et 50 mm et de préférence entre 20 et 40 mm. Les présents inventeurs ont en particulier constaté que en sélectionnant la teneur en cuivre entre 3,85 et 4,15 % en poids et de préférence entre 3,90 et 4,10 % en poids, la teneur en magnésium entre 0,95 et 1,25 % en poids, de préférence entre 0,96 et 1,15 % en poids et de
25 manière préférée entre 0,98 et 1,10 % en poids, avec la condition supplémentaire que $Cu + Mg \leq 5,15$ et de préférence $Cu + Mg \leq 5,05$ il est possible d'améliorer les propriétés de fatigue sous spectre tout en maintenant une résistance mécanique statique suffisante. La teneur en manganèse de l'alliage selon l'invention est comprise entre 0,45 et 0,57 % en poids et de préférence entre 0,48 et 0,55 % en poids. Dans un mode de réalisation de l'invention la
30 teneur en manganèse est au moins 0,51 % en poids et de préférence au moins 0,54 % en poids. La teneur en titane de l'alliage selon l'invention est comprise entre 0,005 et 0,1 % en poids et de préférence entre 0,010 et 0,05 % en poids. La teneur en zirconium de l'alliage selon l'invention est comprise entre 0,09 et 0,16 % en poids et de préférence entre 0,10 et 0,15 % en poids. De manière surprenante il est plus efficace de sélectionner selon l'invention

les teneurs en cuivre, magnésium, manganèse, titane et zirconium pour améliorer le compromis que de diminuer la teneur en fer et en silicium. Ainsi la teneur en silicium est inférieure à 0,060 % en poids et de préférence inférieure à 0,040 % en poids mais une teneur inférieure à 0,020 % en poids n'est pas nécessaire. Dans un mode de réalisation de l'invention on tolère une teneur en silicium d'au moins 0,020% en poids ce qui permet de diminuer le coût de l'alliage. De même la teneur en fer est inférieure à 0,070 % en poids et de préférence inférieure à 0,060 % en poids mais une teneur inférieure à 0,030 % en poids n'est pas nécessaire. Dans un mode de réalisation de l'invention on tolère une teneur en fer d'au moins 0,030% en poids ce qui permet de diminuer le coût de l'alliage.

10 Les autres éléments ont une teneur inférieure à 0,05 % en poids chacun, et de préférence inférieure à 0,03 % chacun et 0,15 % en poids au total et de préférence inférieure à 0,10 % en poids au total. Le reste est de l'aluminium.

Les produits selon l'invention sont obtenus par un procédé dans lequel tout d'abord on élabore et on coule en ajoutant un affinant de type AlTiB ou AlTiC un alliage de composition selon l'invention pour obtenir une plaque de laminage.

15 Par affinant AlTiB on entend dans le cadre de la présente invention un alliage d'aluminium comprenant entre 1 et 10% de titane, entre 0,5 et 5% de bore, les produits typiquement utilisés, connus sous la référence AT3B et AT5B comprennent respectivement 3% et 5% de titane et 1% de bore. Par affinant AlTiC on entend dans le cadre de la présente invention un alliage d'aluminium comprenant entre 1 et 10% de titane et entre 0,01 et 1% de carbone, les produits typiquement utilisés, connus sous la référence AT3C0,15 et AT6C0,02 comprennent respectivement 3% de titane et 0,15 % de carbone et 6% de titane et 0,02 % de carbone. Ces produits peuvent être ajoutés dans le four ou dans une goulotte à l'aide d'un fil lors de la coulée. Les présents inventeurs ont constaté que l'ajout d'un affinant de type AlTiC est
20
25 avantageux car il permet d'obtenir des produits ayant des propriétés de fatigue sous spectre encore améliorées. Optionnellement on homogénéise ladite plaque de laminage à une température comprise entre 480°C et 510°C préféré entre 490 et 508°C.

On lamine à chaud la plaque de laminage optionnellement homogénéisée pour obtenir une tôle d'épaisseur e , exprimée en mm, comprise entre 15 et 50 mm. Avantagusement la température moyenne lors du laminage à chaud jusqu'à l'épaisseur 60 mm, c'est-à-dire la moyenne des températures de chaque passe de laminage à chaud jusqu'à l'épaisseur 60 mm, est au moins 450 °C. La température de sortie du laminage à chaud peut également influencer les propriétés mécaniques, avantagusement la température de sortie du laminage à chaud est au moins 410 °C.

- On met en solution ladite tôle à une température comprise entre 480 et 505 °C pendant une durée t exprimée en heures telle que $t \geq e / 7$, où e est l'épaisseur de la tôle exprimée en mm. Ainsi pour une épaisseur de 15 mm la durée doit être au moins 2,1 h et pour une durée de 50 mm la durée doit être d'au moins 7,1 heure. Les présents inventeurs ont constaté que de
- 5 manière surprenante une durée de mise en solution trop élevée peut être néfaste pour la performance en fatigue sous spectre et/ou pour la résistance mécanique statique, alors que l'on aurait imaginé au contraire qu'elle permettait d'améliorer encore la mise en solution et donc les performances mécaniques. Avantageusement la mise en solution est réalisée à une température d'au moins 495 °C ladite durée t exprimée en heures étant telle que $t \leq e / 4,5$ et
- 10 préférentiellement $t \leq e / 5,0$ et de manière préférée $t \leq e / 5,5$ où e est l'épaisseur de la tôle exprimée en mm La tôle ainsi mise en solution est ensuite trempée, typiquement par immersion ou aspersion à l'eau froide. On réalise une traction à froid de ladite tôle ainsi trempée avec une déformation comprise entre 1,5 et 3% de déformation permanente. On réalise enfin un vieillissement à température ambiante jusqu'à l'obtention d'un état
- 15 pratiquement stable pour obtenir un état T351.
- Compte tenu des conditions de transformations utilisées, la tôle ainsi obtenue présente un rapport entre la résistance à la rupture R_m dans la direction L et la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2% d'allongement $R_{p0,2}$ dans la direction L supérieur à 1,25 et de préférence supérieur à 1,30. La limite d'élasticité conventionnelle à 0,2% d'allongement $R_{p0,2}$
- 20 dans la direction L est avantagement d'au moins 350 MPa, de préférence d'au moins 365 MPa. Les tôles obtenues par le procédé selon l'invention présentent notamment un compromis avantageux entre la résistance mécanique statique, la ténacité et la propagation des fissures en fatigue sous spectre.
- 25 Les éléments d'intrados d'aile d'avion comprenant une tôle selon l'invention sont avantageux.

Exemples

Exemple 1 : tôles d'épaisseur 35 mm

30

Dans cet exemple, des plaques de laminage ont été coulées. La composition des plaques ainsi que le type d'affinant utilisé sont donnés dans le tableau 1. Les plaques 8 à 14 ont une composition selon l'invention.

Tableau 1. Caractéristiques des plaques coulées, les compositions sont données en % en poids.

Essai	Affinant	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cu+Mg	Ti	Zr
1	AT5B	0,040	0,075	4,21	0,63	1,29	5,50	0,013	0,098
2	AT3C0,15	0,053	0,094	4,15	0,55	1,27	5,42	0,022	0,117
3	AT5B	0,023	0,029	4,08	0,57	1,16	5,24	0,021	0,106
4	AT5B	0,054	0,079	4,06	0,56	1,27	5,33	0,013	0,115
5	AT3C0,15	0,031	0,040	4,10	0,66	1,29	5,39	0,024	0,103
6	AT3C0,15	0,033	0,050	4,00	0,56	1,24	5,24	0,028	0,092
7	AT3C0,15	0,018	0,039	4,06	0,61	1,31	5,37	0,005	0,098
8	AT3C0,15	0,025	0,033	3,97	0,55	1,07	5,04	0,021	0,114
9	AT5B	0,026	0,063	4,01	0,54	1,05	5,06	0,022	0,106
10	AT5B	0,029	0,045	3,97	0,51	1,08	5,05	0,020	0,120
11	AT5B	0,026	0,063	4,01	0,54	1,05	5,06	0,022	0,106
12	AT3C0,15	0,024	0,028	4,03	0,57	1,09	5,12	0,023	0,108
13	AT3C0,15	0,025	0,033	3,97	0,55	1,07	5,04	0,021	0,114
14	AT3C0,15	0,030	0,044	3,94	0,52	0,99	4,93	0,020	0,118

- 5 Les tôles ont été laminées à chaud jusqu'à une épaisseur comprise entre 35 et 37 mm puis mises en solution à une température de 497 °C puis trempées. Toutes les tôles ont subi une traction contrôlée avec un allongement permanent de 2,2% et ont ensuite été vieillies naturellement à température ambiante pour obtenir un état T351. Les conditions de transformation sont données dans le tableau 2. Les durées de mise en solution des essais 3, 8 et 9 sont significativement plus élevées par rapport à celles des autres essais.

Tableau 2 – Conditions de transformation des plaques

Essai	Température moyenne de laminage à chaud jusqu'à l'épaisseur 60 mm (°C)	Température de sortie de laminage à chaud (°C)	Epaisseur finale (mm)	Durée de mise en solution (h)
1	442	404	36,7	6
2	449	nd	35,5	6
3	460	449	36	9,3
4	431	nd	35,5	6
5	456	421	35,6	6
6	458	420	35,6	6
7	nd	450	36	6
8	459	441	36	9,3

9	457	408	36	9,6
10	461	435	35	5,1
11	455	419	35	6,7
12	455	431	35	7
13	454	429	35	6
14	nd	452	35	5,8

nd : non disponible

On a mesuré les caractéristiques mécaniques statiques des tôles dans le sens L et TL, ainsi que la ténacité sur des éprouvettes de largeur 76 mm et d'épaisseur $B = 2$ mm, dans le sens T-L et dans le sens L-T. Les caractéristiques mécaniques statiques et la ténacité ont été mesurées à mi-épaisseur. De plus, on a mesuré la fatigue sous spectre représentative des conditions intrados d'un avion commercial selon la spécification d'un fabricant d'avion sur des éprouvettes de type CCT, d'épaisseur 12 mm, de longueur 700 mm et de largeur 200 mm ayant une entaille de 30 mm. Les éprouvettes de caractérisation de fatigue sous spectre ont été prélevées de façon à être centrées 11 mm sous la surface de la tôle. Les résultats de fatigue sous spectre ont été obtenus après une préfissuration par fatigue jusqu'à ce la fissure atteigne 40 mm. Le résultat obtenu est le nombre de vols entre 50 mm et 130 mm de propagation de fissure.

Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 3.

Tableau 3 – Caractéristiques mécaniques mesurées

Essai	R_m L (MPa)	$R_{p0,2}$ L (MPa)	A% L	R_m TL (MPa)	$R_{p0,2}$ TL (MPa)	A% TL	Fatigue sous spectre (nombre de vols)	Kq W76 L-T (MPa $\sqrt{m}$)	Kq W76 T-L (MPa $\sqrt{m}$)
1	500	383	15,6	467	331	16,6	4211		
2	509	380	15,6	475	335	16,6	4293		
3	500	379	16,3	474	336	18,3	4730	58,8	49,5
4	501	372	16,6	468	327	18,7	4940		
5	524	413	15,5	493	369	17,9	4958	58,6	47,7
6	512	398	16,8	486	350	18,7	5001	57,7	49,0
7	520	399	14,9	488	352	17,6	5157	59,7	49,8
8	502	383	16,9	478	339	19,6	5183	60,6	52,3
9	482	357	16,8	462	323	18,6	5334	59,3	51,2
10	504	390	16,3	475	345	18,7	5437	62	59
11	486	371	16,2	464	329	18,4	5459	57,0	50,2
12	503	389	16,4	474	343	19,0	5516	61	54
13	492	374	15,8	465	331	18,0	5650	58,8	56,1
14	490	376	15,8	463	333	18,6	5676	59	50

Avec la composition selon l'invention, on obtient toujours un nombre de vols d'au moins 5183. Le nombre de vols obtenu pour l'échantillon 7 est plus faible malgré une teneur en silicium et en fer très faible. Ainsi, la composition selon l'invention permet donc d'obtenir

5 une performance satisfaisante en fatigue sous spectre sans recourir à une très faible teneur en fer et en silicium, et pour les compositions hors invention en Cu, Mg et Mn une très faible teneur en fer et silicium ne permet pas d'atteindre une performance en fatigue suffisante. On constate par ailleurs, notamment en comparant les échantillons 8 et 13 ou 9 et 11, qu'une

10 durée de mise en solution trop élevée est défavorable pour la performance en fatigue sous spectre. Les meilleurs résultats en fatigue sous spectre sont obtenus avec la combinaison d'une composition selon l'invention, d'un affinage de type AlTiC et d'une durée de mise en solution inférieure ou égale à l'épaisseur divisée par 4,5.

Exemple 2 : tôles d'épaisseur 25 mm

15

Dans cet exemple, des plaques de laminage ont été coulées. La composition des plaques ainsi que le type d'affinant utilisé sont donnés dans le tableau 4.

Les plaques 17 à 19 ont une composition selon l'invention.

20 Tableau 4. Caractéristiques des plaques coulées. Les compositions sont données en % en poids.

Essai	Affinant	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cu+Mg	Ti	Zr
15	AT5B	0,035	0,075	4,11	0,61	1,24	5,35	0,016	0,093
16	AT5B	0,040	0,075	4,21	0,63	1,29	5,50	0,013	0,098
17	AT5B	0,026	0,063	4,01	0,54	1,06	5,07	0,022	0,106
18	AT5B	0,026	0,063	4,01	0,54	1,05	5,06	0,022	0,106
19	AT3C0,15	0,025	0,033	3,97	0,55	1,07	5,04	0,021	0,114

Les tôles ont été laminées à chaud jusqu'à une épaisseur de 25 mm puis mises en solution à une température de 497 °C puis trempées. Toutes les tôles ont subi une traction contrôlée avec

25 un allongement permanent de 2,2% et ont ensuite été vieilles naturellement à température ambiante pour obtenir un état T351. Les conditions de transformation sont données dans le tableau 5

Tableau 5 – Conditions de transformation des plaques

Essai	Température moyenne de laminage à chaud jusqu'à l'épaisseur 60 mm	Température de sortie de laminage à chaud	Durée de mise en solution (h)
15	423	363	6
16	436	379	6
17	453,1	427,0	6,6
18	454,6	405,0	4,2
19	453,5	420,0	5,6

On a mesuré les caractéristiques mécaniques statiques des tôles dans le sens L et TL, ainsi que la ténacité sur des éprouvettes de largeur 76 mm dans le sens T-L et dans le sens L-T. Les caractéristiques mécaniques statiques et la ténacité ont été mesurées à mi-épaisseur. De plus,

5 on a mesuré la fatigue sous spectre représentative des conditions intrados d'un avion commercial selon la spécification d'un fabricant d'avion sur des éprouvettes de type CCT, d'épaisseur 12 mm, de longueur 700 mm et de largeur 200 mm ayant une entaille de 30 mm.

Les éprouvettes de caractérisation de la fatigue sous spectre ont été prélevées de façon à être centrées à mi-épaisseur de la tôle. Les résultats de fatigue sous spectre ont été obtenus après

10 une préfissuration par fatigue jusqu'à ce que la fissure atteigne 40 mm. Le résultat obtenu est le nombre de vols entre 50 mm et 130 mm de propagation de fissure.

Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 6.

Tableau 6 – Caractéristiques mécaniques mesurées

Essai	R _m L (MPa)	R _{p0,2} L (MPa)	A% L	R _m TL (MPa)	R _{p0,2} TL (MPa)	A% TL	Fatigue sous spectre (nombre de vols)	K _q W76 L-T (MPa√m)	K _q W76 T-L (MPa√m)
15	493	366	19,2	482	332	19,5	5124		
16	504	378	18,5	488	341	18,4	5293		
17	486	366	16,9	470	329	18,9	5718	54,0	50,3
18	488	373	17,0	469	334	17,9	5910	52,7	49,0
19	497	382	17,1	474	340	19,3	6348	55,0	52,5

15 Pour cette épaisseur, on obtient toujours un nombre de vols d'au moins 5718 avec la composition selon l'invention. On constate comme pour l'épaisseur 35 mm, notamment en comparant les échantillons 17 et 18, qu'une durée de mise en solution trop élevée est défavorable pour la performance en fatigue sous spectre. Les meilleurs résultats en fatigue

20 sous spectre sont à nouveau obtenus avec la combinaison d'une composition selon

l'invention, d'un affinage de type AlTiC et d'une durée de mise en solution inférieure ou égale à 5,6 heures.

Revendications

1. Produit laminé à l'état T351, dont l'épaisseur est comprise entre 15 et 50 mm, en alliage d'aluminium de composition, comprenant en % en poids,

Cu : 3,85 – 4,15
 Mg : 0,95 – 1,25
 Mn : 0,45 – 0,57
 Zr : 0,09 – 0,16
 Ti : 0,005 – 0,1
 Fe : < 0,070
 Si : < 0,060
 avec $\text{Cu} + \text{Mg} \leq 5,15$
 autres éléments inférieurs 0,05 chacun et inférieurs à 0,15 au total, reste aluminium.
2. Produit selon la revendication 1 dans lequel Fe 0,030 - 0,060 % en poids et/ou Si : 0,020 – 0,040 % en poids.
3. Produit selon la revendication 1 ou la revendication 2 dans lequel, en % en poids, Mn : 0,48 – 0,55.
4. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 3 dans lequel, en % en poids, la teneur en manganèse est au moins 0,51 % en poids.
5. Produit selon la revendication 4 dans lequel la teneur en manganèse est au moins 0,54 % en poids.
6. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel, en % en poids, Mg : 0,96 – 1,15.
7. Produit selon la revendication 6 dans lequel, en % en poids, Mg : 0,98 – 1,10.
8. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 7 dans lequel, en % en poids, $\text{Cu} + \text{Mg} \leq 5,05$.

9. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 8 présentant un rapport $R_m(L)/R_{p0,2}(L) > 1,25$, où R_m = la résistance à la rupture et $R_{p0,2}$ = la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % d'allongement.
10. Procédé de fabrication d'un produit laminé selon une quelconque des revendications 1 à 9 dans lequel
- on élabore et on coule en ajoutant un affinant de type AlTiB ou AlTiC un alliage selon la composition d'une quelconque des revendications 1 à 6 pour obtenir une plaque de laminage,
 - optionnellement on homogénéise ladite plaque de laminage à une température comprise entre 480°C et 510°C,
 - on lamine à chaud ladite plaque de laminage optionnellement homogénéisée pour obtenir une tôle d'épaisseur e comprise entre 15 et 50 mm,
 - on met en solution ladite tôle à une température comprise entre 480 et 505 °C pendant une durée t exprimée en heures telle que $t \geq e / 7$,
 - on trempe ladite tôle ainsi mise en solution,
 - on réalise une traction à froid de ladite tôle ainsi trempée avec une déformation comprise entre 1,5 et 3%,
 - on réalise un vieillissement à température ambiante.
11. Procédé selon la revendication 10 dans lequel ledit affinant est un affinant de type AlTiC.
12. Procédé selon la revendication 10 ou la revendication 11 dans lequel ladite mise en solution est réalisée à une température d'au moins 495 °C et ladite durée t est telle que $t \leq e / 4,5$.
13. Procédé selon une quelconque des revendications 10 à 12 dans lequel une température moyenne lors du laminage à chaud jusqu'à l'épaisseur 60 mm est au moins 450 °C.
14. Élément d'intrados d'aile d'avion comprenant une tôle selon une quelconque des revendications 1 à 9.