



(11) **EP 2 364 378 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:  
**08.01.2014 Bulletin 2014/02**

(51) Int Cl.:  
**C22C 21/00** (2006.01) **C22C 21/16** (2006.01)  
**C22F 1/04** (2006.01) **C22F 1/057** (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **09764268.0**

(86) Numéro de dépôt international:  
**PCT/FR2009/001299**

(22) Date de dépôt: **10.11.2009**

(87) Numéro de publication internationale:  
**WO 2010/055225 (20.05.2010 Gazette 2010/20)**

(54) **PRODUITS EN ALLIAGE ALUMINIUM-CUIVRE-LITHIUM**

**PRODUKTE AUS ALUMINIUM-KUPFER-LITHIUM-LEGIERUNG**

**PRODUCTS IN ALUMINIUM-COPPER-LITHIUM ALLOY**

(84) Etats contractants désignés:  
**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 SE SI SK SM TR**

**WO-A-2004/106570 WO-A-2006/131627**  
**FR-A- 2 894 985 FR-A- 2 900 160**  
**RU-C1- 2 237 098 US-A- 5 455 003**

(30) Priorité: **14.11.2008 FR 0806339**  
**14.11.2008 US 114493 P**

- **COLVIN, J. J. ET AL: "The use of X2096 as a structural die forging material" ADVANCES IN THE METALLURGY OF ALUMINUM ALLOYS, PROCEEDINGS FROM MATERIALS SOLUTIONS CONFERENCE, THE JAMES T. STALEY HONORARY SYMPOSIUM ON ALUMINUM ALLOYS, INDIANAPOLIS, IN, UNITED STATES, NOV. 5-8, 2001, 416-424. EDITOR(S): TIRYAKIOGLU, MURAT. PUBL, 2001, XP009128104**
- **ALCAN AEROSPACE: "2196 - T8511 Al-Li Extrusions" juin 2007 (2007-06), XP002564106 Extrait de l'Internet: URL:http://www.pechiney-aerospace.com/Aero space/aerospace.nsf/0/72744E0E74B206EBC125 70190052475E/\$FILE/Alcan\_2196\_Al-Li\_extrusions.pdf?OpenElement> [extrait le 2010-01-18]**
- **"International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminium and wrought aluminium alloys" REGISTRATION RECORD SERIES, ALUMINUM ASSOCIATION, WASHINGTON, DC, US, 1 janvier 2004 (2004-01-01), pages 1-26, XP002903949**
- **BALMUTHE SET AL: "FRACTURE AND FATIGUE CRACK GROWTH RESISTANCE OF RECRYSTALLIZED AL-LI ALLOYS" MATERIALS SCIENCE FORUM, AEDERMANNSDORF, CH, vol. 217-222, no. 3, 1 janvier 1996 (1996-01-01), pages 1365-1370, XP009085471 ISSN: 0255-5476**

(43) Date de publication de la demande:  
**14.09.2011 Bulletin 2011/37**

(73) Titulaire: **Constellium France**  
**75008 Paris (FR)**

(72) Inventeurs:

- **HEYMES, Fabrice**  
**F-13122 Ventabren (FR)**
- **EBERL, Frank**  
**F-63500 Issoire (FR)**
- **POUGET, Gaëlle**  
**F-38000 Grenoble (FR)**

(74) Mandataire: **Butruille, Jean-Remi Pierre Marie**  
**Constellium CRV**  
**Service Propriété Industrielle**  
**Parc Economique Centr'Alp**  
**725, rue Aristide Bergès, BP 27**  
**38341 Voreppe Cedex (FR)**

(56) Documents cités:  
**WO-A-91/11540 WO-A-92/12269**

**EP 2 364 378 B1**

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).

**Description****Domaine de l'invention**

5 [0001] L'invention concerne en général les produits corroyés en alliages aluminium-cuivre-lithium, et plus particulièrement de tels produits sous la forme de profilés destinés à réaliser des raidisseurs en construction aéronautique.

**Etat de la technique**

10 [0002] Un effort de recherche continu est réalisé afin de développer des matériaux qui puissent simultanément réduire le poids et augmenter l'efficacité des structures d'avions à hautes performances. 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 doit atteindre celle des alliages couramment utilisés, en particulier en terme de compromis entre les propriétés de résistance mécanique statique (limite élastique, 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 de plus 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 [0003] Le brevet US 5,032,359 décrit une vaste famille d'alliages aluminium-cuivre-lithium dans lesquels l'addition de magnésium et d'argent, en particulier entre 0,3 et 0,5 pourcent en poids, permet d'augmenter la résistance mécanique. Ces alliages sont souvent connus sous le nom commercial « Weldalite™ ».

25 [0004] Le brevet US 5,198,045 décrit une famille d'alliages Weldalite™ comprenant (en % en poids) (2,4-3,5)Cu, (1,35-1,8)Li, (0,25-0,65)Mg, (0,25-0,65)Ag, (0,08-0,25) Zr. Les produits corroyés fabriqués avec ces alliages combinent une densité inférieure à 2,64 g/cm<sup>3</sup> et un compromis entre la résistance mécanique et la ténacité intéressant.

[0005] Le brevet US 7,229,509 décrit une famille d'alliages Weldalite™ comprenant (en % en poids) (2,5-5,5)Cu, (0,1-2,5) Li, (0,2-1,0) Mg, (0,2-0,8) Ag, (0,2-0,8) Mn, (jusqu'à 0,4) Zr ou d'autres affinants tels que Cr, Ti, Hf, Sc et V. Les exemples présentés ont un compromis entre la résistance mécanique et la ténacité amélioré mais leur densité est supérieure à 2,7 g/cm<sup>3</sup>.

30 [0006] La demande de brevet WO2007/080267 décrit un alliage Weldalite™ ne contenant pas de zirconium destiné à des tôles de fuselage comprenant (en % en poids) (2,1-2,8)Cu, (1,1-1,7) Li, (0,2-0,6) Mg, (0,1-0,8) Ag, (0,2-0,6) Mn.

[0007] Le brevet EP1891247 décrit un alliage Weldalite™ peu chargé en éléments d'alliage et destiné également à la fabrication de tôles de fuselage comprenant (en % en poids) (2,7-3,4)Cu, (0,8-1,4) Li, (0,2-0,6) Mg, (0,1-0,8) Ag et au moins un élément choisi parmi Zr, Mn, Cr, Sc, Hf, Ti.

35 [0008] La demande de brevet WO2006/131627 décrit un alliage destiné à des tôles de fuselage comprenant (en % en poids) (2,7-3,4)Cu, (0,8-1,4) Li, (0,2-0,6) Mg, (0,1-0,8) Ag et au moins un élément parmi Zr, Mn, Cr, Sc, Hf et Ti, dans lequel les teneurs en Cu et en Li répondent à la condition  $Cu + 5/3 Li < 5,2$ .

[0009] Le brevet US 5,455,003 décrit procédé de production d'alliages aluminium-cuivre-lithium présentant des propriétés améliorées de résistance mécanique et ténacité à température cryogénique. Ce procédé s'applique notamment à un alliage comprenant (en % en poids) (2,0-6,5)Cu, (0,2-2,7) Li, (0-4,0) Mg, (0-4,0) Ag, (0-3,0) Zn.

40 [0010] On connaît par ailleurs l'alliage AA2196 comprenant (en % en poids) (2,5-3,3)Cu, (1,4-2,1) Li, (0,25-0,8) Mg, (0,25-0,6) Ag, (0,04-0,18) Zr et au plus 0,35 Mn.

[0011] Il a été généralement admis dans ces brevets ou demandes de brevet qu'une homogénéisation poussée, c'est-à-dire à une température d'au moins 527 °C et pour une durée d'au moins 24 h permettait d'atteindre les propriétés optimales de l'alliage. Dans certains cas d'alliages peu chargés (EP1891247) ou exempts de zirconium (WO2007/080267), des conditions d'homogénéisation beaucoup moins poussées, c'est-à-dire à une température inférieure à 510 °C, ont été utilisées.

45 [0012] Il existe cependant toujours un besoin concernant des produits en alliage en Al-Cu-Li de faible densité et de propriétés encore améliorées, particulièrement en terme de compromis entre la résistance mécanique d'une part, et la tolérance aux dommages, et en particulier de la ténacité et de la résistance à la propagation des fissures en fatigue, d'autre part, tout en ayant d'autres propriétés d'usage satisfaisantes, notamment la résistance à la corrosion.

**Objet de l'invention**

55 [0013] L'invention définit selon la revendication 1 a pour objet un procédé de fabrication d'un produit filé, laminé et/ou forgé à base d'alliage d'aluminium dans lequel :

a) on élabore un bain de métal liquide comprenant 2,0 à 3,5 % en poids de Cu, 1,4 à 1,8 % en poids de Li, 0,1 à

## EP 2 364 378 B1

0,5 % en poids d'Ag, 0,1 à 1,0 % en poids de Mg, 0,05 à 0,18 % en poids de Zr, 0,2 à 0,6 % en poids de Mn et au moins un élément choisi parmi Cr, Sc, Hf et Ti, la quantité dudit élément, s'il est choisi, étant de 0,05 à 0,3 % en poids pour Cr et pour Sc, 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et de 0,01 à 0,15 % en poids pour Ti, le reste étant de l'aluminium et des impuretés inévitables ;

b) on coule une forme brute à partir dudit bain de métal liquide ;

c) on homogénéise ladite forme brute à une température comprise entre 515 °C et 525°C de façon à ce que le temps équivalent pour l'homogénéisation

$$t(eq) = \frac{\int \exp(-26100/T) dt}{\exp(-26100/T_{ref})}$$

soit compris entre 5 et 20 heures, où T (en Kelvin) est la température instantanée de traitement, qui évolue avec le temps t (en heures), et T<sub>ref</sub> est une température de référence fixée à 793 K ;

d) on déforme à chaud et optionnellement à froid ladite forme brute en un produit filé, laminé et/ou forgé ;

e) on met en solution et on trempe ledit produit ;

f) on tractionne de façon contrôlée ledit produit avec une déformation permanente de 1 à 5 % et préférentiellement d'au moins 2% ;

g) on réalise un revenu dudit produit par chauffage à 140 à 170 °C pendant 5 à 70 heures de façon à ce que ledit produit ait une limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement d'au moins 440 MPa et de préférence d'au moins 460 MPa.

**[0014]** L'invention a également pour objet un produit filé, laminé et/ou forgé en alliage d'aluminium de densité inférieure à 2,67 g/cm<sup>3</sup> susceptible d'être obtenu par le procédé selon l'invention.

**[0015]** Encore un autre objet de l'invention est un élément de structure incorporant au moins un produit selon l'invention.

### Description des figures

**[0016]**

Figure 1. Forme du profilé W de l'exemple 1. Les cotes sont indiquées en mm. Les échantillons utilisés pour les caractérisations mécaniques ont été prélevés dans la zone indiquée par les pointillés. L'épaisseur de la semelle est 16 mm.

Figure 2. Forme du profilé X de l'exemple 2. Les cotes sont indiquées en mm. L'épaisseur de la semelle est 26,3 mm.

Figure 3. Forme du profilé Y de l'exemple 2. Les cotes sont indiquées en mm. L'épaisseur de la semelle est 18 mm.

Figure 4. Compromis entre ténacité et résistance mécanique obtenu pour les profilés X de l'exemple 2.

Figure 5. Compromis entre ténacité et résistance mécanique obtenu pour les profilés Y de l'exemple 2 ; 5a : semelle et sens long ; 5b : semelle et sens travers long.

Figure 6. Courbe de Wohler d'initiation de fissures en fatigue pour les profilés Y de l'exemple 2.

Figure 7. Forme du profilé Z de l'exemple 3. Les cotes sont indiquées en mm. Les échantillons utilisés pour les caractérisations mécaniques ont été prélevés dans la zone indiquée par les pointillés. L'épaisseur de la semelle est 20 mm.

Figure 8. Forme du profilé P de l'exemple 4. Les cotes sont indiquées en mm.

Figure 9. Forme du profilé Q de l'exemple 5. Les cotes sont indiquées en mm.

### Description de l'invention

**[0017]** 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. 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.

**[0018]** Sauf mention contraire, les caractéristiques mécaniques statiques, en d'autres termes la résistance à la rupture R<sub>m</sub>, la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2% d'allongement R<sub>p0,2</sub> (« limite d'élasticité ») et l'allongement à la rupture A, sont déterminées par un essai de traction selon la norme EN 10002-1, le prélèvement et le sens de l'essai étant définis par la norme EN 485-1.

Le facteur d'intensité de contrainte ( $K_Q$ ) est déterminé selon la norme ASTM E 399. Ainsi, la proportion des éprouvettes définie au paragraphe 7.2.1 de cette norme est toujours vérifiée de même que la procédure générale définie au paragraphe 8. La norme ASTM E 399 donne aux paragraphes 9.1.3 et 9.1.4 des critères qui permettent de déterminer si  $K_Q$  est une valeur valide de  $K_{1C}$ . Ainsi, une valeur  $K_{1C}$  est toujours une valeur  $K_Q$  la réciproque n'étant pas vraie. Dans le cadre de l'invention, les critères des paragraphes 9.1.3 et 9.1.4 de la norme ASTM E399 ne sont pas toujours vérifiés, cependant pour une géométrie d'éprouvette donnée, les valeurs de  $K_Q$  présentées sont toujours comparables entre elles, la géométrie d'éprouvette permettant d'obtenir une valeur valide de  $K_{1C}$  n'étant pas toujours accessible compte tenu des contraintes liées aux dimensions des tôles ou profilés.

**[0019]** Le test MASTMAASIS (Modified ASTM Acetic Acid Salt Intermittent Spray) est effectué selon la norme ASTM G85.

Sauf mention contraire, les définitions de la norme EN 12258 s'appliquent. L'épaisseur des profilés est définie selon la norme EN 2066 :2001 : la section transversale est divisée en rectangles élémentaires de dimensions A et B ; A étant toujours la plus grande dimension du rectangle élémentaire et B pouvant être considéré comme l'épaisseur du rectangle élémentaire. La semelle est le rectangle élémentaire présentant la plus grande dimension A.

**[0020]** 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 (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.

**[0021]** Les présents inventeurs ont constaté que de manière surprenante, pour certains alliages Al-Cu-Li de faible densité contenant à la fois une addition d'argent, de magnésium, de zirconium et de manganèse, le choix de conditions d'homogénéisation spécifiques permet d'améliorer de façon très significative le compromis entre la résistance mécanique et la tolérance aux dommages.

Le procédé selon l'invention permet la fabrication d'un produit filé, laminé et/ou forgé. Dans une première étape, on élabore un bain de métal liquide de façon à obtenir un alliage d'aluminium de composition définie.

La teneur en cuivre de l'alliage pour lequel l'effet surprenant lié au choix des conditions d'homogénéisation est observé est comprise entre 2,0 et 3,5 % en poids, de manière préférée entre 2,45 ou 2,5 et 3,3% en poids. Dans un mode de réalisation avantageux, la teneur en cuivre est comprise entre 2,7 et 3,1 % en poids.

La teneur en lithium est comprise entre 1,4 et 1,8%. Dans un mode de réalisation avantageux la teneur en lithium est comprise entre 1,42 et 1,77 % en poids.

La teneur en argent est comprise entre 0,1 et 0,5% en poids. Les présents inventeurs ont constaté qu'une quantité importante d'argent n'est pas nécessaire pour obtenir l'amélioration souhaitée dans le compromis entre la résistance mécanique et la tolérance aux dommages. Dans une réalisation avantageuse de l'invention, la teneur en argent est comprise entre 0,15 et 0,35 % en poids. Dans un mode de réalisation de l'invention, qui présente l'avantage de minimiser la densité, la teneur en argent est au plus de 0,25 % en poids.

La teneur en magnésium est comprise entre 0,1 et 1,0% en poids et de manière préférée elle est inférieure à 0,4 % en poids.

La combinaison des conditions d'homogénéisation spécifiques et de l'addition simultanée de zirconium et de manganèse est une caractéristique essentielle de l'invention. La teneur en zirconium doit être comprise entre 0,05 et 0,18 % en poids et la teneur en manganèse doit être comprise entre 0,2 et 0,6 % en poids. De manière préférée, la teneur en manganèse est au plus de 0,35% en poids.

L'alliage contient également au moins un élément pouvant contribuer au contrôle de la taille de grain choisi parmi Cr, Sc, Hf et Ti, la quantité de l'élément, s'il est choisi, étant de 0,05 à 0,3 % en poids pour Cr et pour Sc, 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et de 0,01 à 0,15 % en poids pour Ti.

Il est préférable de limiter la teneur des impuretés inévitables de l'alliage de façon à atteindre les propriétés de tolérance aux dommages les plus favorables. Les impuretés inévitables comprennent le fer et le silicium, ces impuretés ont de préférence une teneur inférieure à 0,08 % en poids et 0,06 % en poids pour le fer et le silicium, respectivement, les autres impuretés ont de préférence une teneur inférieure à 0,05 % en poids chacune et 0,15 % en poids au total. Par ailleurs la teneur en zinc est de préférence inférieure à 0,04 % en poids.

De préférence, la composition est ajustée de façon à obtenir une densité à température ambiante inférieure à 2,67 g/cm<sup>3</sup>, de manière encore plus préférée inférieure à 2,66 g/cm<sup>3</sup> voire dans certains cas inférieure à 2,65 g/cm<sup>3</sup> ou même 2,64 g/cm<sup>3</sup>. La diminution de la densité est en général associée à une dégradation des propriétés. Dans le cadre de l'invention, il est possible de manière surprenante de combiner une faible densité avec un compromis de propriétés

mécaniques très avantageux.

Le bain de métal liquide est ensuite coulé sous une forme brute, telle qu'une billette, une plaque de laminage ou une ébauche de forge.

La forme brute est ensuite homogénéisée à une température comprise entre 515 °C et 525°C de façon à ce que le temps équivalent  $t(eq)$  à 520 °C pour l'homogénéisation soit compris entre 5 et 20 heures et de préférence entre 6 et 15 heures. Le temps équivalent  $t(eq)$  à 520 °C est défini par la formule :

$$t(eq) = \frac{\int \exp(-26100/T) dt}{\exp(-26100/T_{ref})}$$

où  $T$  (en Kelvin) est la température instantanée de traitement, qui évolue avec le temps  $t$  (en heures), et  $T_{ref}$  est une température de référence fixée à 793 K.  $t(eq)$  est exprimé en heures. La constante  $Q/R = 26100$  K est dérivée de l'énergie d'activation pour la diffusion du Mn,  $Q = 217000$  J/mol. La formule donnant  $t(eq)$  tient compte des phases de chauffage et de refroidissement. Dans le mode de réalisation préféré de l'invention, la température d'homogénéisation est d'environ 520 °C et la durée de traitement est comprise entre 8 et 20 heures. Pour l'homogénéisation, les temps indiqués correspondent à des durées pour lesquelles le métal est effectivement à la température souhaitée.

**[0022]** Dans les exemples il est montré que les conditions d'homogénéisation selon l'invention permettent d'améliorer de façon surprenante le compromis entre ténacité et résistance mécanique par rapport à des conditions dans lesquelles la combinaison de durée et température est plus faible ou plus élevée. Il est généralement admis par l'homme du métier que, en vue de minimiser la durée d'homogénéisation, il est avantageux de réaliser l'homogénéisation à la température la plus élevée possible permettant d'éviter la fusion locale de façon accélérer les processus de diffusion des éléments et de précipitation des dispersoïdes. Les présents inventeurs ont constaté au contraire pour la composition d'alliage selon l'invention, un effet favorable surprenant d'une combinaison de durée et température d'homogénéisation plus faible que celle selon l'art antérieur.

Après homogénéisation, la forme brute est en général refroidie jusqu'à température ambiante avant d'être préchauffée en vue d'être déformée à chaud. Le préchauffage a pour objectif d'atteindre une température de préférence comprise entre 400 et 500 °C et de manière préférée de l'ordre de 450 °C permettant la déformation de la forme brute. Le préchauffage est typiquement de 20 heures à 520 °C pour des plaques. Il est à noter que contrairement à l'homogénéisation, les durées et températures mentionnées pour le préchauffage correspondent à la durée passée dans le four et à la température du four et non à la température effectivement atteinte par le métal et à la durée passée à cette température. Pour les billettes destinées à être filées, le préchauffage par induction est avantageux.

La déformation à chaud et optionnellement à froid est typiquement effectuée par filage, laminage et/ou forgeage de façon à obtenir un produit filé, laminé et/ou forgé. Le produit ainsi obtenu est ensuite mis en solution de préférence par traitement thermique entre 490 et 530 °C pendant 15 min à 8 h, puis trempé typiquement avec de l'eau à température ambiante ou préférentiellement de l'eau froide.

Le produit subit ensuite une traction contrôlée de 1 à 5 % et préférentiellement d'au moins 2%. Dans un mode de réalisation de l'invention, on réalise un laminage à froid avec une réduction comprise entre 5% et 15% avant l'étape de traction contrôlée. Des étapes connues telles que le planage, le redressage, la mise en forme peuvent être optionnellement réalisées avant ou après la traction contrôlée.

Un revenu est réalisé à une température comprise entre 140 et 170°C pendant 5 à 70 h de façon à ce que le produit ait une limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement d'au moins 440 MPa et de préférence d'au moins 460 MPa. Les présents inventeurs ont constaté que de manière surprenante, la combinaison des conditions d'homogénéisation selon l'invention avec un revenu préféré réalisé par chauffage à 148 à 155 °C pendant 10 à 40 heures permet d'atteindre dans certains cas un niveau de ténacité  $K_{1C}(L-T)$  particulièrement élevé.

Les présents inventeurs pensent que les produits obtenus par le procédé selon l'invention présentent une microstructure très particulière, bien qu'ils n'aient pas encore pu la décrire de façon précise. En particulier, la taille, la répartition et la morphologie des dispersoïdes contenant du manganèse semblent être remarquables pour les produits obtenus par le procédé selon l'invention, cependant la caractérisation complète de ses dispersoïdes, dont la taille est de l'ordre de 50 à 100 nm, nécessite des observations en microscopie électronique à un grossissement de  $\times 30\ 000$ , quantifiées et nombreuses ce qui explique la difficulté d'en obtenir une description fiable.

Les produits selon l'invention ont de préférence une structure granulaire essentiellement non-recristallisée. Par essentiellement non-recristallisée il est entendu que au moins 80% et de préférence au moins 90% des grains ne sont pas recristallisés à quart et à mi-épaisseur de produit.

Les produits filés et en particulier les profilés filés obtenus par le procédé selon l'invention sont particulièrement avantageux. Les avantages du procédé selon l'invention ont été observés pour de profilés minces dont l'épaisseur d'au moins un rectangle élémentaire est comprise entre 1 mm et 8 mm et des profilés épais, cependant les profilés épais, c'est-à-

## EP 2 364 378 B1

dire dont l'épaisseur d'au moins un rectangle élémentaire est supérieure à 8 mm, et de préférence supérieure à 12 mm, voire 15 mm sont les plus avantageux. Le compromis entre la résistance mécanique statique et la ténacité ou la tenue en fatigue est particulièrement avantageux pour les produits filés selon l'invention.

Un produit filé en alliage d'aluminium selon l'invention a une densité inférieure à 2,67 g/cm<sup>3</sup>, est susceptible d'être obtenu par le procédé selon l'invention, et est avantageusement caractérisé en ce que :

(a) sa limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement dans le sens L  $R_{p0,2}(L)$  exprimée en MPa

et sa ténacité  $K_{1C}(L-T)$ , dans le sens L-T exprimée en MPa  $\sqrt{m}$  sont telles que  $K_Q(L-T) > 129 - 0,17 R_{p0,2}(L)$ ,  
préférentiellement  $K_Q(L-T) > 132 - 0,17 R_{p0,2}(L)$  et encore plus préférentiellement  $K_Q(L-T) > 135 - 0,17 R_{p0,2}(L)$  ; et/ou

(b) sa résistance à la rupture dans le sens L  $R_m(L)$  exprimée en MPa et sa ténacité  $K_Q(L-T)$ , dans le sens L-T  
exprimée en MPa  $\sqrt{m}$  sont telles que  $K_Q(L-T) > 179 - 0,25 R_m(L)$ , préférentiellement  $K_Q(L-T) > 182 - 0,25 R_m(L)$   
et encore plus préférentiellement  $K_Q(L-T) > 185 - 0,25 R_m(L)$  ; et/ou

(c) sa résistance à la rupture dans le sens TL  $R_m(TL)$  exprimée en MPa et sa ténacité  $K_Q(L-T)$ , dans le sens L-T  
exprimée en MPa  $\sqrt{m}$  sont telles que  $K_Q(L-T) > 88 - 0,09 R_m(TL)$ , préférentiellement  $K_Q(L-T) > 90 - 0,09 R_m(TL)$   
et encore plus préférentiellement  $K_Q(L-T) > 92 - 0,09 R_m(TL)$  et/ou

(d) sa limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement dans le sens L  $R_{p0,2}(L)$  d'au moins 490 MPa  
et de préférence d'au moins 500 MPa et sa contrainte maximale pour l'initiation des fissures de fatigues pour un  
nombre de cycles à rupture de 10<sup>5</sup> est supérieure à 210 MPa, préférentiellement supérieure à 220 MPa et encore  
plus préférentiellement supérieure à 230 MPa pour des éprouvettes de  $K_t = 2,3$ , avec  $R = 0,1$ .

De manière préférée, la ténacité  $K_Q(L-T)$  des produits filés selon l'invention est d'au moins 43 MPa  $\sqrt{m}$ .

**[0023]** Dans le mode de réalisation de l'invention, permettant d'atteindre pour des produits filés une ténacité  $K_Q(L-T)$   
d'au moins 52 MPa  $\sqrt{m}$  avec une limite d'élasticité  $R_{p0,2}(L)$  d'au moins 490 MPa, ou préférentiellement une ténacité  
 $K_Q(L-T)$  d'au moins 56 MPa  $\sqrt{m}$  avec une résistance à rupture  $R_m(L)$  d'au moins 515 MPa, une teneur en cuivre  
comprise entre 2,45 et 2,65 % en poids est associée à une teneur en lithium comprise entre 1,4 et 1,5 % en poids.

**[0024]** Dans un autre mode de réalisation de l'invention, permettant d'atteindre pour des produits filés une ténacité  
 $K_Q(L-T)$  d'au moins MPa  $\sqrt{m}$  avec une limite d'élasticité  $R_{p0,2}(L)$  d'au moins 520 MPa, une teneur en cuivre comprise  
entre 2,65 et 2,85 % en poids est associée à une teneur en lithium comprise entre 1,5 et 1,7 % en poids.

De manière préférée, la densité des produits filés selon l'invention est inférieure à 2,66 g/cm<sup>3</sup>, de manière encore plus  
préférée inférieure à 2,65 g/cm<sup>3</sup> voire dans certains cas inférieure à 2,64 g/cm<sup>3</sup>.

**[0025]** Dans un mode de réalisation avantageux de l'invention, on réalise un revenu permettant d'obtenir une limite  
d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement supérieure à 520 MPa, par exemple de 30h à 152 °C, la  
résistance à la rupture dans le sens L  $R_m(L)$ , exprimées en MPa et la ténacité  $K_Q(L-T)$ , dans le sens L-T exprimée en  
MPa  $\sqrt{m}$  sont alors telles  $R_m(L) > 550$  et  $K_Q(L-T) > 50$ .

Le procédé selon l'invention permet également d'obtenir des produits laminés avantageux. Parmi les produits laminés,  
les tôles dont l'épaisseur est au moins de 10 mm et de préférences d'au moins 15 mm et/ou au plus 100 mm et de  
préférence au plus 50 mm sont avantageuses.

Un produit laminé en alliage d'aluminium selon l'invention a une densité inférieure à 2,67 g/cm<sup>3</sup>, est susceptible d'être  
obtenu par le procédé selon l'invention, et est avantageusement caractérisé en ce que sa ténacité  $K_Q(L-T)$ , dans le sens

L-T est au moins de 23 MPa  $\sqrt{m}$  et de préférence d'au moins 25 MPa  $\sqrt{m}$ , sa limite d'élasticité conventionnelle  
mesurée à 0,2% d'allongement dans le sens L  $R_{p0,2}(L)$  est au moins égale à 560 MPa et de préférence au moins égale  
à 570 MPa et/ou sa résistance à la rupture dans le sens L  $R_m(L)$  est au moins égale à 585 MPa et de préférence au  
moins égale à 595 MPa.

De manière préférée, la densité des produits laminés selon l'invention est inférieure à 2,66 g/cm<sup>3</sup>, de manière encore  
plus préférée inférieure à 2,65 g/cm<sup>3</sup> voire dans certains cas inférieure à 2,64 g/cm<sup>3</sup>.

Les produits selon l'invention peuvent de manière avantageuse être utilisés dans des éléments de structure, en particulier  
d'avion. Un élément de structure incorporant au moins un produit selon l'invention ou fabriqué à partir d'un tel produit  
est avantageux, en particulier pour la construction aéronautique. Un élément de structure, formé d'au moins un produit  
selon l'invention, en particulier d'un produit filé selon l'invention utilisé en tant que raidisseur ou de cadre, peut être

## EP 2 364 378 B1

utilisé avantageusement pour la fabrication de panneaux de fuselage ou de voilure d'avions de même que toute autre utilisation où les présentes propriétés pourraient être avantageuses.

Dans l'assemblage de pièces structurales, toutes les techniques connues et possibles de rivetage et de soudage appropriées pour des alliages en aluminium peuvent être utilisées, si souhaité. Les inventeurs ont trouvé que si le soudage est choisi, il peut être préférable d'utiliser des techniques de soudage au laser ou de soudage par friction-malaxage. Les produits de l'invention n'induisent généralement aucun problème particulier pendant des opérations ultérieures de traitement de surface classiquement utilisées en construction aéronautique.

La résistance à la corrosion des produits de l'invention est généralement élevée ; à titre d'exemple, le résultat au test MASTMAASIS est au moins EA et de préférence P pour les produits selon l'invention.

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

### Exemples

#### Exemple 1.

**[0026]** Dans cet exemple, plusieurs plaques en alliage Al-Cu-Li dont la composition est donnée dans le tableau 1 ont été coulées.

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

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
1	0,06	0,04	2,94	0,01	0,36	0,01	0,02	0,12	1,62	0,34	2,635
2	0,04	0,05	2,83	0,33	0,36	0,02	0,02	0,11	1,59	0,38	2,641

**[0027]** Les plaques ont été homogénéisées selon l'art antérieur 8h à 500 °C puis 24h à 527 °C. Des billettes ont été prélevées dans les plaques. Les billettes ont été réchauffées à 450 °C +/- 40 °C puis filées à chaud pour obtenir des profilés W selon la Figure 1. Les profilés ainsi obtenus ont été mis en solution à 524 °C, trempés avec de l'eau de température inférieure à 40 °C, et tractionnés avec un allongement permanent compris entre 2 et 5%. Le revenu a été effectué pendant 48h à 152 °C. Des échantillons prélevés en fin de profilé 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), diamètre des échantillons : 10 mm) de même que leur ténacité ( $K_Q$ ). La localisation des prélèvements est indiquée en pointillés sur la Figure 1. Les éprouvettes utilisées pour les mesures de ténacité avaient pour caractéristiques B=15 mm et W = 30 mm.

**[0028]** Une vitesse de montée en température de 15 °C/h et de 50 °C/h ont été utilisées pour l'homogénéisation et la mise en solution, respectivement. Le temps équivalent pour l'homogénéisation était de 37,5 heures. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2. Propriétés mécaniques des profilés obtenus à partir des alliages 1 et 2.

Alliage	Sens L			Sens LT			$K_Q (K_{1C})$ (MPa $\sqrt{m}$ )	
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	L-T	T-L
1	571	533	8,7	560	508	10,4	28,5	29,0
2	556	522	7,9	550	515	8,4	37,6	35,5

#### Exemple 2

**[0029]** Dans cet exemple, on a comparé trois conditions d'homogénéisation pour deux types de profilés, obtenus à partir de billettes prélevées dans une plaque dont la composition est donnée dans le tableau 3 ci-dessous.

## EP 2 364 378 B1

Tableau 3 Composition en % en poids et densité de l'alliage Al-Cu-Li utilisé.

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
3	0,03	0,04	2,72	0,31	0,31	0,02	0,03	0,10	1,61	0,34	2,637

**[0030]** Les billettes ont été homogénéisées soit 8h à 500 °C puis 24h à 527 °C (référence A) soit 8h à 520 °C (référence B) soit 8h à 500 °C (référence C). La vitesse de montée en température était de 15 °C/h pour l'homogénéisation et le temps équivalent était de 37,5 heures pour l'homogénéisation de référence A, 9,5 heures pour l'homogénéisation de référence B, et de 4 heures l'homogénéisation de référence C. Après homogénéisation, les billettes ont été réchauffées à 450 °C +/- 40 °C puis filées à chaud pour obtenir des profilés X selon la Figure 2 ou Y selon la Figure 3. Les profilés ainsi obtenus ont été mis en solution à 524 +/- 2 °C, trempés avec de l'eau de température inférieure à 40 °C, et tractionnés avec un allongement permanent compris entre 2 et 5%.

**[0031]** Différentes conditions de revenu ont été mises en oeuvre. Des échantillons prélevés en fin de profilé 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) de même que leur ténacité ( $K_Q$ ). Les zones de prélèvement pour le profilé Y sont indiquées sur la Figure 3 : renfort (1), Renfort/semelle (2) semelle (3), les éprouvettes utilisées pour les mesures de ténacité avaient pour caractéristiques B=15 mm et W = 60 mm. Pour le profilé X, les prélèvements sont effectués sur la semelle, les éprouvettes utilisées pour les mesures de ténacité avaient pour caractéristiques B=20 mm et W = 76 mm. Les échantillons prélevés avaient un diamètre de 10 mm sauf pour le sens T-L pour lequel les échantillons avaient un diamètre de 6 mm. Les résultats obtenus sur les profilés X sont donnés dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4. Propriétés mécaniques des profilés X en alliage 3.

Revenu	Homogénéisation	Sens L			Sens TL			$K_Q$ (MPa $\sqrt{m}$ )	
		$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	L-T	T-L
48H152°C	A	563	533	8,4	512	484	5,4	39,1	30,9
	B	569	541	9,8	528	500	6,6	40,7	34,2
	C	565	537	7,7	507	477	6,7	37,7	28,9
30h152°C	A	554	522	8,8	500	470	5,2	42,5	34,1
	B	557	524	10,1	519	486	7,4	53,3	42,9
	C	553	520	8,0	494	457	7,4	40,7	32,9
23h145°C	A	512	452	9,3	448	390	6,7	47,2	43,8
	B	515	455	10,0	479	414	12,6	47,1	58,9
	C	513	454	8,3	445	377	9,0	45,6	43,2

**[0032]** Ces résultats sont illustrés par les Figures 4a (sens L) et 4b (sens TL). Pour les profilés provenant de billettes ayant été homogénéisées à 520 °C, le compromis entre résistance mécanique et ténacité est très nettement amélioré. Dans le sens long, l'amélioration est particulièrement nette pour un revenu de 30 heures à 152 °C.

**[0033]** Les résultats obtenus avec le profilé Y sont donnés dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5. Propriétés mécaniques des profilés Y en alliage 3.

Revenu		30h 152°C		48h 152 °C	
Homogénéisation		A	B	A	B
sens L - Renfort	$R_m$ (MPa)	527	563	538	573
	$R_{p0,2}$ (MPa)	500	537	516	551
	A (%)	7,5	9,9	8,1	9,6

## EP 2 364 378 B1

(suite)

Revenu		30h 152°C		48h 152 °C	
Homogénéisation		A	B	A	B
sens L-Renfort/semelle	R <sub>m</sub> (MPa)	534	580	551	590
	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	510	559	534	572
	A (%)	6,6	8,6	7	7,8
sens L - Semelle	R <sub>m</sub> (MPa)	543	536	557	549
	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	505	494	529	517
	A (%)	7,3	9,2	7,2	9,5
Sens T-L (semelle)	R <sub>m</sub> (MPa)	501	488	513	503
	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	456	441	472	462
	A (%)	8,8	12,3	8,6	11,4
K <sub>Q</sub> (CT15-W60) (MPa√m)	L-T	34,3	45,2	30,5	42,8
	T-L	29,3	42,5	26,4*	37,3
* K <sub>1C</sub>					

**[0034]** Ces résultats sont illustrés par les Figures 5a (sens L) et 5b (sens TL). Pour les profilés provenant de billettes ayant été homogénéisées à 520 °C, le compromis entre résistance mécanique et ténacité est à nouveau très nettement amélioré et ce pour les deux conditions de revenu testées.

**[0035]** Des essais de fatigue ont été réalisés dans le cas du revenu de 30 h à 152 °C, sur des éprouvettes à trou (Kt = 2,3) avec un rapport (charge minimale / charge maximale) R = 0,1 à une fréquence de 80 Hz. Les essais ont été réalisés à l'air ambiant du laboratoire. Ces essais sont présentés sur le Figure 6. Pour un nombre de cycles donné, l'augmentation de la contrainte maximale est comprise entre 10 et 25%. La contrainte maximale pour l'initiation des fissures de fatigues pour un nombre de cycles à rupture de 10<sup>5</sup> est de l'ordre de 230 MPa pour des éprouvettes de Kt = 2,3, avec R = 0,1.

### Exemple 3

**[0036]** Dans cet exemple, on a comparé deux des conditions d'homogénéisation de l'exemple 2 pour un autre type de profilés, obtenus à partir de billettes prélevées dans une plaque dont la composition est donnée dans le tableau 6 ci-dessous :

Tableau 6. Composition en % en poids des alliages Al-Cu-Li utilisés

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
4	0.03	0.05	3,05	0,01	0.39	0,01	0.03	0,12	1,70	0.35	2,631
5	0.03	0.04	2,90	0.31	0.40	0,01	0.03	0,1	1,67	0,38	2,635

**[0037]** Les billettes en alliage 4 ont été homogénéisées 8h à 500 °C puis 24h à 527 °C (soit l'homogénéisation de référence A) tandis que les billettes en alliage 5 ont été homogénéisées 8h à 520 °C (référence B). Après homogénéisation, les billettes ont été réchauffées à 450 °C +/- 40 °C puis filées à chaud pour obtenir des profilés Z selon la Figure 7. Les profilés ainsi obtenus ont été mis en solution à 524 +/- 2 °C, trempés avec de l'eau de température inférieure à 40 °C, et tractionnés avec un allongement permanent compris entre 2 et 5%. Les profilés ont enfin subi un revenu de 48h à 152 °C. Des échantillons prélevés en fin de profilé ont été testés pour déterminer leurs propriétés mécaniques statiques (limite d'élasticité R<sub>p0,2</sub>, la résistance à la rupture R<sub>m</sub>, et l'allongement à la rupture (A), diamètre des échantillons : 10 mm) de même que leur ténacité (K<sub>Q</sub>), les éprouvettes utilisées pour les mesures de ténacité avaient pour caractéristiques B=15 mm et W = 60 mm. Les mesures effectuées en fin de profilé permettent manière générale d'obtenir les caractéristiques mécaniques les plus défavorables du profilé. La localisation des prélèvements est indiquée en pointillés sur la Figure 7.

## EP 2 364 378 B1

**[0038]** Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 7 ci-dessous. Les produits selon l'invention présentent des caractéristiques mécaniques légèrement supérieures et une ténacité améliorée de plus de 20%.

Tableau 7. Propriétés mécaniques des profilés Z en alliage 4 et 5.

Alliage	Sens L			$K_Q$ (MPa $\sqrt{m}$ )	
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	L-T	T-L
4	576	527	8,4	31,0	31,4
5	574	536	9,8	38,2	37,8

Exemple 4

**[0039]** Dans cet exemple, une billette dont la composition est donnée dans le tableau 8 a été coulée.

Tableau 8 Composition en % en poids et densité de l'alliage Al-Cu-Li utilisé.

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
6	0,03	0,05	3,1	0,3	0,4	0,01	0,03	0,11	1,65	0,34	2,639

**[0040]** Les billettes en alliage 6 ont été homogénéisées 8h à 520 °C (soit l'homogénéisation de référence B). Après homogénéisation, les billettes ont été réchauffées à 450 °C +/- 40 °C puis filées à chaud pour obtenir des profilés P selon la Figure 8. Les profilés ainsi obtenus ont été mis en solution, trempés avec de l'eau de température inférieure à 40 °C, et tractionnés avec un allongement permanent compris entre 2 et 5%. Les profilés ont enfin subi un revenu de 48h à 152 °C. Des échantillons prélevés en fin de profilé 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).

**[0041]** Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9. Propriétés mécaniques des profilés P en alliage 6.

Alliage	Sens L		
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
6	562	525	10,1

**[0042]** Des essais de fatigue ont été réalisés dans, sur des éprouvettes à trou ( $K_t = 2,3$ ) avec un rapport (charge minimale / charge maximale)  $R = 0,1$  à une fréquence de 80 Hz. Les essais ont été réalisés à l'air ambiant du laboratoire. Les résultats de ces essais sont donnés dans le Tableau 10.

Tableau 10. Résultats des essais de fatigue S/N pour les profilés en alliage 6

Charge maximale [MPa]	Cycles
MPa	N
300	22 120
280	31 287
260	46 696
240	53 462
220	87 648
200	113 583
180	132 003
170	203 112

## EP 2 364 378 B1

(suite)

Charge maximale [MPa]	Cycles
MPa	N
160	232 743
150	177 733
140	5 113 237
130	9 338 654

### Exemple 5

**[0043]** Dans cet exemple, une billette dont la composition est donnée dans le tableau 11 a été coulée.

Tableau 11 Composition en % en poids et densité de l'alliage Al-Cu-Li utilisé.

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
7	0,03	0,05	3,1	0,3	0,4	0,01	0,04	0,10	1,71	0,36	2,636

**[0044]** Les billettes en alliage 7 ont été homogénéisées 8h à 520 °C (soit l'homogénéisation de référence B). Après homogénéisation, les billettes ont été réchauffées à 450 °C +/- 40 °C puis filées à chaud pour obtenir des profilés Q selon la Figure 9. Les profilés ainsi obtenus ont été mis en solution, trempés avec de l'eau de température inférieure à 40 °C, et tractionnés avec un allongement permanent compris entre 2 et 5%. Les profilés ont enfin subi un revenu de 48h à 152 °C. Des échantillons prélevés en fin de profilé 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).

**[0045]** Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 12 ci-dessous.

Tableau 12. Propriétés mécaniques des profilés Q en alliage 7.

Alliage	Sens L		
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
7	561	521	8,5

**[0046]** Des essais de fatigue ont été réalisés dans, sur des éprouvettes à trou ( $K_t = 2,3$ ) avec un rapport (charge minimale / charge maximale)  $R = 0,1$  à une fréquence de 80 Hz. Les essais ont été réalisés à l'air ambiant du laboratoire. Les résultats de ces essais sont donnés dans le Tableau 13.

Tableau 13. Résultats des essais de fatigue S/N pour les profilés en alliage 7.

Charge maximale [MPa]	Cycles
MPa	N
300	22 165
280	32 214
260	47 536
240	59 094
220	103 407
200	251 771
190	254 842
180	6 508 197
160	6 130 947

## EP 2 364 378 B1

(suite)

Charge maximale [MPa]	Cycles
MPa	N
130	9 383 980

Exemple 6

**[0047]** Dans cet exemple, une plaque dont la composition est donnée dans le tableau 14 a été coulée.

Tableau 14 Composition en % en poids et densité de l'alliage Al-Cu-Li utilisé.

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
8	0,03	0,06	3,1	0,3	0,4	0,01	0,03	0,11	1,77	0,36	2,631

**[0048]** La plaque a été scalpée puis homogénéisée à 520 +/- 5 °C pendant 8 h (soit l'homogénéisation de référence B). Après homogénéisation, la plaque a été laminée à chaud pour obtenir des tôles ayant une épaisseur de 25 mm. Les tôles ont été mises en solution à 524 +/- 2 °C, trempées à l'eau froide et tractionnées avec un allongement permanent compris entre 2 et 5%. Des échantillons de diamètre 10 mm prélevés dans certaines de ces tôles ont ensuite subi un revenu d'une durée comprise entre 20h et 50h à 155 °C. Ces 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)) de même que leur ténacité ( $K_Q$ ), avec des éprouvettes de géométrie B = 15 mm, W = 30 mm. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 15 ci-dessous.

Tableau 15 Propriétés mécaniques des tôles en alliage 8 ayant subi un revenu en laboratoire.

Alliage	Traction	Durée du revenu à 155 °C	$R_m$ L (MPa)	$R_{p0,2}$ L (MPa)	$K_Q$ L-T (MPa $\sqrt{m}$ )
8	2,5 %	20	557	504	33,9
		30	579	538	28,6
		40	586	550	25,4
		50	589	555	25,8*
8	4,4 %	20	577	543	30,5
		30	589	562	27,2
		40	594	566	23,8*
		50	597	571	23,7

\* $K_{1C}$

**[0049]** Les tôles ont subi un revenu industriel de 48 h à 152 °C. Les résultats des essais mécaniques (prélèvement à mi-épaisseur) effectués sur les tôles ainsi obtenues sont donnés dans le Tableau 16.

Tableau 16 Propriétés mécaniques des tôles en alliage 8 ayant subi un revenu industriel

Traction	$R_{mL}$ (MPa)	$R_{p0,2L}$ (MPa)	A% L	$R_{mTL}$ (MPa)	$R_{p0,2TL}$ (MPa)	A% TL	$R_{m45^\circ}$ (MPa)	$R_{p0,245^\circ}$ (MPa)	A% 45°	$K_{QL-T}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$K_{QT-L}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
2,5	594	559	6	568	523	6	522	466	9	26,2	25,1
4	600	571	6	575	537	6	526	476	10	25,3	24,7

## EP 2 364 378 B1

### Exemple 7

**[0050]** Dans cet exemple, on a utilisé les conditions d'homogénéisation selon l'invention pour deux types de profilés, obtenus à partir de billettes en deux alliages différents dont la composition est donnée dans le tableau 17 ci-dessous.

Tableau 17 Composition en % en poids et densité de l'alliage Al-Cu-Li utilisé.

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Zr	Li	Ag	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
9	0,03	0,05	2,49	0,31	0,35	0,01	0,04	0,13	1,43	0,25	2,645
10	0,03	0,06	2,62	0,30	0,35	0,01	0,04	0,14	1,42	0,25	2,648

Les billettes ont été homogénéisées 8h à 520 °C (référence B) La vitesse de montée en température était de 15 °C/h pour l'homogénéisation et le temps équivalent était 9,5 heures Après homogénéisation, les billettes ont été réchauffées à 450 °C +/- 40 °C puis filées à chaud pour obtenir des profilés X selon la Figure 2 ou Y selon la Figure 3. Les profilés ainsi obtenus ont été mis en solution à 524 +/- 2 °C, trempés avec de l'eau de température inférieure à 40 °C, et tractionnés avec un allongement permanent compris entre 2 et 5%. Différentes conditions de revenu ont été mises en oeuvre. Des échantillons prélevés en fin de profilé ont été testés pour déterminer leurs propriétés mécaniques statiques (limite d'élasticité R<sub>p0,2</sub>, la résistance à la rupture R<sub>m</sub>, et l'allongement à la rupture (A) de même que leur ténacité (K<sub>Q</sub>). Les prélèvements ont été effectués sur la semelle pour les profilés X et Y. Les échantillons prélevés avaient un diamètre de 10 mm sauf pour le sens T-L pour lequel les échantillons avaient un diamètre de 6 mm. Les éprouvettes utilisées pour les mesures de ténacité avaient pour caractéristiques B=15 mm et W = 60 mm (profilés Y) et B=20 mm et W = 76 mm (profilés X).

Les résultats obtenus sur les profilés X et Y sont donnés dans les tableaux 18 et 19 ci-dessous.

Tableau 18. Propriétés mécaniques des profilés X en alliage 8 et 9.

Alliage	Revenu	Sens L			Sens TL			K <sub>Q</sub> (MPa√m)	
		R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	A (%)	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>p0,2</sub> (MPa)	A (%)	L-T	T-L
9	20H 152 °C	468	405	12,6	444	388	15,1	60,8	60,2
	30H 152 °C	497	450	12,8	465	417	14,1	63,7	52,1
	48H 152 °C	517	478	11,0	486	447	12,5	60,3	47,9*
	60H 152 °C	526	493	10,9	494	458	12,7	56,5	45,6*
10	20H 152 °C	488	433	10,9	457	397	13,1	61,4	54,1
	30H 152 °C	513	470	11,3	486	441	13,2	59,8	47,7
	48H 152 °C	532	498	10,1	501	463	12,4	55,2	42,5*
	60H 152 °C	536	503	9,9	503	468	9,5	53,6	40,0*

\*K<sub>1C</sub>

## EP 2 364 378 B1

Tableau 19. Propriétés mécaniques des profilés Y en alliage 8 et 9.

Alliage	Revenu	Sens L			Sens TL			$K_Q$ (MPa $\sqrt{m}$ )	
		$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	L-T	T-L
9	20H 152 °C	489	432	12	451	392	15	53,6	53,6
	30H 152 °C	517	477	11	478	435	13	57,9	50,8
	48H 152 °C	535	501	10	494	457	12	56,9	47,2
	60H 152 °C	539	506	10	497	462	12	53,0	45,4*
10	20H 152 °C	496	440	11,9	458	402	14	54,2	50,3
	30H 152 °C	523	483	11,1	485	442	13	52,7	46,3
	48H 152 °C	539	506	10,5	500	465	11	52,2	39,5
	60H 152 °C	546	515	10,3	504	470	11	49,1	38,4*

\* $K_{1C}$

**[0051]** Le compromis entre ténacité et résistance mécanique obtenu avec les alliages 9 et 10 est particulièrement avantageux, notamment pour obtenir des valeurs de ténacité très élevées, avec  $K_Q(L-T)$  supérieur à 50 MPa  $\sqrt{m}$ , et même supérieur à 55 MPa  $\sqrt{m}$ .

### Revendications

1. Procédé de fabrication d'un produit filé, laminé et/ou forgé à base d'alliage d'aluminium dans lequel :

- a) on élabore un bain de métal liquide comprenant 2,0 à 3,1 % en poids de Cu, 1,4 à 1,8 % en poids de Li, 0,1 à 0,5 % en poids d'Ag, 0,1 à 1,0 % en poids de Mg, 0,05 à 0,18 % en poids de Zr, 0,2 à 0,6 % en poids de Mn et au moins un élément choisi parmi Cr, Sc, Hf et Ti, la quantité dudit élément, s'il est choisi, étant de 0,05 à 0,3 % en poids pour Cr et pour Sc, 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et de 0,01 à 0,15 % en poids pour Ti, le reste étant de l'aluminium et des impuretés inévitables ; la composition étant ajustée de façon à obtenir une densité à température ambiante inférieure à 2,67 g/cm<sup>3</sup>,
- b) on coule une forme brute à partir dudit bain de métal liquide ;
- c) on homogénéise ladite forme brute à une température comprise entre 515 °C et 525°C de façon à ce que le temps équivalent pour l'homogénéisation

$$t(eq) = \frac{\int \exp(-26100 / T) dt}{\exp(-26100 / T_{ref})}$$

- soit compris entre 5 et 20 heures, où T (en Kelvin) est la température instantanée de traitement, qui évolue avec le temps t (en heures), et  $T_{ref}$  est une température de référence fixée à 793 K ;
- d) on déforme à chaud et optionnellement à froid ladite forme brute en un produit filé, laminé et/ou forgé ;
  - e) on met en solution et on trempe ledit produit ;

## EP 2 364 378 B1

f) on tractionne de façon contrôlée ledit produit avec une déformation permanente de 1 à 5 % et préférentiellement d'au moins 2% ;

g) on réalise un revenu dudit produit par chauffage à 140 à 170 °C pendant 5 à 70 heures de façon à ce que ledit produit ait une limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement d'au moins 440 MPa et de préférence d'au moins 460 MPa.

2. Procédé selon la revendication 1 dans lequel la teneur en cuivre dudit bain de métal liquide est au moins 2,5 % en poids et de préférence au moins 2,7 % en poids.

3. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 2 dans lequel la teneur en lithium dudit bain de métal liquide est comprise entre 1,42 et 1,77% en poids.

4. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 3 dans lequel lesdites impuretés inévitables comprennent le fer et le silicium, ces impuretés ayant une teneur inférieure à 0,08 % en poids et 0,06 % en poids pour le fer et le silicium, respectivement, les autres impuretés ayant une teneur inférieure à 0,05 % en poids chacune et 0,15 % en poids au total.

5. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 4 dans lequel ledit temps équivalent pour l'homogénéisation est compris entre 6 et 15 heures.

6. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel la température d'homogénéisation est d'environ 520 °C et la durée de traitement est comprise entre 8 et 20 heures.

7. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel ledit revenu est réalisé par chauffage à 148 à 155 °C pendant 10 à 40 heures.

8. Produit filé en alliage d'aluminium de densité inférieure à 2,67 g/cm<sup>3</sup> obtenu par le procédé selon une quelconque des revendications 1 à 7 **caractérisé en ce que** sa ténacité  $K_Q(L-T)$  est d'au moins 52 MPa  $\sqrt{m}$  sa limite d'élasticité  $R_{p0,2}(L)$  est d'au moins 490 MPa, et **en ce que** sa teneur en cuivre est comprise entre 2,45 et 2,65 % en poids et sa teneur en lithium est comprise entre 1,4 et 1,5 % en poids et **caractérisé en ce que**:

(a) sa limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement dans le sens L  $R_{p0,2}(L)$  exprimée en MPa et sa ténacité  $K_Q(L-T)$ , dans le sens L-T exprimée en MPa  $\sqrt{m}$  sont telles que  $K_Q(L-T) > 129 - 0,17 R_{p0,2}(L)$  ; et/ou

(b) sa résistance à la rupture dans le sens L  $R_m(L)$  exprimée en MPa et sa ténacité  $K_Q(L-T)$ , dans le sens L-T exprimée en MPa  $\sqrt{m}$  sont telles que  $K_Q(L-T) > 179 - 0,25 R_m(L)$ , et/ou

(c) sa résistance à la rupture dans le sens TL  $R_m(TL)$  exprimée en MPa et sa ténacité  $K_Q(L-T)$ , dans le sens L-T exprimée en MPa  $\sqrt{m}$  sont telles que  $K_Q(L-T) > 88 - 0,09 R_m(TL)$ , et/ou

(d) sa limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement dans le sens L  $R_{p0,2}(L)$  est d'au moins 490 MPa et de préférence d'au moins 500 MPa et sa contrainte maximale pour l'initiation des fissures de fatigues pour un nombre de cycles à rupture de  $10^5$  est supérieure à 210 MPa pour des éprouvettes de  $K_t = 2,3$ , avec  $R = 0,1$ .

9.

Produit filé selon la revendication 8 **caractérisé en ce que** sa ténacité  $K_Q(L-T)$  est d'au moins 56 MPa  $\sqrt{m}$  et sa résistance à rupture  $R_m(L)$  est d'au moins 515 MPa.

10. Produit filé en alliage d'aluminium de densité inférieure à 2,67 g/cm<sup>3</sup> obtenu par le procédé selon une quelconque des revendications 1 à 7 **caractérisé en ce que** sa ténacité  $K_Q(L-T)$  d'au moins 45 MPa  $\sqrt{m}$  et sa limite d'élasticité  $R_{p0,2}(L)$  est d'au moins 520 MPa, et **en ce que** sa teneur en cuivre est comprise entre 2,65 et 2,85 % en poids et sa teneur en lithium est comprise entre 1,5 et 1,7 % en poids et **caractérisé en ce que** :

(a) sa limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement dans le sens L  $R_{p0,2}(L)$  exprimée en

## EP 2 364 378 B1

MPa et sa ténacité  $K_{Q(L-T)}$ , dans le sens L-T exprimée en MPa  $\sqrt{m}$  sont telles que  $K_{Q(L-T)} > 129 - 0,17 R_{p0,2}(L)$  ; et/ou

(b) sa résistance à la rupture dans le sens L  $R_m(L)$  exprimée en MPa et sa ténacité  $K_{Q(L-T)}$ , dans le sens L-T exprimée en MPa  $\sqrt{m}$  sont telles que  $K_{Q(L-T)} > 179 - 0,25 R_m(L)$ , et/ou

(c) sa résistance à la rupture dans le sens TL  $R_m(TL)$  exprimée en MPa et sa ténacité  $K_{Q(L-T)}$ , dans le sens L-T exprimée en MPa  $\sqrt{m}$  sont telles que  $K_{Q(L-T)} > 88 - 0,09 R_m(TL)$ , et/ou

(d) sa contrainte maximale pour l'initiation des fissures de fatigues pour un nombre de cycles à rupture de  $10^5$  est supérieure à 210 MPa pour des éprouvettes de  $K_t = 2,3$ , avec  $R = 0,1$ .

11. Produit filé selon une quelconque des revendications 8 à 10 dont l'épaisseur d'au moins un rectangle élémentaire est supérieure à 8 mm et de préférence supérieure à 12 mm.

12. Produit laminé en alliage d'aluminium de densité inférieure à 2,67 g/cm<sup>3</sup> obtenu par le procédé selon une quelconque des revendications 1 à 7 **caractérisé en ce que** sa ténacité  $K_{Q(L-T)}$ , dans le sens L-T est au moins de 23 MPa  $\sqrt{m}$  et sa limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement dans le sens L  $R_{p0,2}(L)$  est au moins égale à 560 MPa et/ou sa résistance à la rupture dans le sens L  $R_m(L)$  est au moins égale à 585 MPa.

13. Produit laminé selon la revendication 12 dont l'épaisseur est au moins de 10 mm et de préférence au moins 15 mm.

14. Élément de structure incorporant au moins un produit selon une quelconque des revendications 8 à 13 ou fabriqué à partir d'un tel produit.

15. Élément de structure selon la revendication 14 comprenant au moins un produit filé selon une quelconque des revendications 8 à 11 utilisé en tant que raidisseur ou de cadre, **caractérisé en ce qu'il** est utilisé pour la fabrication de panneaux de fuselage ou de voilure d'avions.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Strangpress-, Walz- und/oder Schmiedeerzeugnisses auf Basis einer Aluminiumlegierung, bei dem

a) eine Metallschmelze hergestellt wird, bestehend aus 2,0 bis 3,1 Gew.-% Cu, 1,4 bis 1,8 Gew.-% Li, 0,1 bis 0,5 Gew.-% Ag, 0,1 bis 1,0 Gew.-% Mg, 0,05 bis 0,18 Gew.-% Zr, 0,2 bis 0,6 Gew.-% Mn und mindestens einem Element gewählt unter Cr, Sc, Hf und Ti, wobei die Menge dieses Elements, falls gewählt, 0,05 bis 0,3 Gew.-% für Cr und für Sc, 0,05 bis 0,5 Gew.-% für Hf und 0,01 bis 0,15 Gew.-% für Ti beträgt,

Rest Aluminium und unvermeidbare Verunreinigungen; wobei die Zusammensetzung so eingestellt wird, dass sich eine Dichte bei Raumtemperatur kleiner als 2,67 g/cm<sup>3</sup> ergibt,

b) die Metallschmelze zu einer Rohform vergossen wird;

c) die Rohform bei einer Temperatur zwischen 515 °C und 525 °C so homogenisiert wird, dass die Äquivalentzeit für die Homogenisierung

$$t \text{ (eq)} = \frac{\int \exp(-26100/T) dt}{\exp(-26100/T_{ref})}$$

zwischen 5 und 20 Stunden beträgt, worin T (in Kelvin) die augenblickliche Behandlungstemperatur ist, die sich mit der Zeit t (in Stunden) ändert, und  $T_{ref}$  eine auf 793 K festgelegte Referenztemperatur ist;

d) die Rohform kalt und optional warm zu einem Strangpress-, Walz- und/oder Schmiedeerzeugnis umgeformt wird;

e) das Erzeugnis lösungsgeglüht und abgeschreckt wird;

f) das Erzeugnis mit 1 bis 5 % und vorzugsweise mindestens 2 % bleibender Verformung kontrolliert gereckt wird;

g) das Erzeugnis durch Erwärmen auf 140 bis 170 °C für 5 bis 70 Stunden warmausgelagert wird, so dass das Erzeugnis eine 0,2 %-Dehngrenze von mindestens 440 MPa und vorzugsweise mindestens 460 MPa aufweist.

## EP 2 364 378 B1

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem der Kupfergehalt der Metallschmelze mindestens 2,5 Gew.-% und vorzugsweise mindestens 2,7 Gew.-% beträgt.
3. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 2, bei dem der Lithiumgehalt der Metallschmelze zwischen 1,42 und 1,77 Gew.-% liegt.
4. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem die unvermeidbaren Verunreinigungen Eisen und Silizium enthalten, wobei diese Verunreinigungen einen Anteil von weniger als 0,08 Gew.-% und 0,06 Gew.-% für Eisen bzw. Silizium aufweisen, wobei die anderen Verunreinigungen jeweils einen Anteil von weniger als 0,05 Gew.-% und insgesamt 0,15 Gew.-% aufweisen.
5. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem die Äquivalentzeit für die Homogenisierung zwischen 6 und 15 Stunden liegt.
6. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem die Homogenisierungstemperatur etwa 520 °C beträgt und die Behandlungsdauer zwischen 8 und 20 Stunden liegt.
7. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem die Warmauslagerung durch Erwärmen auf 148 bis 155 °C während 10 bis 40 Stunden erfolgt.
8. Strangpresserzeugnis aus Aluminiumlegierung mit einer Dichte kleiner als 2,67 g/cm<sup>3</sup>, das durch das Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 7 gewonnen ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  mindestens 52 MPa  $\sqrt{m}$ , seine Dehngrenze  $R_{p0,2}(L)$  mindestens 490 MPa beträgt, und dadurch dass sein Kupfergehalt zwischen 2,45 und 2,65 Gew.-% und sein Lithiumgehalt zwischen 1,4 und 1,5 Gew.-% liegt und **dadurch gekennzeichnet:**
- (a) **dass** seine 0,2 %-Dehngrenze in L-Richtung  $R_{p0,2}(L)$  ausgedrückt in MPa und seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  in LT-Richtung ausgedrückt in MPa  $\sqrt{m}$  so sind, dass  $K_Q(L-T) > 129 - 0,17 R_{p0,2}(L)$  ist; und/oder
- (b) **dass** seine Bruchfestigkeit in L-Richtung  $R_m(L)$  ausgedrückt in MPa und seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  in LT-Richtung ausgedrückt in MPa  $\sqrt{m}$  so sind, dass  $K_Q(L-T) > 179 - 0,25 R_{p0,2}(L)$  ist, und/oder
- (c) **dass** seine Bruchfestigkeit in TL-Richtung  $R_m(TL)$  ausgedrückt in MPa und seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  in LT-Richtung ausgedrückt in MPa  $\sqrt{m}$  so sind, dass  $K_Q(L-T) > 88 - 0,09 R_m(TL)$  ist, und/oder
- (d) **dass** seine 0,2 %-Dehngrenze in L-Richtung  $R_{p0,2}(L)$  mindestens 490 MPa und vorzugsweise mindestens 500 MPa beträgt und seine maximale Belastung für die Initiierung von Ermüdungsrissen bei einer Bruchzyklenzahl von 10<sup>5</sup> größer als 210 MPa ist für Proben mit  $K_t = 2,3$ , mit  $R = 0,1$ .
9. Strangpresserzeugnis nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  mindestens 56 MPa  $\sqrt{m}$  und seine Bruchfestigkeit  $R_m(L)$  mindestens 515 MPa beträgt.
10. Strangpresserzeugnis aus Aluminiumlegierung mit einer Dichte kleiner als 2,67 g/cm<sup>3</sup>, das durch das Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 7 gewonnen ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  mindestens 45 MPa  $\sqrt{m}$ , seine Dehngrenze  $R_{p0,2}(L)$  mindestens 520 MPa beträgt, und dadurch dass sein Kupfergehalt zwischen 2,65 und 2,85 Gew.-% und sein Lithiumgehalt zwischen 1,5 und 1,7 Gew.-% liegt und **dadurch gekennzeichnet:**
- (a) **dass** seine 0,2 %-Dehngrenze in L-Richtung  $R_{p0,2}(L)$  ausgedrückt in MPa und seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  in LT-Richtung ausgedrückt in MPa  $\sqrt{m}$  so sind, dass  $K_Q(L-T) > 129 - 0,17 R_{p0,2}(L)$  ist; und/oder
- (b) **dass** seine Bruchfestigkeit in L-Richtung  $R_m(L)$  ausgedrückt in MPa und seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  in LT-Richtung ausgedrückt in MPa  $\sqrt{m}$  so sind, dass  $K_Q(L-T) > 179 - 0,25 R_{p0,2}(L)$  ist, und/oder

## EP 2 364 378 B1

(c) **dass** seine Bruchfestigkeit in TL-Richtung  $R_m(TL)$  ausgedrückt in MPa und seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  in LT-Richtung ausgedrückt in  $MPa\sqrt{m}$  so sind, dass  $K_Q(L-T) > 88 - 0,09 R_m(TL)$  ist, und/oder  
(d) seine maximale Belastung für die Initiierung von Ermüdungsrissen bei einer Bruchzyklenzahl von  $10^5$  größer als 210 MPa ist für Proben mit  $K_t = 2,3$ , mit  $R = 0,1$ .

11. Strangpresserzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 8 bis 10, bei dem die Dicke wenigstens eines Elementarrechtecks größer als 8 mm und vorzugsweise größer als 12 mm ist.
12. Walzerzeugnis aus Aluminiumlegierung mit einer Dichte kleiner als  $2,67 \text{ g/cm}^3$ , das durch das Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 7 gewonnen ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** seine Zähigkeit  $K_Q(L-T)$  in L-T-Richtung mindestens  $23 \text{ MPa}\sqrt{m}$  beträgt und seine 0,2 %-Dehngrenze in L-Richtung  $R_{p0,2}(L)$  mindestens gleich 560 MPa und/oder seine Bruchfestigkeit in L-Richtung  $R_m(L)$  mindestens gleich 585 MPa ist.
13. Walzerzeugnis nach Anspruch 12, dessen Dicke mindestens 10 mm und vorzugsweise mindestens 15 mm beträgt.
14. Strukturelement enthaltend mindestens ein Erzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 8 bis 13 oder hergestellt aus einem solchen Erzeugnis.
15. Strukturelement nach Anspruch 14, enthaltend mindestens ein als Versteifung oder Rahmen eingesetztes Strangpresserzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 8 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** es für die Herstellung von Rumpf- oder Tragflügelplatten für Flugzeuge verwendet wird.

### Claims

1. A method for manufacturing an extruded, laminated and / or forged product based on aluminum alloy, in which:

- a) a molten metal bath is prepared, comprising 2.0 to 3.1% by weight of Cu, 1.4 to 1.8% by weight of Li, 0.1 to 0.5% by weight of Ag, 0.1 to 1.0% by weight of Mg, 0.05 to 0.18% by weight of Zr, 0.2 to 0.6 % by weight of Mn and at least one element selected from Cr, Sc, Hf and Ti, the quantity of said element, if chosen being 0.05 to 0.3% by weight for Cr and Sc, 0.05 to 0.5 % by weight for Hf and 0.01 to 0.15% by weight for Ti, the remainder being aluminum and inevitable impurities, the composition being adjusted to obtain a density at room temperature of less than  $2.67 \text{ g/cm}^3$
- b) a rough shape is cast from said molten metal bath;
- c) said rough shape is homogenized at a temperature between  $515^\circ \text{C}$  and  $525^\circ \text{C}$  so that the equivalent time for homogenization

$$t(\text{eq}) = \frac{\int \exp(-26100/T) dt}{\exp(-26100/T_{\text{ref}})}$$

is between 5 and 20 hours, where T (in Kelvin) is the instantaneous treatment temperature, which changes with time t (in hours), and  $T_{\text{ref}}$  is a reference temperature fixed at 793 K;

- d) said rough shape is hot and optionally cold worked to give an extruded, laminated and / or forged product
- e) said product undergoes solution heat treatment;
- f) said product undergoes controlled stretching with a permanent set of 1 to 5% and preferably at least 2%;
- g) said product is artificially aged by heating to  $140\text{-}170^\circ \text{C}$  for 5 to 70 hours so that said product has a conventional yield strength measured at 0.2% elongation of at least 440 MPa and preferably at least 460 MPa.

2. Process according to claim 1 in which the copper content of said molten metal bath is at least 2.5% by weight and preferably at least 2.7% in weight.
3. Process according to either of claims 1 to 2 in which the lithium content of said molten metal bath ranges between 1.42 and 1.77% by weight.

## EP 2 364 378 B1

4. Process according to any of claims 1 to 3 in which said inevitable impurities include iron and silicon, these impurities having a content less than 0.08% by weight and 0.06% by weight for iron and silicon respectively, other impurities having a content less than 0.05% by weight each and 0.15% by weight in total.

5 5. Process according to any of claims 1 to 4 in which said equivalent time for homogenization ranges between 6 and 15 hours.

6. Process according to any of claims 1 to 5 in which the homogenization temperature is approximately 520°C and the treatment time is between 8 and 20 hours.

10 7. Process according to any of claims 1 to 6 in which said artificial aging is performed by heating to 148 to 155 °C for 10 to 40 hours.

15 8. Extruded product made of aluminum alloy of density less than 2.67 g/cm<sup>3</sup> obtained by the process according to any of claims 1 to 7 **characterized in that** its fracture toughness  $K_Q(L-T)$  is at least 52 MPa√m its yield strength  $R_{p0,2}(L)$  is at least 490 MPa, and **in that** its copper content is comprised between 2,45 and 2,65 weight % and its lithium content is comprised between 1,4 and 1,5 weight % and **characterized in that**:

20 (a) its conventional yield strength measured at 0.2% elongation in direction L  $R_{p0,2}(L)$  expressed in MPa and its fracture toughness  $K_Q(L-T)$ , in direction L-T expressed in MPa √m are such that  $K_Q(L-T) > 129 - 0,17 R_{p0,2}(L)$ ; and / or

(b) its ultimate tensile strength in direction L  $R_m(L)$  expressed in MPa and its fracture toughness  $K_Q(L-T)$ , in direction L-T expressed in MPa √m are such that

25

$$K_Q(L-T) > 179 - 0,25 R_m(L),$$

and / or

30 (c) its ultimate tensile strength in direction LT  $R_m(LT)$  expressed in MPa and its fracture toughness  $K_Q(L-T)$ , in direction L-T expressed in MPa √m are such that  $K_Q(L-T) > 88 - 0,09 R_m(LT)$ , and / or

(d) its conventional yield strength measured at 0.2% elongation in direction L  $R_{p0,2}(L)$  is at least 490 MPa and preferably at least 500 MPa and its maximum stress for the initiation of fatigue cracks for a number of cycles to break of 10<sup>5</sup> is greater than 210 MPa for specimens with  $K_t = 2.3$ , with  $R = 0.1$ .

35

9. Extruded product according to claim 8 **characterized in that** its fracture toughness  $K_Q(L-T)$  is at least 56 MPa√m and its ultimate tensile strength  $R_m(L)$  is at least 515 MPa.

40 10. Extruded product made of aluminum alloy of density less than 2.67 g/cm<sup>3</sup> obtained by the process according to any of claims 1 to 7 **characterized in that** its fracture toughness  $K_Q(L-T)$  is at least 45 MPa√m its yield strength  $R_{p0,2}(L)$  is at least 520 MPa, and **in that** its copper content is comprised between 2,65 and 2,85 weight % and its lithium content is comprised between 1,5 and 1,7 weight % and **characterized in that**:

45 (a) its conventional yield strength measured at 0.2% elongation in direction L  $R_{p0,2}(L)$  expressed in MPa and its fracture toughness  $K_Q(L-T)$ , in direction L-T expressed in MPa √m are such that  $K_Q(L-T) > 129 - 0,17 R_{p0,2}(L)$ ; and / or

(b) its ultimate tensile strength in direction L  $R_m(L)$  expressed in MPa and its fracture toughness  $K_Q(L-T)$ , in direction L-T expressed in MPa √m are such that

50

$$K_Q(L-T) > 179 - 0,25 R_m(L),$$

and / or

55 (c) its ultimate tensile strength in direction LT  $R_m(LT)$  expressed in MPa and its fracture toughness  $K_Q(L-T)$ , in direction L-T expressed in MPa √m are such that  $K_Q(L-T) > 88 - 0,09 R_m(LT)$ , and / or

(d) its maximum stress for the initiation of fatigue cracks for a number of cycles to break of 10<sup>5</sup> is greater than 210 MPa for specimens with  $K_t = 2.3$ , with  $R = 0.1$ .

## EP 2 364 378 B1

11. Extruded product according to any of claims 8 to 10 of which the thickness of at least one elementary rectangle is greater than 8 mm and preferably greater than 12 mm.
- 5 12. Flat-rolled aluminum alloy product with a density lower than 2.67 g/cm<sup>3</sup> obtained by the process according to any of claims 1 to 7 **characterized in that** its fracture toughness  $K_{Q(L-T)}$ , in direction L-T is at least 23 MPa $\sqrt{m}$  and its conventional limit elastic measured at 0.2% elongation in direction L  $R_{p0.2}(L)$  is at least equal to 560 MPa and/or its ultimate tensile strength in direction L  $R_m(L)$  is at least equal to 585 MPa.
- 10 13. Flat-rolled product according to claim 12 whose thickness is at least 10 mm and preferably at least 15 mm.
14. Structural element incorporating at least one product according to any of claims 8 to 13 or manufactured using such a product.
- 15 15. Structural element according to claim 14 including at least one extruded product according to any of claims 8 to 11 used as a stiffener or framework, **characterized in that** it is used for the manufacture of aircraft fuselage panels or wing skins.

20

25

30

35

40

45

50

55

Figure 1

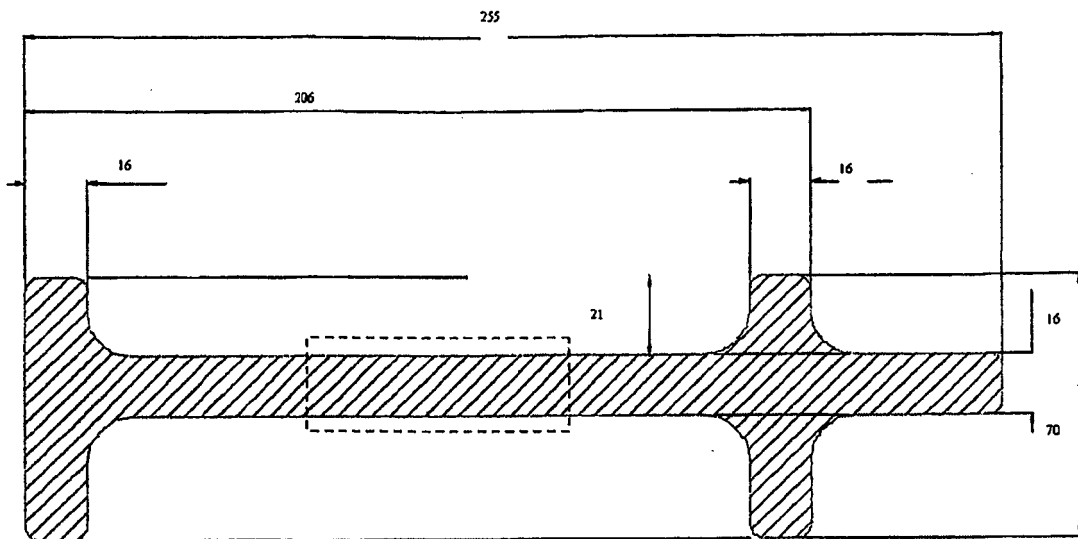


Figure 2

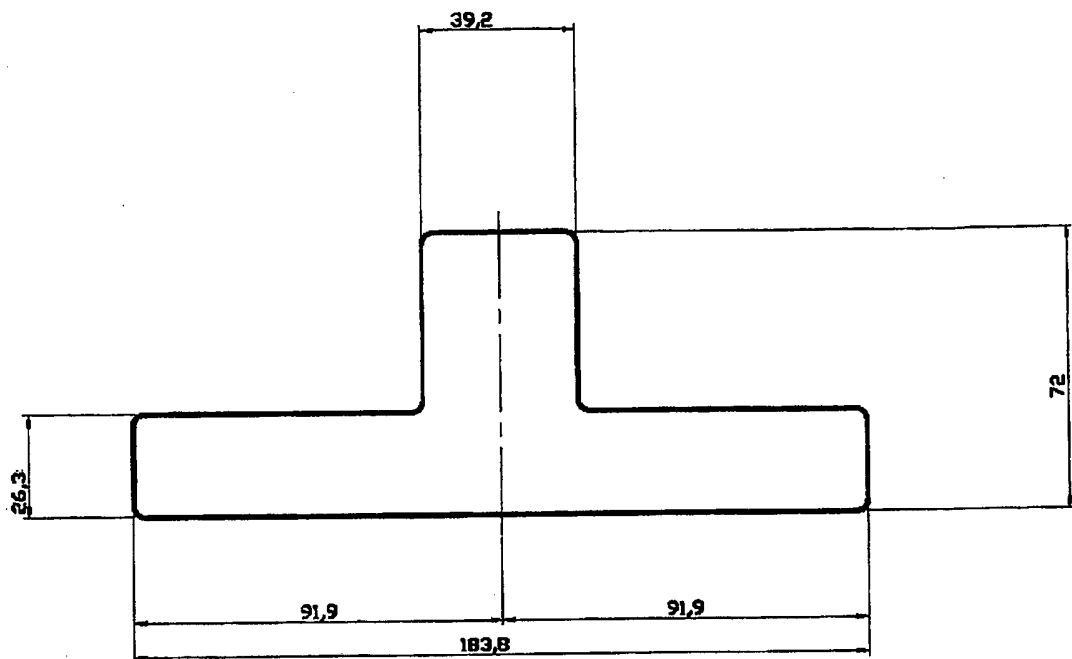




Figure 4a

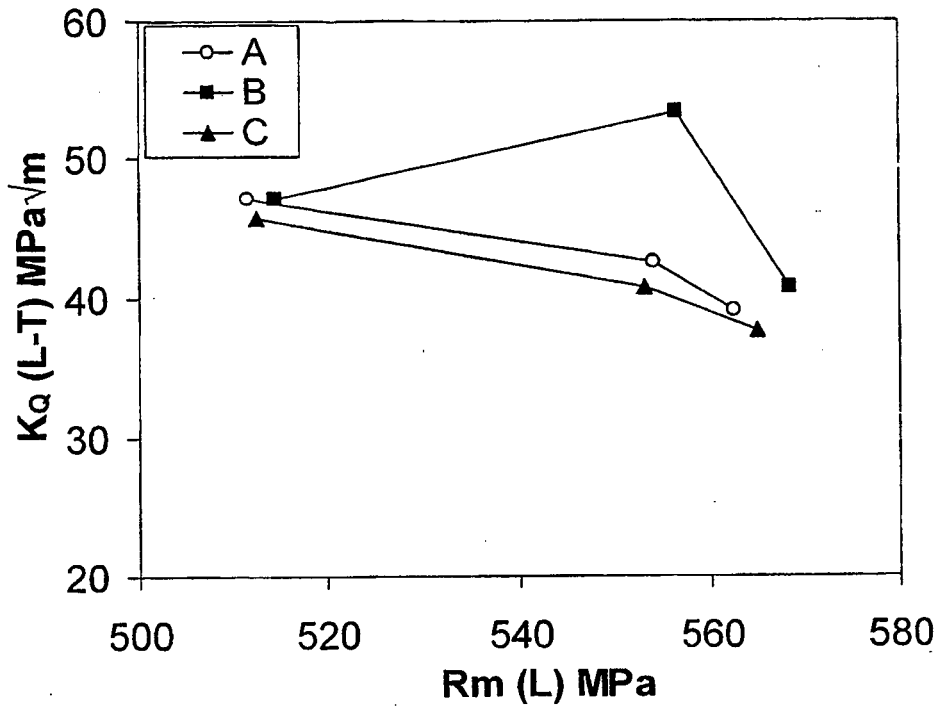


Figure 4b

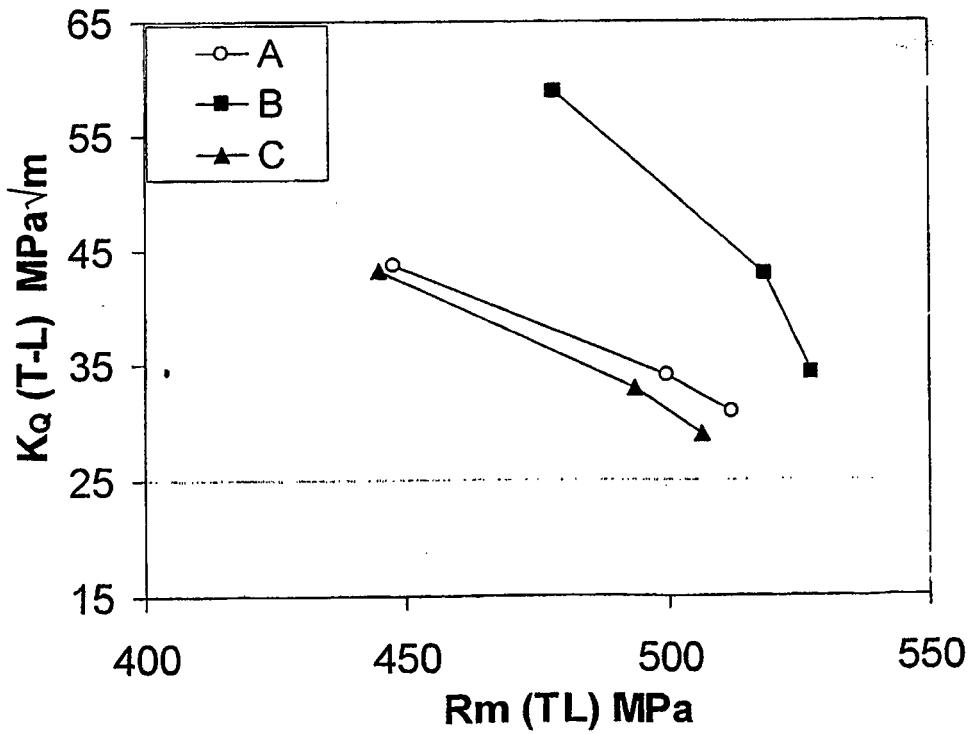


Figure 5a

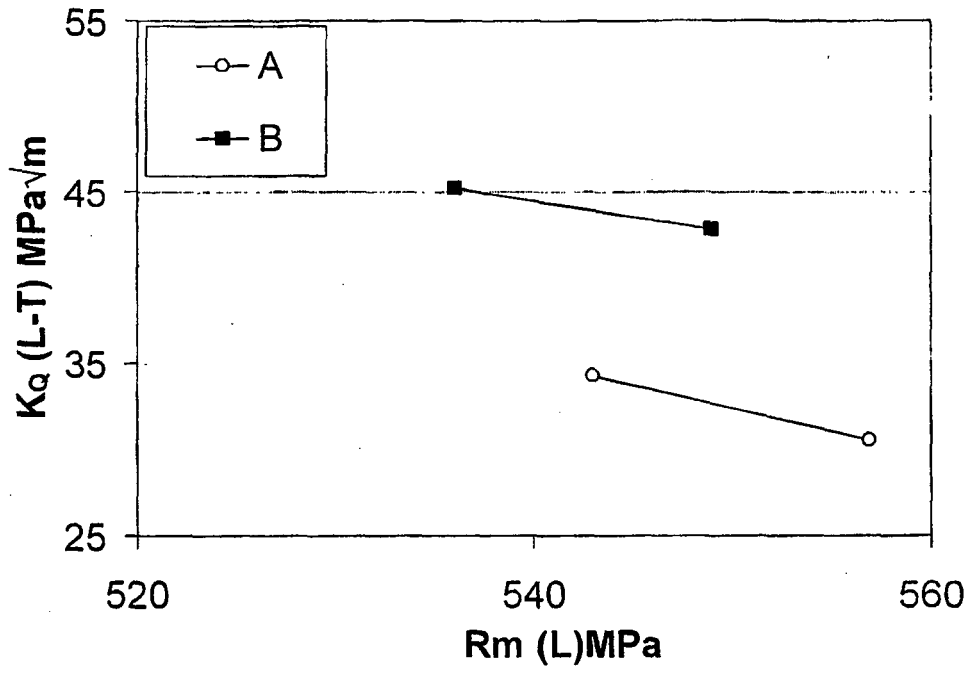


Figure 5b

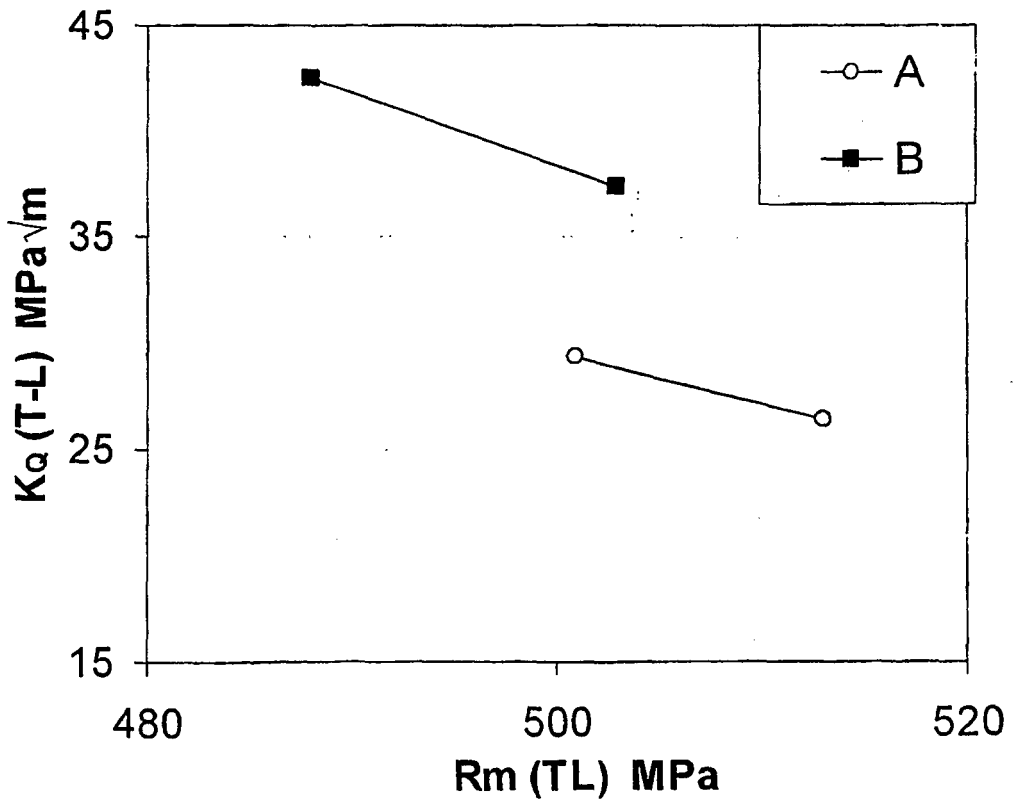


Figure 6

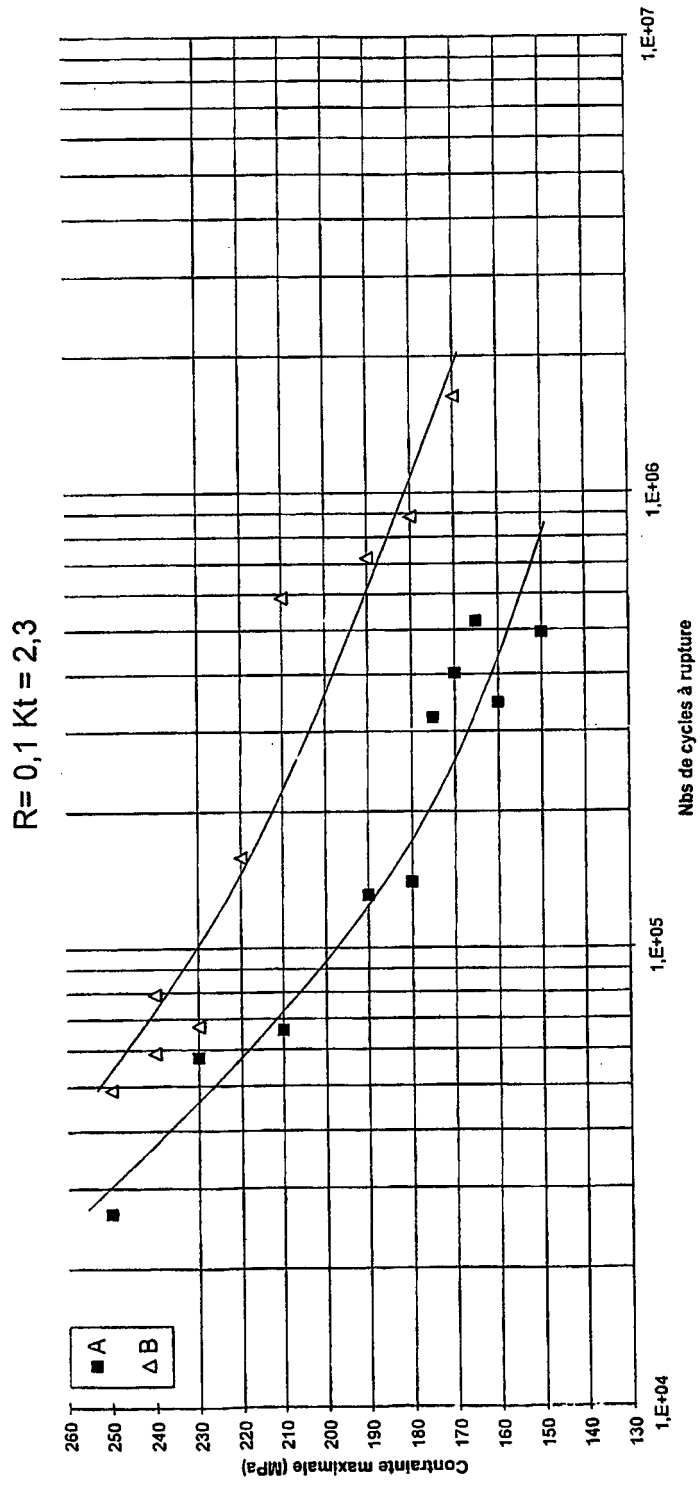


Figure 7

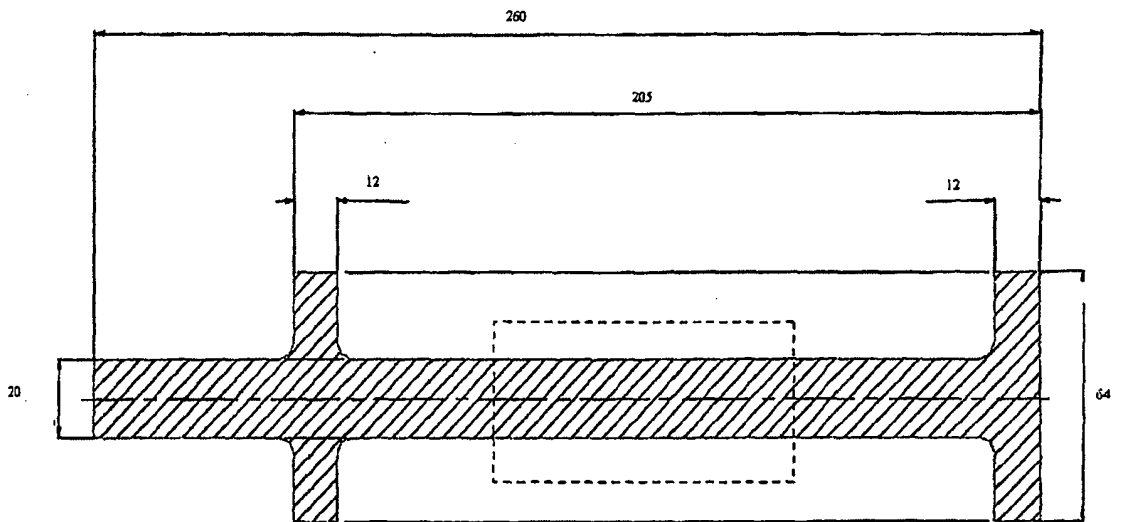


Figure 8

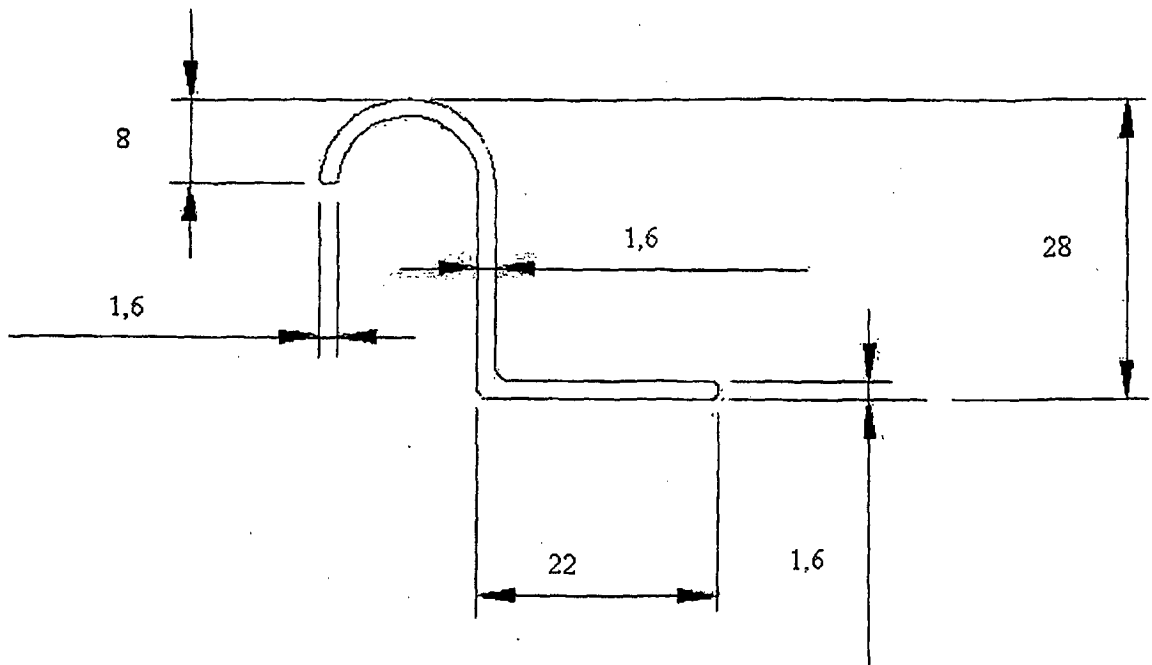
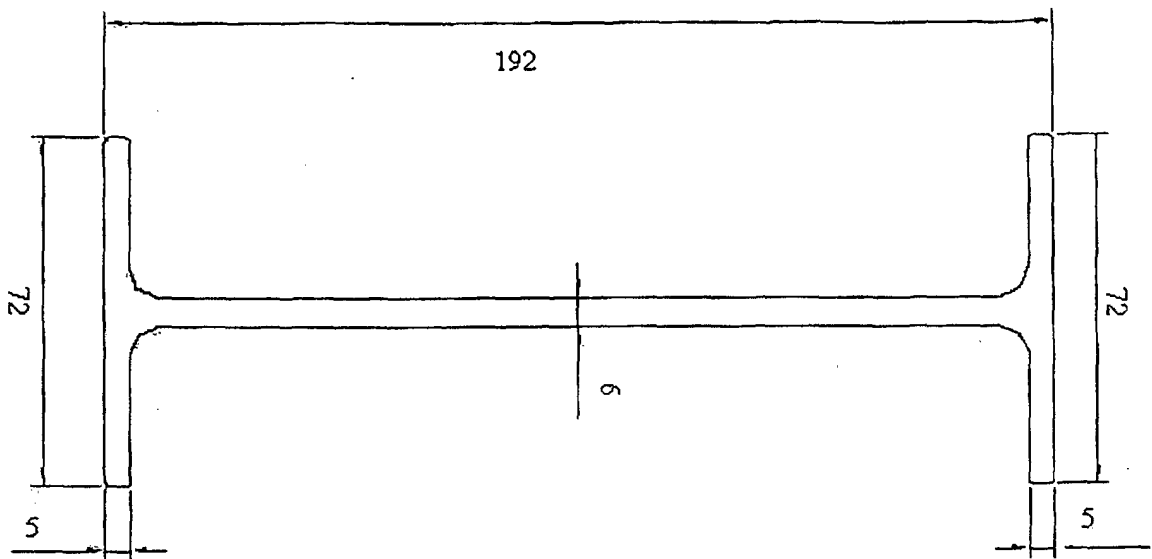


Figure 9



**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**

- US 5032359 A [0003]
- US 5198045 A [0004]
- US 7229509 B [0005]
- WO 2007080267 A [0006] [0011]
- EP 1891247 A [0007] [0011]
- WO 2006131627 A [0008]
- US 5455003 A [0009]