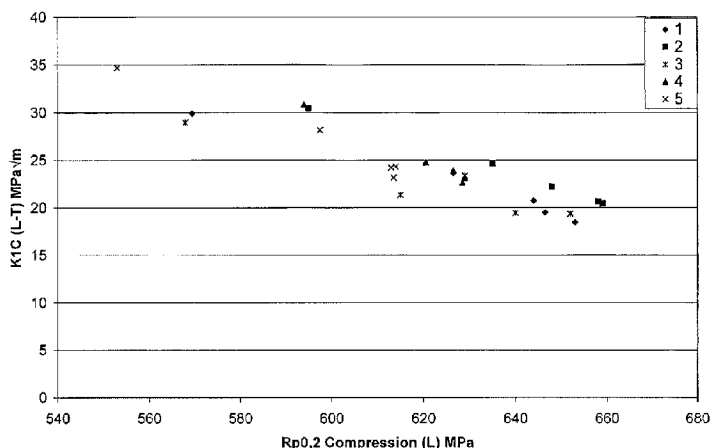




(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2014/06/18
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2015/01/29
(45) Date de délivrance/Issue Date: 2021/05/04
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2015/12/14
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2014/000138
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2015/011346
(30) Priorité/Priority: 2013/06/21 (FR13/01459)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *C22C 21/12* (2006.01),
C22F 1/057 (2006.01)
(72) Inventeurs/Inventors:
DANIELOU, ARMELLE, FR;
POUGET, GAELLE, US;
SIGLI, CHRISTOPHE, FR
(73) Propriétaire/Owner:
CONSTELLIUM ISSOIRE, FR
(74) Agent: NORTON ROSE FULBRIGHT CANADA
LLP/S.E.N.C.R.L., S.R.L.

(54) Titre : ELEMENT DE STRUCTURE EXTRADOS EN ALLIAGE ALUMINIUM CUIVRE LITHIUM
(54) Title: EXTRADOS STRUCTURAL ELEMENT MADE FROM AN ALUMINIUM COPPER LITHIUM ALLOY



(57) **Abrégé/Abstract:**

L'invention concerne un élément de structure extrados en alliage aluminium cuivre et lithium et son procédé de fabrication. Dans le procédé selon l'invention un alliage de composition (en % en poids) 4,2 à 5,2 Cu, 0,9 à 1,2 Li, 0,1 à 0,3 Ag, 0,1 à 0,25 Mg, 0,08 à 0,18 Zr, 0,01 à 0,15 Ti, optionnellement jusqu'à 0,2 Zn, optionnellement jusqu'à 0,6 Mn, une teneur de Fe et de Si inférieure ou égale à 0,1 % chacun, et des autres éléments à une teneur inférieure ou égale à 0,05% chacun et 0,15% au total, reste aluminium est coulé, homogénéisé déformé à chaud et optionnellement à froid, mis en solution à une température d'au moins 515 °C, tractionné de 0,5 à 5% et revenu. La combinaison notamment de la teneur en magnésium, en cuivre et en manganèse avec la température de mise en solution permet d'atteindre une limite d'élasticité en compression très avantageuse. Ainsi les produits selon l'invention présentant une épaisseur d'au moins 12 mm ont une limite d'élasticité en compression dans la direction longitudinale d'au moins 645 MPa et un allongement dans la direction longitudinale d'au moins 7%.

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international(10) Numéro de publication internationale
WO 2015/011346 A1(43) Date de la publication internationale
29 janvier 2015 (29.01.2015)

WIPO | PCT

(51) Classification internationale des brevets :
C22C 21/12 (2006.01) C22F 1/057 (2006.01)(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2014/000138(22) Date de dépôt international :
18 juin 2014 (18.06.2014)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
13/01459 21 juillet 2013 (21.07.2013) FR(71) Déposant : CONSTELLIUM FRANCE [FR/FR]; 40-44,
Rue Washington, F-75008 Paris (FR).(72) Inventeurs : DANIELOU Armelle; Les Modelons, F-
73360 Les Echelles (FR). POUGET Gaëlle; 104, Rue
Abbé Grégoire, F-38000 Grenoble (US). SIGLI Chris-
tophe; 44, Rue Bizanet, F-38000 Grenoble (FR).(74) Mandataire : BUTRUILLE, Jean-Rémi; Constellium
CRV, 725, Rue Aristide Bergès, CS10027, F-38341 Vo-
repe (FR).(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,
ZW.(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ,
UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,
TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK,
EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,
MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM,
TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW,
KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

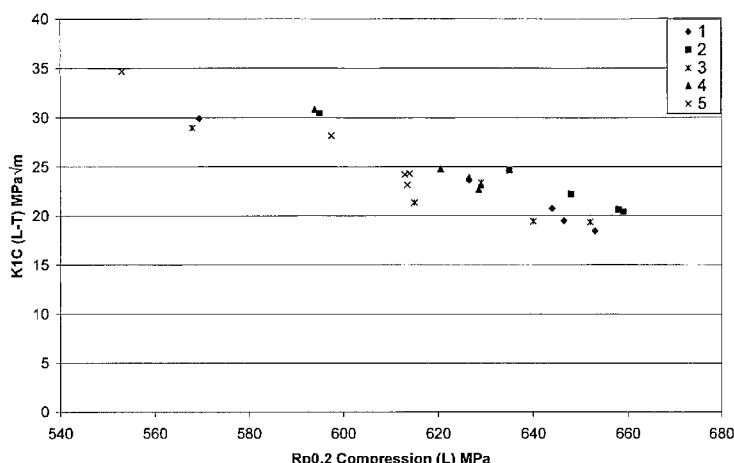
— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv))

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : EXTRADOS STRUCTURAL ELEMENT MADE FROM AN ALUMINIUM COPPER LITHIUM ALLOY

(54) Titre : ELÉMENT DE STRUCTURE EXTRADOS EN ALLIAGE ALUMINIUM CUIVRE LITHIUM

Fig. 1



(57) Abstract : The invention relates to an extrados structural element made from an aluminium, copper and lithium alloy and a method for manufacturing same. In the method according to the invention, an alloy with composition (in wt%) 4.2 to 5.2 Cu, 0.9 to 1.2 Li, 0.1 to 0.3 Ag, 0.1 to 0.25 Mg, 0.08 to 0.18 Zr, 0.01 to 0.15 Ti, optionally up to 0.2 Zn, optionally up to 0.6 Mn, an Fe and Si content level less than or equal to 0.1% each, and other element with a content level less than or equal to 0.05% each and 0.15% in total, the aluminium is poured, homogenised, deformed hot and optionally cold, placed in a solution at a temperature of at least 515°C, pulled from 0.5 to 5% and annealed. The combination in particular of the magnesium, copper and manganese content with the temperature in solution can reach a very advantageous elasticity under compression limit. Thus, the products according to the invention having a thickness of at least 12 mm have an elasticity under compression limit in the longitudinal direction of at least 645 MPa and an elongation in the longitudinal direction of at least 7%.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2015/011346 A1**Publiée :**

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h))

L'invention concerne un élément de structure extradors en alliage aluminium cuivre et lithium et son procédé de fabrication. Dans le procédé selon l'invention un alliage de composition (en % en poids) 4,2 à 5,2 Cu, 0,9 à 1,2 Li, 0,1 à 0,3 Ag, 0,1 à 0,25 Mg, 0,08 à 0,18 Zr, 0,01 à 0,15 Ti, optionnellement jusque 0,2 Zn, optionnellement jusque 0,6 Mn, une teneur de Fe et de Si inférieure ou égale à 0,1 % chacun, et des autres éléments à une teneur inférieure ou égale à 0,05% chacun et 0,15% au total, reste aluminium est coulé, homogénéisé déformé à chaud et optionnellement à froid, mis en solution à une température d'au moins 515 °C, tractionné de 0.5 à 5% et revenu. La combinaison notamment de la teneur en magnésium, en cuivre et en manganèse avec la température de mise en solution permet d'atteindre une limite d'élasticité en compression très avantageuse. Ainsi les produits selon l'invention présentant une épaisseur d'au moins 12 mm ont une limite d'élasticité en compression dans la direction longitudinale d'au moins 645 MPa et un allongement dans la direction longitudinale d'au moins 7%.

Elément de structure extradors en alliage Aluminium Cuivre Lithium

5 Domaine de l'invention

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

10

Etat de la technique

Des produits en alliage d'aluminium sont développés pour produire des pièces de haute résistance destinées notamment à l'industrie aéronautique et à l'industrie aérospatiale.

15

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 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. Pour certaines pièces telles que les extradors de voilure la limite d'élasticité en compression est une propriété essentielle car elle est déterminante pour les caractéristiques de flambement. Pour certaines pièces, cette caractéristique est essentielle pour le dimensionnement et donc le poids des pièces.

20

25

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.

30

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.

- 5 Le brevet US 5,455,003 décrit un procédé de fabrication d'alliages Al-Cu-Li qui présentent une résistance mécanique et une ténacité améliorés à température cryogénique, en particulier grâce à un écrouissage et un revenu appropriés. Ce brevet recommande en particulier la composition, en pourcentage en poids, Cu = 3,0 – 4,5, Li = 0,7 – 1,1, Ag = 0 – 0,6, Mg = 0,3-0,6 et Zn = 0 – 0,75.

10

Le brevet US 7,438,772 décrit des alliages comprenant, en pourcentage en poids, Cu : 3-5, Mg : 0,5-2, Li : 0,01-0,9 et décourage l'utilisation de teneur en lithium plus élevées en raison d'une dégradation du compromis entre ténacité et résistance mécanique.

- 15 Le brevet US 7,229,509 décrit un alliage comprenant (% 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, 0,4 max Zr ou d'autres agents affinant le grain tels que Cr, Ti, Hf, Sc, V.

- 20 La demande de brevet US 2009/142222 A1 décrit des alliages comprenant (en % en poids), 3,4 à 4,2% de Cu, 0,9 à 1,4 % de Li, 0,3 à 0,7 % de Ag, 0,1 à 0,6% de Mg, 0,2 à 0,8 % de Zn, 0,1 à 0,6 % de Mn et 0,01 à 0,6 % d'au moins un élément pour le contrôle de la structure granulaire. Cette demande décrit également un procédé de fabrication de produits filés.

- 25 La demande de brevet WO2009/036953 concerne un produit en alliage d'aluminium pour les éléments structuraux présentant une composition chimique comprenant, en poids %: Cu de 3,4 à 5,0, Li de 0,9 à 1,7, Mg de 0,2 à 0,8, Ag d'environ 0,1 à 0,8, Mn de 0,1 à 0,9, Zn jusqu'à 1,5, et un ou plusieurs éléments choisis dans le groupe constitué par: (Zr environ 0,05 à 0,3, Cr 0,05 à 0,3, Ti environ 0,03 à 0,3, Sc environ 0,05 à 0,4, Hf environ 0,05 à 0,4), Fe <0,15, Si <0,5, les impuretés normales et inévitables.

30

La demande de brevet W0 2012/085359 A2 concerne un procédé de fabrication de produits laminés en alliage à base d'aluminium comprenant 4,2 à 4,6 % en poids de Cu, 0,8 à 1,30 %

en poids de Li, 0,3 à 0,8 % en poids de Mg, 0,05 à 0,18 % en poids de Zr, 0,05 à 0,4 % en poids d'Ag, 0,0 à 0,5% en poids de Mn, au plus 0,20 % en poids de Fe + Si, moins de 0,20 % en poids de Zn, au moins un élément choisi parmi Cr, Se, Hf et Ti, la quantité dudit élément, s'il est choisi, étant de 0,05 à 0,3 % en poids pour Cr et pour Se, 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et de 0,01 à 0,15 % en poids pour Ti, les autres éléments au plus 0,05% en poids chacun et 0,15% en poids au total, le reste aluminium, comprenant les étapes d'élaboration, coulée, homogénéisation, laminage avec une température supérieure à 400 °C, mise en solution, trempe, traction entre 2 et 3,5% et revenu.

La demande de brevet US2012/0225271 A1 concerne des produits corroyés d'épaisseur au moins 12,7 mm contenant de 3,00 à 3,80 3,00 à 3,80 en poids.% de Cu, de 0,05 à 0,35 en poids % de Mg, de 0,975 à 1,385 en poids % de Li, dans lequel $-0,3 * Mg - 0,15Cu + 1,65 \leq Li \leq -0,3 * Mg - 0,15Cu + 1,85$, de 0,05 à 0,50 en poids. % d'au moins un élément de contrôle de la structure du grain, dans lequel l'élément de contrôle de la structure des grains est choisi dans le groupe constitué de Zr, Sc, Cr, V, Hf, d'autres éléments des terres rares, et des combinaisons de ceux-ci, jusqu'à 1,0 en poids % de Zn, jusqu'à 1,0 en poids % de Mn, jusqu'à 0,12 en poids % de Si, jusqu'à 0,15 en poids % de Fe, jusqu'à 0,15 en poids % de Ti, jusqu'à 0,10 poids. % d'autres éléments avec un total ne dépassant pas 0,35 en poids %.

L'article « The effect of composition on the Weldability of Al-Cu-Li-Ag-Mg Alloys in the High Cu :Li Regime » de L.S Kramer, C.E. Cross et J.R. Pickens, Sixth International Aluminium-Lithium Conference; Garmisch-Partenkirchen; Allemagne; 7-11 Oct. 1991, décrit des alliages contenant (en % en poids) de 5 à 6,3 % de Cu, de 1 à 1,9 % de Li, de 0 à 0,4 % de Mg, de 0 à 0,4 % de Ag et de 0 à 0,1 % de Ti.

Il existe un besoin pour des produits corroyés en alliage aluminium-cuivre-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 en particulier ayant une limite d'élasticité en compression très élevée et les propriétés de tolérance aux dommages, en particulier la ténacité, de stabilité thermique, de résistance à la corrosion et d'aptitude à l'usinage suffisantes, tout en ayant une faible densité.

De plus il existe un besoin pour un procédé de fabrication de ces produits fiable et économique.

Objet de l'invention

Un premier objet de l'invention est un procédé de fabrication d'un produit filé, laminé et/ou

5 forgé à base d'alliage d'aluminium dans lequel :

a) on élabore un bain de métal liquide comprenant

4,2 à 5,2 % en poids de Cu,

0,9 à 1,2 % en poids de Li,

0,1 à 0,3 % en poids de Ag,

10 0,1 à 0,25 % en poids de Mg,

0,08 à 0,18 % en poids de Zr,

0,01 à 0,15 % en poids de Ti,

optionnellement jusque 0,2 % en poids de Zn,

optionnellement jusque 0,6 % en poids de Mn,

15 une teneur de Fe et de Si inférieure ou égale à 0,1 % en poids chacun, et des autres éléments à une teneur inférieure ou égale à 0,05% en poids chacun et 0,15% en poids au total, reste aluminium,

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

c) on homogénéise ladite forme brute par un traitement thermique dans lequel la
20 température à mi-épaisseur de la forme brute atteint au minimum de 510 °C pendant une durée d'au moins 10 heures,

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

e) on met en solution à une température d'au moins 515 °C et on trempe ledit
25 produit ;

f) on tractionne de façon contrôlée ledit produit avec une déformation permanente de 0,5 à 5 % ;

g) on réalise un revenu dudit produit par chauffage à une température de 140 à 170 °C pendant 5 à 70 heures.

30

Un autre objet de l'invention est un produit filé, laminé et/ou forgé en alliage d'aluminium susceptible d'être obtenu par le procédé selon l'invention présentant une épaisseur d'au moins 12 mm, une limite d'élasticité en compression dans la direction longitudinale d'au moins 645 MPa et un allongement dans la direction longitudinale d'au moins 7%.

5

Encore un autre objet de l'invention est un élément de structure extradors incorporant au moins un produit selon l'invention ou fabriqué à partir d'un tel produit

10 Description des figures

Figure 1 : Compromis de propriétés entre la limite d'élasticité en compression et la ténacité pour les tôles de l'exemple 1.

Figure 2 : Schéma des éprouvettes utilisées pour les essais en fatigue à trou. Les dimensions sont données en mm.

Figure 3 : Courbes de Wöhler obtenues avec les alliages 2, 4 et 5 dans la direction L-T.

Description de l'invention

20 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.

25 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.

30 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.

La limite d'élasticité en compression a été mesurée à 0,2% de compression selon la norme ASTM E9.

5

Le facteur d'intensité de contrainte (K_Q) est déterminé selon la norme ASTM E 399. La norme ASTM E 399 donne les critères qui permettent de déterminer si K_Q est une valeur valide de K_{IC} . Pour une géométrie d'éprouvette donnée, les valeurs de K_Q obtenues pour différents matériaux sont comparables entre elles pour autant que les limites d'élasticité des matériaux soient du même ordre de grandeur.

10

Les propriétés en fatigue sur éprouvettes à trou sont mesurées à l'air ambiant pour des niveaux de contrainte variables, à une fréquence de 50 Hz, un rapport de contrainte $R = 0,1$, sur des éprouvettes telles que représentées sur la Figure 2, $K_t = 2,3$, prélevées au centre et à mi-épaisseur des tôles dans la direction L-T. L'équation de Walker a été utilisée pour déterminer une valeur de contrainte maximale représentative de 50 % de non rupture à 100 000 cycles. Pour ce faire un indice de qualité fatigue (IQF) est calculé pour chaque point de la courbe de Wöhler avec la formule

15

$$IQF = \sigma_{\max} \left(\frac{N_0}{N} \right)^{1/n}$$

où $\sigma_{\max}$ est la contrainte maximale appliquée à un échantillon donné, N est le nombre de cycles jusqu'à la rupture, N_0 est égale à 100 000 et $n = -4,5$. On rapporte l'IQF correspondant à la médiane, soit 50% rupture pour 100 000 cycles.

20

Dans le cadre de l'invention les caractéristiques mécaniques statiques en traction, la limite d'élasticité en compression et le facteur d'intensité de contrainte sont mesurés à mi-épaisseur des produits.

25

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

Selon la présente invention, il est possible d'améliorer la limite d'élasticité en compression d'alliages aluminium cuivre lithium magnésium dont la teneur en cuivre est comprise entre 4,2 et 5,2 % en poids et la teneur en lithium entre 0,9 et 1,2 % en poids en diminuant la teneur en magnésium, par rapport aux teneurs d'au moins 0,3 % en poids connues et en

30

augmentant simultanément la température de mise en solution. De manière surprenante, la diminution de la teneur en magnésium, dont la conséquence attendue est une diminution des propriétés mécaniques statiques, permet pour les alliages de l'invention au contraire d'augmenter les propriétés mécaniques statiques.

- 5 L'alliage selon l'invention contient 4,2 à 5,2 % en poids de Cu. Une teneur minimale en cuivre de 4,3% et de préférence de 4,4 % en poids est avantageuse de façon à obtenir des propriétés mécaniques statiques élevées. Une teneur maximale en cuivre de 5,0% et de préférence de 4,8 % en poids est avantageuse de façon à obtenir un allongement et une ténacité suffisantes.
- 10 L'alliage selon l'invention contient 0,9 à 1,2 % en poids de Li. Une teneur minimale en lithium de 1,0 % et de préférence de 1,03 % en poids est avantageuse de façon à obtenir des propriétés mécaniques statiques élevées. Une teneur maximale en lithium de 1,15% et de préférence de 1,10% en poids est avantageuse de façon à obtenir un allongement et une ténacité suffisantes.
- 15 L'alliage selon l'invention contient 0,1 à 0,25 % en poids de Mg. Une teneur minimale en magnésium de 0,15 % et de préférence de 0,20 % en poids est avantageuse de façon à obtenir des propriétés mécaniques statiques élevées. Une teneur maximale en magnésium de 0,24% en poids est avantageuse de façon à encore augmenter la température de mise en solution. Selon les présents inventeurs, il est possible que la teneur en magnésium selon
- 20 l'invention ait pour conséquence une augmentation de la température de solidus et permette donc d'augmenter la température de mise en solution et ainsi améliorer la mise en solution du cuivre et la fraction de phases durcissantes après revenu. Les limites d'élasticité en traction et en compression très élevées, parfois supérieures à 700 MPa dans le cas des produits extrudés, obtenues avec les alliages selon l'invention tout en maintenant une
- 25 aptitude à la mise en forme, l'allongement restant d'au moins 7%, sont probablement liées notamment à l'excellente mise en solution du cuivre.
- L'alliage selon l'invention contient 0,1 à 0,3 % en poids d'Ag. Une teneur minimale en argent de 0,15 % et de préférence de 0,20 % en poids est avantageuse. Une teneur maximale en argent de 0,25% en poids est avantageuse. Les présents inventeurs pensent
- 30 que contrairement à ce qui est attendu, la relativement faible teneur en argent permet

d'augmenter encore la résistance mécanique statique en contribuant à autoriser l'augmentation de la température de mise en solution.

L'alliage selon l'invention contient 0,08 à 0,18 % en poids de Zr. De préférence, l'alliage selon l'invention contient 0,11 à 0,18 % en poids de Zr. Une teneur minimale en zirconium de 0,13 % en poids est avantageuse. Une teneur maximale en zirconium de 0,17% en poids est avantageuse. L'alliage selon l'invention contient 0,01 à 0,15 % en poids de Ti. Une teneur minimale en titane de 0,02 % en poids est avantageuse. Une teneur maximale en titane de 0,1% en poids et de préférence de 0,05% en poids est avantageuse.

L'addition de zirconium et de titane contribue à obtenir une structure essentiellement non recristallisée qui est avantageuse. L'addition de titane contribue par ailleurs à contrôler la structure granulaire lors de la coulée.

Optionnellement, l'alliage selon l'invention peut contenir jusqu'à 0,2 % en poids de zinc. Dans un mode de réalisation de l'invention la teneur en zinc est inférieure à 0,05 % en poids.

Optionnellement, l'alliage selon l'invention peut contenir jusqu'à 0,6 % en poids de manganèse. Dans un mode de réalisation avantageux la teneur en manganèse est comprise entre 0,2 et 0,5 % en poids et de préférence entre 0,3 ou même 0,35 et 0,45 % en poids. L'addition de manganèse permet dans le cas de la fabrication de tôles d'améliorer simultanément la limite d'élasticité en compression et la ténacité notamment dans la direction L-T ce qui est avantageux. L'addition de manganèse permet également dans le cas de la fabrication de profilés par extrusion d'améliorer notamment la ténacité dans la direction T-L. Dans un autre mode de réalisation, il peut être avantageux pour la fabrication de certains profilés par extrusion que la teneur en manganèse soit inférieure à 0,05 % en poids.

La teneur de Fe et de Si de l'alliage selon l'invention est inférieure ou égale à 0,1 % en poids chacun, avantageusement la teneur en fer est inférieure à 0,06 % en poids et la teneur en silicium est inférieure à 0,04 % en poids. Les autres éléments ont une teneur inférieure ou égale à 0,05 % en poids chacun et 0,15 % en poids au total, le reste est de l'aluminium.

Dans le procédé de fabrication selon l'invention, on élabore un bain de métal liquide de composition selon l'invention puis on coule une forme brute, telle qu'une plaque de laminage, une billette de filage ou une ébauche de forge, à partir dudit bain de métal

liquide. Le procédé selon l'invention peut comprendre des étapes connues de l'homme du métier telles que le scalpage ou des traitements thermiques de détente des plaques coulées.

La forme brute est homogénéisée par un traitement thermique dans lequel la température à mi-épaisseur de la forme brute atteint au minimum 510 °C pendant une durée d'au moins 10 heures. L'alliage selon l'invention, notamment en raison de la faible teneur en magnésium et en argent, permet d'homogénéiser à une température élevée sans provoquer de fusion locale partielle, aussi appelée brûlure. Avantageusement la température à mi-épaisseur de la forme brute atteint au minimum 515 °C pendant une durée d'au moins 10 heures. Préférentiellement, l'homogénéisation est réalisée avec au moins deux paliers, typiquement au moins un premier palier à une température comprise entre 495 °C et 505 °C pendant une durée d'au moins 10 heures et au moins un second palier à une température d'au moins 515 °C pendant une durée d'au moins 10 heures ou en utilisant une vitesse de montée lente, typiquement inférieure à 10 °C/heure et préférentiellement inférieure 6 °C/heure à partir de 490 °C.

Après homogénéisation, ladite forme brute est déformée à chaud et optionnellement à froid en un produit filé, laminé et/ou forgé. La température de déformation à chaud est typiquement au moins de 350 °C et de préférence au moins 400 °C.

Ledit produit est ensuite mis en solution à une température d'au moins 515 °C, de préférence d'au moins 520 °C et dans certains cas d'au moins 522 °C. La durée de mise en solution est adaptée à l'épaisseur du produit de façon à ce que la température de mise en solution soit atteinte à mi-épaisseur du produit, de préférence pendant une durée d'au moins une heure. Il est possible techniquement de réaliser une mise en solution à une température aussi élevée avec des alliages ayant une composition semblable à celle des alliages selon l'invention en ce qui concerne Cu, Li, Zr, Ti, Zn et Mn mais plus élevée en Mg et Ag mais cela a pour conséquence une dégradation des propriétés mécaniques en raison des brûlures inévitables, notamment l'allongement et la ténacité sont diminués. La valeur maximale de température utilisable pour le traitement de mise en solution peut être évaluée par calorimétrie différentielle (DSC) sur le produit issu de l'étape de déformation à chaud. L'avantage des alliages selon l'invention est d'atteindre une valeur maximale de température utilisable pour le traitement de mise en solution élevée sans risque de brûlure, la vitesse de montée en température étant adaptée à la géométrie du produit par l'homme du

métier selon ses connaissances générales. De préférence, la température de mise en solution est inférieure à 530 °C, quand le traitement est réalisé en un seul palier. Les présents inventeurs ont cependant observé qu'avec les alliages selon l'invention, il est possible de réaliser une mise en solution avec un premier palier à une température comprise entre 515 °C et 520 °C et un second palier à une température d'au moins 530°C et de préférence d'au moins 535°C et d'obtenir notamment un compromis amélioré entre allongement et limite d'élasticité.

Après mise en solution, le produit est trempé, typiquement par aspersion ou immersion avec de l'eau à température ambiante. Le produit ainsi mis en solution et trempé subit un détensionnement par traction contrôlée avec une déformation permanente de 0,5 à 5 %. Dans un mode de réalisation favorisant l'amélioration du compromis entre la limite d'élasticité en compression et la ténacité, le détensionnement par traction contrôlée est réalisé avec une déformation permanente inférieure à 2 % et avantageusement de 0,5 à 1,5 %. Ce mode de réalisation avec déformation permanente modérée peut cependant avoir l'inconvénient de nécessiter une durée de revenu élevée et nuire à la productivité du procédé. Dans un autre mode de réalisation favorisant la productivité du procédé, le détensionnement par traction contrôlée est réalisé avec une déformation permanente comprise entre 2% et 4%. Le produit ainsi tractionné subit enfin un revenu par chauffage à une température de 140 à 170 °C pendant 5 à 70 heures. Le revenu peut être effectué en un ou plusieurs paliers. Dans un mode de réalisation dans lequel le détensionnement par traction contrôlée est réalisé avec une déformation permanente inférieure à 2 % le revenu est effectué entre 150 et 160 °C pendant une durée de 40 à 60 heures. Dans un autre mode de réalisation dans lequel le détensionnement par traction contrôlée est réalisé avec une déformation permanente supérieure à 2 % le revenu est effectué entre 150 et 160 °C pendant une durée de 10 à 40 heures.

Les produits ainsi obtenus ont de préférence une structure granulaire essentiellement non-recristallisée. Dans le cadre de la présente invention, on appelle structure granulaire essentiellement non-recristallisée une structure granulaire telle que le taux de recristallisation entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ épaisseur est inférieur à 30 % et de préférence inférieur à 20%.

Les produits selon l'invention ont de préférence une épaisseur d'au moins 12 mm. L'épaisseur des produits filés 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. De préférence, l'épaisseur des produits selon l'invention est au moins 15 mm et inférieure à 50 mm.

Le procédé selon l'invention combinant notamment la composition selon l'invention et les traitements thermiques d'homogénéisation et de mise en solution selon l'invention permet d'obtenir un produit filé, laminé et/ou forgé en alliage d'aluminium présentant une épaisseur d'au moins 12 mm, une limite d'élasticité en compression dans la direction longitudinale d'au moins 645 MPa et de préférence d'au moins 650 MPa et un allongement dans la direction longitudinale d'au moins 7% et de préférence d'au moins 8%.

Les produits filés selon l'invention ont avantageusement une limite d'élasticité en compression dans le sens L d'au moins 680 MPa, une limite d'élasticité en traction dans le sens L est au moins 680 MPa et une ténacité $K_Q(T - L)$, d'au moins $17 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Les produits filés selon l'invention dont la teneur en manganèse est comprise entre 0,2 et 0,5 % en poids ont avantageusement une limite d'élasticité en compression dans le sens L d'au moins 720 MPa, une limite d'élasticité en traction dans le sens L d'au moins 710 MPa et une ténacité $K_Q(T-L)$, d'au moins $18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Les produits laminés selon l'invention dont l'épaisseur est d'au moins 20 mm ont avantageusement une limite d'élasticité en compression dans le sens L d'au moins 650 MPa et une ténacité $K_Q(L-T)$, d'au moins $18 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Dans un mode de réalisation avantageux dans lequel la teneur en manganèse est comprise entre 0,2 et 0,5 % en poids les produits laminés selon l'invention dont l'épaisseur est d'au moins 20 mm ont avantageusement une limite d'élasticité en compression dans le sens L d'au moins 653 MPa et préférentiellement d'au moins 655 MPa et une ténacité $K_Q(L-T)$, d'au moins $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Avantageusement, les produits laminés selon l'invention d'épaisseur au moins 20 mm présentent également des propriétés en fatigue avantageuse pour des éprouvettes à trou, ainsi l'indice de qualité fatigue IQF obtenu sur des éprouvettes à trou $K_t = 2,3$ selon la Figure 2 à une fréquence de 50 Hz à l'air ambiant avec une valeur $R = 0,1$ est au moins 200 MPa et de préférence est au moins 210 MPa dans la direction L-T.

Les éléments de structure extradados incorporant au moins un produit selon l'invention ou fabriqué à partir d'un tel produit sont avantageux. 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. Les éléments de structure extradados comprennent la peau de voilure extradados (upper wing skin) et les raidisseurs extradados (upper wing stringers ou stiffeners).

Exemples

Exemple 1.

Dans cet exemple, cinq plaques de dimension 406 x 1520 mm dont la composition est donnée dans le tableau 1 ont été coulées. Les alliages 1, 2 et 3 ont une composition selon l'invention. Les alliages 4 et 5 ont une composition de référence.

Tableau 1. Composition en % en poids

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zr	Li	Ag	Zn
1	0,02	0,04	4,40	0,02	0,21	0,02	0,14	1,05	0,21	0,04
2	0,03	0,04	4,61	0,35	0,23	0,02	0,14	1,05	0,22	0,04
3	0,03	0,04	4,34	0,08	0,17	0,02	0,15	1,12	0,22	0,03
4	0,04	0,05	4,56	0,37	0,44	0,03	0,11	1,02	0,22	0,02
5	0,03	0,05	4,49	0,34	0,71	0,04	0,11	1,03	0,21	0,04

Les plaques ont été homogénéisées. Suite à des essais préliminaires par calorimétrie différentielle, des conditions différentes ont été utilisées pour les différentes plaques de façon à atteindre une homogénéisation maximale sans brûlure. Les plaques en alliage 1, 2 et 3 ont été homogénéisées 15 h à 500 °C puis 16 h à 516 °C. Les plaques 4 et 5 ont été homogénéisées 15 h à 492 °C.

Les plaques ont été laminées à chaud à une température supérieure à 420 °C pour obtenir des tôles d'épaisseur 25 mm. Après laminage à chaud des essais de calorimétrie différentielle ont à nouveau été réalisés pour déterminer la température de mise en solution.

Il a été montré que les tôles selon l'invention pouvaient supporter une température de mise en solution d'au moins 515 °C tandis que pour les tôles de référence un risque de brûlure est présent à cette température et une température de mise en solution de moins de 515 °C a été nécessaire. Les tôles ont été mises en solution à 516 °C (alliages 1 à 3), 512 °C (alliages 4) et 509 °C (alliage 5) pendant environ 5h puis trempées avec de l'eau à 20 °C. Les tôles en alliage 1 et 2 ont ensuite été tractionnées d'environ 3%. Les tôles en alliage 4 et 5 ont été tractionnées de 4%.

Les propriétés mécaniques statiques mesurées à mi-épaisseur obtenues après différentes conditions de revenu à 155 °C sont données dans le Tableau 2 et représentées sur la figure 1. Les éprouvettes utilisées pour la mesure de ténacité avaient une largeur $W = 40$ mm et une épaisseur $B = 20$ mm.

Tableau 2, Propriétés mécaniques mesurées à mi-épaisseur

	Durée de revenu à 155 °C	Propriétés en traction sens L			Propriétés en compression sens L	Ténacité
		Rm MPa	Rp _{0,2} MPa	A (%)	Rc _{0,2} MPa	K _Q L-T (* : K _{IC}) (MPa√m)
1	0	432	308	14,0	271	36,1
	10	621	567	11,3	570	29,9*
	15	650	611	8,4	627	23,6*
	20	660	625	7,6	644	20,8*
	30	663	632	7,5	647	19,5*
	50	670	640	6,9	653	18,5*
2	0	454	321	12,2	285	37,8
	10	629	581	8,9	595	30,5*
	15	652	612	8,2	635	24,7*
	20	657	621	7,3	648	22,2*
	30	667	635	7,2	659	20,4*
	50	668	637	6,4	658	20,7*
3	0	409	292	14,9	263	33,8
	10	614	559	10,9	568	29,0*
	15	640	599	8,1	629	23,4*
	20	654	618	8,3	615	21,4*
	30	662	630	8,3	640	19,5*
	50	665	634	7,2	652	19,4*
4	0	475	364	14,7	325	33,4
	10	617	587	9,8	594	30,8*
	20	638	614	8,8	621	24,8*

5	30	642	621	7,7	627	23,9*
	45	643	624	7,4	629	23,1*
	60	643	624	7,8	629	22,7*
	0	484	385	12,2	353	35,5
	10	590	562	10,4	553	34,7
	20	620	603	8,8	598	28,2*
	30	628	613	8,7	613	24,2*
	45	631	616	8,1	614	24,3*
	60	631	616	7,9	614	23,2*

5 Exemple 2.

Dans cet exemple, on a fait varier les conditions de mise en solution pour une tôle en alliage 2 prélevée après laminage à chaud. Une mise en solution suivie d'une trempe à l'eau a été réalisée dans les conditions de durée et de température indiquées dans le tableau 3.

- 10 Après trempe, les tôles obtenues ont subi un détensionnement par traction avec un allongement permanent de 3% et un revenu de 25 heures à 155 °C.

Les propriétés mécaniques obtenues en traction dans le sens L à mi-épaisseur sont fournies dans le tableau 3.

- 15 Tableau 3. Propriétés mécaniques en traction sens L à mi-épaisseur pour différentes conditions de mise en solution

Conditions de mise en solution	Rp 0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A %
5h 500°C	601	629	9,1
5h 510°C	618	646	9,5
5h 516°C	624	652	8,0
3h 520°C	625	649	8,3
1h 524°C	628	653	7,8
1h 528°C	634	659	7,3
1h 532°C	628	653	5,9
5h 516°C + 3h 530°C	626	651	8,7
5h 516°C + 3h 540°C	631	656	8,2

Avec les tôles selon l'invention il est possible d'augmenter significativement la température de mise en solution et de bénéficier d'un potentiel de durcissement accru.

Exemple 3

- 5 Dans cet exemple, on a prélevé des billettes de diamètre 139 mm dans des plaques en alliage 1 et 2. Les billettes ont été homogénéisées à 515 °C, filées sous la forme de barres de dimension 54,6 x 16 mm à 460 °C, puis mises en solution 4 heures à 520 °C et trempées à l'eau. Les barres ainsi obtenues ont été tractionnées avec un allongement permanent de 3%, puis elles ont subi un revenu de 15h ou 25h à 155 °C.
- 10 Les caractéristiques mécaniques mesurées dans le sens L à mi-épaisseur sont présentées dans le Tableau 4. Les éprouvettes utilisées pour la mesure de ténacité avaient une largeur $W = 25$ mm et une épaisseur $B = 12,5$ mm.

Tableau 4 : Propriétés mécaniques obtenues sur les profilés en alliage 1 et 2

Alliage	Conditions de revenu	Propriétés en traction (L)			Propriétés en compression (L)	Ténacité
		$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A (%)	$R_{c0,2}$ MPa	K_{Ic} T-L (MPa $\sqrt{m}$)
1	15h155°C	662	691	10,8	682	21,3
	25h 155°C	687	709	9,8	714	18,0
2	15h155°C	677	702	9,5	697	20,8
	25h 155°C	700	720	8,7	728	18,7

15

Exemple 4.

- Dans cet exemple, on a fait varier les conditions de traction contrôlée pour une tôle en alliage 2 d'épaisseur 25 mm mise en solution pendant 5 h à 516 °C puis trempée avec de l'eau à 20 °C. Les tôles ont subi une traction contrôlée avec un allongement permanent de 1%, 2,1%, 3,5% ou 4,5 %. Différentes durées de revenu à 155 °C ont été réalisées pour rechercher le compromis optimal entre limite d'élasticité en compression et ténacité pour chaque taux d'allongement permanent.
- 20

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 5. Les éprouvettes utilisées pour la mesure de ténacité avaient une largeur $W = 40$ mm et une épaisseur $B = 20$ mm.

Tableau 5. Propriétés mécaniques sens L à mi-épaisseur pour différentes conditions traction contrôlée et de revenu

Allongement permanent lors de la traction contrôlée	Durée de revenu à (155°C)	Limite d'élasticité en traction $R_{p0,2}$ (MPa)	Limite d'élasticité en compression $R_{c0,2}$ (MPa)	K_{Ic} L-T (MPa $\sqrt{m}$)
1	45		653*	25,3
2,1	35	640	653	23,9
3,5	25	644	652	23,4
4,5	25	644	649	23,1

* valeur obtenue par interpolation linéaire entre une mesure de 645 MPa pour un revenu de 35 h à 155 °C et 657 MPa pour un revenu de 50h à 155°C

Avec un allongement permanent lors de la traction contrôlée de 1%, on obtient un compromis particulièrement avantageux entre la limite d'élasticité en compression et la ténacité, pour une durée de revenu 45h à 155 °C qui n'est cependant pas favorable pour la productivité du procédé.

Exemple 5.

Dans cet exemple, on a évalué les propriétés en fatigue sur éprouvettes à trou pour les alliages 2, 4 et 5 de l'exemple 1. Des tôles d'épaisseur 25 mm ont été laminées, mises en solution et tractionnées comme décrit dans l'exemple 1. La tôle en alliage 2 a subi un revenu de 25 heures à 155 °C, les tôles en alliage 4 et 5 ont subi un revenu de 22 heures à 155 °C.

Les propriétés en fatigue sur éprouvettes à trou ont été mesurées à l'air ambiant pour des niveaux de contrainte variables, à une fréquence de 50 Hz, un rapport de contrainte $R = 0,1$, sur des éprouvettes telles que représentées sur la Figure 2, $K_t = 2,3$, prélevées au centre et à mi-épaisseur des tôles dans la direction L-T.

Les courbes de Wöhler correspondantes sont présentées sur la Figure 3. On a calculé l'indice de qualité de fatigue IQF dont les résultats sont donnés dans le Tableau 6.

Tableau 6 – Résultats des essais en fatigue

Alliage	Résultats de fatigue à trou IQF (MPa), 50% rupture pour 100 000 cycles (L-T)
2	218
4	196
5	195

Le produit selon l'invention en alliage 2 présente un IQF significativement amélioré par rapport aux produits de référence en alliages 4 et 5

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
4,2 à 5,2 % en poids de Cu,
0,9 à 1,2 % en poids de Li,
0,1 à 0,3 % en poids de Ag,
0,1 à 0,25 % en poids de Mg,
0,08 à 0,18 % en poids de Zr,
0,01 à 0,15 % en poids de Ti,
optionnellement jusque 0,2 % en poids de Zn,
optionnellement jusque 0,6 % en poids de Mn,
une teneur de Fe et de Si inférieure ou égale à 0,1 % en poids chacun, et des autres éléments à une teneur inférieure ou égale à 0,05% en poids chacun et 0,15% en poids au total, reste aluminium,
 - b) on coule une forme brute à partir dudit bain de métal liquide ;
 - c) on homogénéise ladite forme brute par un traitement thermique dans lequel la température à mi-épaisseur de la forme brute atteint au minimum de 510 °C pendant une durée d'au moins 10 heures,
 - d) on déforme à chaud et optionnellement à froid ladite forme brute ainsi homogénéisée en un produit filé, laminé et/ou forgé ;
 - e) on met en solution à une température d'au moins 515 °C et on trempe ledit produit ;
 - f) on tractionne de façon contrôlée ledit produit avec une déformation permanente de 0,5 à 5 % ;
 - g) on réalise un revenu dudit produit par chauffage à une température de 140 à 170 °C pendant 5 à 70 heures.
2. Procédé selon la revendication 1 dans lequel la teneur en cuivre dudit bain de métal liquide est comprise entre 4,3 et 5,0% en poids.

3. Procédé selon la revendication 2 dans lequel la teneur en cuivre dudit bain de métal liquide est comprise entre 4,4 et 4,8 % en poids.
- 5 4. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 3 dans lequel la teneur en lithium dudit bain de métal liquide est comprise entre 1,0 et 1,15% en poids.
5. Procédé selon la revendication 4 dans lequel la teneur en lithium dudit bain de métal liquide est comprise entre 1,03 et 1,10 % en poids.
- 10 6. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel la teneur en magnésium dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,15 et 0,24% en poids.
7. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel la teneur en manganèse dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,2 et 0,5% en poids.
- 15 8. Procédé selon la revendication 7 dans lequel la teneur en manganèse dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,3 et 0,45 % en poids.
9. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 8 dans lequel la teneur en argent dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,15 et 0,25% en poids.
- 20 10. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 9 dans lequel la teneur en zirconium dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,11 et 0,18 % en poids.
- 25 11. Procédé selon la revendication 10 dans lequel la teneur en zirconium dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,13 et 0,17% en poids.
12. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 11 dans lequel la température de mise en solution est au minimum de 520 °C.
- 30

13. Procédé selon la revendication 12 dans lequel la température de mise en solution est au minimum de 522 °C.
14. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 13 dans lequel le
5 détensionnement par traction contrôlée est réalisé avec une déformation permanente inférieure à 2 %.
15. Procédé selon la revendication 14 dans lequel la déformation permanente est de 0,5 à 1,5 %.
- 10 16. Produit filé, laminé et/ou forgé en alliage d'aluminium susceptible d'être obtenu par le procédé selon une quelconque des revendications 1 à 15, présentant une épaisseur d'au moins 12 mm, une limite d'élasticité en compression dans la direction longitudinale d'au moins 645 MPa et un allongement dans la direction
15 longitudinale d'au moins 7%.
17. Produit filé selon la revendication 16 caractérisé en ce que sa limite d'élasticité en compression dans le sens L est au moins 680 MPa, sa limite d'élasticité en traction dans le sens L est au moins 680 MPa et sa ténacité $K_Q(T-L)$, est au moins 17
20 $MPa\sqrt{m}$.
18. Produit filé selon la revendication 17 dont la teneur en manganèse est comprise entre 0,2 et 0,5 % en poids caractérisé en ce que sa limite d'élasticité en compression dans le sens L est au moins 720 MPa, sa limite d'élasticité en traction dans le sens L est au moins 710 MPa et sa ténacité $K_Q(T-L)$ est au moins 18
25 $MPa\sqrt{m}$.
19. Produit laminé selon la revendication 16 dont l'épaisseur est d'au moins 20 mm caractérisé en ce que sa limite d'élasticité en compression dans le sens L est au
30 moins 650 MPa et sa ténacité $K_Q(L-T)$, est au moins 18 $MPa\sqrt{m}$.

20. Produit laminé selon la revendication 19 dont la teneur en manganèse est comprise entre 0,2 et 0,5 % en poids caractérisé en ce que sa limite d'élasticité en compression dans le sens L est au moins 653 MPa et sa ténacité $K_Q(L-T)$, d'au moins $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

5

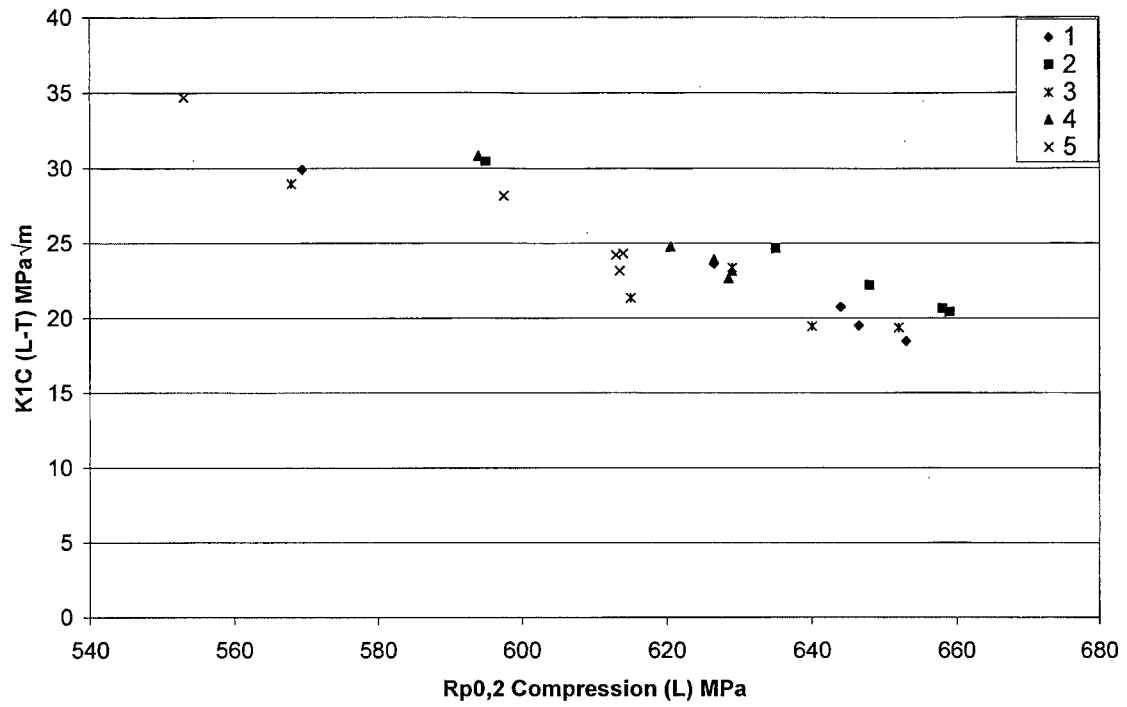
21. Produit laminé selon la revendication 20 caractérisé en ce que sa limite d'élasticité en compression dans le sens L est d'au moins 655 MPa.

10

22. Produit laminé selon la revendication 20 ou 21 caractérisé en ce que la ténacité $K_Q(L-T)$ est d'au moins $24 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

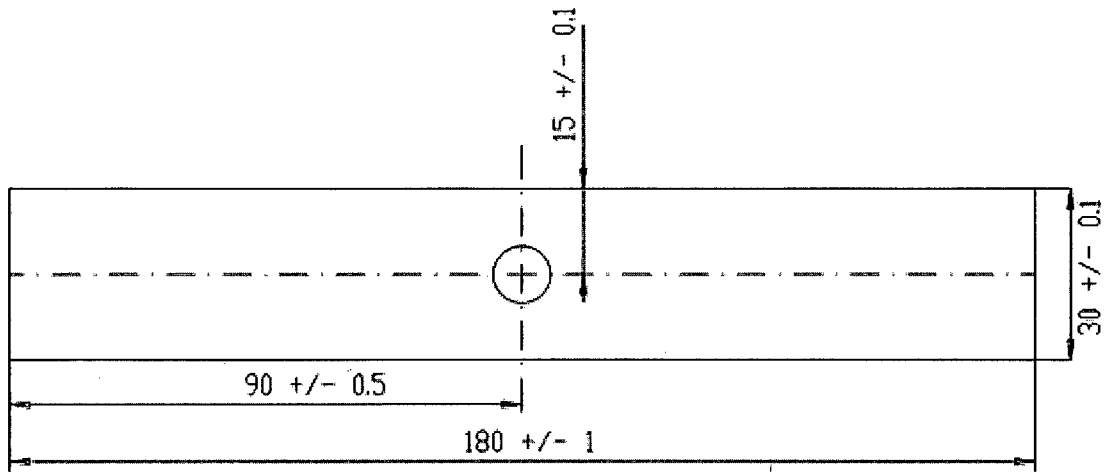
23. Élément de structure extradoss incorporant au moins un produit selon une quelconque des revendications 16 à 20 ou fabriqué à partir d'un tel produit.

Fig. 1



2/2

Fig. 2



5

Fig. 3

