



(11) **EP 1 891 247 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention  
de la délivrance du brevet:  
**12.11.2008 Bulletin 2008/46**

(51) Int Cl.:  
**C22C 21/12 (2006.01) C22F 1/057 (2006.01)**

(21) Numéro de dépôt: **06764718.0**

(86) Numéro de dépôt international:  
**PCT/FR2006/001250**

(22) Date de dépôt: **02.06.2006**

(87) Numéro de publication internationale:  
**WO 2006/131627 (14.12.2006 Gazette 2006/50)**

(54) **TOLE EN ALUMINIUM-CUIVRE-LITHIUM A HAUTE TENACITE POUR FUSELAGE D'AVION**  
**HOCHFESTES ALUMINIUM-KUPFER-LITHIUM-BLECH FÜR FLUGZEUGRÜMPFE**  
**HIGH-STRENGTH ALUMINUM-COPPER-LITHIUM SHEET METAL FOR AIRCRAFT FUSELAGES**

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

(30) Priorité: **06.06.2005 US 687444 P**  
**05.08.2005 FR 0508374**

(43) Date de publication de la demande:  
**27.02.2008 Bulletin 2008/09**

(73) Titulaire: **ALCAN RHENALU**  
**92400 Courbevoie (FR)**

(72) Inventeurs:  
• **BES, Bernard**  
**F-38180 Seyssins (FR)**  
• **RIBES, Hervé**  
**F-63500 Issoire (FR)**  
• **SIGLI, Christophe**  
**F-38000 Grenoble (FR)**

• **WARNER, Timothy**  
**F-38340 Voreppe (FR)**

(74) Mandataire: **Fénot, Dominique**  
**Alcan France S.A.S.**  
**Propriété Industrielle**  
**217, cours Lafayette**  
**69451 Lyon Cedex 06 (FR)**

(56) Documents cités:  
**WO-A-89/01531 WO-A-92/20830**  
**WO-A-93/23584 WO-A-20/04106570**  
**US-A- 5 198 045 US-A- 5 389 165**  
**US-A- 5 455 003 US-A1- 2004 071 586**

• **DATABASE WPI Derwent Publications Ltd.,**  
**London, GB; AN 2004-755565 XP002386374-& RU**  
**2 237 098 C (AVIATION MATERIALS RES INST) 27**  
**septembre 2004 (2004-09-27)**

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

**EP 1 891 247 B1**

## Description

### Domaine de l'invention

- 5 **[0001]** La présente invention concerne en général des produits en alliages d'aluminium et, en particulier, de tels produits utiles dans l'industrie aérospatiale et appropriés pour une utilisation dans des applications de fuselage.

### Etat de la technique

- 10 **[0002]** Dans l'industrie aéronautique civile d'aujourd'hui et, en particulier, pour des applications de fuselage, il existe une forte motivation pour réduire tant le poids que le coût. Le fuselage d'un avion de transport commercial est soumis à un ensemble complexe de contraintes, dépendant de la phase de fonctionnement (décollage, croisière, manoeuvre, atterrissage...) et des conditions environnementales (rafales de vent, vents de face,...). De plus, les différentes parties du fuselage sont soumises à des contraintes différentes. En dépit de cette complexité, il est possible de distinguer des  
15 lignes directrices majeures de conception qui déterminent le poids de la structure, certaines ayant un impact sur le poids total plus important que d'autres.

- [0003]** A titre d'exemple, la résistance à la compression et au cisaillement en compression est une ligne directrice de conception extrêmement importante, puisque les panneaux de fuselage les plus lourds subissent ce type de contrainte. Afin qu'un nouveau matériau puisse permettre une réduction du poids de ces panneaux contraints en compression, il  
20 doit avoir un module d'élasticité élevé, une limite d'élasticité à 0,2 % élevée (pour résister au flambage) et une faible masse volumique.

- [0004]** La deuxième ligne directrice majeure est la résistance résiduelle de panneaux longitudinalement (dans l'axe du fuselage) fissurés. Les règlements de certification aéronautiques obligent la prise en compte de la tolérance aux dommages dans la conception, ainsi il est habituel d'envisager de grandes fissures longitudinales ou circonférentielles  
25 dans les panneaux de fuselage, pour prouver qu'un certain niveau de contrainte peut être appliqué sans rupture catastrophique. Une propriété connue des matériaux gouvernant la conception est ici la ténacité sous contrainte plane. Tous les facteurs connus d'intensité de contrainte critique ne confèrent toutefois qu'une vue limitée de la ténacité. L'essai de courbe R est un moyen largement reconnu pour caractériser les propriétés de ténacité. La courbe R représente l'évolution du facteur d'intensité de contrainte effective critique pour la propagation de fissure en fonction de l'extension de fissure effective, sous une contrainte monotone. Elle permet la détermination de la charge critique pour une rupture instable  
30 pour toute configuration pertinente à des structures d'aéronef fissurées. Les valeurs du facteur d'intensité de contrainte effective et de l'extension de fissure effective sont des valeurs définies dans la norme ASTM E561. La longueur de la courbe R - à savoir l'extension de fissure maximale de la courbe - est un paramètre en lui-même important pour la conception de fuselage. L'analyse classique, généralement utilisée, des essais réalisés sur des panneaux à fissure centrale donne un facteur d'intensité de contrainte apparent à la rupture ( $K_{app}$ ). Cette valeur ne varie pas significativement  
35 en fonction de la longueur de la courbe R, spécialement lorsque la pente de la courbe R est proche de la pente de la courbe liée au facteur d'intensité de contrainte appliqué à la longueur de fissure (courbe appliquée). Toutefois, dans une structure d'élément structural réel tel qu'un panneau comportant des raidisseurs fixés, lorsqu'une fissure progresse sous un raidisseur non rompu, la courbe appliquée chute en raison de l'effet de pontage du raidisseur. Dans ce cas, un  
40 minimum local de la courbe appliquée peut se produire pour une longueur de fissure plus grande que la somme de la longueur de fissure initiale et de l'extension de fissure sous une charge monotone. Dans ce cas, de plus grandes contraintes avant rupture instable sont permises pour de longues courbes R. Il est ainsi intéressant d'avoir une plus longue courbe R, même pour des facteurs d'intensité de contrainte critiques identiques, tels qu'ils sont déterminés classiquement.

- [0005]** Pour des produits ayant des propriétés mécaniques identiques, une masse volumique inférieure est clairement bénéfique pour le poids d'un élément de structure. Une troisième ligne directrice majeure est ainsi la masse volumique du matériau. De plus, de grandes parties du fuselage ne sont pas aussi fortement chargées et le poids de la conception est limité par une certaine limite généralement appelée « épaisseur minimale ». Le concept d'épaisseur minimale correspond à la plus faible épaisseur utilisable pour la fabrication (en particulier la manipulation des panneaux) et la  
50 réparation (rivetage de réparation). La seule manière de réduire le poids dans ce cas consiste à utiliser un matériau de plus faible masse volumique.

- [0006]** D'autres lignes directrices importantes sont la propagation de fissures en fatigue, soit sous contrainte à amplitude constante, soit avec une amplitude variable (en raison de manoeuvres et de rafales de vent, spécialement dans la direction longitudinale, mais également autour de l'aile, dans toutes les directions).

- 55 **[0007]** Aujourd'hui, les fuselages des avions civils sont, pour la majeure partie, constitués de tôle en alliage 2024, 2056, 2524, 6013, 6156 ou 7475, plaquée sur chaque face avec un alliage d'aluminium peu chargé en éléments d'alliage, un alliage 1050 ou 1070 par exemple. Le but de l'alliage de revêtement est de conférer une résistance à la corrosion suffisante. Une corrosion légère, généralisée ou par piqûre est tolérable mais elle ne doit pas être pénétrante de façon

à ne pas attaquer l'alliage de coeur. Il existe une tendance à essayer d'utiliser des matériaux non-plaqués pour la conception de fuselage, de façon à réduire le coût. La résistance à la corrosion, et en particulier la corrosion intergranulaire et la corrosion sous contrainte, du panneau de fuselage est ainsi un aspect important de ses propriétés.

**[0008]** Comme énoncé ci-dessus, la seule manière de réduire le poids consiste, dans certains cas, à réduire la masse volumique des matériaux utilisés pour la construction aéronautique. Les alliages en aluminium-lithium ont depuis longtemps été reconnus comme une solution efficace pour réduire le poids en raison de la faible masse volumique de ces alliages. Toutefois, les différentes exigences citées ci-dessus : module d'élasticité élevé, résistance à la compression élevée, tolérance aux dommages élevée et résistance à la corrosion élevée, n'ont pas été satisfaites simultanément par les alliages aluminium-lithium de l'art antérieur. Obtenir une ténacité élevée avec ces alliages s'est en particulier révélé être un problème difficile à résoudre. Prasad et al, par exemple, ont établi récemment (dans Sadhana, vol. 28, parties 1 & 2, février/avril 2003 pages 209 à 246) que « des alliages Al-Li sont des matériaux candidats de premier ordre pour remplacer les alliages en Al traditionnellement utilisés. En dépit de leurs nombreux avantages de propriétés, une faible ductilité en tension et une ténacité inadéquate, spécialement dans les directions à travers l'épaisseur, militent contre leur acceptabilité ». Aujourd'hui, les alliages en Al-Li ont été limités à des applications militaires très spécifiques telles que les matériaux ayant une résistance élevée à haute température, les matériaux ayant une ténacité améliorée à des températures cryogénique pour des applications aérospatiales, dans certaines parties d'hélicoptères, et des pièces de fuselage d'avions militaires.

**[0009]** Le brevet US 5 032 359 (Martin Marietta) décrit une famille d'alliages basée sur des alliages aluminium-cuivre-magnésium-argent auxquels du lithium a été ajouté, dans des gammes spécifiques et qui présentent une résistance élevée à température ambiante et à haute température, une ductilité élevée à températures ambiante et à haute température, une aptitude à l'extrusion, une forgeabilité, et de bonnes propriétés de soudabilité et de réponse au vieillissement naturel. Les exemples décrivent des produits extrudés. Aucune information n'est fournie quant à la ténacité, au comportement en fatigue ou à la résistance à la corrosion. Dans un mode de réalisation préféré, l'alliage a pour composition de 3,0 à 6,5 % de cuivre, de 0,05 à 2,0 % de magnésium, de 0,05 à 1,2 % d'argent, de 0,2 à 3,1 % de lithium, de 0,05 à 0,5 % d'un élément choisi parmi le zirconium, le chrome, le manganèse, le titane, le bore, l'hafnium, le vanadium, le diborure de titane et les mélanges de ces derniers.

**[0010]** Le document US 5 122 339 (Martin Marietta) est une continuation de la demande précédente. Il est décrit en outre une utilisation d'alliages similaire en tant qu'alliages de soudage ou en tant qu'alliages soudés.

**[0011]** Le document US 5 211 910 (Martin Marietta) décrit les alliages à base d'aluminium contenant du Cu, du Li, du Zn, du Mg et de l'Ag qui possèdent des propriétés favorables, comme une masse volumique relativement faible, un module élevé, des combinaisons résistance mécanique/ductilité élevées, une forte réponse au vieillissement naturel avec et sans écrouissage antérieur, et un module élevé après revenu avec ou sans écrouissage antérieur. Les alliages ont pour composition de 1 à 7% de Cu, de 0,1 à 4% de Li, de 0,01 à 4% de Zn, de 0,05 à 3% de Mg, de 0,01 à 2 % d'Ag, de 0,01 à 2 % d'un élément choisi parmi Zr, Cr, Mn, Ti, Hf, V, Nb, B et TiB<sub>2</sub>, le reste étant de l'Al conjointement avec ses impuretés inévitables. Cette invention décrit comment des additions de Zn peuvent être utilisées pour réduire la teneur en Ag présents dans les alliages enseignés dans le document US 5 032 359 de façon à de réduire le coût.

**[0012]** Le document US 5 455 003 (Martin Marietta) décrit un procédé de production d'alliages aluminium-cuivre-lithium qui présentent une résistance mécanique et une ténacité améliorées à des températures cryogéniques. Les propriétés cryogéniques améliorées sont atteintes en ajustant la composition de l'alliage, conjointement avec les paramètres de traitement tels que la quantité d'écrouissage et le revenu. Le produit est utilisé pour des réservoirs cryogéniques dans des véhicules de lancement spatial.

**[0013]** Le document US 5 389 165 (Reynolds) décrit un alliage à base d'aluminium utile dans des structures d'aéronef et aérospatiales qui a une faible masse volumique, une résistance mécanique élevée et une haute ténacité et qui a pour formule: Cu<sub>a</sub>Li<sub>b</sub>Mg<sub>c</sub>Ag<sub>d</sub>Zr<sub>e</sub>Al<sub>bal</sub> dans laquelle a, b, c, d, e et bal indiquent la quantité en % en poids de composants d'alliage, et dans laquelle 2,8 < a < 3,8, 0,80 < b < 1,3, 0,20 < c < 1,00, 0,20 < d < 1,00 et 0,08 < e < 0,40. De préférence, les composants cuivre et lithium sont ajustés de sorte que la teneur combinée en cuivre et en lithium est maintenue en dessous de la limite de solubilité afin d'éviter une perte de la ténacité pendant une exposition à une température élevée. La relation entre les teneurs en cuivre et en lithium doit également satisfaire la relation suivante :

$$\text{Cu (\% en poids)} + 1,5 \text{ Li (\% en poids)} < 5,4.$$

**[0014]** Des conditions spéciales de traction contrôlée, entre 5 et 11 %, sont appliquées. Les exemples sont limités à une épaisseur de 19 mm et une teneur en zirconium supérieure ou égale à 0,13 % en poids.

**[0015]** Le document US 2004/0071586 (Alcoa) divulgue un alliage Al-Cu-Mg comprenant de 3 à 5 % en poids de Cu, de 0,5 à 2 % en poids de Mg et de 0,01 à 0,9 % en poids de Li. D'après cette demande de brevet, la ténacité des alliages pour lesquels un ajout de Li compris entre 0,2 et 0,7 % en poids est améliorée de façon significative par rapport à des

alliages semblables contenant soit pas de Li soit une quantité de Li plus élevée.

**[0016]** Il existe un besoin d'un alliage en Al-Li de résistance mécanique élevée, de haute ténacité et en particulier d'extension de fissure élevée avant une rupture instable, de résistance à la corrosion élevée, pour des applications aéronautiques et en particulier pour des applications de tôle de fuselage.

## Objet de l'invention

**[0017]** Pour ces raisons et d'autres, les présents inventeurs sont parvenus à la présente invention concernant un alliage aluminium-cuivre-lithium-magnésium-argent, qui présente une résistance mécanique élevée, une haute ténacité et spécifiquement une extension de fissure élevée avant une rupture instable de panneaux larges pré-fissurés, et une haute résistance à la corrosion.

**[0018]** Un objet de la présente invention est un procédé de fabrication d'une tôle à base d'alliage d'aluminium ayant une ténacité et une résistance mécanique élevées, dans lequel :

a) on élabore un bain de métal liquide comprenant 3,0 à 3,4% en poids de Cu, 0,8 à 1,2 % en poids de Li, 0,2 à 0,5 % en poids d'Ag, 0,2 à 0,6% en poids de Mg et au moins un élément choisi parmi Zr, Mn, Cr, Sc, Hf et Ti, la quantité dudit élément, s'il est choisi, étant de 0,05 à 0,13% en poids pour Zr, 0,05 à 0,8 % en poids pour Mn, 0,05 à 0,3 % en poids pour Cr et pour Sc, 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et de 0,05 à 0,15 % en poids pour Ti, le reste étant de l'aluminium et des impuretés inévitables, avec la condition supplémentaire que la quantité de Cu et de Li soit telle que

$$\text{Cu (\% en poids)} + 5/3 \text{ Li (\% en poids)} < 5,2 ;$$

b) on coule une plaque à partir dudit bain de métal liquide  
c) on homogénéise ladite plaque à une température comprise entre 490 à 530°C pendant une durée de 5 à 60 heures ;  
d) on lamine ladite plaque en une tôle ayant une épaisseur finale comprise entre 0,8 et 12 mm ;  
e) on met en solution et on trempe ladite tôle ;  
f) on tractionne de façon contrôlée ladite tôle avec une déformation permanente de 1 à 5 % ;  
g) on réalise un revenu de ladite tôle par chauffage à 140 à 170 °C pendant 5 à 30 heures.

**[0019]** Un autre objet de l'invention est un produit laminé, extrudé et/ou forgé en alliage d'aluminium comprenant 3,0 à 3,4% en poids de Cu, 0,8 à 1,2 % en poids de Li, 0,2 à 0,5 % en poids d'Ag, 0,2 à 0,6 % en poids de Mg et au moins un élément choisi parmi Zr, Mn, Cr, Sc, Hf et Ti, la quantité dudit élément, s'il est choisi, étant de 0,05 à 0,13 % en poids pour Zr, 0,05 à 0,8 % en poids pour Mn, 0,05 à 0,3 % en poids pour Cr et pour Sc, 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et de 0,05 à 0,15 % en poids pour Ti, le reste étant de l'aluminium et des impuretés inévitables, avec la condition supplémentaire que la quantité de Cu et de Li soit telle que

$$\text{Cu (\% en poids)} + 5/3 \text{ Li (\% en poids)} < 5,2 .$$

**[0020]** Encore d'autres objets de l'invention sont des éléments de structures, raidisseurs et panneaux de fuselage obtenus à partir desdits produits laminés, extrudés et/ou forgés.

## Description des figures

**[0021]**

Figure 1 : Courbe R dans le sens T-L (éprouvette CCT760).

Figure 2 : Courbe R dans le sens L-T (éprouvette CCT760) .

Figure 3 : évolution de la vitesse de fissuration dans le sens T-L lorsque l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte varie.

Figure 4 : évolution de la vitesse de fissuration dans le sens L-T lorsque l'amplitude du facteur d'intensité de contrainte varie.

Figure 5 : Courbe R dans le sens T-L (éprouvette CCT760) d'échantillons selon l'invention ayant été obtenu avec différents niveaux de déformation par traction.

## Description détaillée de l'invention

**[0022]** 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. Les définitions des états métallurgiques sont indiquées dans la norme européenne EN 515.

**[0023]** Sauf mention contraire, les caractéristiques mécaniques statiques, 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 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.

**[0024]** La vitesse de fissuration ( $da/dN$ ) est déterminée selon la norme ASTM E 647. Une courbe de l'intensité de contrainte en fonction de l'extension de fissure, connue comme la courbe  $R$ , est déterminée selon la norme ASTM E 561. Le facteur d'intensité de contrainte critique  $K_{IC}$ , en d'autres termes le facteur d'intensité qui rend la fissure instable, est calculé à partir de la courbe  $R$ . Le facteur d'intensité de contrainte  $K_{ICO}$  est également calculé en attribuant la longueur de fissure initiale à la charge critique, au commencement de la charge monotone. Ces deux valeurs sont calculées pour une éprouvette de la forme requise.  $K_{app}$  représente le facteur  $K_{ICO}$  correspondant à l'éprouvette qui a été utilisée pour effectuer l'essai de courbe  $R$ .  $K_{eff}$  représente le facteur  $K_{IC}$  correspondant à l'éprouvette qui a été utilisée pour effectuer l'essai de courbe  $R$ .  $\Delta a_{eff(max)}$  représente l'extension de fissure du dernier point valide de la courbe  $R$ . Sauf mention contraire, la taille de fissure à la fin du stade de pré-fissurage par fatigue est  $W/3$  pour des éprouvettes du type  $M(T)$ , dans laquelle  $W$  est la largeur de l'éprouvette telle que définie dans la norme ASTM E561. Il faut remarquer que la largeur de l'éprouvette utilisée dans un essai de courbe  $R$  peut avoir une influence substantielle sur l'intensité de contrainte mesurée dans l'essai. Les tôles de fuselage étant de grands panneaux, les résultats de courbe  $R$  obtenus sur échantillons suffisamment larges, tels que des échantillons ayant une largeur supérieure ou égale à 400 mm, sont jugés les plus significatifs pour l'évaluation de la ténacité. Pour cette raison, les échantillons d'essai CCT760, qui avaient une largeur de 760 mm, ont été utilisés préférentiellement pour l'évaluation de la ténacité. La longueur de fissure initiale  $2a_0 = 253$  mm.

**[0025]** La ténacité a été également évaluée dans les sens T-L à l'aide de l'énergie globale à rupture  $E_g$  selon l'essai Kahn. La contrainte Kahn  $R_e$  (en MPa) est égale au rapport de la charge maximale  $F_{max}$  que peut supporter l'éprouvette sur la section de l'éprouvette (produit de l'épaisseur  $B$  par la largeur  $W$ ).  $R_e$  ne permet pas d'évaluer la ténacité relative d'échantillons dont les caractéristiques mécaniques statiques sont différentes. L'énergie globale à rupture  $E_g$  est déterminée comme l'aire sous la courbe Force-Déplacement jusqu'à la rupture de l'éprouvette,  $E_g$  est directement reliée à la ténacité. L'essai est décrit dans l'article « Kahn-Type Tear Test and Crack Toughness of Aluminum Alloy Sheet », paru dans la revue Materials Research & Standards, Avril 1964, p. 151- 155. L'éprouvette utilisée pour l'essai de ténacité Kahn est décrite, par exemple, dans le « Metals Handbook », 8th Edition, vol. 1, American Society for Metals, pp. 241-242.

**[0026]** Par « tôle », on veut dire ici un produit laminé n'excédant pas 12 mm d'épaisseur.

**[0027]** Le terme « élément de structure » se réfère à un élément utilisé en construction mécanique pour lequel les caractéristiques mécaniques statiques et / ou dynamiques ont une importance particulière pour la performance et l'intégrité de la structure, et pour lequel un calcul de la structure est généralement prescrit ou effectué. Il s'agit typiquement d'une pièce mécanique dont la défaillance est susceptible de mettre en danger la sécurité de ladite construction, de ses utilisateurs, de 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.

**[0028]** L'alliage aluminium - cuivre - lithium - argent-magnésium selon un mode de réalisation de l'invention a de manière avantageuse la composition suivante :

Tableau 1 :

| Gammes de composition d'alliages (% en poids, le reste étant du Al) |           |           |           |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                                                     | Cu        | Li        | Ag        | Mg        |
| Large                                                               | 2,7 à 3,4 | 0,8 à 1,4 | 0,1 à 0,8 | 0,2 à 0,6 |
| Préférée                                                            | 3,0 à 3,4 | 0,8 à 1,2 | 0,2 à 0,5 | 0,2 à 0,6 |
| Plus préférée                                                       | 3,1 à 3,3 | 0,9 à 1,1 | 0,2 à 0,4 | 0,2 à 0,4 |

**[0029]** Afin d'obtenir des résultats souhaités en termes de ténacité, il peut être avantageux d'obtenir une dissolution presque parfaite pendant un traitement thermique de mise en solution et également de minimiser la décomposition de la solution solide pendant la trempe. Les inventeurs ont déterminé que ceci peut être obtenu, par exemple, en limitant la quantité totale de Cu et de Li, selon la relation suivante entre le cuivre et le lithium

$$\text{Cu (\% en poids)} + 5/3 \text{ Li (\% en poids)} < 5,2$$

et en assurant une vitesse de refroidissement pendant la trempe suffisamment élevée, par exemple en trempant à l'eau froide.

**[0030]** Pour les compositions préférée et plus préférée du tableau 1, la relation entre le cuivre et le lithium est de préférence :

$$\text{Cu (\% en poids)} + 5/3 \text{ Li (\% en poids)} < 5.$$

**[0031]** Au moins un élément tel que Zr, Mn, Cr, Sc, Hf, Ti ou une combinaison de ceux-ci est inclus de façon à affiner le grain. Les additions dépendent de l'élément: de 0,05 à 0,13 % en poids (de préférence de 0,09 à 0,13 % en poids) pour Zr, de 0,05 à 0,8 % en poids pour Mn, de 0,05 à 0,3% en poids pour Cr et Sc, de 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et de 0,05 à 0,15 % en poids pour Ti. Lorsque plusieurs de ces éléments anti-recristallisants sont ajoutés, la somme peut être limitée par l'apparition de phases primaires.

**[0032]** Dans une autre réalisation avantageuse de l'invention, l'affinage de grain est réalisé grâce à l'ajout de 0,05 à 0,13% en poids de Zr, de 0,02 à 0,3% en poids de Sc et optionnellement de 0,05 à 0,8 % en poids de Mn, de 0,05 à 0,3 % en poids de Cr, de 0,05 à 0,5 % en poids de Hf et de 0,05 à 0,15 % en poids de Ti.

**[0033]** Dans certains cas, et particulièrement pour les tôles laminées à chaud d'épaisseur comprise entre 4 et 12 mm, il peut être avantageux de limiter la teneur en Mn à 0,05 % en poids et de préférence à 0,03 % en poids. Les inventeurs ont observé que pour de telles épaisseurs la présence de Mn rend plus difficile le contrôle de la structure granulaire et peut affecter à la fois les propriétés mécaniques et la ténacité.

**[0034]** Fe et Si affectent généralement les propriétés de ténacité. La quantité de Fe devrait de préférence être limitée à 0,1 % en poids et la quantité de Si devrait de préférence être limitée à 0,1 % en poids (de préférence à 0,05 % en poids). Tous les autres éléments devraient également de préférence être limités à 0,1 % en poids (de préférence à 0,05 % en poids).

**[0035]** Les inventeurs ont trouvé que si la teneur en cuivre est supérieure à 3,4 % en poids, les propriétés de ténacité peuvent dans certains cas chuter rapidement. Pour certains modes de réalisation de l'invention, il est recommandé de ne pas dépasser une teneur en cuivre de 3,3 % en poids. De manière préférée, la teneur en cuivre est supérieure à 3,0% ou même 3,1% en poids.

**[0036]** Les présents inventeurs ont observé que les teneurs en Zr supérieures à 0,13 % en poids peuvent, dans certains cas, conduire à une performance de ténacité inférieure. Quelle que soit la raison de cette chute de la ténacité, les inventeurs ont trouvé que la teneur en Zr supérieure conduisait à une formation de phases primaires  $\text{Al}_3\text{Zr}$ . Dans ce cas, une température de coulée élevée peut être utilisée afin d'éviter la formation des phases primaires, mais ceci peut conduire à une plus faible qualité du métal liquide, en termes d'inclusion et de teneur en gaz. C'est pourquoi les présents inventeurs considèrent que le Zr devrait avantageusement ne pas excéder 0,13 % en poids.

**[0037]** Les inventeurs ont trouvé que si la teneur en Li est inférieure à 0,8 % en poids ou même 0,9% en poids, l'amélioration de la résistance mécanique est trop faible. Dans certains cas, il peut être avantageux que la teneur en Li soit > 0,9 % en poids. Egalement, avec ces faibles teneur en Li la diminution de la densité de l'alliage est trop faible. Pour une teneur en Li supérieure à 1,4 % voir supérieure à 1,2 % en poids ou même supérieure à 1,1 % en poids, la ténacité est réduite de façon significative. Egalement, ces teneurs en Li élevées ont plusieurs désavantages liés notamment à la stabilité thermique, la coulabilité et le coût des matières premières.

**[0038]** L'ajout d'Ag est une caractéristique essentielle de l'invention. Les performances en résistance mécanique et en ténacité observées par les inventeurs ne sont habituellement pas atteintes pour des alliages ne contenant pas d'argent. Les inventeurs pensent que l'argent joue un rôle lors de la formation des phases durcissantes contenant du cuivre, formées pendant le vieillissement naturel ou artificiel et permet en particulier la formation de phases plus fines et une distribution plus homogène de ces phases. L'effet avantageux de Ag est observé pour une teneur de cet élément supérieure à 0,1 % en poids et préférentiellement supérieure à 0,2 % en poids. De façon à limiter le coût associé à l'ajout de Ag, il peut être avantageux de ne pas excéder 0,5% en poids ou même 0,4% en poids.

**[0039]** L'ajout de Mg améliore la résistance mécanique et diminue la densité. Une addition excessive de Mg aurait

cependant un effet néfaste sur la ténacité. Dans une réalisation avantageuse de l'invention, la teneur en Mg est limitée à 0,4% en poids. Les inventeurs pensent que l'ajout de Mg pourrait également avoir un rôle pendant la formation des phases contenant du cuivre.

**[0040]** Le bain de métal liquide ayant une composition selon l'invention est ensuite coulé. La présente invention permet d'obtenir un produit laminé, extrudé et/ou forgé dont l'épaisseur est, d'une façon avantageuse, comprise entre 0,8 et 12 mm et de préférence entre 2 et 12 mm.

**[0041]** Selon un mode de réalisation avantageux de la présente invention, un alliage ayant des quantités ajustées d'éléments d'alliage est coulé sous forme de plaque. La plaque est ensuite homogénéisée à 490 à 530 °C pendant 5 à 60 heures. Les inventeurs ont observé que les températures d'homogénéisation supérieures à 530 °C peuvent tendre à réduire la performance de ténacité dans certains cas.

**[0042]** Avant le laminage à chaud, les plaques sont chauffées à 490 à 530 °C pendant 5 à 30 h. Un laminage à chaud est réalisé pour obtenir une épaisseur comprise entre 4 et 12 mm. Pour une épaisseur d'approximativement 4 mm ou moins, une étape de laminage à froid peut être ajoutée, si nécessaire. La tôle obtenue a une épaisseur comprise de préférence entre 0,8 et 12 mm, et l'invention est plus avantageuse pour des tôles de 2 à 12 mm d'épaisseur et même 2 à 9 mm et encore plus avantageuse pour des tôles de 3 à 7 mm d'épaisseur. Les tôles sont ensuite mises en solution, par exemple par traitement thermique entre 490 et 530 °C pendant 15 min à 2 h, puis trempées avec de l'eau à température ambiante ou préférentiellement de l'eau froide.

**[0043]** Le produit subit ensuite une traction contrôlée de 1 à 5 % et préférentiellement de 2,5 à 4 %. De tels niveaux d'écrouissage à froid peuvent également être obtenus par laminage à froid, planage, forgeage ou une combinaison de ces méthodes et de la traction contrôlée. De manière avantageuse, l'écrouissage à froid total après trempe est compris entre 2,5 et 4%. En particulier, quand une opération de planage est effectuée entre la trempe et la traction contrôlée et qu'aucune autre déformation à froid n'est réalisée, il peut être avantageux que la déformation par traction contrôlée soit comprise entre 1,7 et 3,5%. Les inventeurs ont observé que la ténacité tend à diminuer quand la déformation par traction contrôlée est supérieure à 5%. De plus, les résultats de Kahn test, en particulier  $E_g$  tend à diminuer pour des déformations permanentes supérieures à 5%. Il est de ce fait recommandé de ne pas dépasser une déformation permanente de 5%. Par ailleurs, si la traction est supérieure à 5 % on peut rencontrer des difficultés industrielles telles qu'une mise en oeuvre élevée ainsi que des difficultés de mise en forme, ce qui augmenterait le coût du produit.

**[0044]** Un revenu est réalisé à une température comprise entre 140 et 170°C pendant 5 à 30 h, ce qui permet d'obtenir un état T8. Dans certains cas et en particulier pour les compositions préférée et plus préférée du tableau 1 le revenu est plus préférentiellement réalisé, entre 140 et 155°C pendant 10 à 30 h. Des températures de revenu basses favorisent généralement une haute ténacité. Dans un mode de réalisation de la présente invention, l'étape de revenu est divisée en deux étapes : une étape de pré-revenu antérieure à une opération de soudage, et un traitement thermique final d'un élément de structure soudé. Dans le cadre de la présente invention, un soudage par friction-malaxage est une technique de soudage préférée.

**[0045]** Les tôles selon l'invention ont des propriétés avantageuses pour des microstructures recristallisées, non recristallisées ou mixtes (c'est à dire comprenant des zones recristallisées et des zones non recristallisées). Dans certains cas, les inventeurs ont observé qu'il pouvait être avantageux d'éviter les microstructures mixtes : pour les tôles dont l'épaisseur est comprise entre 4 et 12 mm, il peut être avantageux que la microstructure soit complètement non recristallisée.

**[0046]** Les caractéristiques des tôles obtenues selon l'invention sont à l'état T8 :

- La limite d'élasticité conventionnelle  $R_{p0,2}$  dans le sens L est de préférence d'au moins 440 MPa, préférentiellement d'au moins 450 MPa ou même d'au moins 460 MPa.
- La résistance à la rupture  $R_m$  dans le sens L est de préférence d'au moins 470 MPa préférentiellement d'au moins 480 MPa ou même d'au moins 490 MPa.
- Les propriétés de ténacité utilisant des éprouvettes CCT760 (avec  $2a_0 = 253$  mm) sont telles que :

$K_{app}$  dans la direction T-L est de préférence d'au moins  $110 \text{ MPa} \sqrt{m}$  et préférentiellement d'au moins 130

$\text{MPa} \sqrt{m}$  ou même d'au moins  $140 \text{ MPa} \sqrt{m}$  ;

$K_{app}$  dans la direction L-T est d'au moins  $150 \text{ MPa} \sqrt{m}$  et préférentiellement d'au moins  $170 \text{ MPa} \sqrt{m}$  ;

$K_{eff}$  dans la direction T-L est d'au moins  $130 \text{ MPa} \sqrt{m}$  et préférentiellement d'au moins  $150 \text{ MPa} \sqrt{m}$  ;

$K_{eff}$  dans la direction L-T est d'au moins  $170 \text{ MPa} \sqrt{m}$  ou même d'au moins  $190 \text{ MPa} \sqrt{m}$  et préféren-

tiellement d'au moins 230 MPA  $\sqrt{m}$  ;

$\Delta a_{eff(max)}$ : l'extension de fissure du dernier point valide de la courbe R dans la direction T-L est de préférence d'au moins 30 mm et préférentiellement d'au moins 40 mm ;

$\Delta a_{eff(max)}$ : l'extension de fissure du dernier point valide de la courbe R dans la direction L-T, est de préférence d'au moins 50 mm.

**[0047]** La mise en forme de la tôle de l'invention peut avantageusement être effectuée par emboutissage profond, étirage, fluotournage, roulage ou pliage, ces techniques étant connues de l'homme du métier.

**[0048]** 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. Ladite tôle peut être fixée à des raidisseurs ou des cadres, par exemple par rivetage ou soudage. Les inventeurs ont trouvé que si le soudage est choisi, il peut être préférable d'utiliser des techniques de soudage à basse température, qui aident à assurer que la zone affectée thermiquement soit aussi faible que possible. A cet égard, le soudage au laser et le soudage par friction-malaxage donnent souvent des résultats particulièrement satisfaisants. Dans le cadre de l'invention, le soudage par friction-malaxage est la méthode de soudage préférée. Les joints soudés de tôles selon l'invention obtenus avantageusement par soudage par friction-malaxage ont un coefficient d'efficacité du joint supérieur à 70% et de préférence supérieur à 75%. Ce résultat avantageux est obtenu que le revenu soit pratiqué avant ou après l'opération de soudage.

**[0049]** Un élément de structure, formé d'au moins un produit selon l'invention, en particulier d'une tôle selon l'invention et de raidisseurs ou de cadres, ces raidisseurs ou cadres étant de préférence constitués de profilés extrudés, peut être utilisé en particulier pour la fabrication de panneaux de fuselage d'avions de même que toute autre utilisation où les présentes propriétés pourraient être avantageuses.

**[0050]** Selon l'invention, des éléments de structures, des raidisseurs, et/ou des panneaux de fuselage, peuvent être fabriqués à partir des produits laminés, extrudés, et/ou forgés obtenus. Les inventeurs ont trouvé que la tôle de l'invention a des propriétés mécaniques statiques particulièrement favorables et une haute ténacité. Pour des produits connus, les tôles à haute ténacité ont généralement de faibles limites d'élasticité et résistance à la rupture. Pour la tôle de l'invention, les propriétés mécaniques élevées favorisent une application industrielle pour des parties structurales d'avion, la limite d'élasticité et la résistance à la rupture de ladite tôle étant des caractéristiques qui sont directement prises en compte pour le calcul du dimensionnement structural. Des calculs d'éléments de structure et en particulier de panneaux de fuselage comprenant des tôles et/ou des raidisseurs selon l'invention ont montré une possibilité de réduction de poids par rapport à des éléments de structure de propriétés comparables ne comprenant que des tôles de l'art antérieur en alliage 2024, 2056, 2098, 7475 ou 6156. De telles réductions de poids sont en général de 1 à 10 % et, dans certains cas, des réductions de poids même supérieures peuvent être atteintes.

**[0051]** A titre d'exemple, dans une pièce de forme et dimensions données, la simple substitution de l'alliage 2024 par un alliage selon l'invention, sans redimensionner l'élément de structure en fonction de l'amélioration des caractéristiques mécaniques, peut permettre une réduction de poids de l'ordre de 3 à 3,5%.

**[0052]** Les caractéristiques mécaniques élevées des alliages selon l'invention permettent de développer des produits d'une dimension et forme plus légère encore ce qui permet d'atteindre ou même de dépasser une réduction de poids de 10%.

**[0053]** La tôle de l'invention n'induit généralement aucun problème particulier pendant des opérations ultérieures de traitement de surface classiquement utilisées en construction aéronautique..

**[0054]** La résistance à la corrosion intergranulaire de la tôle de l'invention est généralement élevée ; à titre d'exemple, on ne détecte en général que des piqûres lorsque le métal est soumis à un essai de corrosion. Dans un mode de réalisation préféré de l'invention, la tôle de l'invention peut être utilisée sans placage.

**[0055]** Ces aspects, ainsi que d'autres de l'invention sont expliqués plus en détail à l'aide de l'exemple illustratif et non limitant suivant.

## Exemples

### Exemple 1

**[0056]** En relation avec la présente invention, plusieurs matériaux connus sont présentés à des fins de comparaison (références A à E). Ils comprennent, respectivement, les alliages 2024, 2056, 7475, 6156 et 2098. Les exemples de l'invention sont marqués F à I. La composition chimique des divers alliages testés est fournie dans le tableau 2.

## EP 1 891 247 B1

Tableau 2 :

| Composition chimique (% en poids) |      |      |     |      |      |      |      |        |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|--------|------|------|------|
| coulée                            | Si   | Fe   | Cu  | Mn   | Mg   | Cr   | Zn   | Zr     | Li   | Ag   | Ti   |
| A (2024)                          | 0,12 | 0,15 | 4,2 | 0,5  | 1,4  | 0,05 | 0,2  | 0,02 - |      | -    | 0,02 |
| B (2056)                          | 0,06 | 0,09 | 4,0 | 0,4  | 1,3  | -    | 0,6  | -      | -    | -    | 0,02 |
| C (7475)                          | 0,04 | 0,07 | 1,6 | 0,01 | 2,2  | 0,2  | 5,8  | 0,02   | -    | -    | 0,02 |
| D (6156)                          | 0,78 | 0,07 | 0,9 | 0,45 | 0,75 |      | 0,14 | 0,02   | -    | -    | 0,02 |
| E (2098)                          | 0,03 | 0,04 | 3,6 | 0,01 | 0,32 |      | 0,14 | 0,02   | 1,00 | 0,33 | 0,02 |
| F                                 | 0,02 | 0,04 | 3,3 | 0,01 | 0,31 |      |      | 0,12   | 0,96 | 0,32 | 0,02 |
| G                                 | 0,05 | 0,06 | 3,2 | 0,01 | 0,31 |      |      | 0,11   | 0,93 | 0,32 | 0,03 |
| H                                 | 0,05 | 0,06 | 3,3 | 0,02 | 0,31 |      | 0,06 | 0,11   | 0,96 | 0,34 | 0,02 |
| I                                 | 0,05 | 0,06 | 3,2 | 0,01 | 0,31 |      |      | 0,11   | 0,94 | 0,33 | 0,03 |
| J                                 | 0,03 | 0,04 | 3,2 | -    | 0,31 | -    | -    | 0,11   | 0,98 | 0,33 | 0,02 |
| K                                 | 0,03 | 0,04 | 3,3 | 0,00 | 0,31 | -    | -    | 0,11   | 0,97 | 0,34 | 0,03 |

**[0057]** La masse volumique des différents alliages testés est présentée dans le tableau 3. Les échantillons F à I présentent la plus faible masse volumique des différents matériaux testés.

Tableau 3 :

| Masse volumique des alliages testés |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Référence                           | Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) |
| A (2024)                            | 2,78                                 |
| B (2056)                            | 2,78                                 |
| C (7475)                            | 2,81                                 |
| D (6156)                            | 2,72                                 |
| E (2098)                            | 2,70                                 |
| F, G, H, I, J, K                    | 2,69                                 |

**[0058]** Le procédé utilisé pour la fabrication des échantillons de référence A à D est le procédé industriel classique, ces échantillons de référence ont été plaqués. Les états métallurgiques finaux pour A, B, C et D étaient, respectivement, T3, T3, T76 et T6 selon la norme EN573. Le procédé utilisé pour fabriquer les échantillons E et F est présenté dans le tableau 4. Dans certains cas, une étape de planage a été effectuée entre la tempe et la traction contrôlée. A des fins de comparaison, les échantillons E n'ont pas été transformés avec leurs conditions les plus habituelles, qui comprennent une opération de traction contrôlée avec un allongement entre 5 et 10 %. L'échantillon E#3 a subi un traitement de recuit avant mise en solution à des fins d'amélioration de la ténacité. Le procédé particulier réalisé pour l'échantillon E#3, incluant une étape supplémentaire, ne serait pas favorable pour une application industrielle en raison de l'augmentation de coût liée à cette étape. Pour les autres échantillons réalisés avec l'alliage E, aucune étape de recuit n'a été réalisée.

Tableau 4 :

| Conditions des étapes consécutives de transformation |                              |                              |                         |
|------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|
|                                                      | Référence E                  | Références F et K            | Références G, H, I et J |
| Etat                                                 | T8                           | T8                           | T8                      |
| Détente des plaques                                  | Oui                          | Oui                          | Oui                     |
| Homogénéisation                                      | 8 h à 500 °C + 36 h à 526 °C | 8 h à 500 °C + 36 h à 526 °C | 12h à 505 °C            |

## EP 1 891 247 B1

(suite)

| Conditions des étapes consécutives de transformation |                                   |                                   |                                   |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                                                      | Référence E                       | Références F et K                 | Références G, H, I et J           |
| Préchauffage avant laminage à chaud                  | 20 h à 520 °C                     | 20 h à 520 °C                     | 20 h à 520 °C                     |
| Laminage à chaud                                     | Epaisseur > 4 mm                  | Epaisseur > 4 mm                  | Epaisseur > 4 mm                  |
| Laminage à froid                                     | Epaisseur < 4 mm                  | Epaisseur < 4 mm                  | Epaisseur < 4 mm                  |
| Mise en solution                                     | 2 h à 521 °C                      | 1 h à 517 °C                      | 30 mn 505 °C                      |
| Trempe                                               | Eau froide                        | Eau froide                        | Eau froide                        |
| Traction contrôlée                                   | 1 à 5 % de déformation permanente | 1 à 5 % de déformation permanente | 1 à 5 % de déformation permanente |
| Revenu                                               | 14 h à 155 °C                     | 14 h à 155 °C                     | 14 h à 155 °C                     |

**[0059]** Pour les références G, H, I et J, la sélection précise de composition autorise une dissolution complète tout en restant à une température de mise en solution significativement inférieure au solidus.

**[0060]** Après revenu, on a coupé les échantillons aux dimensions souhaitées. Le tableau 5 fournit la référence des différents échantillons et de leurs dimensions.

Tableau 5 :

| Dimensions finales des échantillons |                |              |               |
|-------------------------------------|----------------|--------------|---------------|
| Echantillon                         | Epaisseur [mm] | Largeur [mm] | Longueur [mm] |
| A                                   | 6,0            | 2 000        | 3 000         |
| B                                   | 6,0            | 2 000        | 3 000         |
| C                                   | 6,3            | 1 900        | 4 000         |
| D                                   | 4,6            | 2 500        | 4 500         |
| E#1                                 | 2,0            | 1 000        | 2 500         |
| E#2                                 | 3,2            | 1 000        | 2 500         |
| E#3                                 | 4,5            | 1 250        | 2 500         |
| E#31                                | 4,5            | 1 250        | 2 500         |
| E#4                                 | 6,7            | 1 250        | 2 500         |
| F#1                                 | 3,0            | 1 000        | 2 500         |
| F#2                                 | 5,0            | 1 250        | 2 500         |
| F#3                                 | 6,7            | 1 250        | 2 500         |
| G#1                                 | 3,8            | 2 450        | 9 600         |
| H#1                                 | 5,0            | 2 450        | 9 600         |
| I#1                                 | 5,0            | 1 500        | 3 000         |
| K#1                                 | 2,0            | 1 000        | 2 500         |

**[0061]** Les échantillons ont été testés pour déterminer leurs propriétés mécaniques statiques de même que leur ténacité. La limite d'élasticité  $R_{p0,2}$ , la résistance à la rupture  $R_m$ , et l'allongement à la rupture (A) sont fournis dans le tableau 6.

# EP 1 891 247 B1

Tableau 6 :

| Propriétés mécaniques des échantillons |           |           |                         |       |          |                         |       |
|----------------------------------------|-----------|-----------|-------------------------|-------|----------|-------------------------|-------|
|                                        |           | Sens L    |                         |       | Sens LT  |                         |       |
| Echantillon                            | Epaisseur | Rm ( MPa) | R <sub>p0,2</sub> (MPa) | A (%) | Rm (MPa) | R <sub>p0,2</sub> (MPa) | A (%) |
| A                                      | 6,0       | 454       | 367                     | 19,0  | 448      | 323                     | 19,3  |
| B                                      | 6,0       | 460       | 367                     | 20,0  | 450      | 325                     | 21,0  |
| C                                      | 6,3       | 510       | 450                     | 14,0  | 506      | 460                     | 11,5  |
| D                                      | 4,6       | 374       | 356                     | 12,0  | 375      | 339                     | 12,0  |
| E#1                                    | 2,0       | 532       | 514                     | 9,9   | 538      | 490                     | 10,6  |
| E#3                                    | 4,5       | 586       | 570                     | 11,0  | 568      | 543                     | 12,0  |
| E#31                                   | 4,5       | 571       | 539                     | 10,2  | 565      | 522                     | 11,3  |
| E#4                                    | 6,7       | 560       | 540                     | 12,0  | 557      | 531                     | 11,7  |
| F#1                                    | 3,0       | 490       | 469                     | 13,0  | 512      | 467                     | 12,5  |
| F#2                                    | 5,0       | 498       | 470                     | 12,2  | 502      | 453                     | 11,1  |
| F#3                                    | 6,7       | 514       | 481                     | 12,2  | 509      | 468                     | 11,6  |
| G#1                                    | 3,8       | 507       | 470                     | 11,3  | 494      | 447                     | 13,8  |
| H#1                                    | 5,0       | 517       | 478                     | 11,9  | 488      | 444                     | 14,7  |
| I#1                                    | 5,0       | 493       | 458                     | 8,7   | 483      | 431                     | 11,0  |
| K#1                                    | 2,0       | 508       | 481                     | 12,6  | 496      | 439                     | 13,0  |

**[0062]** Les propriétés mécaniques statiques des échantillons selon l'invention sont très élevées comparés à l'alliage classique de la gamme 2XXX tolérant aux dommages, et du même ordre de grandeur que l'échantillon 7475 T76 référencé C. La résistance mécanique des échantillons selon l'invention est légèrement inférieure à la résistance mécanique de l'alliage de référence E. Les inventeurs considèrent que la teneur en cuivre inférieure et la teneur en zirconium inférieure des échantillons selon l'invention influencent légèrement leur résistance mécanique.

**[0063]** Les courbes R de certains échantillons selon l'invention et des échantillons E de référence sont fournies sur les figures 1 et 2, pour les directions T-L et L-T, respectivement. La figure 1 montre clairement que l'extension de fissure du dernier point valide de la courbe R ( $\Delta a_{eff(max)}$ ) est beaucoup plus grande pour les échantillons de l'invention que pour l'échantillon E#1, E#3, E#31 et E#4. Ce paramètre est au moins aussi critique que les valeurs  $K_{app}$  du fait que, comme expliqué dans la description de l'art antérieur, la longueur de la courbe R est un paramètre important pour la conception du fuselage. La figure 2 montre la même tendance, bien que la direction L-T donne intrinsèquement un meilleur résultat. La courbe R de l'échantillon F#3 n'a pas pu être mesurée dans la direction L-T car la charge maximale de la machine a été atteinte. Le tableau 7 résume les résultats des essais de ténacité. Pour les tôles selon l'invention,

la valeur de  $K_{app}$  dans le sens T-L est supérieure à 110 MPa  $\sqrt{m}$  et même supérieure à 130 MPa  $\sqrt{m}$  tandis que pour les échantillons E en alliage 2098 de référence la valeur de  $K_{app}$  dans le sens T-L est inférieure à 110 MPa  $\sqrt{m}$  à part pour l'échantillon E#3 qui a subi une étape spéciale de recuit avant mise en solution.

Tableau 7 :

| Résultats des essais de ténacité |                |                                    |                             |                                    |                             |
|----------------------------------|----------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
|                                  |                | T-L (éprouvette de largeur 760 mm) |                             | L-T (éprouvette de largeur 760 mm) |                             |
| Echantillon                      | Epaisseur [mm] | $K_{app}$ (MPa $\sqrt{m}$ )        | $K_{eff}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) | $K_{app}$ (MPa $\sqrt{m}$ )        | $K_{eff}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) |
| A                                | 6,0            | 114                                | 160                         | 130                                | 180                         |
| B                                | 6,0            | 140                                | 220                         | 150                                | 236                         |

# EP 1 891 247 B1

(suite)

| Résultats des essais de ténacité |                |                                    |                             |                                    |                             |
|----------------------------------|----------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
|                                  |                | T-L (éprouvette de largeur 760 mm) |                             | L-T (éprouvette de largeur 760 mm) |                             |
| Echantillon                      | Epaisseur [mm] | $K_{app}$ (MPa $\sqrt{m}$ )        | $K_{eff}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) | $K_{app}$ (MPa $\sqrt{m}$ )        | $K_{eff}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) |
| C                                | 6,3            | 110                                | 135                         | 150                                | 206                         |
| D                                | 4,6            | 125                                | 178                         | 147                                | 214                         |
| E#1                              | 2,0            | 95                                 | 108                         | 114                                | 131                         |
| E#2                              | 3,1            | 104                                | 114                         | 160                                | 200                         |
| E#3                              | 4,5            | 154                                | 174                         | 148                                | 188                         |
| E#31                             | 4,5            | 106                                | 126                         | 143                                | 162                         |
| E#4                              | 6,7            | 103                                | 112                         | 123                                | 143                         |
| F#2                              | 5,0            | 141                                | 171                         | 179                                | 237                         |
| F#3                              | 6,7            | 140                                | 171                         | 155                                | 172                         |
| G#1                              | 3,8            | 162                                | 227                         | 164                                | 213                         |
| H#1                              | 5,0            | 175                                | 277                         | 154                                | 191                         |
| I#1                              | 5,0            | 150                                | 192                         |                                    |                             |
| K#1                              | 2,0            | 140                                | 182                         | 158                                | 213                         |

**[0064]** Les résultats issus de la courbe R sont regroupés dans le tableau 8. L'extension de fissure du dernier point valide de la courbe R est supérieure pour les échantillons de l'invention que pour les échantillons de référence. Ainsi, dans le sens T-L, tous les échantillons selon l'invention atteignent une extension de fissure d'au moins 30 mm et même d'au moins 40 mm tandis que l'extension maximale de fissure est inférieure à 40 mm pour les échantillons de référence. Les inventeurs considèrent que plusieurs raisons peuvent être proposées pour expliquer cette performance, comme la plus faible teneur en Cu, et/ou la plus faible teneur en Zr.

Tableau 8 :

| Données de résumé de la courbe R        |      |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\Delta a$ [mm]                         |      | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  |
| $K_r$ (Direction T-L) (MPa $\sqrt{m}$ ) | E#1  | 86  | 106 |     |     |     |     |     |     |
|                                         | E#3  | 125 | 161 | -   | -   | -   |     |     |     |
|                                         | E#31 | 97  | 112 | 123 |     |     |     |     |     |
|                                         | E#4  | 96  |     |     |     |     |     |     |     |
|                                         | F#2  | 113 | 141 | 159 | 170 | 178 |     |     |     |
|                                         | F#3  | 104 | 136 | 156 | 168 |     |     |     |     |
|                                         | G#1  | 115 | 146 | 167 | 184 | 198 | 210 | 221 | 230 |
|                                         | H#1  | 106 | 140 | 166 | 188 | 207 | 225 | 241 | 256 |
|                                         | I#1  | 122 | 147 | 164 | 177 | 188 | 198 |     |     |
|                                         | K#1  | 113 | 139 | 156 | 168 | 178 | 186 | 192 | 198 |

# EP 1 891 247 B1

(suite)

| Données de résumé de la courbe R        |      |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\Delta a$ [mm]                         |      | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  |
| $K_r$ (Direction L-T) (MPa $\sqrt{m}$ ) | E#1  | 96  | 120 |     |     |     |     |     |     |
|                                         | E#3  | 115 | 141 | 159 | 174 | 185 |     |     |     |
|                                         | E#31 | 123 | 152 |     |     |     |     |     |     |
|                                         | E#4  | 102 | 128 | 140 |     |     |     |     |     |
|                                         | F#2  | 122 | 159 | 185 | 206 | 225 |     |     |     |
|                                         | G#1  | 123 | 153 | 173 | 189 | 203 | 214 | 224 | 233 |
|                                         | H#1  | 124 | 150 | 168 | 182 | 193 | 203 | 212 | 220 |
|                                         | K#1  | 115 | 149 | 171 | 188 | 201 | 212 | 221 | 228 |

**[0065]** Les figures 3 et 4 montrent l'évolution de la vitesse de fissuration  $da/dN$  (en mm/cycle) dans l'orientation T-L et L-T, respectivement, pour différents niveaux de facteur d'intensité de contrainte ( $\Delta K$ ). La largeur de l'échantillon était de 400 mm (éprouvette CCT 400) et  $R = 0,1$ . On n'observe pas de différence majeure entre les échantillons E et F. La vitesse de fissuration de l'échantillon F est dans la même gamme que dans celle typiquement obtenue pour l'alliage 2056 (Echantillon B) et inférieure à celle obtenue pour l'alliage 6156 (Echantillon D).

**[0066]** La résistance à la corrosion intergranulaire a été testée selon la norme ASTM G110. Pour tous les échantillons selon l'invention, on n'a détecté aucune corrosion intergranulaire. Aucune corrosion intergranulaire n'a non plus été détectée sur les échantillons en alliage 2098 de référence (E#1 à E#4). Pour l'échantillon B (pour lequel on avait enlevé le placage), on a observé une corrosion intergranulaire avec une profondeur moyenne de 120  $\mu m$  et pour l'échantillon D (pour lequel on avait enlevé le placage), on a observé une corrosion intergranulaire avec une profondeur moyenne de 180  $\mu m$ . La résistance à la corrosion intergranulaire était ainsi très élevée pour les échantillons selon l'invention.

## Exemple 2

**[0067]** Dans cet exemple, l'influence du taux de déformation par traction a été étudié sur des échantillons à l'échelle du laboratoire. Six échantillons provenant de la coulée H et transformés en tôles d'épaisseur 5 mm selon les conditions décrites dans le tableau 4 ont été déformés par traction contrôlée avec un taux de déformation permanente compris entre 1 et 6% puis ont subi un revenu de 18h à 155 °C. Les échantillons ont été testés pour déterminer leurs propriétés mécaniques statiques de même que leur ténacité. La limite d'élasticité  $R_{p0,2}$ , la résistance à la rupture  $R_m$ , et l'allongement à la rupture (A) sont fournis dans le tableau 9.

Tableau 9 :

| Propriétés mécaniques des échantillons laboratoire ayant différents taux de déformation permanente |                                    |             |                  |       |             |                  |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------|------------------|-------|-------------|------------------|-------|
|                                                                                                    |                                    | Sens L      |                  |       | Sens LT     |                  |       |
| Echantillon                                                                                        | Taux de déformation permanente (%) | $R_m$ (MPa) | $R_{p0,2}$ (MPa) | A (%) | $R_m$ (MPa) | $R_{p0,2}$ (MPa) | A (%) |
| H#11                                                                                               | 1                                  | 495         | 436              | 11,2  | 469         | 411              | 15,1  |
| H#12                                                                                               | 2                                  | 515         | 469              | 11,1  | 489         | 444              | 13,5  |
| H#13                                                                                               | 3                                  | 529         | 493              | 10,5  | 501         | 464              | 13,8  |
| H#14                                                                                               | 4                                  | 534         | 501              | 10,8  | 501         | 465              | 14,2  |
| H#15                                                                                               | 5                                  | 542         | 514              | 10,8  | 511         | 481              | 13,8  |
| H#16                                                                                               | 6                                  | 550         | 524              | 10,4  | 516         | 485              | 13,9  |

**[0068]** Les caractéristiques mécaniques statiques augmentent avec le taux de déformation permanente lors de la traction contrôlée. L'essentiel de l'augmentation est atteint pour un taux de déformation permanente de 3%. Ainsi,

## EP 1 891 247 B1

l'augmentation de  $R_m(L)$  est de 7% pour une augmentation du taux de déformation permanente de 1 à 3% tandis qu'elle est seulement de 3% pour une augmentation de 4 à 6%. La ténacité a été évaluée par la méthode dite du Kahn test, les résultats sont donnés dans le Tableau 10.

Tableau 10 :

| Résultats du Kahn test effectué sur les échantillons laboratoire ayant différents taux de déformation permanente |                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------|
|                                                                                                                  |                                    | Kahn test |
| Echantillon                                                                                                      | Taux de déformation permanente (%) | $E_g$ (J) |
| H#11                                                                                                             | 1                                  | 30,5      |
| H#12                                                                                                             | 2                                  | 29,2      |
| H#13                                                                                                             | 3                                  | 27,8      |
| H#14                                                                                                             | 4                                  | 25,1      |
| H#15                                                                                                             | 5                                  | 25,0      |
| H#16                                                                                                             | 6                                  | 20,6      |

**[0069]** La relation entre l'énergie globale à rupture  $E_g$  et la ténacité est directe bien que les valeurs de  $E_g$  ne puissent pas être utilisées pour prédire les résultats de la courbe R d'échantillons larges en raison des géométries différentes des tests. On peut remarquer que  $E_g$  diminue lentement jusqu'à une déformation permanente de 5% et diminue de façon plus brutale pour une déformation permanente de 6%.

### Exemple 3

**[0070]** Dans cet exemple, l'influence du taux de déformation permanente obtenu par traction contrôlée a été étudiée sur des échantillons industriels. Deux échantillons issus de la coulée J et transformés en tôles d'épaisseur 5 mm selon les conditions indiquées dans le Tableau 4 ont été planés et ont subi une traction contrôlée avec un taux de déformation permanente de 1,8% et 3,4%. Les échantillons ont été testés pour déterminer leurs propriétés mécaniques statiques de même que leur ténacité. La limite d'élasticité  $R_{p0,2}$ , la résistance à la rupture  $R_m$ , et l'allongement à la rupture (A) sont fournis dans le tableau 11.

Tableau 11 :

| Propriétés mécaniques des échantillons industriels ayant différents taux de déformation permanente |                                    |             |                  |       |             |                  |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------|------------------|-------|-------------|------------------|-------|
|                                                                                                    |                                    | Sens L      |                  |       | Sens LT     |                  |       |
| Echantillon                                                                                        | Taux de déformation permanente (%) | $R_m$ (MPa) | $R_{p0,2}$ (MPa) | A (%) | $R_m$ (MPa) | $R_{p0,2}$ (MPa) | A (%) |
| J#11                                                                                               | 1,8                                | 510,0       | 465,0            | 13,1  | 494,7       | 444,3            | 14,5  |
| J#12                                                                                               | 3,4                                | 534,0       | 499,0            | 10,7  | 515,0       | 475,0            | 13,7  |

**[0071]** Les courbes R obtenues pour les deux échantillons dans la direction T-L sont présentées sur la figure 5. Le tableau 12 résume les résultats des courbes R. L'échantillon ayant subi une déformation permanente de 1,8% présente une résistance mécanique plus faible que celle de l'échantillon ayant subi une déformation permanente de 3,4%. Par ailleurs, une ténacité très élevée a été observée pour les deux échantillons.

## EP 1 891 247 B1

Tableau 12 :

| Résultats des essais de ténacité effectués sur les échantillons industriels ayant différents taux de déformation permanente. |                                    |                            |                          |                        |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Echantillon                                                                                                                  | Taux de déformation permanente (%) | T-L (760 mm wide specimen) |                          |                        |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                                                                                              |                                    | K <sub>app</sub> (MPa√m)   | K <sub>eff</sub> (MPa√m) | K <sub>r</sub> (MPa√m) |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                                                                                              |                                    |                            |                          | Δa [mm]                |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                                                                                              |                                    |                            |                          | 10                     | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  |
| J#11                                                                                                                         | 1,8                                | 140                        | 220                      | 118                    | 152 | 177 | 198 | 216 | 232 | 246 | 260 |
| J#12                                                                                                                         | 3,4                                | 179                        | 259                      | 135                    | 160 | 181 | 199 | 217 | 234 | 250 | 263 |

### Exemple 4

**[0072]** Dans cet exemple, la résistance mécanique de joints soudés entre des tôles de l'invention ou entre des tôles de référence a été évaluée. Des tôles d'épaisseur 3,2 mm provenant des coulées D (6156), E et I ont été soudées par soudage par friction-malaxage. Le soudage a été effectué sur une machine MTS ISTIR®. Les paramètres de soudage ont été choisis sur la base d'essais effectués lors d'une étude préliminaire. La sélection des paramètres a été effectuée en fonction des résultats d'observations microstructurales et de tests de pliage. Pour les tôles provenant des coulées E et I, les assemblages ont été effectués avec une vitesse de rotation de l'outil de 800 tpm (tours par minute) et une vitesse de soudage de 300 mm/min. Pour des tôles provenant de la coulée D, les assemblages ont été effectués avec une vitesse de rotation de l'outil de 510 tpm (tours par minute) et une vitesse de soudage de 900 mm/min.

**[0073]** Le revenu a été effectué soit avant soit après l'assemblage par soudage par friction-malaxage. Les résultats sont donnés dans le tableau 13. La performance des joints soudés obtenus avec les tôles selon l'invention a été particulièrement satisfaisante pour deux aspects. Premièrement, le coefficient d'efficacité du joint, qui est le rapport entre la résistance à la rupture du joint soudé et celle de la tôle non soudée, est supérieur à 70% et même supérieur à 75% pour les tôles de l'invention. Ce coefficient atteint même 80% dans certains cas. Ce résultat est meilleur que celui obtenu avec des tôles provenant de la coulée E. Deuxièmement, les résultats sont peu influencés par la position de l'étape de revenu (avant ou après soudage), ce qui permet un procédé flexible. Au contraire, pour les tôles obtenues à partir de la coulée D(6156), on observe une influence importante de la position de l'étape de revenu.

Tableau 13 :

| Propriétés mécaniques des joints soudés |                               |                                  |                         |       |                                                              |                                       |
|-----------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Coulée                                  | Position de l'étape de revenu | Mechanical strength of the joint |                         |       | R <sub>m</sub> de référence pour les tôles non soudées (MPa) | Coefficient d'efficacité du joint (%) |
|                                         |                               | R <sub>m</sub> (MPa)             | R <sub>p0,2</sub> (MPa) | A (%) |                                                              |                                       |
| D                                       | Avant soudage                 | 264                              | 200                     | 2,8   | 372                                                          | 71                                    |
| D                                       | Après soudage                 | 318                              | 292                     | 1,8   | 372                                                          | 86                                    |
| E                                       | Avant soudage                 | 386                              | 269                     | 4,9   | 543                                                          | 71                                    |
| E                                       | Après soudage                 | 413                              | 309                     | 5,6   | 543                                                          | 76                                    |
| F                                       | Avant soudage                 | 385                              | 309                     | 5,2   | 483                                                          | 80                                    |
| F                                       | Après soudage                 | 377                              | 279                     | 5,9   | 483                                                          | 78                                    |

### Exemple 5

**[0074]** Dans cet exemple l'influence de la teneur en Zr et Mn sur les caractéristiques mécaniques statiques et la ténacité a été évaluée.

**[0075]** Deux alliages ont été coulés et transformés en tôles d'épaisseur 6 mm selon les conditions indiquées pour les échantillons G, H et I du tableau 4. Les compositions de ces alliages sont données dans le tableau 14.

## EP 1 891 247 B1

Tableau 14 :

| Composition chimique (% en poids) des alliages contenant du Mn |      |      |     |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| Référence de coulée                                            | Si   | Fe   | Cu  | Mn   | Mg   | Zr   | Li   | Ag   | Ti   |
| L                                                              | 0,03 | 0,05 | 3,3 | 0,31 | 0,32 | 0,05 | 0,99 | 0,32 | 0,02 |
| M                                                              | 0,03 | 0,05 | 3,3 | 0,30 | 0,33 | 0,11 | 0,98 | 0,35 | 0,02 |

**[0076]** Les échantillons ont été testés pour déterminer leurs propriétés mécaniques statiques de même que leur ténacité. La limite d'élasticité  $R_{p0,2}$ , la résistance à la rupture  $R_m$ , et l'allongement à la rupture (A) sont fournis dans le tableau 15 et les résultats des essais de ténacité dans le tableau 16.

Tableau 15 :

| Propriétés mécaniques des échantillons provenant d'alliages contenant du Mn |           |             |                  |       |             |                  |       |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|------------------|-------|-------------|------------------|-------|
|                                                                             |           | Sens L      |                  |       | Sens LT     |                  |       |
| Echantillon                                                                 | Epaisseur | $R_m$ (MPa) | $R_{p0,2}$ (MPa) | A (%) | $R_m$ (MPa) | $R_{p0,2}$ (MPa) | A (%) |
| L                                                                           | 6,0       | 479         | 447              | 13,5  | 477         | 419              | 7,8   |
| M                                                                           | 6,0       | 494         | 464              | 13,7  | 493         | 448              | 13,1  |

Tableau 16 :

| Résultats des essais de ténacité pour les alliages contenant du Mn |                |                             |                             |                         |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Echantillon                                                        | Epaisseur (mm) | T-L (760 mm wide specimen)  |                             |                         |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                                    |                | $K_{app}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) | $K_{eff}$ (MPa $\sqrt{m}$ ) | $K_r$ (MPa $\sqrt{m}$ ) |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                                    |                |                             |                             | $\Delta a$ [mm]         |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                                    |                |                             |                             | 10                      | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  |
| L                                                                  | 6,0            | 140                         | 174                         | 111                     | 137 | 155 | 168 | 178 | 187 | 194 | 200 |
| M                                                                  | 6,0            | 158                         | 198                         | 123                     | 152 | 171 | 186 | 199 | 209 | 219 | 227 |

**[0077]** Les échantillons L et M atteignent les caractéristiques mécaniques selon l'invention à l'état T8. Par ailleurs, les performances en résistance mécanique statique et en ténacité sont plus faibles pour l'échantillon L, qui contient du Mn et une faible teneur en Zr, que pour les autres exemples selon l'invention. Les inventeurs pensent que la plus faible performance de l'échantillon L est liée à une microstructure moins favorable caractérisée en particulier par la présence de zones recristallisées et de zones non recristallisées (microstructure mixte).

### Revendications

1. Procédé de fabrication d'une tôle à base d'alliage d'aluminium ayant une ténacité et une résistance mécanique élevées, dans lequel :

a) on élabore un bain de métal liquide comprenant 3,0 à 3,4 % en poids de Cu, 0,8 à 1,2 % en poids de Li, 0,2 à 0,5 % en poids d'Ag, 0,2 à 0,6 % en poids de Mg et au moins un élément choisi parmi Zr, Mn, Cr, Sc, Hf et Ti, la quantité dudit élément, s'il est choisi, étant de 0,05 à 0,13 % en poids pour Zr, 0,05 à 0,8 % en poids pour Mn, 0,05 à 0,3 % en poids pour Cr et pour Sc, 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et de 0,05 à 0,15 % en poids pour Ti, le reste étant de l'aluminium et des impuretés inévitables, avec la condition supplémentaire que la quantité de Cu et de Li soit telle que

$$\text{Cu (\% en poids)} + 5/3 \text{ Li (\% en poids)} < 5,2 ;$$

- 5 b) on coule une plaque à partir dudit bain de métal liquide  
c) on homogénéise ladite plaque à une température comprise entre 490 à 530°C pendant une durée de 5 à 60 heures ;  
d) on lamine ladite plaque en une tôle ayant une épaisseur finale comprise entre 0,8 et 12 mm ;  
e) on met en solution et on trempe ladite tôle ;  
10 f) on tractionne de façon contrôlée ladite tôle avec une déformation permanente de 1 à 5 % ;  
g) on réalise un revenu de ladite tôle par chauffage à 140 à 170 °C pendant 5 à 30 heures.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la dite épaisseur finale est comprise entre 2 et 12 mm.
- 15 3. Procédé selon la revendication 1 ou la revendication 2 dans lequel la teneur en cuivre dudit bain de métal liquide est comprise entre 3,1 et 3,3% en poids.
4. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 3 dans lequel la teneur en lithium dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,9 et 1,1% en poids.
- 20 5. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 4 dans lequel la teneur en argent dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,2 et 0,4% en poids.
6. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel la teneur en magnésium dudit bain de métal liquide est inférieure à 0,4% en poids.
- 25 7. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel la teneur en zirconium dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,05 et 0,13% en poids et la teneur en scandium est comprise entre 0,02 et 0,3 % en poids.
- 30 8. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 7 dans lequel la teneur en zirconium dudit bain de métal liquide est comprise entre 0,09 et 0,13% en poids.
9. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 8 dans lequel la teneur en manganèse dudit bain de métal liquide est inférieure à 0,05 % en poids.
- 35 10. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 9 dans lequel l'écrouissage à froid total après trempe est compris entre 2,5 et 4%.
11. Procédé selon une quelconque des revendications 1 à 10 dans lequel la dite déformation permanente obtenue par traction contrôlée est comprise entre 2,5 et 4% .
- 40 12. Procédé selon, une quelconque des revendications 1 à 11 dans lequel ledit revenu est réalisé par chauffage à 140-155 °C pendant 10 à 30 heures.
- 45 13. Procédé de fabrication d'une tôle selon la revendication 1, dans lequel
- a) on élabore un bain de métal liquide comprenant 3,0 à 3,4 % en poids de Cu, 0,8 à 1,2% en poids de Li, 0,2 à 0,5 % en poids de Ag, 0,2 à 0,6 % en poids de Mg et au moins un élément choisi dans parmi Zr, Mn Cr, Sc, Hf et Ti, la quantité dudit élément, s'il est choisi, étant de 0,09 à 0,13 % en poids pour Zr, 0,05 à 0,8 % en poids pour Mn, 0,05 à 0,3 % en poids pour Cr et pour Sc, 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et 0,05 à 0,15 % en poids pour Ti, le reste étant de l'aluminium et des impuretés inévitables,  
50 avec la condition supplémentaire que la quantité de Cu et de Li soit telle que

$$\text{Cu (\% en poids)} + 5/3 \text{ Li (\% en poids)} < 5,0 ;$$

- b) on coule une plaque à partir dudit bain de métal liquide

- c) on homogénéise ladite plaque à une température comprise entre 490 à 530 °C pendant une durée de 5 à 60 heures ;  
 d) on lamine ladite plaque en une tôle ayant une épaisseur finale comprise entre 2 et 9 mm;  
 e) on met en solution en solution ladite tôle à une température comprise entre 490 et 530 C pendant une durée  
 5 de 15 mn à 2 heures, et on trempe ladite tôle;  
 f) on tractionne de façon contrôlée ladite tôle avec une déformation permanente de 2,5 à 4 %;  
 g) on réalise un revenu de ladite tôle par chauffage à 140 à 155 °C pendant 10 à 30 heures.

14. Produit laminé, extrudé et/ou forgé en alliage en aluminium comprenant 3,0 à 3,4 % en poids de Cu, 0,8 à 1,2 %  
 10 en poids de Li, 0,2 à 0,5 % en poids de Ag, 0,2 à 0,6 % en poids de Mg et au moins un élément choisi parmi Zr, Mn, Cr, Sc, Hf et Ti, la quantité dudit élément, s'il est choisi, étant de 0,05 à 0,13% en poids pour Zr, 0,05 à 0,8 % en poids pour Mn, 0,05 à 0,3 % en poids pour Cr et pour Sc, 0,05 à 0,5 % en poids pour Hf et 0,05 à 0,15 % en poids pour Ti,  
 le reste étant de l'aluminium et des impuretés inévitables,  
 15 avec la condition supplémentaire que la quantité de Cu et de Li soit telle que

$$\text{Cu (\% en poids)} + 5/3 \text{ Li (\% en poids)} < 5,2.$$

15. Produit laminé, extrudé et/ou forgé selon la revendication 14, ayant une épaisseur comprise entre 0,8 et 12 mm et  
 20 de préférence entre 2 et 12 mm.  
 16. Produit selon la revendication 14 ou la revendication 15 dans lequel la teneur en Zr, s'il est choisi, est supérieure  
 25 à 0,09% en poids, et dans lequel la quantité de Cu et de Li soit telle que

$$\text{Cu (\% en poids)} + 5/3 \text{ Li (\% en poids)} < 5,0.$$

17. Tôle en alliage d'aluminium produite par le procédé selon une quelconque des revendications 1 à 13, **caractérisé  
 en ce qu'**à l'état T8 :

(a) sa limite d'élasticité conventionnelle mesurée à 0,2% d'allongement dans le sens L est d'au moins 440 MPa, et

(b) sa ténacité  $K_{app}$ , mesurée sur des éprouvettes de type CCT760 (avec  $2a_0 = 253$  mm), est d'au moins 110  
 MPa  $\sqrt{m}$  dans le sens T-L, et

(c) son extension de fissure  $\Delta a_{eff(max)}$  du dernier point valide de la courbe R dans la direction T-L est d'au moins  
 40 30 mm.

18. Tôle en alliage d'aluminium produite par le procédé selon une quelconque des revendications 1 à 13, **caractérisé  
 en ce qu'**à l'état T8:

(a) sa limite d'élasticité conventionnelle testée à 0,2% d'allongement dans le sens L est d'au moins 460 MPa, et

(b) sa ténacité  $K_{app}$ , mesurée sur des éprouvettes de type CCT760 (avec  $2a_0 = 253$  mm), est d'au moins 130  
 MPa  $\sqrt{m}$  dans le sens T-L, et

(c) son extension de fissure  $\Delta a_{eff(max)}$  du dernier point valide de la courbe R dans la direction T-L est d'au moins  
 50 40 mm.

19. Élément de structure incorporant au moins un produit selon une quelconque des revendications 14 à 18 ou fabriqué  
 55 à partir d'un tel produit.

20. Élément de structure selon la revendication 19 **caractérisé en ce qu'**il s'agit d'un panneau de fuselage d'aéronef.

21. Elément de structure selon la revendication 19 par rapport aux revendications 14 à 16 **caractérisé en ce qu'il s'agit** d'un raidisseur.

22. Elément de structure selon une quelconque des revendications 19 à 21 comprenant une construction soudée dans laquelle le coefficient d'efficacité du joint est supérieur à 70%.

23. Elément de structure selon la revendication 22 dans lequel ladite construction soudée est soudée par soudage par friction-malaxage.

## Claims

1. A method for producing an aluminum alloy sheet having high fracture toughness and strength, said method comprising:

a) elaborating a liquid metal bath comprising 3.0 to 3.4 wt.% Cu, 0.8 to 1.2 wt.% Li, 0.2 to 0.5 wt.% Ag, 0.2 to 0.6 wt.% Mg and at least one element selected from the group consisting of 0.05 to 0.13 wt.% Zr, 0.05 to 0.8 wt.% Mn, 0.05 to 0.3 wt.% Cr, 0.05 to 0.3 wt.% Sc, 0.05 to 0.5 wt.% Hf and 0.05 to 0.15 wt.% Ti, remainder aluminum and unavoidable impurities,

with the additional proviso that the amount of Cu and Li is such that  $Cu(wt.\%) + 5/3 Li(wt.\%) < 5.2$ ;

b) casting an ingot from said liquid metal bath

c) homogenizing said ingot at 490-530°C for a duration from 5 and 60 hours;

d) rolling said ingot to a sheet with a final thickness from 0.8 to 12 mm;

e) solution heat treating and quenching said sheet ;

f) stretching said sheet with a permanent set from 1 to 5%;

g) aging said sheet by heating at 140-170°C for 5 to 30 hours.

2. A method according to claim 1 wherein said final thickness is from 2 to 12 mm.

3. A method according to claim 1 or claim 2 wherein said liquid metal bath comprises from 3.1 to 3.3 wt.% copper.

4. A method according to anyone of claims 1 to 3 wherein said liquid metal bath comprises from 0.9 to 1.1 wt.% lithium.

5. A method according to anyone of claims 1 to 4 wherein said liquid metal bath comprises from 0.2 to 0.4 wt.% silver.

6. A method according to anyone of claims 1 to 5 wherein said liquid metal bath comprises less than 0.4 wt.% magnesium.

7. A method according to anyone of claims 1 to 6 wherein said liquid metal bath comprises from 0.05 to 0.13 wt.% zirconium and from 0.02 to 0.3% scandium.

8. A method according to anyone of claims 1 to 7 wherein said liquid metal bath comprises from 0.09 to 0.13 wt.% zirconium

9. A method according to anyone of claims 1 to 8 wherein said liquid metal bath comprises less than 0.05 wt.% Mn.

10. A method according to anyone of claims 1 to 9 wherein the total cold working deformation after quenching is from 2.5 to 4%.

11. A method according to anyone of claims 1 to 10 wherein said stretching permanent set is from 2.5 to 4 %.

12. A method according to anyone of claims 1 to 11 wherein said aging comprises heating at 140-155°C for 10 to 30 hours.

13. A method for producing an aluminum alloy sheet according to claim 1 comprising:

a) elaborating a liquid metal bath comprising 3.0 to 3.4 wt.% Cu, 0.8 to 1.2 wt.% Li, 0.2 to 0.5 wt.% Ag, 0.2 to 0.6 wt.% Mg and at least one element selected from the group consisting of 0.09 to 0.13 wt.% Zr, 0.05 to 0.8 wt.% Mn, 0.05 to 0.3 wt.% Cr 0.05 to 0.3 wt.% Sc, 0.05 to 0.5 wt.% Hf and 0.05 to 0.15 wt.% Ti, remainder

aluminum and unavoidable impurities,

with the additional proviso that the amount of Cu and Li is such that  $\text{Cu}(\text{wt.}\%) + 5/3 \text{ Li}(\text{wt.}\%) < 5.0$ ;

b) casting an ingot from said liquid metal bath;

c) homogenizing said ingot at 490-530°C for a duration from 5 to 60 hours;

d) rolling said ingot to a 2 to 9 mm final gauge sheet ;

e) solution heat treating said sheet at a temperature from 490 to 530°C for a duration from 15 mn to 2 hours, followed by quenching;

f) stretching said sheet with a permanent set from 2.5 to 4%;

g) aging said sheet by heating at 140-155°C for 10 to 30 hours.

**14.** A rolled, forged and/or extruded product made from an aluminum alloy comprising 3.0 to 3.4 wt.% Cu, 0.8 to 1.2 wt.% Li, 0.2 to 0.5 wt.% Ag, 0.2 to 0.6 wt.% Mg and at least one element selected from the group consisting of 0.05 to 0.13 wt.% Zr, 0.05 to 0.8 wt.% Mn, 0.05 to 0.3 wt.% Cr, 0.05 to 0.3 wt.% Sc, 0.05 to 0.5 wt.% Hf and 0.05 to 0.15 wt.% Ti, remainder aluminum and unavoidable impurities,.

with the additional proviso that the amount of Cu and Li is such that  $\text{Cu}(\text{wt.}\%) + 5/3 \text{ Li}(\text{wt.}\%) < 5.2$ .

**15.** A rolled, forged and/or extruded product according to claim 14, with a thickness from 0.8 to 12 mm and preferably from 2 to 12 mm.

**16.** A product according to claim 14 or to claim 15 wherein the Zr content, if it is chosen, is higher than 0.09 wt.% and wherein the amount of Cu and Li is such that  $\text{Cu}(\text{wt.}\%) + 5/3 \text{ Li}(\text{wt.}\%) < 5.0$

**17.** An aluminum alloy sheet produced by the method of anyone of claims 1 to 13 comprising in a T8 temper

(a) a conventional yield strength measured at 0.2 % elongation in the L direction of at least 440 MPa, and

(b) a toughness  $K_{app}$ , measured on CCT760 ( $2a_0 = 253 \text{ mm}$ ) specimens, of at least  $110 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  in the T-L direction, and

(c) a crack extension of the last valid point of the R-curve  $\Delta a_{eff(max)}$  in the T-L direction of at least 30 mm.

**18.** An aluminum alloy sheet produced by the method of anyone of claims 1 to 13 comprising in a T8 temper

(a) a conventional yield strength measured at 0.2 % elongation in the L direction of at least 460 MPa, and

(b) a toughness  $K_{app}$ , measured on CCT760 ( $2a_0 = 253 \text{ mm}$ ) specimens, of at least  $130 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  in the T-L direction, and

(c) a crack extension of the last valid point of the R-curve  $\Delta a_{eff(max)}$  in the T-L direction of at least 40 mm.

**19.** A structural member comprising at least one product according to anyone of claims 14 to 18 or made of such a product.

**20.** A structural member according to claim 19 wherein said structural member is an aircraft fuselage panel.

**21.** A structural member according to claim 19 with reference to claims 14 to 16 wherein said structural member is a stringer.

**22.** A structural member according to anyone of claims 19 to 21 comprising a welded construction wherein the joint efficiency coefficient is at least 70 %.

**23.** A structural member of claim 22 wherein said welded construction is welded by friction stir welding.

## Patentansprüche

**1.** Verfahren zur Herstellung eines Blechs auf Basis von Aluminiumlegierung mit hoher Bruchzähigkeit und hoher Festigkeit, bei dem:

a) ein Flüssigmetallbad hergestellt wird, enthaltend 3,0 bis 3,4 Gew.-% Cu, 0,8 bis 1,2 Gew.-% Li, 0,2 bis 0,5 Gew.-% Ag, 0,2 bis 0,6 Gew.-% Mg und mindestens ein Element ausgewählt unter Zr, Mn, Cr, Sc, Hf und Ti, wobei die Menge des Elements, falls es ausgewählt wird, 0,05 bis 0,13 Gew.-% für Zr, 0,05 bis 0,8 Gew.-% für Mn, 0,05 bis 0,3 Gew.-% für Cr und Sc, 0,05 bis 0,5 Gew.-% für Hf und 0,05 bis 0,15 Gew.-% für Ti beträgt,

Rest Aluminium und unvermeidbare Verunreinigungen,  
mit der zusätzlichen Bedingung, dass die Cu- und Li-Menge so gewählt wird, dass

5

$$\text{Cu (Gew.-%)} + 5/3 \text{ Li (Gew.-%)} < 5,2;$$

10

- b) aus dem Flüssigmetallbad eine Platte abgegossen wird;
- c) die Platte bei einer Temperatur zwischen 490 und 530°C während einer Dauer von 5 bis 60 Stunden homogenisiert wird;
- d) die Platte zu einem Blech mit einer Enddicke von 0,8 bis 12 mm gewalzt wird;
- e) das Blech lösungsgeglüht oder abgeschreckt wird;
- f) das Blech mit 1 bis 5 % bleibender Verformung kontrolliert gereckt wird,
- g) das Blech durch Erwärmen auf 140 bis 170°C während 5 bis 30 Stunden warmausgelagert wird.

15

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Enddicke zwischen 2 und 12 mm liegt.

20

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, bei dem der Kupfergehalt des Flüssigmetallbads zwischen 3,1 und 3,3 Gew.-% liegt.

4. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem der Lithiumgehalt des Flüssigmetallbads zwischen 0,9 und 1,1 Gew.-% liegt.

25

5. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem der Silbergehalt des Flüssigmetallbads zwischen 0,2 und 0,4 Gew.-% liegt.

6. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem der Magnesiumgehalt des Flüssigmetallbads unter 0,4 Gew.-% liegt.

30

7. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem der Zirkoniumgehalt des Flüssigmetallbads zwischen 0,05 und 0,13 Gew.-% liegt und der Scandiumgehalt zwischen 0,02 und 0,3 Gew.-% liegt.

8. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 7, bei dem der Zirkoniumgehalt des Flüssigmetallbads zwischen 0,09 und 0,13 Gew.-% liegt.

35

9. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 8, bei dem der Mangangehalt des Flüssigmetallbads unter 0,05 Gew.-% liegt.

40

10. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem die gesamte Kaltverfestigung nach Abschrecken zwischen 2,5 und 4 % liegt.

11. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 10, bei dem die durch kontrolliertes Recken erhaltene bleibende Verformung zwischen 2,5 und 4 % liegt.

45

12. Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 11, bei dem die Warmauslagerung durch Erwärmen auf 140-155°C während 10 bis 30 Stunden erfolgt.

13. Verfahren zur Herstellung eines Blechs nach Anspruch 1, bei dem

50

- a) ein Flüssigmetallbad hergestellt wird, enthaltend 3,0 bis 3,4 Gew.-% Cu, 0,8 bis 1,2 Gew.-% Li, 0,2 bis 0,5 Gew.-% Ag, 0,2 bis 0,6 Gew.-% Mg und mindestens ein Element ausgewählt unter Zr, Mn, Cr, Sc, Hf und Ti, wobei die Menge des Elements, falls es ausgewählt wird, 0,09 bis 0,13 Gew.-% für Zr, 0,05 bis 0,8 Gew.-% für Mn, 0,05 bis 0,3 Gew.-% für Cr und Sc, 0,05 bis 0,5 Gew.-% für Hf und 0,05 bis 0,15 Gew.-% für Ti beträgt,

55

Rest Aluminium und unvermeidbare Verunreinigungen,  
mit der zusätzlichen Bedingung, dass die Cu- und Li-Menge so gewählt wird, dass

$$\text{Cu (Gew.-%) + 5/3 Li (Gew.-%) < 5,0;}$$

- b) aus dem Flüssigmetallbad eine Platte abgegossen wird;
- c) die Platte bei einer Temperatur zwischen 490 und 530°C während einer Dauer von 5 bis 60 Stunden homogenisiert wird;
- d) die Platte zu einem Blech mit einer Enddicke von 2 bis 9 mm gewalzt wird;
- e) das Blech bei einer Temperatur zwischen 490 und 530°C während einer Dauer von 15 min bis 2 Stunden lösungsgeglüht und dann abgeschreckt wird;
- f) das Blech mit 2,5 bis 4 % bleibender Verformung kontrolliert gereckt wird,
- g) das Blech durch Erwärmen auf 140 bis 155°C während 10 bis 30 Stunden warmausgelagert wird.

- 14.** Walz-, Strangpress- und/oder Schmiedeerzeugnis aus Aluminiumlegierung enthaltend 3,0 bis 3,4 Gew.-% Cu, 0,8 bis 1,2 Gew.-% Li, 0,2 bis 0,5 Gew.-% Ag, 0,2 bis 0,6 Gew.-% Mg und mindestens ein Element ausgewählt unter Zr, Mn, Cr, Sc, Hf und Ti, wobei die Menge des Elements, falls es ausgewählt wird, 0,05 bis 0,13 Gew.-% für Zr, 0,05 bis 0,8 Gew.-% für Mn, 0,05 bis 0,3 Gew.-% für Cr und Sc, 0,05 bis 0,5 Gew.-% für Hf und 0,05 bis 0,15 Gew.-% für Ti beträgt,  
Rest Aluminium und unvermeidbare Verunreinigungen,  
mit der zusätzlichen Bedingung, dass die Cu- und Li-Menge so gewählt wird, dass

$$\text{Cu (Gew.-%) + 5/3 Li (Gew.-%) < 5,2.}$$

- 15.** Walz-, Strangpress- und/oder Schmiedeerzeugnis nach Anspruch 14 mit einer Dicke zwischen 0,8 und 12 mm und vorzugsweise zwischen 2 und 12 mm.
- 16.** Erzeugnis nach Anspruch 14 oder Anspruch 15, bei dem der Gehalt an Zr, falls es ausgewählt wird, über 0,09 Gew.-% liegt und bei dem die Cu- und Li-Menge so gewählt wird, dass

$$\text{Cu (Gew.-%) + 5/3 Li (Gew.-%) < 5,0.}$$

- 17.** Blech aus Aluminiumlegierung, hergestellt durch das Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Zustand T8

(a) seine Dehngrenze gemessen bei 0,2 % nichtproportionaler Dehnung in Längsrichtung mindestens 440 MPa beträgt, und

(b) seine Bruchzähigkeit  $K_{app}$  gemessen an Proben vom Typ CCT760 (mit  $2a_0 = 253$  mm) mindestens 110MPa

$\sqrt{m}$  in Quer-Längsrichtung beträgt, und

(c) seine Rissverlängerung  $\Delta a_{eff(max)}$  beim letzten gültigen Messpunkt der R-Kurve in Quer-Längsrichtung mindestens 30 mm beträgt.

- 18.** Blech aus Aluminiumlegierung, hergestellt durch das Verfahren nach irgendeinem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Zustand T8

(a) seine Dehngrenze getestet bei 0,2 % nichtproportionaler Dehnung in Längsrichtung mindestens 460 MPa beträgt, und

(b) seine Bruchzähigkeit  $K_{app}$  gemessen an Proben vom Typ CCT760 (mit  $2a_0 = 253$  mm) mindestens 130MPa

$\sqrt{m}$  in Quer-Längsrichtung beträgt, und

(c) seine Rissverlängerung  $\Delta a_{eff(max)}$  beim letzten gültigen Messpunkt der R-Kurve in Quer-Längsrichtung mindestens 40 mm beträgt.

## EP 1 891 247 B1

19. Strukturelement, welches mindestens ein Erzeugnis nach irgendeinem der Ansprüche 14 bis 18 beinhaltet oder aus einem solchen Erzeugnis hergestellt ist.

5 20. Strukturelement nach Anspruch 19, **dadurch gekennzeichnet, dass** es sich um ein Rumpfhautfeld eines Flugzeugs handelt.

21. Strukturelement nach Anspruch 19 in Bezug auf die Ansprüche 14 bis 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** es sich um eine Versteifung handelt.

10 22. Strukturelement nach irgendeinem der Ansprüche 19 bis 21, umfassend eine Schweißkonstruktion, bei der der Wirksamkeitskoeffizient der Schweißnaht größer ist als 70 %.

23. Strukturelement nach Anspruch 22, bei dem die Schweißkonstruktion durch Reibrührschweißen geschweißt wird.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Figure 1

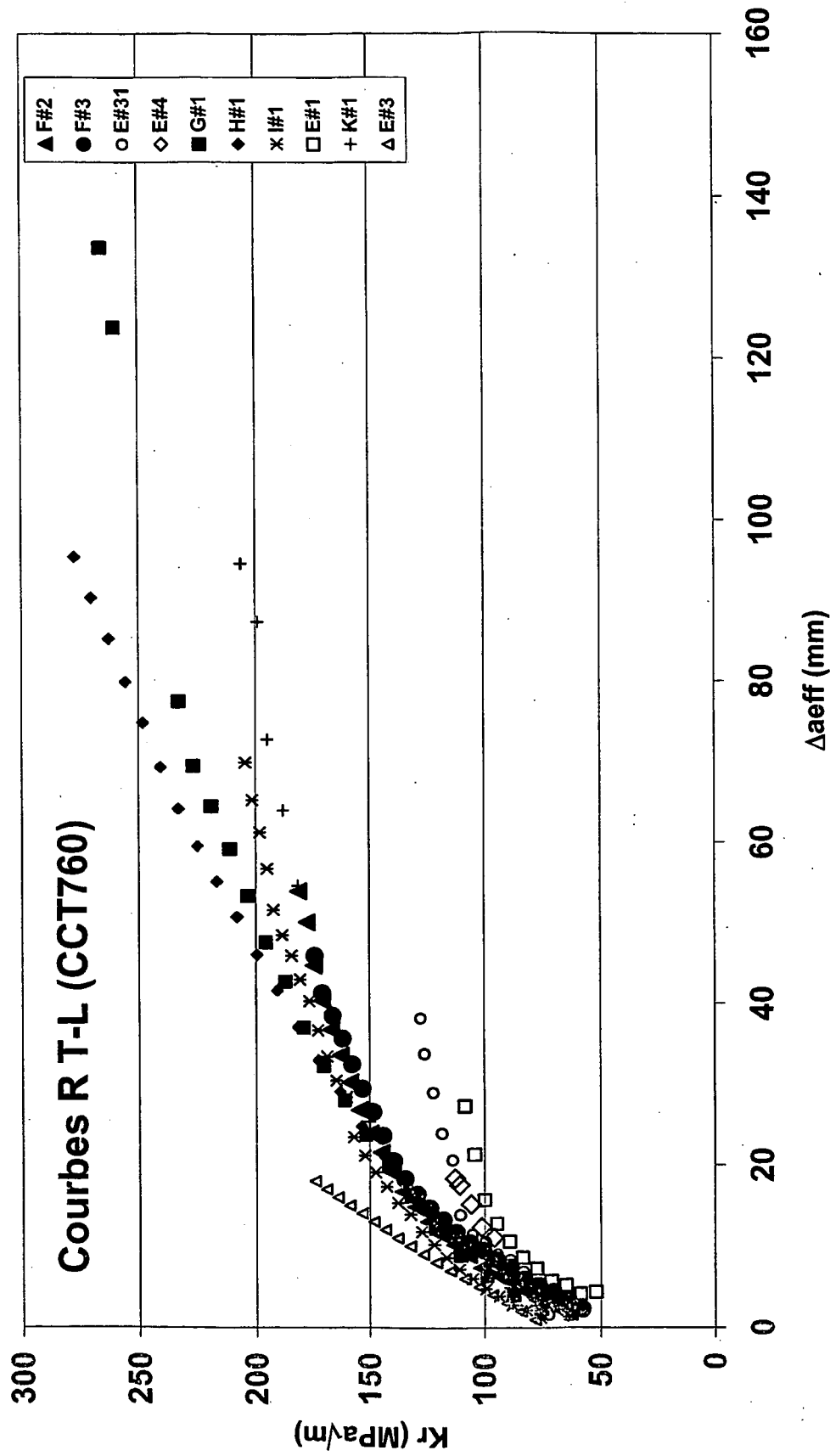


Figure 2

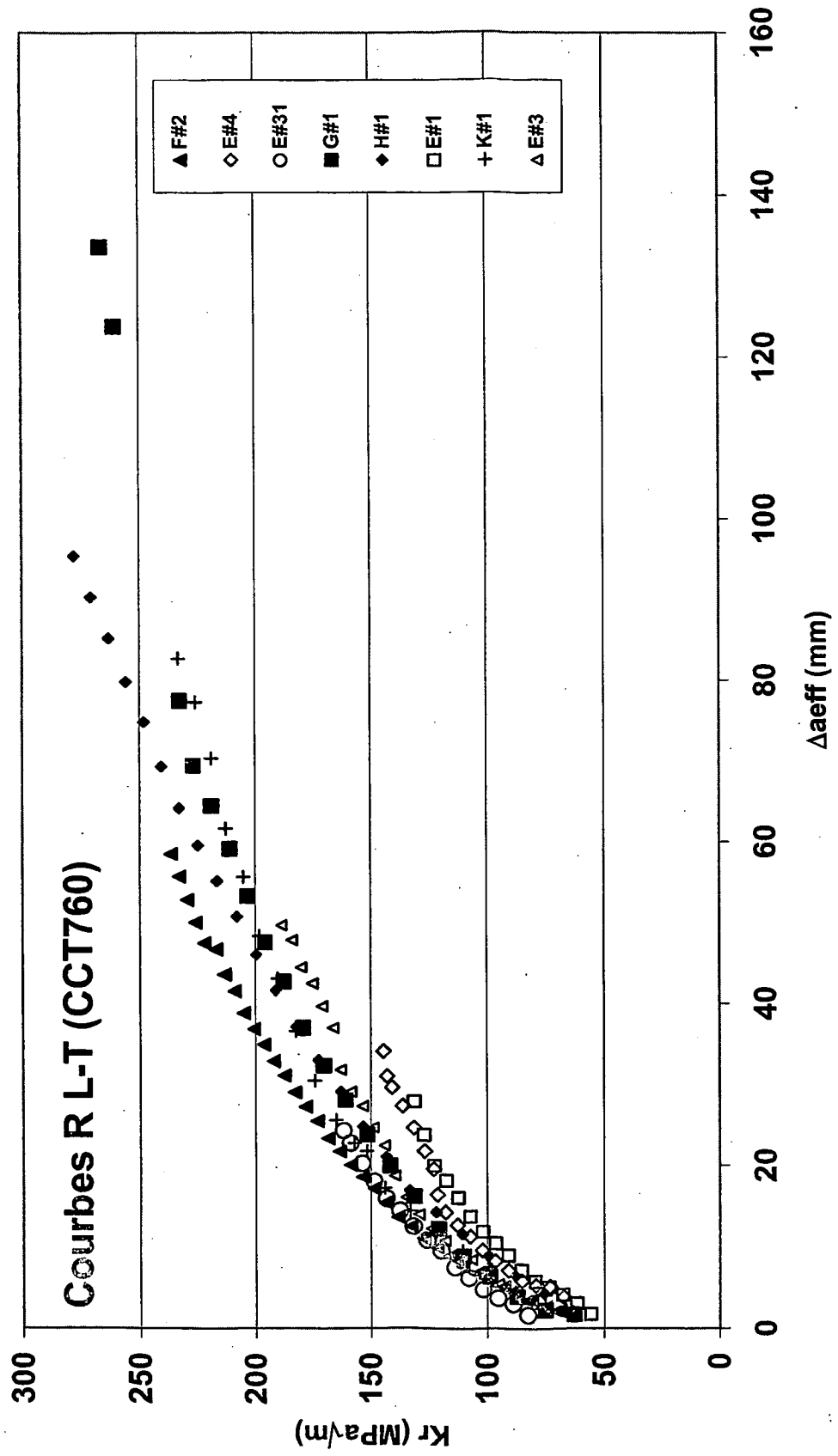


Figure 3

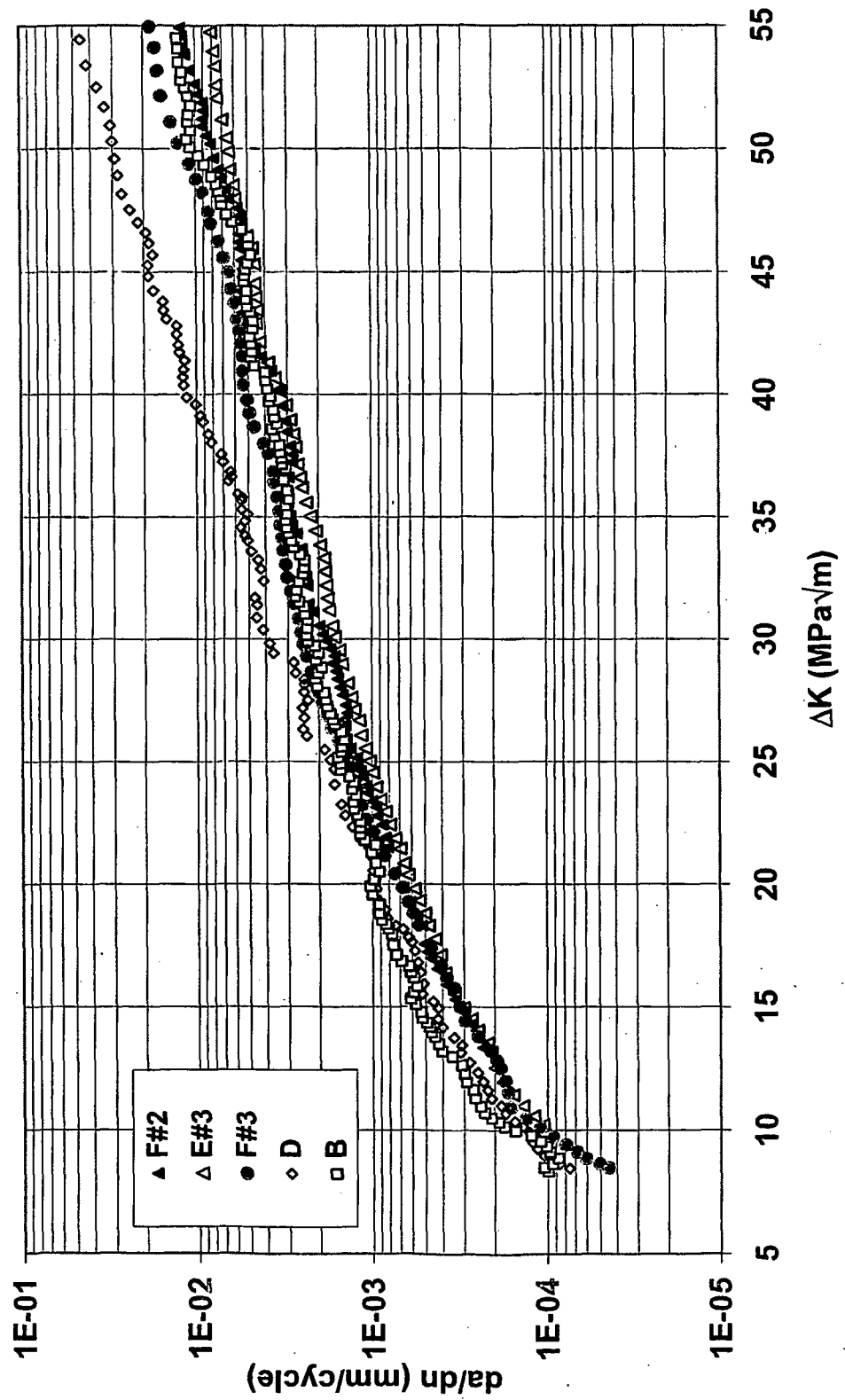


Figure 4

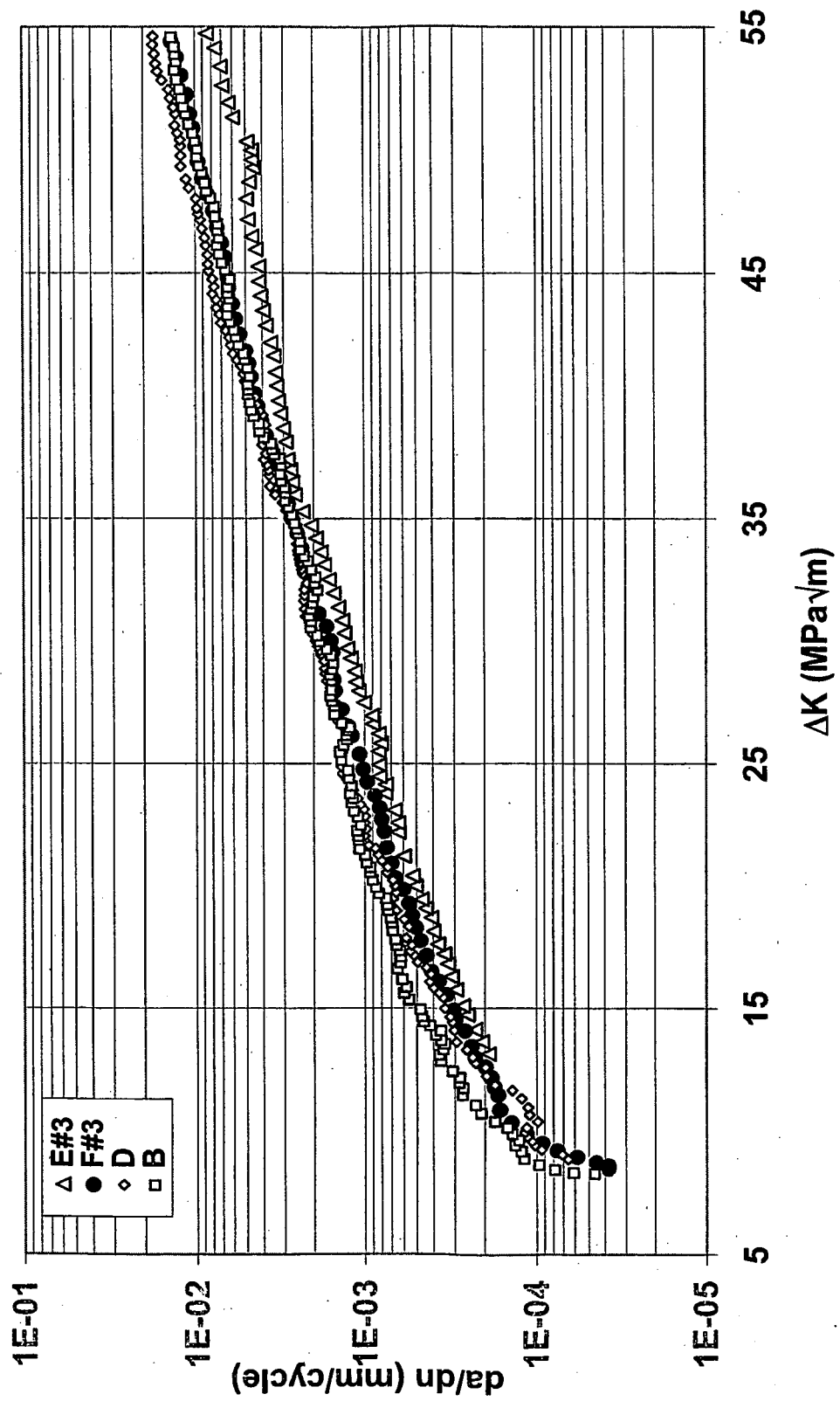
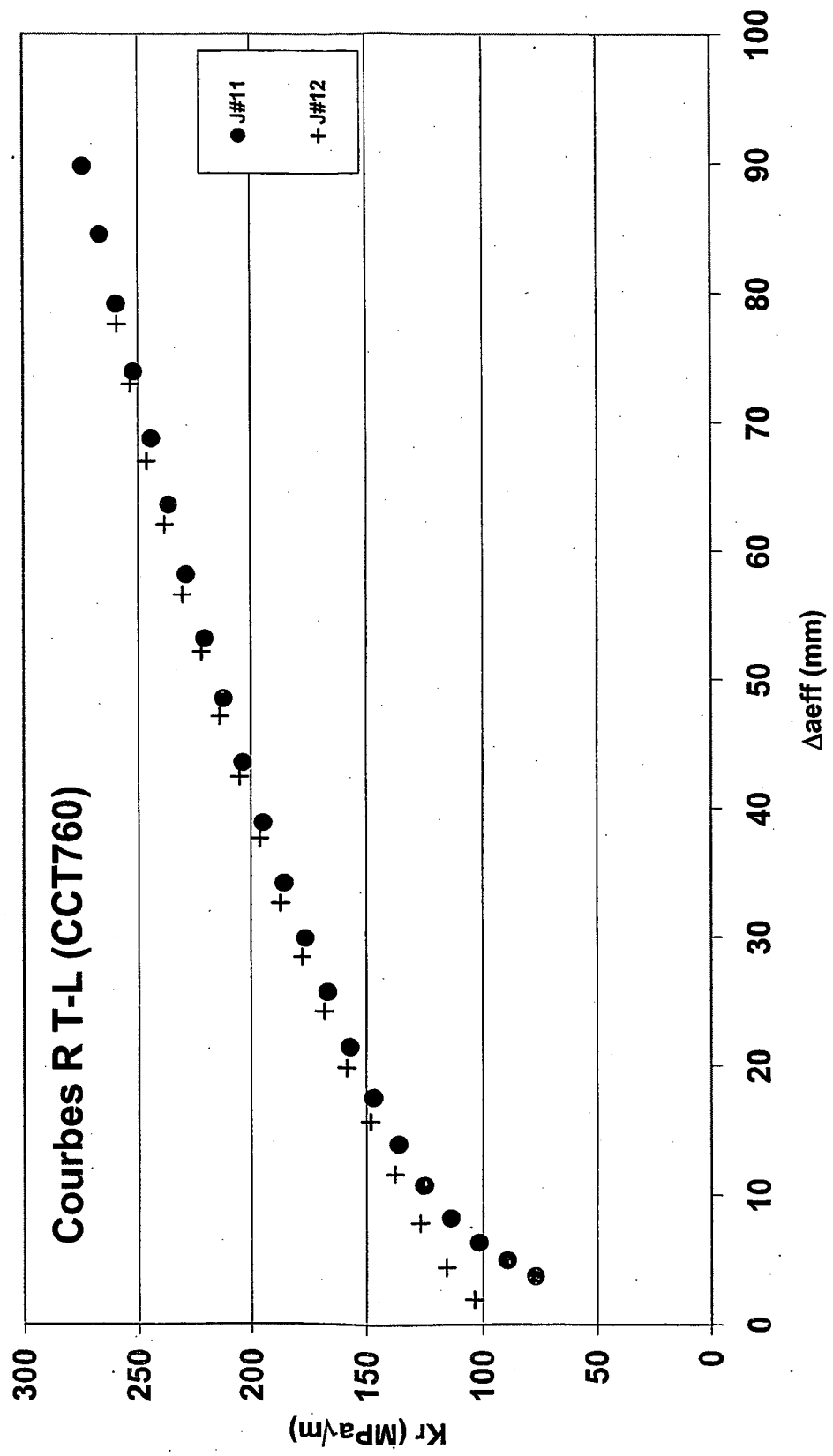


Figure 5



## 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, Martin Marietta [0009] [0011]
- US 5122339 A, Martin Marietta [0010]
- US 5211910 A, Martin Marietta [0011]
- US 5455003 A, Martin Marietta [0012]
- US 5389165 A, Reynolds [0013]
- US 20040071586 A, Alcoa [0015]

### Littérature non-brevet citée dans la description

- Sadhana, Février 2003, vol. 28 (1,2), 209-246 [0008]
- Kahn-Type Tear Test and Crack Toughness of Aluminum Alloy Sheet. *Materials Research & Standards*, Avril 1964, 151-155 [0025]
- Metals Handbook. American Society for Metals, vol. 1, 241-242 [0025]