



(11) **EP 2 710 163 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
13.09.2017 Bulletin 2017/37

(51) Int Cl.:
C22C 21/06^(2006.01) C22F 1/047^(2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **12728642.5**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2012/000198

(22) Date de dépôt: **16.05.2012**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2012/160272 (29.11.2012 Gazette 2012/48)

(54) **ALLIAGE ALUMINIUM MAGNÉSIUM LITHIUM À TÉNACITÉ AMÉLIORÉE**

ALUMINIUM-MAGNESIUM-LITHIUMLEGIERUNG MIT ERHÖHTER ZÄHIGKEIT

ALUMINUM MAGNESIUM LITHIUM ALLOY HAVING IMPROVED TOUGHNESS

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

(30) Priorité: **20.05.2011 FR 1101555**
20.05.2011 US 201161488196 P

(43) Date de publication de la demande:
26.03.2014 Bulletin 2014/13

(73) Titulaire: **Constellium Isoire**
63500 Isoire (FR)

(72) Inventeurs:
• **EBERL Frank**
F-63500 Isoire (FR)
• **BES Bernard**
F-38180 Seyssins (FR)

(74) Mandataire: **Constellium - Propriété Industrielle**
C-TEC Constellium Technology Center
Propriété Industrielle
Parc Economique Centr'Alp
725, rue Aristide Bergès
CS10027
38341 Voreppe (FR)

(56) Documents cités:
WO-A1-00/37696 WO-A1-92/03583
DE-A1- 1 558 491 RU-C1- 2 171 308

- **G. Tempus: "NEW ALUMINIUM ALLOYS AND FUSELAGE STRUCTURES IN aircraft design", , 18 mai 2001 (2001-05-18), XP002664650, Extrait de l'Internet: URL:http://www.mat.ethz.ch/news_events/archive/materialsday/matday01/pdf/TempusMD.pdf [extrait le 2011-11-28]**
- **I.N.FRIDLANDER ET AL: "Le développement d'un alliage 1424 Al.Li thernostable pour les applications dans les fuselages soudés", MÉTALLURGIE PHYSIQUE ET TRAITEMENT THERMIQUE DES MÉTAUX, no. 1, 1 janvier 2002 (2002-01-01), XP002664651, ISSN: 0026-0819**
- **S. ZHANG ET AL: "Mechanical properties and microstructures of Al-Mg-Li-Zr alloys-containing silver", TRANSACTIONS OF NFSOC, vol. 4, no. 4, 1 décembre 1994 (1994-12-01), XP002664652,**

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

EP 2 710 163 B1

Description**Domaine de l'invention**

- 5 **[0001]** L'invention concerne les produits en alliages aluminium-magnésium-lithium, plus particulièrement, de tels produits, leurs procédés de fabrication et d'utilisation, destinés en particulier à la construction aéronautique et aérospatiale.

Etat de la technique

- 10 **[0002]** Des produits laminés en alliage d'aluminium sont développés pour produire des pièces de haute résistance destinées notamment à l'industrie aéronautique et à l'industrie aérospatiale.
- [0003]** Les alliages d'aluminium contenant du lithium sont très intéressants à cet égard, car le lithium peut réduire la densité de l'aluminium de 3 % et augmenter le module d'élasticité de 6 % pour chaque pourcent en poids de lithium ajouté. Pour que ces alliages soient sélectionnés dans les avions, leur performance par rapport aux autres propriétés
- 15 d'usage doit atteindre celle des alliages couramment utilisés, en particulier en terme de compromis entre les propriétés de résistance mécanique statique (limite d'élasticité en traction et en compression, résistance à la rupture) et les propriétés de tolérance aux dommages (ténacité, résistance à la propagation des fissures en fatigue), ces propriétés étant en général antinomiques.
- Ces alliages doivent également présenter une résistance à la corrosion suffisante, pouvoir être mis en forme selon les procédés habituels et présenter de faibles contraintes résiduelles de façon à pouvoir être usinés de façon intégrale.
- 20 Les alliages d'aluminium contenant simultanément du magnésium et du lithium permettent d'atteindre des densités particulièrement faibles et ont donc été extensivement étudiés.
- [0004]** Le brevet GB 1,172,736 enseigne un alliage contenant 4 à 7% en poids Mg, 1,5 - 2,6 % Li, 0,2 - 1% Mn et/ou 0,05 - 0,3 % Zr, reste aluminium utiles pour des utilisations nécessitant une résistance mécanique élevée, une bonne
- 25 résistance à la corrosion, une faible densité et un module d'élasticité élevé.
- [0005]** La demande internationale WO 92/03583 décrit un alliage utile pour les structures aéronautiques ayant une faible densité de formule générale $Mg_aLi_bZn_cAg_dAl_{bal}$, dans lequel a est compris entre 0,5 et 10%, b est compris entre 0,5 et 3%, c est compris entre 0,1 et 5%, d est compris entre 0,1 et 2% et bal indique que le reste est de l'aluminium.
- [0006]** Le brevet US 5,431,876 enseigne un groupe d'alliages ternaire d'aluminium lithium et magnésium ou cuivre, incluant au moins un additif tel que le zirconium, le chrome et/ou le manganèse.
- 30 **[0007]** Le brevet US 6,551,424 décrit un procédé de fabrication de produits en alliage aluminium-magnésium-lithium de composition (en % en poids) Mg : 3,0 - 6,0, Li : 0,4 - 3,0, Zn jusqu'à 2,0, Mn jusqu'à 1,0, Ag jusqu'à 0,5, Fe jusqu'à 0,3, Si jusqu'à 0,3, Cu jusqu'à 0,3, 0,02 - 0,5 d'un élément sélectionné dans le groupe consistant en Sc, Hf, Ti, V, Nd, Zr, Cr, Y, Be, incluant un laminage à froid dans le sens de la longueur et dans le sens de la largeur.
- 35 Le brevet US 6,461,566 décrit un alliage de composition (en % en poids) Li : 1,5 - 1,9, Mg : 4,1 - 6,0, Zn 0,1 - 1,5, Zr 0,05 - 0,3, Mn 0,01 - 0,8 H, 0,9 10^{-5} - 4,5 10^{-5} et au moins un élément sélectionné dans le groupe Be 0,001 - 0,2, Y 0,001 - 0,5 et Sc 0,01 - 0,3.
- Le brevet RU 2171308 décrit un alliage comprenant (en % en poids) Li : 1,5 - 3,0, Mg : 4,5 - 7,0, Fe 0,01 - 0,15, Na : 0,001 - 0,0015, H, 1,7 10^{-5} - 4,5 10^{-5} et au moins un élément sélectionné dans le groupe Zr 0,05- 0,15, Be 0,005 - 0,1, et Sc 0,05 - 0,4 et au moins un élément sélectionné dans le groupe Mn 0,005- 0,3, Cr 0,005 - 0,2, et Ti 0,005 - 0,2, reste aluminium.
- 40 **[0008]** Le brevet RU2163938 décrit un alliage contenant (en % en poids) Mg : 2,0 - 5,8, Li : 1,3-2,3, Cu : 0,01 - 0,3, Mn : 0,03- 0,5, Be : 0,0001 - 0,3, au moins un élément parmi Zr et Sc : 0,02 - 0,25 et au moins un élément parmi Ca et Ba : 0,002 - 0,1, reste aluminium.
- 45 **[0009]** La demande de brevet DE 1 558 491 décrit notamment un alliage contenant (en % en poids) Mg : 4 - 7, Li : 1,5 - 2,6, Mn : 0,2- 1,0, Zr 0,05 - 0,3 et/ou Ti 0,05 - 0,15 ou Cr 0,05 - 0,3.
- [0010]** Ces alliages n'ont pas résolu certains problèmes et en particulier leur performance en termes de tolérance aux dommages n'a pas permis leur utilisation significative dans l'aviation commerciale. Il est à noter également que la fabrication de produits corroyés à partir de ces alliages est restée difficile et que le taux de rebut est trop élevé.
- 50 **[0011]** Il existe un besoin pour des produits corroyés en alliage aluminium-magnésium-lithium présentant des propriétés améliorées par rapport à celles des produits connus, en particulier en termes de compromis entre les propriétés de résistance mécanique statique et les propriétés de tolérance aux dommages, en particulier la ténacité, de résistance à la corrosion tout en ayant une faible densité.
- De plus il existe un besoin pour un procédé de fabrication de ces produits fiable et économique.
- 55

Objet de l'invention

- [0012]** Un premier objet de l'invention est un produit corroyé en alliage d'aluminium de composition, en % en poids,

Mg : 4,0 - 5,0
 Li : 1,0 - 1,6
 Zr : 0,05 - 0,15
 Ti : 0,01 - 0,15
 Fe : 0,02 - 0,2
 Si : 0,02 - 0,2
 Mn : $\leq 0,5$
 Cr : $\leq 0,5$
 Ag : $\leq 0,5$
 Cu : $\leq 0,5$
 Zn : $\leq 0,5$
 Sc : $< 0,01$
 autres éléments : $< 0,05$
 reste aluminium.

[0013] Un autre objet de l'invention est un procédé de fabrication d'un produit corroyé selon l'invention comprenant successivement

- l'élaboration d'un bain de métal liquide de façon à obtenir un alliage d'aluminium de composition selon l'invention,
- la coulée dudit alliage sous forme brute,
- optionnellement l'homogénéisation du produit ainsi coulé,
- la déformation à chaud et optionnellement à froid,
- optionnellement un traitement thermique à une température comprise entre 300 et 420 °C en un ou plusieurs paliers,
- la mise en solution du produit ainsi déformé, et la trempe,
- optionnellement la déformation à froid du produit ainsi mis en solution et trempé,
- le revenu à une température inférieure à 150 °C.

[0014] Encore un autre objet de l'invention est l'utilisation d'un produit l'invention pour réaliser des éléments de structure d'aéronef.

Description des figures

[0015]

Figure 1 : Courbe R dans le sens L-T (éprouvette CCT760).
 Figure 2 : Courbe R dans le sens T-L (éprouvette CCT760).
 Figure 3 : Ténacité K_{app} (L-T) en fonction de la limite d'élasticité $R_{p0,2}(L)$ pour les alliages A, C et D.

Description de l'invention

[0016] 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. 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. La densité dépend de la composition et est déterminée par calcul plutôt que par une méthode de mesure de poids. Les valeurs sont calculées en conformité avec la procédure de The Aluminium Association, qui est décrite pages 2-12 et 2-13 de « Aluminum Standards and Data ». Les définitions des états métallurgiques sont indiquées dans la norme européenne EN 515.

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.

Une courbe donnant le facteur d'intensité de contrainte effectif en fonction de l'extension de fissure effective, connue comme la courbe R, est déterminée selon la norme ASTM E 561. Le facteur d'intensité de contrainte critique K_C , en d'autres termes le facteur d'intensité qui rend la fissure instable, est calculé à partir de la courbe R. Le facteur d'intensité de contrainte K_{CO} est également calculé en attribuant la longueur de fissure initiale au commencement de la charge monotone, à la charge critique. Ces deux valeurs sont calculées pour une éprouvette de la forme requise. K_{app} représente le facteur K_{CO} correspondant à l'éprouvette qui a été utilisée pour effectuer l'essai de courbe R. K_{Ceff} représente le facteur K_C correspondant à l'éprouvette qui a été utilisée pour effectuer l'essai de courbe R. $\Delta a_{eff(max)}$ représente l'extension de fissure du dernier point valide de la courbe R. La longueur de la courbe R - à savoir l'extension de fissure

maximale de la courbe - est un paramètre en lui-même important, notamment pour la conception de fuselage.

[0017] Sauf mention contraire, les définitions de la norme EN 12258 s'appliquent.

[0018] On appelle ici « élément de structure » ou « élément structural » d'une construction mécanique une pièce mécanique pour laquelle les propriétés mécaniques statiques et/ou dynamiques sont particulièrement importantes pour la performance de la structure, et pour laquelle un calcul de structure est habituellement prescrit ou réalisé. Il s'agit typiquement d'éléments dont la défaillance est susceptible de mettre en danger la sécurité de ladite construction, de ses utilisateurs, des ses usagers ou d'autrui. Pour un avion, ces éléments de structure comprennent notamment les éléments qui composent le fuselage (tels que la peau de fuselage, fuselage skin en anglais), les raidisseurs ou lisses de fuselage (stringers), les cloisons étanches (bulkheads), les cadres de fuselage (circumferential frames), les ailes (tels que la peau de voilure extradors ou intrados (upper or lower wing skin), les raidisseurs (stringers ou stiffeners), les nervures (ribs) et longerons (spars)) et l'empennage composé notamment de stabilisateurs horizontaux et verticaux (horizontal or vertical stabilisers), ainsi que les profilés de plancher (floor beams), les rails de sièges (seat tracks) et les portes.

[0019] Selon la présente invention, une classe sélectionnée d'alliages d'aluminium qui contiennent des quantités spécifiques et critiques de magnésium, de lithium, de zirconium, de titane, de fer et de silicium permet de fabriquer des produits corroyés ayant un compromis de propriétés amélioré, en particulier entre la résistance mécanique et la tolérance aux dommages, tout en présentant une bonne performance en corrosion. La teneur en magnésium des produits selon l'invention est comprise entre 4,0 et 4,7 % en poids. Dans une réalisation avantageuse de l'invention, la teneur en magnésium est au moins de 4,3 % en poids ou préférentiellement 4,4 % en poids. La teneur maximale de 4,7 % en poids ou avantageusement de 4,6 % en poids de magnésium est préférée. La teneur en lithium des produits selon l'invention est comprise entre 1,0 et 1,5 % en poids. Les présents inventeurs ont constaté qu'une teneur en lithium limitée, en présence de certains éléments d'addition, permet d'améliorer très significativement la ténacité et la vitesse de propagation des fissures en fatigue, ce qui compense largement la légère augmentation de densité et la diminution des propriétés mécaniques statiques. La teneur maximale en lithium est 1,5 % en poids et de préférence 1,45 % en poids ou préférentiellement 1,4 % en poids. Une teneur minimale en lithium de 1,1 % en poids et de préférence de 1,2 % en poids est avantageuse, notamment pour améliorer la résistance à la corrosion intergranulaire.

La teneur en zirconium des produits selon l'invention est comprise entre 0,05 et 0,15 % en poids et la teneur en titane est comprise entre 0,01 et 0,15 % en poids. La présence de ces éléments associée aux conditions de transformation utilisées permet avantageusement de maintenir une structure granulaire substantiellement non recristallisée. Contrairement à certains enseignements de l'art antérieur, les présents inventeurs ont constaté qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter du scandium dans ces alliages pour obtenir la structure granulaire substantiellement non-recristallisée désirée et que l'addition de scandium pouvait même s'avérer néfaste en rendant l'alliage particulièrement fragile et difficile à laminier à froid jusqu'à des épaisseurs inférieures à 3 mm. La teneur en scandium est donc inférieure à 0,01 % en poids. Dans un mode de réalisation de l'invention la teneur en titane est comprise entre 0,01 et 0,05 % en poids. Le manganèse et/ou le chrome peuvent également être ajoutés pour contribuer notamment au contrôle de la structure granulaire, leur teneur restant au maximum de 0,5 % en poids. Dans un mode de réalisation avantageux de l'invention, présentant notamment une ductilité à chaud améliorée, l'alliage contient au moins un élément parmi Mn et Cr avec pour teneur, en % en poids Mn : 0,05 - 0,5 ou 0,05 - 0,3 et Cr : 0,05 - 0,3, un élément non choisi parmi Mn et Cr ayant une teneur inférieure à 0,05 % en poids. L'amélioration de la ductilité à chaud facilite notamment la déformation à chaud ce qui permet de diminuer le taux de rebut lors de la transformation.

[0020] Le cuivre et/ou l'argent peuvent également être ajoutés pour améliorer les performances des produits corroyés selon l'invention leur teneur restant au maximum de 0,5 % en poids. Dans un mode de réalisation avantageux de l'invention, l'alliage contient au moins un élément parmi Ag et Cu avec pour teneur s'il est choisi, en % en poids Cu : 0,05 - 0,3 et Ag : 0,05 - 0,3, un élément non choisi parmi Ag et Cu ayant une teneur inférieure à 0,05 % en poids. Ces éléments peuvent contribuer notamment aux propriétés mécaniques statiques. Cependant dans un mode de réalisation avantageux pour améliorer la résistance à la corrosion intergranulaire la teneur en Ag et/ou la teneur en Cu sont inférieures à 0,05 % en poids.

[0021] Les produits corroyés selon l'invention contiennent une faible quantité de fer et de silicium, la teneur de ces éléments étant comprise entre 0,02 et 0,2 % en poids. Les présents inventeurs pensent que la présence de ces éléments peut contribuer, en formant des phases intermétalliques et/ou en contribuant à la formation des dispersoïdes notamment en présence de manganèse, à améliorer les propriétés de tolérance aux dommages en évitant la localisation de la déformation. Dans un mode de réalisation de l'invention la teneur en Fe et/ou la teneur en Si sont en % en poids Fe : 0,04 - 0,15 ; Si : 0,04 - 0,15. Dans un mode de réalisation de l'invention la teneur en Fe et/ou la teneur en Si est inférieure à 0,15 % en poids et de préférence inférieure à 0,1 % en poids.

[0022] La teneur en Zn est au maximum de 0,5 % en poids. Dans un mode de réalisation avantageux de l'invention la teneur en Zn est inférieure à 0,2 % en poids et de préférence inférieure à 0,05 % en poids. L'addition délibérée de Zn n'est typiquement pas souhaitable car cet élément peut contribuer à dégrader la ductilité à chaud tout en n'apportant pas d'avantage pour la résistance à la corrosion intergranulaire. De plus l'addition de Zn contribue à augmenter la densité

de l'alliage ce qui n'est le plus souvent pas souhaitable. Les autres éléments ont une teneur inférieure à 0,05% en poids, chacun.

[0023] Certains éléments peuvent être néfaste pour les alliages selon l'invention, en particulier pour des raisons de transformation de l'alliage telles que la toxicité et/ou les casses lors de la déformation et il est préférables de les limiter à un niveau très faible, i.e. inférieure à 0,05 % en poids ou même moins. Dans un mode de réalisation avantageux les produits selon l'invention ont une teneur maximale de 5 ppm de Be et de préférence de 2 ppm de Be et/ou une teneur maximale de 10 ppm de Na et/ou une teneur maximale de 20 ppm de Ca.

[0024] Les produits corroyés selon l'invention sont préférentiellement des produits filés tels que des profilés, des produits laminés tels que des tôles ou des tôles épaisses et/ou des produits forgés.

[0025] Le procédé de fabrication des produits selon l'invention comprend les étapes successives d'élaboration d'un bain de métal liquide de façon à obtenir un alliage d'aluminium de composition selon l'invention, la coulée dudit alliage sous forme brute, optionnellement l'homogénéisation du produit ainsi coulé, la déformation à chaud et optionnellement à froid, la mise en solution du produit ainsi déformé, et la trempe, optionnellement la déformation à froid du produit ainsi mis en solution et trempé et le revenu à une température inférieure à 150 °C.

[0026] Dans une première étape, on élabore un bain de métal liquide de façon à obtenir un alliage d'aluminium de composition selon l'invention.

[0027] Le bain de métal liquide est ensuite coulé sous forme brute, typiquement une plaque de laminage, une billette de filage ou une ébauche de forge.

[0028] La forme brute est ensuite optionnellement homogénéisée de façon à atteindre une température comprise entre 450°C et 550° et de préférence entre 480 °C et 520 °C pendant une durée comprise entre 5 et 60 heures. Le traitement d'homogénéisation peut être réalisé en un ou plusieurs paliers. Cependant les présents inventeurs n'ont pas constaté d'avantage significatif apporté par l'homogénéisation et dans une réalisation préférée de l'invention, on procède directement à la déformation à chaud à la suite d'un simple réchauffage sans effectuer d'homogénéisation.

[0029] La déformation à chaud, typiquement par filage, laminage et/ou forgeage, est effectuée de préférence avec une température d'entrée supérieure à 400 °C et de manière avantageuse supérieure à 430 °C ou même 450 °C.

[0030] Dans le cas de la fabrication de tôles par laminage, il est nécessaire de réaliser une étape de laminage à froid pour les produits dont l'épaisseur est inférieure à 3 mm. Il peut s'avérer utile de réaliser un ou plusieurs traitement thermiques intermédiaires avant ou au cours du laminage à froid. Ces traitements thermiques intermédiaires sont typiquement réalisés à une température comprise entre 300 et 420 °C en un ou plusieurs paliers.

[0031] Les présents inventeurs ont constaté que même en réalisant ces traitements thermiques intermédiaires, il ne leur avait pas été possible de laminier à froid de façon industrielle des tôles en alliages de référence jusqu'à une épaisseur de 2 mm alors que cette étape s'est avérée réalisable avec des tôles en alliage selon l'invention. Les tôles selon l'invention ont une épaisseur préférée d'au moins 0,5 mm et de préférence d'au moins 0,8 mm ou 1 mm.

[0032] Après déformation à chaud et optionnellement à froid le produit est mis en solution et trempé. Avant mise en solution, il est avantageux de réaliser un traitement thermique à une température comprise entre 300 et 420 °C en un ou plusieurs paliers, de façon à améliorer le contrôle de la structure granulaire substantiellement non recristallisée. La mise en solution est effectuée, selon la composition du produit, à une température comprise entre 370 et 500 °C. La trempe est effectuée à l'eau et/ou à l'air. Il est avantageux de réaliser la trempe à l'air car les propriétés de corrosion intergranulaire sont améliorées.

[0033] Le produit ainsi mis en solution et trempé peut optionnellement être à nouveau déformé à froid. Des étapes de planage ou redressage sont typiquement effectuées à ce stade mais il est également envisageable d'effectuer une déformation plus poussée de manière à améliorer encore les propriétés mécaniques.

[0034] L'état métallurgique obtenu pour les produits laminés est avantageusement un état T6 ou T6X ou T8 ou T8X et pour les produits filés avantageusement un état T5 ou T5X dans le cas de la trempe sur presse ou un état T6 ou T6X ou T8 ou T8X.

[0035] Le produit subit enfin un revenu à une température inférieure à 150 °C. De manière avantageuse le revenu est effectué en trois paliers, un premier palier à une température comprise entre 70 à 100 °C, un second palier à une température comprise entre 100 à 140 °C et un troisième palier à une température comprise entre 90 à 110 °C, la durée de ces paliers étant typiquement de 5 à 50 h.

[0036] La combinaison de la composition choisie, en particulier de la teneur en zirconium et de titane, et des paramètres de transformation, en particulier la température de déformation à chaud et le cas échéant du traitement thermique avant mise en solution, permet avantageusement d'obtenir des produits corroyés ayant une structure granulaire substantiellement non-recristallisée. Par structure granulaire substantiellement non-recristallisée, on entend un taux de structure granulaire non-recristallisée à mi-épaisseur supérieur à 70 % et de préférence supérieur à 85%.

[0037] Les produits laminés selon l'invention présentent des caractéristiques particulièrement avantageuses. Les produits laminés ont de préférence une épaisseur comprise entre 0,5 mm et 15 mm, mais des produits d'épaisseur supérieure à 15 mm, jusque 50 mm ou même 100 mm ou plus peuvent avoir des propriétés avantageuses.

[0038] Les produits laminés obtenus par le procédé selon l'invention ont, pour une épaisseur comprise entre 0.5 et

EP 2 710 163 B1

15 mm, à mi-épaisseur au moins une propriété de résistance mécanique statique parmi les propriétés (i) à (iii) et au moins une propriété de tolérance aux dommages parmi les propriétés (iv) à (vi)

- (i) une limite d'élasticité en traction $R_{p0,2}(L) \geq 280$ MPa et de préférence $R_{p0,2}(L) \geq 310$ MPa,
- (ii) une limite d'élasticité en traction $R_{p0,2}(TL) \geq 260$ MPa et de préférence $R_{p0,2}(TL) \geq 290$ MPa,
- (iii) une limite d'élasticité en traction $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 200$ MPa et de préférence $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 240$ MPa,
- (iv) une ténacité pour des éprouvettes de largeur $W = 760$ mm $K_{app}(L-T) \geq 90$ MPa $\sqrt{m}$ pour une épaisseur inférieure à 3 mm et $K_{app}(L-T) \geq 110$ MPa $\sqrt{m}$ pour une épaisseur d'au moins 3 mm,
- (v) une ténacité pour des éprouvettes de largeur $W = 760$ mm $K_{app}(T-L) \geq 100$ MPa $\sqrt{m}$ pour une épaisseur inférieure à 3 mm et $K_{app}(T-L) \geq 120$ MPa $\sqrt{m}$ pour une épaisseur d'au moins 3 mm,
- (vi) une extension de fissure du dernier point valide de la courbe R pour des éprouvettes de largeur $W = 760$ mm $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 80$ mm pour une épaisseur inférieure à 3 mm et $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 110$ mm pour une épaisseur d'au moins 3 mm.

[0039] Les produits laminés selon l'invention présentent une amélioration de l'isotropie des propriétés mécaniques, en particulier de la ténacité. Ainsi les produits laminés selon l'invention présentent de façon avantageuse pour des éprouvettes de largeur $W = 760$ mm un écart entre $K_{app}(L-T)$ et $K_{app}(T-L)$ inférieur à 20% et/ou un écart entre $\Delta a_{eff(max)}(T-L)$ et $\Delta a_{eff(max)}(L-T)$ inférieur à 20% et de préférence inférieur à 15%.

[0040] De plus les produits laminés selon l'invention ayant été trempés à l'air présentent une perte de poids inférieure à 20 mg/cm² et de préférence inférieure à 15 mg/cm² après le test de corrosion intergranulaire NAMLT (« Nitric Acid Mass Loss Test » ASTM-G67).

[0041] Les produits corroyés selon l'invention sont avantageusement utilisés pour réaliser des éléments de structure d'aéronef, notamment d'avions. Des éléments de structure d'aéronef préférés sont notamment une peau de fuselage obtenue avantageusement avec des tôles d'épaisseur 0,5 à 12 mm selon l'invention, un cadre de fuselage, un raidisseur ou lisse de fuselage obtenu avantageusement avec des profilés selon l'invention ou une nervure.

[0042] Ces aspects, ainsi que d'autres de l'invention sont expliqués plus en détail à l'aide des exemples illustratifs et non limitatifs suivants.

Exemples

Exemple 1

[0043] Dans cet exemple, plusieurs plaques en alliage Al-Mg-Li dont la composition est donnée dans le tableau 1 ont été coulées. L'alliage D a une composition selon l'invention, les alliages A à C sont des alliages de référence.

Tableau 1. Composition en % en poids et densité des alliages Al-Mg-Li utilisés

Alliage	Ag	Li	Si	Fe	Cu	Ti	Mn	Mg	Zn	Zr	Na (ppm)	Sc
A	0,1	1,8	0,04	0,04	0,17	0,02	0,13	4,6	0,46	0,07	9	0,08
B	0,1	1,7	0,04	0,04	0,07	0,02	0,13	4,9	0,48	0,13	8	
C	0,1	1,7	0,04	0,04	0,17	0,02	0,15	4,8	0,44	0,12	11	
D	0,1	1,4	0,05	0,04	0,18	0,02	0,15	4,5		0,12	4	

[0044] Les plaques ont été réchauffées et laminées à chaud jusqu'à une épaisseur d'environ 4 mm. Des essais de laminage à froid jusqu'à l'épaisseur 2 mm ont été effectués après un traitement thermique constitué de deux paliers successifs d'une heure à 340 °C suivi de 1 heure à 400 °C. Seule les tôles en alliage selon l'invention ont pu être laminées à froid avec succès jusqu'à l'épaisseur finale, les tôles en alliage de référence s'étant cassées à l'épaisseur 2,6 mm. Après laminage à chaud et éventuellement à froid, les tôles ont été mises en solution à 480 °C pendant 20 mn, ce traitement étant précédé d'un traitement thermique constitué de deux paliers successifs d'une heure à 340 °C suivi de 1 heure à 400 °C. Après mise en solution, les tôles ont été trempées à l'air et planées. Le revenu a été effectué pendant 10h à 85°C suivi de 16h à 120 °C suivi de 10h à 100°C.

[0045] La structure granulaire de l'ensemble des échantillons était substantiellement non recristallisée, le taux de recristallisation à mi-épaisseur étant inférieur à 10%.

[0046] Des échantillons ont été testés pour déterminer leurs propriétés mécaniques statiques (limite d'élasticité $R_{p0,2}$, la résistance à la rupture R_m , et l'allongement à la rupture (A)).

[0047] Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 2 ci-dessous.

EP 2 710 163 B1

Tableau 2. Propriétés mécaniques des tôles obtenues.

Alliage	Ep. (mm)	Sens L			Sens TL			Sens 45°		
		Rm (MPa)	R0.2 (MPa)	A%	Rm (MPa)	R0.2 (MPa)	A%	Rm (MPa)	R0.2 (MPa)	A%
A	4,5	507	399	4,9	502	355	12,5	436	293	21,8
B	4,5	488	370	6,0	513	354	12,4	423	274	24,7
C	4,2	487	374	5,6	506	349	11,7	444	286	21,0
D	4,2	436	328	8,5	443	304	16,1	394	256	23,1
D	2,1	439	344	5.4	455	327	15.2	379	256	25.8

[0048] La ténacité des tôles a été caractérisée par l'essai de courbes R suivant la norme ASTM E561. Les essais ont été effectués avec une éprouvette CCT (W=760 mm, 2a0=253 mm) pleine épaisseur. L'ensemble de résultats est reporté dans le tableau 3 et le tableau 14 et illustré par les graphes de la figure 1 et de la figure 2.

Tableau 3 - Données de résumé de la courbe R

Alliage	Ep. (mm)	Sens	Kr (MPa√m) à Δa_{eff} (mm)							
			10	20	30	40	50	60	70	80
A	4,5	L-T	63	79	91	101	105	107	111	
C	4,2		70	91	105	115	122	129	135	142
D	4,2		86	113	131	145	157	166	175	183
D	2,1		79	101	113	120	128	132	137	141
A	4,5	T-L	62	86	95	110	123	135	143	
B	4,5		68	87	110	129	147	157	164	174
C	4,2		70	94	110	122	131	134		
D	4,2		86	110	128	141	153	164	175	183
D	2,1		84	106	122	133	142	150	157	161

Tableau 4 - Résultats des essais de ténacité

Alliage	Ep. (mm)	Sens	K_{app} MPa√m	K_{eff} MPa√m	$\Delta a_{eff,max}$ mm
A	4,5	L-T	82	102	76
C	4,2		96	132	116
D	4,2		125	177	121
D	2,1		99	122	113
A	4,5	T-L	102	142	72
B	4,5		119	179	102
C	4,2		102	131	63
D	4,2		125	177	134
D	2,1		112	147	103

[0049] La figure 3 montre l'amélioration du compromis entre la limite d'élasticité et la ténacité. En particulier, l'amélioration de K_{app} (L-T) est supérieure à 25 % alors que la diminution de limite d'élasticité est inférieure à 15% par rapport à la tôle en alliage C. La longueur de la courbe R est également significativement améliorée, ainsi $\Delta a_{eff(max)}$ (T-L) est amélioré de plus de 30%.

EP 2 710 163 B1

[0050] La vitesse de propagation de fissure a été déterminée selon la norme E647 sur des éprouvettes CCT de largeur 160 mm.

Tableau 5 - Vitesse de propagation des fissures ($\sigma_{\max} = 80$ MPa ou $\sigma_{\max} = 120$ MPa (**), R = 0,1 - pleine épaisseur)

Alliage	Ep. (mm)	Sens	da/dN (mm/cycles) à ΔK (MPa $\sqrt{m}$)						
			10	15	20	25	30	35	40
D	4,2	L-T	1,24.10 ⁻⁰⁴	1,17.10 ⁻⁰⁴	2,27.10 ⁻⁰⁴	3,85.10 ⁻⁰⁴	0,63.10 ⁻⁰³	0,95.10 ⁻⁰³	1,48.10 ⁻⁰³
D	2,1		1,20.10 ⁻⁰⁴	1,59.10 ⁻⁰⁴	2,82.10 ⁻⁰⁴	4,95.10 ⁻⁰⁴	0,90.10 ⁻⁰³		
A	4,5	T-L	1,30.10 ⁻⁰⁴	2,58.10 ⁻⁰⁴	7,81.10 ⁻⁰⁴	35,3.10 ⁻⁰⁴	14,4.10 ⁻⁰³		
B	4,5**		1,37.10 ⁻⁰⁴	1,89.10 ⁻⁰⁴	2,73.10 ⁻⁰⁴	5,63.10 ⁻⁰⁴	0,98.10 ⁻⁰³	2,20.10 ⁻⁰³	5,30.10 ⁻⁰³
C	4,2**			2,84.10 ⁻⁰⁴	5,10.10 ⁻⁰⁴	9,61.10 ⁻⁰⁴	1,99.10 ⁻⁰³	9,60.10 ⁻⁰³	
D	4,2		1,35.10 ⁻⁰⁴	2,00.10 ⁻⁰⁴	3,52.10 ⁻⁰⁴	5,14.10 ⁻⁰⁴	0,92.10 ⁻⁰³	1,95.10 ⁻⁰³	
D	2,1		1,01.10 ⁻⁰⁴	1,53.10 ⁻⁰⁴	2,96.10 ⁻⁰⁴	5,56.10 ⁻⁰⁴	0,90.10 ⁻⁰³		

[0051] Les résultats du test de corrosion intergranulaire NAMLT (« Nitric Acid Mass Loss Test » ASTM-G67) pour les diverses tôles sont synthétisés dans le Tableau 6. Certaines tôles ont été mises en solution et trempées à l'eau en laboratoire.

Tableau 6 - Corrosion intergranulaire au test NAMLT

Alliage	Ep. (mm)	Perte de poids (mg/cm ²)			
		Trempe eau		Trempe air	
		Surface	t/10e	Surface	t/10
A	4,5	24		13	
B	4,5	26		16	
C	4,2	26		18	
D	4,2	26,5	24	16	17
D	2,1			12	

[0052] Les tôles en alliage selon l'invention trempées à l'air présentent une faible sensibilité à la corrosion intergranulaire pour une épaisseur de 4 mm et ne sont pas sensibles à la corrosion intergranulaire pour une épaisseur de 2 mm.

Exemple 2

[0053] Dans cet exemple des lingotins ont été coulés pour évaluer la ductilité à chaud et les propriétés en corrosion intergranulaire de différents alliages. La dimension des lingotins après scalpage était en mm de 255 x 180 x 28. La composition des alliages testés est donnée dans le Tableau 7.

Tableau 7 - Composition en % en poids et densité des alliages Al-Mg-Li utilisés

Alliage	Ag	Li	Si	Fe	Cu	Ti	Mn	Mg	Zn	Zr	Cr	Sc
E	-	1,4	0,03	0,03	-	0,02	0,40	4,5	-	0,11	0,18	-
F	-	1,4	0,03	0,03	-	0,02	0,16	4,4	-	0,12	0,19	-
G	-	1,4	0,03	0,03	-	0,02	0,17	4,4	-	0,11	-	-
H	-	1,1	0,03	0,03	-	0,02	0,16	4,5	-	0,12	-	-
I	-	1,4	0,03	0,03	-	0,02	0,17	4,5	0,6	0,12	-	-

[0054] La ductilité à chaud a été évaluée sur des éprouvettes usinées dans les lingotins après une homogénéisation

EP 2 710 163 B1

de 12 h à 505 °C. Le test de ductilité à chaud a été effectué à l'aide d'une machine servo hydraulique fournie par Servotest Testing Systems Ltd sur des éprouvettes spécifiques d'épaisseur 20 mm à une vitesse de déformation de 1 s⁻¹. Le test consiste à déformer en compression un échantillon contenant deux trous. En raison de la compression, le matériau situé entre les trous subit une expansion à une vitesse de déformation contrôlée. Les conditions d'essai sont décrites dans l'article d'A. Deschamps et al. publié dans la revue Materials Science and Engineering A319-321 (2001) 583 - 586. La mesure normalisée de réduction de surface de la zone de rupture ($\Delta A/A_0$) par analyse d'image permet d'évaluer la ductilité à la température considérée. Les résultats obtenus à 450 °C et 475 °C sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 - Ductilité à chaud ($\Delta A/A_0$) (%)

Ductilité à chaud ($\Delta A/A_0$) (%)	Température déformation (°C)		
Alliage	450	475	Moyenne
E	17	19	18
F	13	19	16
G	12	13	12
H	11	20	15
I	8	12	10

[0055] Les alliages E et F qui contiennent du Mn et du Cr présentent une ductilité à chaud avantageuse tandis que la ductilité à chaud de l'alliage de référence I contenant 0,6% en poids de Zn est la plus faible des alliages testés.

[0056] Les lingotins ont été laminés à chaud jusqu'à l'épaisseur 4 mm. Les tôles ainsi obtenues ont été mises en solution à 480 °C, ce traitement étant précédé d'un traitement thermique constitué de deux paliers successifs d'une heure à 345 °C suivi de 1 heure à 400 °C. Après mise en solution, les tôles ont été trempées à l'air et planées par une traction contrôlée avec un allongement permanent de 2%. Le revenu a été effectué pendant 10h à 85°C suivi de 16h à 120 °C suivi de 10h à 100 °C.

[0057] Les résultats du test de corrosion intergranulaire NAMLT (« Nitric Acid Mass Loss Test » ASTM-G67 sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 - Corrosion intergranulaire au test NAMLT mesurées en surface

Alliage	Perte de poids (mg/cm ²)
E	11
F	11
G	8
H	16
I	8

[0058] L'alliage G, qui se distingue notamment de l'alliage D par une plus faible teneur en cuivre, présente une perte de poids particulièrement faible. L'alliage I qui contient du Zn ne se distingue pas de l'alliage G en terme de résistance à la corrosion intergranulaire. L'alliage H qui présente une teneur en lithium plus faible que les autres alliages testés, présente une perte de poids plus élevée.

Revendications

1. Produit corroyé en alliage d'aluminium de composition, en % en poids,

Mg: 4,0 - 4,7

Li : 1,0 - 1,5

Zr: 0,05 - 0,15

Ti : 0,01 - 0,15

Fe : 0,02 - 0,2

EP 2 710 163 B1

Si : 0,02 - 0,2
Mn: $\leq 0,5$
Cr $\leq 0,5$
Ag : $\leq 0,5$
Cu $\leq 0,5$
Zn $\leq 0,5$
Sc $< 0,01$
autres éléments $< 0,05$
reste aluminium.

2. Produit corroyé selon la revendication 1 contenant au moins un élément parmi Mn et Cr avec pour teneur, en % en poids

Mn : 0,05 - 0,5
Cr : 0,05 - 0,3 ,

un élément non choisi parmi Mn et Cr ayant une teneur inférieure à 0,05 % en poids.

3. Produit corroyé selon la revendication 1 ou la revendication 2 contenant au moins un élément parmi Cu et Ag avec pour teneur s'il est choisi, en % en poids

Cu : 0,05 - 0,3
Ag : 0,05 - 0,3

un élément non choisi parmi Cu et Ag ayant une teneur inférieure à 0,05 % en poids.

4. Produit corroyé selon une quelconque des revendications 1 à 3 dans lequel la teneur en Li est en % en poids

Li : 1,1 - 1,5 et de préférence Li : 1,2 - 1,4.

5. Produit corroyé selon une quelconque des revendications 1 à 4 dans lequel la teneur en Mg est en % en poids

Mg : 4,4 - 4,7.

6. Produit corroyé selon une quelconque des revendications 1 à 5 ayant une teneur maximale de Be de 5 ppm de Be et/ou une teneur maximale de Na de 10 ppm de Na et/ou une teneur maximale de Ca de 20 ppm.

7. Produit corroyé selon une quelconque des revendications 1 à 6 ayant une teneur en Zn inférieure à 0,2 % en poids et de préférence inférieure à 0,05 % en poids.

8. Produit corroyé selon une quelconque des revendications 1 à 7 dans lequel la teneur en Fe et/ou la teneur en Si sont en % en poids :

Fe : 0,04 - 0,15
Si : 0,04 - 0,15.

9. Produit corroyé selon une quelconque des revendications 1 à 8 dont le corroyage est effectué par laminage.

10. Produit corroyé selon la revendication 9 ayant pour une épaisseur comprise entre 0.5 et 15 mm, à mi-épaisseur au moins une propriété de résistance mécanique statique parmi les propriétés (i) à (iii) et au moins une propriété de tolérance aux dommages parmi les propriétés (iv) à (vi)

(i) une limite d'élasticité en traction $R_{p0,2}(L) \geq 280$ MPa et de préférence $R_{p0,2}(L) \geq 310$ MPa,
(ii) une limite d'élasticité en traction $R_{p0,2}(TL) \geq 260$ MPa et de préférence $R_{p0,2}(TL) \geq 290$ MPa,
(iii) une limite d'élasticité en traction $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 200$ MPa et de préférence $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 240$ MPa,
(iv) une ténacité pour des éprouvettes de largeur $W = 760$ mm $K_{app}(L-T) \geq 90$ MPa $\sqrt{m}$ pour une épaisseur inférieure à 3 mm et $K_{app}(L-T) \geq 110$ MPa $\sqrt{m}$ pour une épaisseur d'au moins 3 mm,
(v) une ténacité pour des éprouvettes de largeur $W = 760$ mm $K_{app}(T-L) \geq 100$ MPa $\sqrt{m}$ pour une épaisseur

inférieure à 3 mm et $K_{app}(T-L) \geq 120 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ pour une épaisseur d'au moins 3 mm,
 (vi) une extension de fissure du dernier point valide de la courbe R pour des éprouvettes de largeur $W = 760$ mm $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 80$ mm pour une épaisseur inférieure à 3 mm et $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 110$ mm pour une épaisseur d'au moins 3 mm.

11. Procédé de fabrication d'un produit corroyé selon une des revendications 1 à 10 comprenant successivement

- l'élaboration d'un bain de métal liquide de façon à obtenir un alliage d'aluminium de composition selon une quelconque des revendications 1 à 8,
- la coulée dudit alliage sous forme brute,
- optionnellement l'homogénéisation du produit ainsi coulé,
- la déformation à chaud et optionnellement à froid,
- optionnellement un traitement thermique à une température comprise entre 300 et 420 °C en un ou plusieurs paliers,
- la mise en solution du produit ainsi déformé, et la trempe,
- optionnellement la déformation à froid du produit ainsi mis en solution et trempé,
- le revenu à une température inférieure à 150 °C.

12. Procédé selon la revendication 11 dans lequel la trempe est effectuée à l'air.

13. Utilisation d'un produit selon une quelconque des revendications 1 à 10 pour réaliser un élément de structure d'aéronef, préférentiellement une peau de fuselage, un cadre de fuselage, un raidisseur ou lisse de fuselage ou une nervure.

Patentansprüche

1. Kneterzeugnis aus einer Aluminiumlegierung mit der Zusammensetzung, in Gew.-%,

Mg: 4,0 - 4,7
 Li: 1,0 - 1,5
 Zr: 0,05 - 0,15
 Ti: 0,01 - 0,15
 Fe: 0,02 - 0,2
 Si: 0,02 - 0,2
 Mn $\leq$ 0,5
 Cr $\leq$ 0,5
 Ag $\leq$ 0,5
 Cu $\leq$ 0,5
 Zn $\leq$ 0,5
 Sc $<$ 0,01
 weitere Elemente $<$ 0,05
 Rest Aluminium.

2. Kneterzeugnis nach Anspruch 1 enthaltend mindestens ein Element unter Mn und Cr mit einem Gehalt, in Gew.-%,

Mn: 0,05 - 0,5
 Cr: 0,05 - 0,3,

ein nicht unter Mn und Cr ausgewähltes Element mit einem Gehalt von weniger als 0,05 Gew.-%.

3. Kneterzeugnis nach Anspruch 1 oder Anspruch 2 enthaltend mindestens ein Element unter Cu und Ag mit einem Gehalt, falls gewählt, in Gew.-%,

Cu: 0,05 - 0,3
 Ag: 0,05 - 0,3,

ein nicht unter Cu und Ag ausgewähltes Element mit einem Gehalt von weniger als 0,05 Gew.-%.

EP 2 710 163 B1

4. Kneterzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem der Li-Gehalt in Gew.-%

Li: 1,1 - 1,5 und vorzugsweise Li: 1,2 - 1,4

5 beträgt.

5. Kneterzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem der Mg-Gehalt in Gew.-%

Mg: 4,4 - 4,7

10 beträgt.

6. Kneterzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 5 mit einem Be-Höchstgehalt von 5 ppm Be und/oder einem Na-Höchstgehalt von 10 ppm Na und/oder einem Ca-Höchstgehalt von 20 ppm.

7. Kneterzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 6 mit einem Zn-Gehalt von weniger als 0,2 Gew.-% und vorzugsweise weniger als 0,05 Gew.-%.

8. Kneterzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 7, bei dem der Fe-Gehalt und/oder der Si-Gehalt in Gew.-%

Fe: 0,04 - 0,15

Si: 0,04 - 0,15

25 beträgt.

9. Kneterzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 8, dessen Umformen mittels Walzen durchgeführt wird.

10. Kneterzeugnis nach Anspruch 9, welches bei einer Dicke im Bereich zwischen 0,5 und 15 mm in halber Dicke mindestens eine statische Festigkeitseigenschaft unter den Eigenschaften (i) bis (iii) und mindestens eine Schan-

- 30 destoleranzeigenschaft unter den Eigenschaften (iv) bis (vi) aufweist,
- (i) eine Dehngrenze unter Zugbeanspruchung $R_{p0,2}(L) \geq 280$ MPa und vorzugsweise $R_{p0,2}(L) \geq 310$ MPa,
 - (ii) eine Dehngrenze unter Zugbeanspruchung $R_{p0,2}(TL) \geq 260$ MPa und vorzugsweise $R_{p0,2}(TL) \geq 290$ MPa,
 - (iii) eine Dehngrenze unter Zugbeanspruchung $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 200$ MPa und vorzugsweise $R_{p0,2}(45^\circ) \geq 240$ MPa,
 - (iv) eine Bruchzähigkeit für Proben mit der Breite $W = 760$ mm $K_{app}(L-T) \geq 90$ MPa $\sqrt{m}$ bei einer Dicke von weniger als 3 mm und $K_{app}(L-T) \geq 110$ MPa $\sqrt{m}$ bei einer Dicke von mindestens 3 mm,
 - (v) eine Bruchzähigkeit für Proben mit der Breite $W = 760$ mm $K_{app}(T-L) \geq 100$ MPa $\sqrt{m}$ bei einer Dicke von weniger als 3 mm und $K_{app}(T-L) \geq 120$ MPa $\sqrt{m}$ bei einer Dicke von mindestens 3 mm,
 - (vi) ein Risswachstum am letzten gültigen Punkt der R-Kurve für Proben mit der Breite $W = 760$ mm $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 80$ mm bei einer Dicke von weniger als 3 mm und $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 110$ mm bei einer Dicke von mindestens 3 mm.

11. Verfahren zur Herstellung eines Kneterzeugnisses nach einem der Ansprüche 1 bis 10, nacheinander umfassend

- das Herstellen eines Flüssigmetallbads, so dass eine Aluminiumlegierung mit der Zusammensetzung nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 8 erhalten wird,
- das Vergießen der Legierung zu einer Rohform,
- wahlweise das Homogenisieren des Gussstücks,
- das Warm- und wahlweise Kaltumformen,
- wahlweise eine Wärmebehandlung bei einer Temperatur zwischen 300 und 420 °C in einer oder mehreren Stufen,
- das Lösungsglühen des umgeformten Erzeugnisses und das Abschrecken,
- wahlweise das Kaltumformen des lösungsgeglühten und abgeschreckten Erzeugnisses,
- das Auslagern bei einer Temperatur unterhalb 150 °C.

12. Verfahren nach Anspruch 11, bei dem das Abschrecken mit Luft durchgeführt wird.

13. Verwendung eines Erzeugnisses nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 10 zur Herstellung eines Strukturelementes

eines Luftfahrzeugs, vorzugsweise einer Rumpfaußenhaut, eines Rumpffrahmens, eines Rumpfversteifungsträgers oder Holms oder einer Rippe.

5 **Claims**

1. Wrought product made of an aluminium alloy having the composition, in wt %,

10 Mg: 4.0 - 4.7
 Li: 1.0 - 1.5
 Zr: 0.05 - 0.15
 Ti: 0.01 - 0.15
 Fe: 0.02 - 0.2
 Si: 0.02 - 0.2
 15 Mn: $\leq$ 0.5
 Cr $\leq$ 0.5
 Ag: $\leq$ 0.5
 Cu $\leq$ 0.5
 Zn $\leq$ 0.5
 20 Sc < 0.01
 other elements < 0.05
 remainder aluminium.

- 25 2. Wrought product according to claim 1, containing at least one element from the group consisting of Mn and Cr, wherein it contains, in wt %

Mn: 0.05 - 0.5
 Cr: 0.05 - 0.3,
 an element not selected from the group consisting of Mn and Cr, the content of which is less than 0.05 wt %.

- 30 3. Wrought product according to either claim 1 or claim 2, containing at least one element selected from the group consisting of Cu and Ag wherein it contains, if selected, in wt %

35 Cu: 0.05 - 0.3
 Ag: 0.05 - 0.3
 an element not selected from the group consisting of Cu and Ag, the content of which is less than 0.05 wt %.

4. Wrought product according to any of claims 1 to 3, wherein the Li content is, in wt %

40 Li: 1.1 - 1.5 and preferably Li: 1.2 - 1.4.

5. Wrought product according to any of claims 1 to 4, wherein the Mg content is, in wt %

45 Mg: 4.4 - 4.7.

6. Wrought product according to any of claims 1 to 5, having a maximum Be content of 5 ppm of Be and/or a maximum Na content of 10 ppm of Na and/or a maximum Ca content of 20 ppm.

- 50 7. Wrought product according to any of claims 1 to 6 having a Zn content of less than 0.2 wt % and preferably less than 0.05 wt %.

8. Wrought product according to any of claims 1 to 7, wherein the Fe content and/or the Si content are, in wt %

55 Fe: 0.04 - 0.15
 Si: 0.04 - 0.15.

9. Wrought product according to any of claims 1 to 8, that has been worked by rolling.

10. Wrought product according to claim 9 having at mid-thickness, for a thickness that lies in the range 0.5 mm to 15 mm, at least one static mechanical strength property from the group consisting of the properties (i) to (iii) and at least one damage tolerance property from the group consisting of the properties (iv) to (vi)

- (i) a tensile yield strength $R_{p0.2}(L) \geq 280$ MPa and preferably $R_{p0.2}(L) \geq 310$ MPa,
- (ii) a tensile yield strength $R_{p0.2}(TL) \geq 260$ MPa and preferably $R_{p0.2}(TL) \geq 290$ MPa,
- (iii) a tensile yield strength $R_{p0.2}(45^\circ) \geq 200$ MPa and preferably $R_{p0.2}(45^\circ) \geq 240$ MPa,
- (iv) a toughness for test specimens having a width $W = 760$ mm $K_{app}(L-T) \geq 90$ MPa $\sqrt{m}$ for a thickness of less than 3 mm and $K_{app}(L-T) \geq 110$ MPa $\sqrt{m}$ for a thickness of no less than 3 mm,
- (v) a toughness for test specimens having a width $W = 760$ mm $K_{app}(T-L) \geq 100$ MPa $\sqrt{m}$ for a thickness of less than 3 mm and $K_{app}(T-L) \geq 120$ MPa $\sqrt{m}$ for a thickness of no less than 3 mm,
- (vi) a crack growth of the last valid point on the curve R for test specimens having a width $W = 760$ mm $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 80$ mm for a thickness of less than 3 mm and $\Delta a_{eff(max)}(T-L) \geq 110$ mm for a thickness of no less than 3 mm.

11. Method for manufacturing a wrought product according to one of claims 1 to 10, successively comprising the steps of:

- producing a molten metal bath so as to produce an aluminium alloy having the composition according to any of claims 1 to 8,
- casting said alloy in raw form,
- optionally homogenising the resulting cast product,
- hot working and optionally cold working,
- optionally heat treating at a temperature of between 300 and 420°C in one or more stages,
- solution heat-treating the resulting worked product, and quenching,
- optionally cold working the resulting solution heat-treated and quenched product,
- aging at a temperature of less than 150°C.

12. Method according to claim 11 wherein the quenching step is an air quenching.

13. Use of a product according to any of claims 1 to 10 to produce a structural element of an aircraft, preferably a fuselage skin, a fuselage frame, a fuselage stringer or stiffener, or a rib.

Fig 1

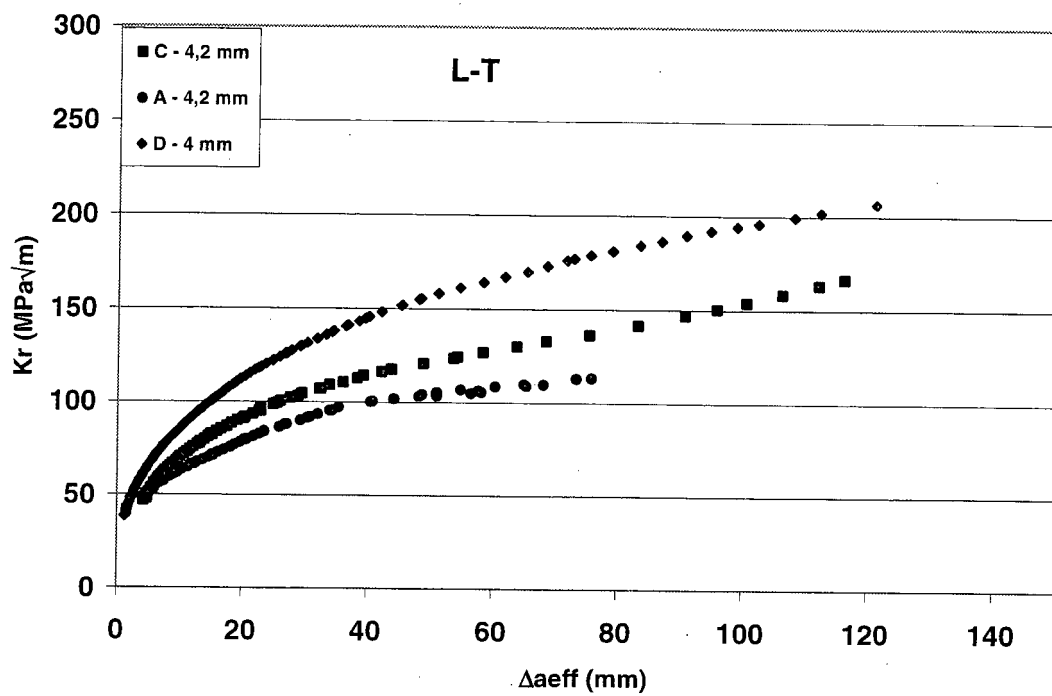


Fig 2

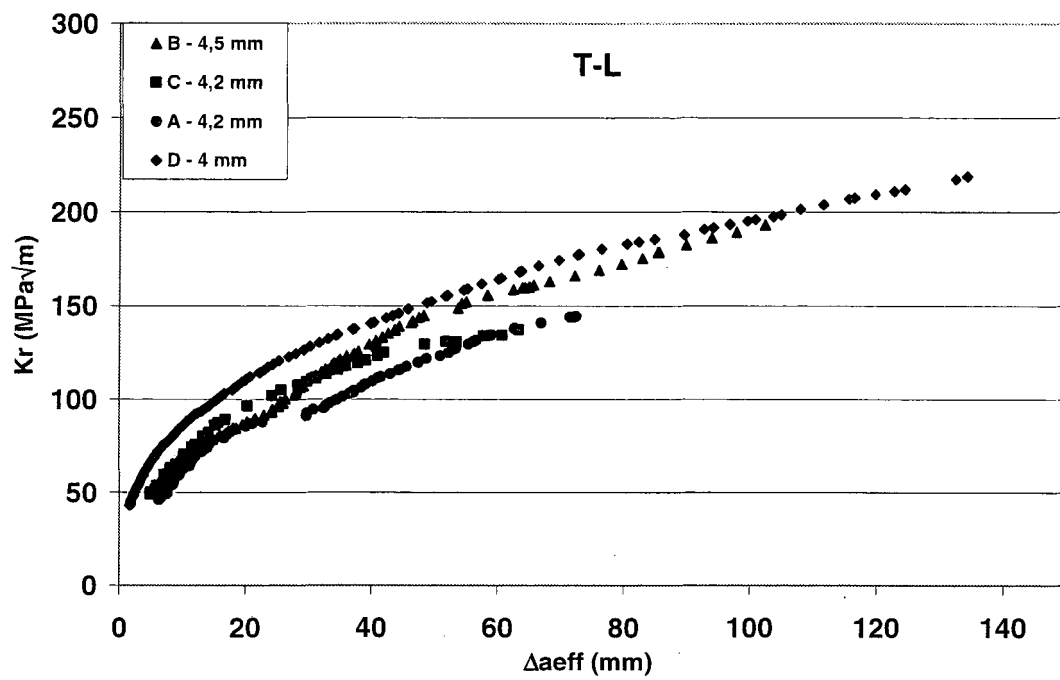
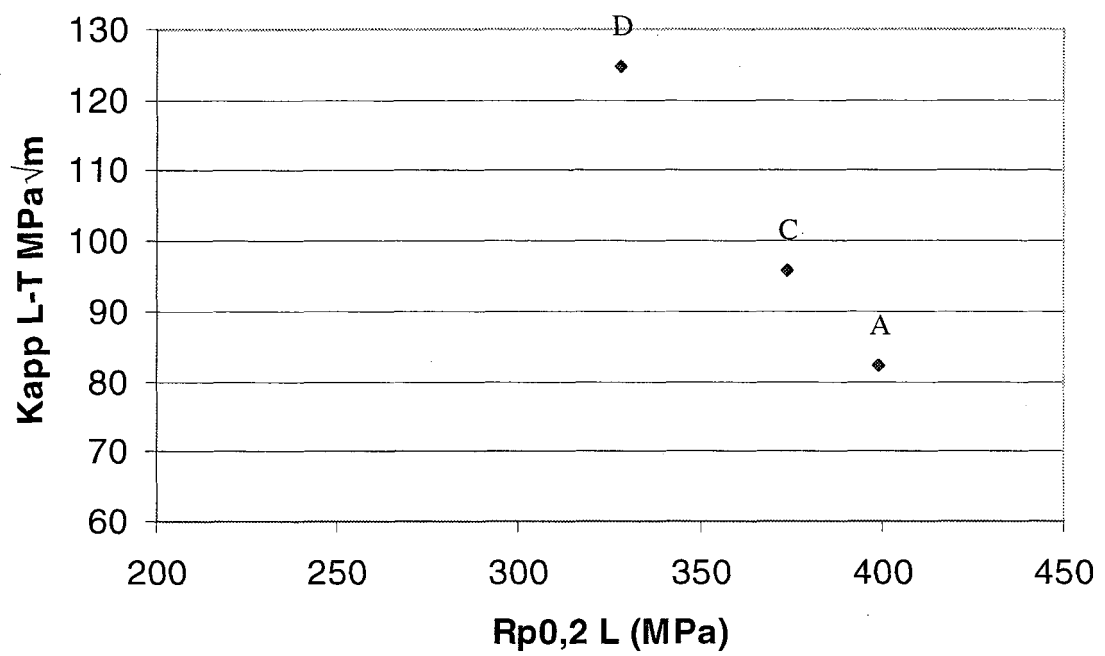


Fig 3 :



RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

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

Documents brevets cités dans la description

- GB 1172736 A [0004]
- WO 9203583 A [0005]
- US 5431876 A [0006]
- US 6551424 B [0007]
- US 6461566 B [0007]
- RU 2171308 [0007]
- RU 2163938 [0008]
- DE 1558491 [0009]

Littérature non-brevet citée dans la description

- *Materials Science and Engineering*, 2001, vol. A319-321, 583-586 [0054]