

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
6 janvier 2005 (06.01.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2005/001149 A2

(51) Classification internationale des brevets⁷ : **C22C**

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2004/001571

(22) Date de dépôt international : 23 juin 2004 (23.06.2004)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
60/480,743 24 juin 2003 (24.06.2003) US

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
PECHINEY RHENALU [FR/FR]; 7, place du Chancelier
Adenauer, F-75116 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **BOSELLI, Julien** [FR/FR]; 4, rue Colbert, F-38000 Grenoble (FR).
HEYMES, Fabrice [FR/FR]; 1, chemin du Mesotype, F-63960 Veyre-Monton (FR). **EBERL, Frank** [DE/FR]; 3, rue Lafayette, F-38000 Grenoble (FR). **WARNER, Timothy** [GB/FR]; 62, rue de Bouvardière, F-38340 Voreppe (FR).

(74) Mandataire : **SCHMIDT, Martin**; Pechiney, 217, cours Lafayette, F-69451 Lyon Cedex 06 (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclaration en vertu de la règle 4.17 :

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

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(54) Title: PRODUCTS MADE FROM AL/ZN/MG/CU ALLOYS WITH IMPROVED COMPROMISE BETWEEN STATIC MECHANICAL PROPERTIES AND TOLERANCE TO DAMAGE

(54) Titre : PRODUITS EN ALLIAGES AL-ZN-MG-CU A COMPROMIS CARACTERISTIQUES MECANQUES STATIQUES/TOLERANCE AUX DOMMAGES AMELIORE

(57) Abstract: The invention relates to a drawn, laminated or forged aluminium alloy product, characterised in comprising (in mass %): Zn 6.7 7.5 %, Cu 2.0 2.8 %, Mg 1.6 2.2 one or several elements selected from the group Zr 0.08 0.20 %, Cr 0.05 0.25 %, Sc 0.01 0.50%, Hf 0.05 0.20 %, V 0.02 0.20%, Fe +Si < 0.20%, other elements = 0.05 % each and = 0.15 % in total, the residue being aluminium. Said product has an improved compromise between static mechanical resistance and tolerance to damage.

(57) Abrégé : L'invention concerne un produit filé, laminé ou forgé en alliage d'aluminium, caractérisé en ce qu'il comprend (en % massiques) : Zn 6,7 - 7,5 %, Cu 2,0 - 2,8 %, Mg 1,6 - 2,2 un ou plusieurs éléments choisis dans le groupe constitué de Zr 0,08 - 0,20 %, Cr 0,05 - 0,25 %, Sc 0,01 - 0,50%, Hf 0,05 - 0,20 %, V 0,02 - 0,20, Fe +Si < 0,20% autres éléments ≤ 0,05 % chacun et ≤ 0,15 % au total, le reste aluminium. Ce produit présente un compromis amélioré entre résistance mécanique statique et tolérance aux dommages.

WO 2005/001149 A2

PRODUITS EN ALLIAGES AL-ZN-MG-CU A COMPROMIS
CARACTERISTIQUES MECANQUES STATIQUES / TOLERANCE AUX
DOMMAGES AMELIORE

5

Domaine technique de l'invention

La présente invention concerne les alliages de type Al-Zn-Mg-Cu à compromis
10 caractéristiques mécaniques statiques – tolérance aux dommages améliorée, ainsi que
des éléments structuraux pour construction aéronautique incorporant des demi-produits
corroyés élaborés à partir de ces alliages.

Etat de la technique

15

On sait que lors de la fabrication de demi-produits et éléments structuraux pour
construction aéronautique, les diverses propriétés recherchées ne peuvent pas être
optimisées toutes en même temps et les unes indépendamment des autres. Lorsque l'on
modifie la composition chimique de l'alliage ou les paramètres des procédés
20 d'élaboration des produits, plusieurs propriétés critiques peuvent même montrer des
tendances antagonistes. Tel est parfois le cas des propriétés rassemblées sous le terme
« résistance mécanique statique » (notamment la résistance à la rupture R_m et la limite
d'élasticité $R_{p0.2}$) d'une part, et des propriétés rassemblées sous le terme « tolérance aux
dommages » (notamment la ténacité et la résistance à la propagation des fissures)
25 d'autre part. Certaines propriétés d'usage comme la résistance à la fatigue, la résistance
à la corrosion, l'aptitude à la mise en forme et l'allongement à rupture sont liées d'une
façon compliquée et souvent imprévisible aux propriétés (ou « caractéristiques »)
mécaniques. L'optimisation de l'ensemble des propriétés d'un matériau pour
construction aéronautique fait donc très souvent intervenir un compromis entre
30 plusieurs paramètres-clé.

Les alliages de type Al-Zn-Mg-Cu (appartenant à la famille des alliages 7xxx) sont utilisés couramment en construction aéronautique, et notamment dans la construction des ailes d'avions civils. Pour les extrados des ailes on utilise par exemple une peau en tôles fortes en alliages 7150, 7055, 7449, et éventuellement des raidisseurs en profilés en alliages 7150, 7055 ou 7449. Les alliages 7150, 7050 et 7349 sont aussi utilisés pour la fabrication de raidisseurs de fuselage. L'alliage 7475 est utilisé parfois pour la fabrication de panneaux intrados de voilure, notamment par usinage de tôles fortes, alors que les raidisseurs intrados de voilure filés sont habituellement en alliages de type 2xxx (p.ex. 2024, 2224, 2027).

10

Certains de ces alliages sont connus depuis des décennies, comme par exemple les alliages 7075 et 7175 (teneur en zinc entre 5,1 et 6,1 % en poids), 7475 (teneur en zinc entre 5,2 et 6,2 %), 7050 (teneur en zinc entre 5,7 et 6,7 %), 7150 (teneur en zinc entre 5,9 et 6,9 %) et 7049 (teneur en zinc entre 7,2 et 8,2 %). Ces alliages présentent différents compromis entre ténacité et limite élastique.

15

La demande de brevet EP 0 257 167 A1 décrit un alliage développé spécifiquement pour la fabrication par filage inverse des corps creux résistant à la pression. Cet alliage a la composition (en pourcent massiques) :

20 Zn 6,25 – 8,0 Mg 1,2 – 2,2 Cu 1,7 – 2,8 Zr ≤ 0,05 Fe ≤ 0,20
(Fe + Si) ≤ 0,40 Cr 0,15 - 0,28 Mn ≤ 0,20 Ti ≤ 0,05.

Ces produits ne dépassent pas, à l'état mis en solution et revenu, des valeurs de $R_m = 530$ MPa, des valeurs de $R_{p0,2} = 480$ MPa, et de $A = 15,4$ %. L'augmentation de la teneur en zinc (à 8,0 %), en Cu (à 2,2 %) et en Mg (à 2,4%) conduit à une augmentation de R_m (jusqu'à 570 MPa) et $R_{p0,2}$ (jusqu'à 525 MPa), mais ces produits ont un mauvais comportement à l'éclatement.

25

La demande de brevet EP 0 589 807 A1 divulgue une bouteille à gaz sous pression avec la composition Zn 6,9, Cu 2,3, Mg 1,9, Zr 0,11 qui montre à l'état T73 les caractéristiques mécaniques statiques suivantes au sens L :

30

$R_{p0,2} = 392$ MPa, $R_m = 459$ MPa, $A = 15,2$ %.

Le brevet US 5 865 911 (Aluminum Company of America) divulgue un alliage de type Al-Zn-Cu-Mg de composition

Zn 5,9 – 6,7 , Mg 1,6 – 1,86 , Cu 1,8 – 2,4 , Zr 0,08 – 0,15

pour la fabrication d'élément de structure pour avions. Ces éléments de structure sont optimisés pour montrer une forte résistance mécanique, ténacité et résistance à la fatigue.

La demande de brevet WO 02/052053 décrit trois alliages de type Al-Zn-Cu-Mg de composition Zn 7,3 Cu 1,6 , Zn 6,7 Cu 1,9 , Zn 7,4 Cu 1,9

et comportant chacun Mg 1,5 Zr 0,11 ,

ainsi que des procédés de traitement thermomécanique appropriés pour la fabrication d'éléments de structure pour avions.

On connaît par ailleurs l'alliage 7040 dont la composition chimique normalisée est :

Zn 5,7 – 6,7 Mg 1,7 – 2,4 Cu 1,5 – 2,3 Zr 0,05 – 0,12

Si $\leq$ 0,10 Fe $\leq$ 0,13 Ti $\leq$ 0,06 Mn $\leq$ 0,04

autres éléments $\leq$ 0,05 chaque et $\leq$ 0,15 au total.

On connaît également l'alliage 7085 dont la composition chimique normalisée est :

Zn 7,0 – 8,0 Mg 1,2 – 1,8 Cu 1,3 – 2,0 Zr 0,08 – 0,15

Si $\leq$ 0,06 Fe $\leq$ 0,08 Ti $\leq$ 0,06 Mn $\leq$ 0,04 Cr $\leq$ 0,04

autres éléments $\leq$ 0,05 chaque et $\leq$ 0,15 au total.

Plus récemment, la demanderesse a constaté l'intérêt de réduire la concentration en Cu et Mg par rapport à un alliage type 7050 (voir EP 0 876 514 B1). Pour une tôle forte, le

compromis entre ténacité et résistance mécanique est ainsi amélioré.

Problème posé

Le problème auquel essaye de répondre la présente invention est de proposer un nouveau produit corroyé en alliage de type Al-Zn-Mg-Cu permettant d'atteindre des niveaux très élevés de résistance mécanique statique tout en présentant un niveau

suffisant dans d'autres propriétés d'usage, notamment la ténacité, la résistance à la corrosion et la résistance à la propagation de fissures de fatigue (fissuration).

Objets de l'invention

5

Un premier objet de la présente invention est constitué par un produit filé, laminé ou forgé en alliage d'aluminium, caractérisé en ce qu'il comprend (en % massiques) :

Zn 6,7 – 7,5 % Cu 2,0 – 2,8 % Mg 1,6 – 2,2 %

un ou plusieurs éléments choisis dans le groupe constitué de :

10 Zr 0,08 – 0,20 % Cr 0,05 - 0,25 % Sc 0,01 - 0,50 %

Hf 0,05 - 0,20 % V 0,02 - 0,20 %

Fe + Si < 0,20 %

autres éléments $\leq 0,05$ % chacun et $\leq 0,15$ % au total,

le reste aluminium.

15

Un autre objet de la présente invention est un procédé de fabrication pour obtenir un tel produit.

Encore un autre objet de la présente invention est un élément de structure d'aéronef qui
20 incorpore au moins un desdits produits, et notamment un élément de structure utilisé dans la construction de la voilure d'avions civils, tel qu'un raidisseur, et en particulier un raidisseur d'intrados de voilure.

Description des figures

25 La figure 1 montre la section de profilés en « I » dont la fabrication est décrite dans l'exemple 1.

1 = branche épaisse, 2 = Epaisseur de la branche épaisse 1, 3 = semelle,

4 = épaisseur de la semelle 3, 5 = branche longue, 6 = hauteur, 7 = largeur.

30 La figure 2 montre la section de profilés dont la fabrication est décrite dans les exemples 3 et 5.

La figure 3 montre la section de profilés en « T inversé » dont la fabrication est décrite dans l'exemple 4 (mêmes symboles que figure 1, 8 = largeur renfort).

5 Description de l'invention

a) Terminologie

Sauf mention contraire, toutes les indications relatives à la composition chimique des alliages sont exprimées en pourcent massique. Par conséquent, dans une expression mathématique, « 0,4 Zn » signifie : 0,4 fois la teneur en zinc, exprimée en pourcent massique ; cela s'applique mutatis mutandis aux autres éléments chimiques. Sauf indication contraire, toutes les compositions chimiques indiquées dans la présente description et les exemples ont été déterminées sur des échantillons obtenus par prélèvement d'un échantillon représentatif de métal liquide au cours de la coulée, suivi de la solidification du métal liquide prélevé dans une forme qui assure une bonne homogénéité de la concentration des éléments dans le solide. La détermination de la concentration des éléments chimiques a été faite par spectroscopie aux rayons X sur solide ou par analyse en solution. La désignation des alliages suit les règles de The Aluminum Association, connues de l'homme du métier. Les états métallurgiques sont définis dans la norme européenne EN 515. La composition chimique d'alliages d'aluminium normalisés est définie par exemple dans la norme EN 573-3. Sauf mention contraire, les caractéristiques mécaniques statiques, c'est-à-dire la résistance à la rupture R_m , la limite élastique $R_{p0,2}$, et l'allongement à la rupture A , sont déterminées par un essai de traction selon la norme EN 10002-1, l'endroit et le sens du prélèvement des éprouvettes étant définis dans la norme EN 485-1. La limite élastique en compression a été mesurée par un essai selon ASTM E9. La ténacité K_{IC} a été mesurée selon la norme ASTM E 399. La courbe R est déterminée selon la norme ASTM 561-98. A partir de la courbe R, on calcule le facteur d'intensité de contrainte critique K_C , c'est à dire le facteur d'intensité qui provoque l'instabilité de la fissure. On calcule également le facteur d'intensité de contrainte K_{CO} , en affectant à la charge critique la longueur initiale de la fissure, au début du chargement monotone. Ces deux valeurs sont calculées pour une éprouvette de forme voulue. K_{app} désigne le K_{CO} correspondant à l'éprouvette

ayant servi à faire le test de courbe R. La résistance à la corrosion exfoliante a été déterminée selon l'essai EXCO décrit dans la norme ASTM G34.

Sauf mention contraire, les définitions de la norme européenne EN 12258-1 s'appliquent. Le terme « tôle » est utilisé ici pour des produits laminés de toute
5 épaisseur.

Le terme « usinage » comprend tout procédé d'enlèvement de matière tel que le tournage, le fraisage, le perçage, l'alésage, le taraudage, l'électroérosion, la rectification, le polissage.

Le terme « produit filé » comprend également les produits qui ont été étirés après filage,
10 par exemple par étirage à froid à travers une filière. Il comprend également les produits tréfilés.

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
15 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, des ses usagers ou d'autrui. Pour un avion, ces éléments de structure comprennent notamment les éléments qui composent le fuselage (tels que la peau de fuselage (fuselage skin en anglais), les
20 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
25 (seat tracks) et les portes.

Le terme « élément de structure monolithique » se réfère à un élément de structure qui a été obtenu à partir d'une seule pièce de demi-produit laminé, filé, forgé ou moulé, sans assemblage, tel que rivetage, soudage, collage, avec une autre pièce.

30 Dans la détermination des temps de revenu à température donnée, on utilise la notion de temps équivalent à une température de référence (par exemple à 160°C). Le calcul ci-dessous donne la formule utilisée :

$$TEQ(160^{\circ}C) = \exp \left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{(160+273)} - \frac{1}{(T_{réel}+273)} \right) \right] \times t_{réel}$$

où TEQ(160°C) est le temps équivalent à 160°C correspondant à un revenu d'une durée
 5 de $t_{réel}$ à $T_{réel}$ (en °K), où Q est une énergie d'activation de 132000 kJ/mol et R=8.31 kJ/mol/(°K).

b) Description détaillée de l'invention

10 Selon l'invention, le problème est résolu par la combinaison entre un ajustement fin de la teneur en éléments d'alliage et des conditions du traitement thermique, notamment de l'homogénéisation des formes brutes, ainsi que de la mise en solution et du revenu des produits obtenus par transformation à chaud.

15 Dans le procédé selon l'invention, on prépare d'abord un alliage de composition

Zn 6,7 – 7,5 (de préférence : 6,9 – 7,3) ;

Cu 2,0 – 2,8 (de préférence : 2,2 – 2,6) ;

Mg 1,6 – 2,2 (de préférence 1,8 – 2,0) ;

un ou plusieurs éléments choisis dans le groupe constitué de

20 Zr 0,08 – 0,20 , Cr 0,05 - 0,40 , Sc 0,01 - 0,50 , Hf 0,05 - 0,60 , V 0,02 - 0,20 ;

Fe + Si < 0,20 et préférentiellement < 0,15 ;

autres éléments $\leq 0,05$ chacun et $\leq 0,15$ au total ;

le reste aluminium.

25 Dans le cadre de la présente invention, la teneur en éléments d'alliage de doit pas dépasser de façon significative leur limite de solubilité, car dans le cas contraire, on observe la persistance de phases intermétalliques lors de la mise en solution qui peuvent nuire à la tolérance aux dommages. Pour une teneur en magnésium donnée, la teneur en cuivre peut être portée à un niveau assez proche de la limite de solubilité, qui dépend de
 30 la teneur en magnésium. Ainsi, on préfère une composition dans laquelle $3,8 < Cu + Mg$

< 4,8, et de manière préférentielle $3,9 < \text{Cu} + \text{Mg} < 4,7$. Dans une réalisation avantageuse de l'invention, on choisit $4,0 < \text{Cu} + \text{Mg} < 4,8$. Dans une autre réalisation avantageuse, on choisit $4,1 < \text{Cu} + \text{Mg} < 4,7$.

- Au-dessous d'une teneur en magnésium d'environ 1,6 %, on constate un risque de formation de fentes lors de la coulée, et on préfère une teneur minimale d'environ 1,7 % ou même 1,8 %. Le rapport Cu / Mg doit être d'au moins 1,0 afin d'obtenir un bon compromis de propriétés, et notamment une bonne tolérance aux dommages, mais ne doit pas dépasser 1,5 pour assurer une coulabilité acceptable. On préfère qu'il soit compris entre 1,1 et 1,5, et encore plus préférentiellement entre 1,1 et 1,4.
- 10 La demanderesse a constaté qu'au-dessus d'une teneur en magnésium d'environ 2,2 %, on n'obtient plus de propriétés de ténacité acceptables.

Dans une réalisation avantageuse de l'invention, on choisit la teneur en magnésium et cuivre telle que $4,2 < \text{Cu} + \text{Mg} < 4,7$ et Cu / Mg compris entre 1,15 et 1,45.

- 15 L'ajout de zirconium à hauteur de 0,08 – 0,20 % limite la recristallisation. Ce rôle peut être rempli aussi par d'autres éléments, tels que le chrome (0,05 - 0,40 %), le scandium (0,01 - 0,50 %), l'hafnium (0,05 - 0,60 %) ou le vanadium (0,02 - 0,20 %). Une teneur en Zr ne dépassant pas 0,15 % est préférée pour éviter la formation de phases primaires. Lorsque plusieurs de ces éléments antirecristallisants sont ajoutés, leur somme est
- 20 limitée par l'apparition du même phénomène. Dans une réalisation avantageuse, on n'ajoute que du zirconium. Le chrome est surtout adapté aux produits minces.
- On peut également ajouter jusqu'à 0,8% de manganèse comme élément anti-recristallisant. En tout état de cause, il est préférable que la somme des éléments anti-recristallisants ne dépasse pas environ 1 %.

25

- Cet alliage est ensuite coulé selon l'une des techniques connues de l'homme du métier pour obtenir une forme brute, tel qu'une billette de filage ou une plaque de laminage. Cette forme brute est ensuite homogénéisée. Le but de ce traitement thermique est triple: (i) dissoudre les phases solubles grossières formées à la solidification (ii) réduire
- 30 les gradients de concentration afin de faciliter l'étape de mise en solution et (iii) précipiter les dispersoïdes afin de limiter/supprimer les phénomènes de recristallisation pendant l'étape de mise en solution. La demanderesse a constaté que l'alliage selon

l'invention était caractérisé par une température de fin de solidification particulièrement basse par rapport aux alliages de type 7040, 7050 ou 7475. Il en est de même de la température au-dessus de laquelle on observe la fusion partielle de l'alliage à l'équilibre thermodynamique (température dite de solidus). Pour ces raisons, une homogénéisation
5 avec une montée rapide à une seule température engendre un risque de brûlure, et ne donne pas une dissolution satisfaisante des particules. Une homogénéisation en au moins deux étapes permet de diminuer ce risque et améliore le résultat. Dans un mode de réalisation préféré, on effectue l'homogénéisation en deux étapes, avec une première étape entre 452 et 473°C, typiquement pendant une durée comprise entre 4 et 30 heures
10 (préférentiellement entre 4 et 15 heures), suivie d'une deuxième étape entre 465 et 484°C, et préférentiellement entre 467 et 481 °C, typiquement pendant une durée comprise entre 4 et 30 heures (préférentiellement entre 4 et 16 heures). Dans un mode de réalisation particulier, la première étape est effectuée entre 457 et 463 °C, et la seconde entre 467 et 474 °C. Dans un autre mode de réalisation, on effectue
15 l'homogénéisation en un seul palier avec une montée linéaire à 40°C par heure jusqu'à une température comprise entre 467 et 481 °C, préférentiellement entre 471 et 481°C, et typiquement pendant une durée comprise entre 4 et 30 heures.

Il est également possible de faire l'homogénéisation en trois paliers.

L'homogénéisation peut également être effectuée en une seule étape, avec une montée
20 en température inférieure à 200°C/h, et préférentiellement entre 20 et 50°C/h jusqu'à un palier entre 465 et 484 °C, et préférentiellement entre 471 et 481 °C.

La forme brute est ensuite transformée à chaud pour former des produits filés (notamment des barres, tubes ou profilés), des tôles laminées à chaud ou des pièces
25 forgées. Le filage est fait de préférence à une température de filière comprise entre 380 et 430 °C, et préférentiellement entre 390 et 420 °C, par un des procédés connus de l'homme du métier, tels que le filage direct ou le filage inverse. On préfère que la transformation à chaud par filage se fasse avec une température de lopin comprise entre 400 et 460°C, et préférentiellement comprise entre 420°C et 440 °C.

30 On peut ainsi obtenir des produits filés qui ne montre nulle part une couche corticale à gros grain d'une épaisseur supérieure à 3 mm, et préférentiellement limitée à 1 mm, notamment dans le cas des produits filés moins épais.

La transformation à chaud peut éventuellement être suivie d'une transformation à froid. A titre d'exemple, on peut fabriquer des tubes filés et étirés. On peut aussi envisager, dans le cas des produits laminés, une ou plusieurs passes de laminage à froid. Cela n'est
5 normalement pas utile pour des produits laminés d'une épaisseur supérieure à 10 mm, pour lesquels la composition envisagée dans le cadre de la présente invention se prête particulièrement bien.

Les produits obtenus sont ensuite mis en solution. Dans une réalisation préférée de
10 l'invention, on augmente la température de façon continue pendant une durée comprise entre 2 et 6 heures, et préférentiellement environ 4 heures, jusqu'à une température comprise entre 470 et 500 °C (préférentiellement ne dépassant pas 485°C), préférentiellement entre 474 et 484 °C, et encore plus préférentiellement entre 477 et 483 °C, et maintient le produit à cette température pendant une durée comprise entre 1
15 et 10 heures, et préférentiellement environ 2 à 4 heures. Ensuite, les produits sont trempés, de préférence dans un milieu de trempe de préférence liquide tel que l'eau, ledit liquide ayant préférentiellement une température ne dépassant pas 40 °C.

Ensuite, les produits peuvent être soumis à une traction contrôlée avec un allongement
20 permanent de l'ordre de 1 à 5 %, et préférentiellement 1,5 à 3 %.

Ensuite, les produits sont soumis à un traitement de revenu, qui influe de façon importante sur les propriétés finales du produit. La demanderesse a constaté qu'un revenu à double palier donnait de bons résultats. Toutefois, le revenu peut être réalisé
25 en trois étapes, ou comme revenu « en rampe » (ramp annealing). On peut même envisager un revenu en une seule étape.

Pour un procédé en deux étapes, un premier palier compris entre 110 °C et 130 °C convient. Dans une réalisation avantageuse de la présente invention, le premier palier se situe entre 115 °C et 125 °C. Pour cette plage de température préférée, on peut utiliser
30 un temps de traitement équivalent TEQ(160°C) compris entre 0.1 et 2 heures, et préférentiellement entre 0,1 et 0,5 heures. Le deuxième palier se situe avantageusement entre 150 et 170 °C. Selon les constatations de la demanderesse, si l'on vise à optimiser

le compromis entre $R_{0.2}$ et K_{app} , le temps de traitement équivalent TEQ(160°C) pour ce second palier est avantageusement compris entre 4 et 16 heures, et préférentiellement comprise entre 6 et 12 heures. Si l'on vise à optimiser le compromis entre $R_{0.2}$ et K_{IC} , un deuxième palier plus long à une température comprise entre 150 °C et 170 °C est
5 préférable, par exemple un temps de traitement équivalent TEQ(160°C) compris entre 16 et 30 heures. Dans une réalisation avantageuse, on a effectué le deuxième palier à une température de 160 °C pendant 24 heures.

Dans un premier mode de réalisation particulier, la température du deuxième palier est comprise entre 155 et 165 °C. Le contrôle de la durée de ce deuxième palier est
10 particulièrement important pour les propriétés finales du produit. Dans une réalisation particulièrement avantageuse de ce premier mode de réalisation particulier, le deuxième palier se situe entre 157 et 163 °C, et sa durée est comprise entre 6 et 10 heures. Dans un autre mode de réalisation particulier de l'invention, le deuxième palier est effectué à une température un peu plus basse, comprise entre 150 et 160 °C.

15

Si on envisage un revenu monopalier, on utilisera avantageusement une température de l'ordre de 115 à 145 °C pour une durée de l'ordre de 4 à 50 heures, par exemple 48 heures à 120 °C. A titre d'exemple, on peut utiliser un temps de traitement équivalent TEQ(160°C) de l'ordre de 0,6 heures à 1,20 heures. Ces traitements mono-palier
20 permettent d'obtenir des produits à l'état T6.

Dans le cas des profilés, les caractéristiques mécaniques statiques sont typiquement mesurées dans la branche (« leg ») la plus longue du profilé. Il en est de même des échantillons pour les mesures de corrosion. Les échantillons pour évaluer la tolérance
25 aux dommages sont prélevées dans une zone plate de largeur suffisante qui inclut, lorsque cela est possible, la branche la plus longue, cette zone étant communément appelée la semelle du profilé. Dans le cas des tôles, on a prélevé les échantillons pour la mesure des caractéristiques mécaniques statiques à la profondeur préconisée par la norme EN 485-1 :1993 (clause 6.1.3.4.).

30

Le procédé selon l'invention conduit à des produits nouveaux qui ont des caractéristiques particulièrement intéressantes pour la construction aéronautique. Ces

produits peuvent se présenter sous forme de tôles, notamment tôles épaisses, ou profilés, ou encore pièces forgées. Plus particulièrement, la présente invention permet de réaliser des profilés épais utilisables comme raidisseurs de voilure. Ces produits ont une limite d'élasticité $R_{p0,2(L)}$ d'au moins 550 MPa et de préférence d'au moins 580 MPa, et un $K_{app(L-T)}$ mesuré selon ASTM E 561-98 sur une éprouvette de type « center-crack tension panel » (appelé également « middle-cracked tension panel ») de largeur $W = 100$ mm d'au moins $75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, préférentiellement d'au moins $78 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ et encore plus préférentiellement d'au moins $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. L'homme du métier sait que le choix de la largeur W de l'éprouvette affecte la valeur de K_{app} obtenue.

10

Un avantage important du produit selon l'invention est le fait que la valeur de $K_{app(L-T)}$, déterminée comme indiqué ci-dessus, est sensiblement la même à environ 20°C et à environ -50°C , sachant que -50°C est une température ambiante typique lors du vol d'un avion civil à réaction. Plus précisément, cette valeur de $K_{app(L-T)}$ ne diminue pas de plus que 3% lorsque l'on passe d'environ 20°C à environ -50°C . Dans une réalisation préférée de la présente invention, elle ne diminue pas du tout. On sait que dans certains alliages de la série 7xxx, la ténacité décroît avec la température. A titre d'exemple, il a été décrit que des tôles en 7475 T7651 montrent une baisse de 25 % de la ténacité (déterminée à partir de courbes R sur des panneaux d'épaisseur $B = 6$ mm au sens L-T) entre environ 20°C et environ -50°C (voir P.R. Abelkis et al., Proceedings of « Fatigue at Low Temperatures », Louisville, Kentucky, 10 mai 1983, pages 257 – 273 (éditeur ASTM)). Dans les mêmes conditions, des tôles fortes en 7050 T7451 montrent une baisse de K_{IC} ou K_q au sens L-T ou T-L d'au moins 5% (voir W.F. Brown et al., Aerospace Materials Handbook, published by CINDAS (USAF CRDA Handbook Operation, Purdue University, 1997)). Alors qu'il est connu que les caractéristiques mécaniques statiques $R_{p0,2}$ et R_m des alliages de la série 7xxx tendent à augmenter lorsque la température baisse d'environ 20°C à environ -50°C , ce qui assure une sécurité complémentaire de la structure à cette température, la baisse de la ténacité des alliages de la série 7xxx selon l'état de la technique (que la demanderesse a constaté par exemple pour des tôles fortes en 7075 T7351, 7475 T7351, 7475 T7651 et 7475 sous-revenu, à raison d'environ 2 à 10%) doit être prise en compte lors du dimensionnement

30

des éléments de structure. Le produit selon l'invention ne montre pas de baisse significative (c'est-à-dire supérieure à 2 %) de la ténacité à basse température.

Dans une réalisation avantageuse de la présente invention, le produit est un raidisseur d'intrados de voilure, qui présente l'ensemble de propriétés suivantes (mesurées à mi-
5 épaisseur et à une température d'environ 20 °C) :

Une résistance à la rupture $R_{m(L)}$ d'au moins 585 MPa, une limite d'élasticité $R_{p0,2(L)}$, mesurée par un essai de traction et par un essai de compression, d'au moins 555 MPa, un allongement à rupture $A_{(L)}$ d'au moins 9 %, un $K_{app(L-T)}$ mesuré sur éprouvettes CCT
10 avec $W = 100$ mm d'au moins 88 MPa $\sqrt{m}$, une résistance à la fatigue (fatigue crack growth resistance) ΔK_{L-T} d'au moins 27 MPa $\sqrt{m}$ à $R=0,1$ et une vitesse de propagation de fissure de $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/cycle, une résistance à la fatigue d'au moins 10^5 cycles à $R=0,1$, $K_t = 3$ et $\sigma_{max} = 22$ ksi (151,7 MPa), une résistance à la corrosion exfoliante d'au moins EB (et préférentiellement au moins EA), et une propagation de fissure dans la
15 direction S-L en milieu corrosif (déterminé par la méthode dite DCB (double cantilever beam) selon EN ISO 7539-6) ne dépassant pas 10^{-8} m/s.

L'invention permet d'obtenir un produit qui montre au moins un ensemble de propriétés
20 (mesurées à environ 20 °C) sélectionné dans le groupe formé par les cinq ensembles :

(a) une limite d'élasticité $R_{p0,2(L)}$ d'au moins 480 MPa (et préférentiellement d'au moins 500 MPa), une résistance à la rupture $R_{m(L)}$ d'au moins 530 MPa (et préférentiellement d'au moins 555 MPa) et un $K_{IC(L-T)}$ d'au moins 36 MPa $\sqrt{m}$ (et préférentiellement d'au moins 40 MPa $\sqrt{m}$ et encore plus préférentiellement
25 d'au moins 44 MPa $\sqrt{m}$)

(b) une limite d'élasticité $R_{p0,2(L)}$ d'au moins 550 MPa (et préférentiellement d'au moins 580 MPa, et encore plus préférentiellement d'au moins 600 MPa) et un $K_{app(L-T)}$ mesuré avec $W = 100$ mm) d'au moins 80 MPa $\sqrt{m}$ (et
30 préférentiellement d'au moins 83 MPa $\sqrt{m}$, et encore plus préférentiellement d'au moins 87 MPa $\sqrt{m}$) ;

- (c) une limite d'élasticité $R_{p0,2(L)}$ d'au moins 550 MPa (et préférentiellement d'au moins 580 MPa) et une vitesse de propagation de fissure da/dn ne dépassant pas $3 \cdot 10^{-3}$ mm/cycle (et préférentiellement ne dépassant pas $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/cycle) pour $\Delta K = 27 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$;
- 5 (d) une limite d'élasticité $R_{p0,2(L)}$ d'au moins 550 MPa (et préférentiellement d'au moins 580 MPa), une résistance à la rupture $R_{m(L)}$ d'au moins 580 MPa (et préférentiellement d'au moins 600 MPa) et un $K_{app(L-T)}$ mesuré avec $W = 100$ mm d'au moins $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (et préférentiellement d'au moins $83 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, et
- 10 encore plus préférentiellement d'au moins $87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) ;
- (e) une résistance à la rupture $R_{m(L)}$ d'au moins 580 MPa (et préférentiellement d'au moins 600 MPa et encore plus préférentiellement d'au moins 620 MPa) et un $K_{app(L-T)}$ mesuré avec $W = 100$ mm d'au moins $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (et
- 15 préférentiellement d'au moins $83 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, et encore plus préférentiellement d'au moins $87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).
- Selon le mode de réalisation particulière, un tel produit peut montrer en plus au moins une propriété sélectionnée dans le groupe formé par :
- 20 (a) un allongement à rupture $A_{(L)}$ d'au moins 9%, et préférentiellement d'au moins 12 % ;
- (b) une résistance à la corrosion exfoliante mesurée selon ASTM G34 d'au moins EB.
- 25 A titre de comparaison, les raidisseurs intrados de voilure en alliage AA2027 T3511 selon l'état de la technique ont typiquement les propriétés suivantes :
- $R_{m(L)}$: environ 545 MPa,
- $R_{p0,2(L)}$ en traction : environ 415 MPa,
- $R_{p0,2(L)}$ en compression : environ 400 MPa,
- 30 Allongement à rupture $A_{(L)}$: environ 16 %,
- $K_{IC(L-T)}$: environ $48 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ avec une éprouvette CT avec $W=2B$,
- $K_{app(L-T)}$ ($W = 100$ mm, $B = 6,35$ mm) : environ $75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$,

Résistance à la corrosion exfoliante : EB

On constate donc que l'invention permet d'augmenter surtout la résistance à la rupture et la limite élastique, tout en maintenant les autres propriétés d'usage à un niveau au moins comparable. La diminution de l'allongement à rupture n'est pas un inconvénient pour ces applications, qui n'exigent normalement pas une valeur particulièrement élevée ; si on ressent dans certains cas un petit inconvénient associé à cette baisse, il est très largement compensé par l'augmentation de la résistance mécanique.

10

Le produit selon l'invention est particulièrement adapté à la fabrication d'éléments de structure dont la largeur effective à considérer vis à vis d'un dimensionnement en ténacité ou en fissuration est limitée par des facteurs géométriques de la structure dans laquelle ces éléments de structure doivent s'intégrer, par exemple par une conception qui limite effectivement la largeur des panneaux hors raidisseurs. Dans un tel cas, le produit optimal selon l'invention correspond à celui qui offre la résistance mécanique statique maximale tout en assurant une ténacité suffisante pour assurer que la résistance résiduelle de la pièce en présence d'une fissure soit limitée par la résistance statique du produit, voire une combinaison de résistance mécanique statique et ténacité, et non par sa ténacité intrinsèque.

20

Un produit particulièrement préféré selon l'invention est un raidisseur de voilure, obtenu par filage, par exemple un raidisseur intrados. Un autre produit avantageux est un cadre de fuselage.

Dans le cadre de la présente invention, on a fabriqué des produits filés avec une couche corticale (couche périphérique de grains recristallisés) au centre des branches longues qui reste

25

- a) inférieure à 3.0 mm quelle que soit la section ; ou
- b) inférieure à 1,5 mm pour des sections de largeur inférieure à égale à 50mm, ou
- c) inférieure à $e/4$ mm (où e est l'épaisseur) pour des sections de largeur inférieure ou égale à 10 mm.

30

Un autre avantage du produit selon l'invention est la possibilité du formage au revenu. On sait que les éléments de structure aéronautique doivent avoir des formes précises dictées par l'aérodynamisme. Ces géométries peuvent être obtenues par mise en forme à froid. Dans ce cas, si l'alliage nécessite un traitement de revenu, celui-ci pourra être
5 réalisé après la mise en forme afin de bénéficier d'un métal plus ductile et plus facile à mettre en forme. Ces géométries peuvent aussi être obtenues par mise en forme lors du traitement thermique de revenu. Dans ce cas, le métal est livré dans un état métallurgique intermédiaire, typiquement après un premier palier de revenu. Ce procédé avantageux en terme de coût et reproductibilité n'est possible qu'avec des produits
10 comportant un traitement de revenu permettant une mise en forme efficace. Les alliages 2xxx T351x utilisés pour les raidisseurs et panneaux de voilure ne permettent pas d'utiliser ce procédé puisqu'ils ne subissent pas de traitement de revenu. Par contre, le produit selon l'invention est particulièrement adapté à la fabrication d'éléments de structure devant subir un formage au revenu pendant le deuxième palier de revenu.

15

Le produit selon l'invention, grâce à son compromis de propriétés, est très intéressant pour les applications qui exigent à la fois une haute résistance mécanique, et une haute tolérance vis à vis des surcharges occasionnelles sans conduire à la rupture brutale de la pièce. Outre les éléments de structure pour aéronef, les produits selon l'invention ont été
20 utilisés pour la fabrication d'autres pièces ou éléments de structure qui répondent à des hautes exigences de sécurité. A titre d'exemple, la demanderesse a fabriqué par filage, suivi éventuellement d'un étirage à froid, des tubes pour la fabrication de cadres, fourches et guidon de cycles (vélos, tricyles, motos etc), ou de battes de baseball. Pour ces applications, il s'est avéré être avantageux d'ajouter à l'alliage une faible teneur en
25 scandium et/ou hafnium, par exemple entre 0,15 et 0,60 % de scandium et environ 0,50 % d'hafnium. On choisit de préférence un procédé de fabrication qui conduit à une structure fibrée des tubes.

L'invention sera mieux comprise à l'aide des exemples, qui n'ont toutefois pas de
30 caractère limitatif.

Exemples

Exemple 1 :

On a coulé par coulée semi-continue des billettes de filage de diamètre 291 mm (alliage
5 A) dont la composition est indiquée dans le Tableau 1. Ces billettes ont été homogénéisées en deux étapes :

- 1) 13 heures à 460 °C
- 2) 14 heures à 470 °C.

Tableau 1

Alliage	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Zr	Ti	Mn
A	6,75	1,9	2,6	0,08	0,05	0,12	0,03	0,01

10

La teneur en Cu, Mg et Zn a été déterminée par analyse chimique après dissolution d'une partie de l'échantillon, tandis que les autres éléments ont été déterminés par spectroscopie aux rayons X sur solide.

- 15 On a filé des profilés de section « I » (voir Figure 1 : épaisseur de l'ordre de 17 mm à 22 mm, largeur de l'ordre de 160 mm et hauteur de l'ordre de 80 mm) à partir de billettes écroûtées de diamètre 270 mm, à une température de lopins comprise entre 390 et 410 °C et une température de conteneur comprise entre 400 et 420°C, avec une vitesse de sortie d'environ 0,5 m/mn. Les profilés ont été mis en solution en augmentant pendant
20 une durée de 3 heures la température de façon continue jusqu'à 481 ± 3 °C et en les maintenant à cette température pendant 6 heures, puis trempés dans de l'eau entre 22 et 25°C et tractionnés avec une déformation permanente comprise entre 1,5 et 3%. On a ensuite effectué un traitement de sur-revenu pour obtenir des produits à l'état T76. Le sur-revenu a été effectué en deux étapes : d'abord à 120 °C pendant 6 heures, puis à 160
25 °C pendant une durée variable. L'épaisseur de la couche recristallisée à gros grains mesurée au centre de la semelle est inférieure à 1 mm. Pour caractériser les produits obtenus, on a déterminé leur caractéristiques mécaniques statiques (R_m , $R_{p0,2}$, A) selon EN 10001-2, leur résistance à la corrosion exfoliante selon ASTM G34, (essai dit «Exco»), leur résistance à la corrosion sous contrainte selon ASTM G 47, leur vitesse
30 de propagation de fissures selon ASTM E647 (essai dit « da/dn ») dans le sens T-L ou

L-T pour une valeur ΔK de 50 MPa $\sqrt{m}$ et un rapport de charges $R=0,1$ et leur facteur d'intensité de contrainte K_{app} (paramètre dit « K apparent »). Ce dernier a été calculé en utilisant la charge maximale mesurée durant l'essai selon ASTM E561-98 sur des éprouvettes de largeur W égale à 100 mm, et la longueur de fissure initiale (en fin de pré-fissuration) dans les formules indiquées par la norme citée.

Le tableau 2 montre l'influence de la durée de la deuxième étape de revenu sur certaines propriétés mesurées en fin de profilé; les caractéristiques mécaniques ayant été mesurées à 20 °C. Les résultats de l'essai de traction ont été obtenus sur éprouvette de section circulaire, diamètre 10 mm, à mi-épaisseur et mi-largeur dans la branche longue. Les résultats de ténacité K_{Ic} ont été obtenus sur éprouvettes prélevés à mi-épaisseur et mi-largeur dans la branche longue ou la branche la plus épaisse. Les résultats de corrosion EXCO ont été obtenus sur éprouvettes prélevés à mi-épaisseur et mi-largeur dans la branche. Les résultats de K_{app} ont été obtenus sur éprouvettes à mi-épaisseur et centrés dans la semelle du profilé contenant la branche longue.

Tableau 2 :

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu	8 h	12 h	24 h
TEQ(160°C)	8,71 h	12,71 h	24,71
EXCO : surface	EA	EA	EA
EXCO : T/10	EB	EB	EB
EXCO : T/2	EA	EA	EB
$K_{app(L-T)}$ [MPa $\sqrt{m}$] (semelle)	89,3	83,0	80,2
$K_{IC(L-T)}$ [MPa $\sqrt{m}$] (branche longue)	38,8	40,5	43,5
$K_{IC(L-T)}$ [MPa $\sqrt{m}$] (branche épaisse)	45,7	42,6	46,6
$K_{IC(T-L)}$ [MPa $\sqrt{m}$] (branche longue)	27,0	28,6	30,7
$K_{IC(T-L)}$ [MPa $\sqrt{m}$] (branche épaisse)	24,5	26,1	29,2
$R_{m(L)}$ [MPa] (branche longue)	629	616	561
$R_{m(L)}$ [MPa] (branche épaisse)	646	621	572
$R_{p0,2(L)}$ [MPa] (branche longue)	604	582	507
$R_{p0,2(L)}$ [MPa] (branche épaisse)	621	586	519

$A_{(L)}$ [%] (branche longue)	12,6	13,2	13,9
$A_{(L)}$ [%] (branche épaisse)	12,4	13,1	13,3
EXCO : résistance à la corrosion exfoliante, déterminée par l'essai EXCO en surface ; à 1/10 de l'épaisseur (T/10) et à mi-épaisseur (T/2) dans la branche longue			
$K_{app(L-T)}$: mesuré avec une éprouvette CCT W=100mm et B=6 mm			
$K_{IC(L-T \text{ ou } T-L)}$ (branche longue): avec B = 12,5 mm et W = 25 mm			
$K_{IC(L-T \text{ ou } T-L)}$ (branche épaisse): avec B = 15 mm et W = 30 mm			

On constate qu'une durée de 8 heures ou 12 heures donne de très bons résultats.

La ténacité $K_{app(L-T)}$ à -50 °C était de $87,6\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ pour un revenu de 8 heures, et de
5 $83,5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ pour une durée de revenu de 24 heures (sur des éprouvettes avec B=6 mm).

Pour un produit ayant subi une deuxième étape de revenu à 160 °C pendant 8 heures, les propriétés au sens LT étaient à 20 °C :

$$R_{p0,2(LT)} = 579\text{ MPa}, R_{m(LT)} = 609\text{ MPa}, A(LT) = 12\text{ \%}.$$

10

Le tableau 3 montre la vitesse de propagation de fissures mesurée dans le sens L-T avec B = 7,61 mm, W = 96,6 mm, R = 0,10, et $P_{min} = 600\text{ N}$ et $P_{max} = 6000\text{ N}$, pour une durée de revenu de 6 heures à 120 °C et 8 heures à 160 °C . Les échantillons de type « Compact-tension panel » ont été prélevés à mi-épaisseur et mi-largeur de la semelle en

15 fin de profilé.

Tableau 3 :

ΔK [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]	da/dn [mm/cycle] à 20 °C	da/dn [mm/cycle] à -54 °C
10	$9,50 \cdot 10^{-5}$	$5,74 \cdot 10^{-6}$
15	$4,44 \cdot 10^{-4}$	$2,48 \cdot 10^{-4}$
20	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$6,76 \cdot 10^{-4}$
25	$2,04 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$
30	$3,55 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$

Des éprouvettes de corrosion sous contrainte ont été prélevées en fin de profilé à mi-épaisseur de la semelle en deux positions dans la section : à mi-largeur de la branche longue et à mi-largeur de la branche opposée dans la semelle. Les résultats de résistance à la corrosion sous contrainte constante dans le sens TL avec $\sigma = 300, 350$ et 400 MPa de contrainte imposée sont présentés dans le tableau 4. Le suivi de ces essais s'est arrêté après 30 jours.

Tableau 4 :

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu	8 h	24 h
TEQ(160°C)	8,71 h	24,71
$\sigma = 300$ MPa	>30j (6 échantillons)	>30j (6 échantillons)
$\sigma = 350$ MPa	>30j (3 échantillons)	>30j (3 échantillons)
$\sigma = 400$ MPa	$\geq 24j$ (3 échantillons)	>30j (3 échantillons)

Des éprouvettes de corrosion sous contrainte en milieu corrosif ont été prélevées à mi-épaisseur et mi-largeur de la branche longue en fin de profilé. La propagation de fissure en milieu corrosif dans le sens de l'épaisseur (déterminé par la méthode dite DCB (double cantilever beam) selon la norme EN ISO 7539-6) était de l'ordre de $5 \cdot 10^{-9}$ m/s pour un deuxième palier de revenu de 8 heures à 160°C .

15 Exemple 2 :

On a élaboré un alliage dont la composition est indiquée au tableau 5. On a coulé des billettes de filage d'un diamètre de 410 mm. Les conditions d'homogénéisation ont été les mêmes que dans l'exemple 1. Après écrouissage, on a obtenu des billettes d'un diamètre de 390 mm. Elles ont été filées avec une température de lopins comprise entre 410 et 430°C et une température de conteneur comprise de l'ordre de 420°C avec une vitesse de sortie de $0,65$ à $0,8$ m/mn, en méplats de section 279×22 mm.

Tableau 5

Alliage	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Zr	Ti	Cr	Mn
K	6,78	1,91	2,49	0,08	0,05	0,11	0,03	0,00	0,01

Les produits ont été mis en solution avec une montée en température en 35 mn jusqu'à 479 ± 2 °C, avec un palier de 4 heures à cette température. La trempe a été effectuée dans de l'eau froide. Ensuite, les méplats ont été tractionnés avec un allongement permanent compris entre 1,5 et 3%. Le revenu a été effectué en deux étapes : 6 heures à 120 °C + 8 heures à 160 °C. Un contrôle ultra-sons a permis de vérifier l'absence de défauts internes (classe AA MIL-STD-2154). L'épaisseur de la couche recristallisée à gros grains mesurée au centre de la semelle est inférieure à 1 mm.

10

Les résultats de l'essai de traction et compression sont rassemblés dans le tableau 6. Les résultats de l'essai de traction ont été obtenus sur éprouvette de section circulaire, diamètre 10 mm, à mi-épaisseur en fin du méplat et en deux positions dans la section : à mi-largeur et en bord. Les résultats de l'essai de compression ont été obtenus sur éprouvette de section circulaire, diamètre 10 mm, à mi-épaisseur en fin du méplat et en deux positions dans la section : à mi-largeur et en bord.

15

Tableau 6

	$R_{m(L)}$ [MPa]	$R_{p0,2(L)}$ [MPa]	$A_{(L)}$ [%]	$R_{p0,2c(L)}$ [MPa]	$R_{m(TL)}$ [MPa]	$R_{p0,2(TL)}$ [MPa]	$A_{(TL)}$ [%]	$R_{p0,2c(TL)}$ [MPa]
mi-largeur	631	602	12,2	604	609	583	11,3	614
bord	645	617	13,5	627	-	-	-	-

20 Les résultats de ténacité K_{IC} , K_{app} et de corrosion EXCO ont été obtenus sur éprouvettes prélevés à mi-épaisseur et mi-largeur en fin du méplat. Les résultats de ténacité et de corrosion sont rassemblés dans le tableau 7. Les conditions d'essai sont les mêmes que celles présentées dans l'exemple 1.

Tableau 7

EXCO : surface	EA
EXCO : T/2	EB
$K_{app(L-T)}$ [MPa√m]	75,4
$K_{IC(L-T)}$ [MPa√m]	31,0
$K_{IC(T-L)}$ [MPa√m]	29,7
$K_{app(L-T)}$: mesuré avec B=6 mm	
$K_{IC(L-T \text{ ou } T-L)}$: avec B = 10 mm et W = 20 mm	

Des éprouvettes de corrosion sous contrainte ont été prélevées en fin de profilé à mi-épaisseur et de part et d'autre de la mi-largeur. Les résultats de résistance à la corrosion sous contrainte constante dans le sens TL avec $\sigma = 300, 350$ et 400 Mpa de contrainte imposée sont présentés dans le tableau 8. Le suivi de ces essais s'est arrêté après 40 jours.

Tableau 8

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu	8 h
TEQ(160°C)	8,71 h
$\sigma = 300$ MPa	>40j (3 échantillons)
$\sigma = 350$ MPa	>40j (3 échantillons)
$\sigma = 400$ MPa	≥33j (3 échantillons)

10

Exemple 3 :

On a filé des profilés de différentes géométries à partir de billettes de composition A (voir exemple 1). La figure 2 montre la section de ces profilés. Le procédé de fabrication était similaire à celui de l'exemple 1. L'épaisseur du produit est de l'ordre millimétrique par rapport aux produits précédents. Néanmoins une microstructure à faible couche corticale à gros grains a pu être obtenue. Le tableau 9 montre les

15

caractéristiques mécaniques statiques obtenues pour différentes conditions de revenu. La première étape du revenu était toujours de 6 heures à 120 °C.

Tableau 9

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu à 160 °C	TEQ(160°C)	R _{m(L)} [MPa]	R _{p0,2(L)} [MPa]	A _(L) [%]	EXCO surface	EXCO T/2
1 heure	1,77	635	595	11	P	ED
2 heures	2,77	634	600	11	P	ED
3 heures	3,77	632	602	9	P	ED
4 heures	4,71	628	601	11	P	ED
8 heures	8,71	621	593	10	P	EB
16 heures	16,71	597	559	10	P	EA/EB
32 heures	32,71	541	482	11	P	EA/EB

5

L'état T6 se trouve proche du point 6 heures à 120 °C + 1 h à 160 °C.

Le tableau 10 montre quelques compromis ténacité – caractéristiques mécaniques statiques pour quelques points correspondant à des états T7x. Les conditions d'essai sont les mêmes que celles présentées dans l'exemple 1.

10

Tableau 10

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu	8 h	12 h	24 h
TEQ(160°C)	8,71 h	12,71 h	24,71
EXCO : surface	P	P	P
EXCO : T/2	EB	EB	EA/EB
K _{app(L-T)} [MPa√m]	86,4	83,1	80,0
R _{m(L)} [MPa]	619	614	576
R _{p0,2(L)} [MPa]	588	577	522
A _(L) [%]	12,5	10,9	11,7
EXCO : résistance à la corrosion exfoliante, déterminée par l'essai EXCO en surface ; mi-épaisseur (T/2)			

Ces profilés ont été utilisés pour la fabrication de cadres de fuselage.

Exemple 4 :

5

On a filé des profilés de section 'T' inversé (voir Figure 3 : épaisseur de la semelle de l'ordre de 25 mm, largeur du renfort de l'ordre de 40 mm, largeur de la semelle de l'ordre de 180 mm et hauteur de l'ordre de 70 mm) à partir de billettes de composition K (voir exemple 2). Les conditions de filage étaient similaires à celles de l'exemple 2.

10

Trois profilés libellés X, Y et Z ont subi séparément les étapes de mise en solution, trempe et traction. Les profilés X et Y ont subi une mise en solution similaire à l'exemple 2. Le profil Z a subi une mise en solution avec une montée en température entre 1h et 2h et un maintien de 3 heures à 480 ± 2 °C. Les trois profilés ont été trempés dans de l'eau froide et tractionnés entre 1.5% et 3%. Les profilés ont été rectifiés pour améliorer leur rectitude. Le revenu a été effectué en deux étapes avec un premier palier de 6 heures à 120 °C. Un contrôle ultra-sons a été réalisé pour vérifier l'absence de défauts internes (classe A, MIL-STD-2154). L'épaisseur de la couche recristallisée à gros grains mesurée au centre de la semelle est inférieure à 1 mm.

20

Les tableaux 11, 12 et 13 montrent l'influence de la durée de la deuxième étape de revenu sur certaines propriétés du produit pour les trois profilés respectivement X, Y et Z; les caractéristiques mécaniques ayant été mesurées à 20 °C . Les conditions d'essai sont les mêmes que celles présentées dans l'exemple 1. Les résultats de l'essai de traction ont été obtenus sur éprouvette de section circulaire, diamètre 10 mm, à mi-épaisseur et mi-largeur dans la branche longue. Les résultats de ténacité K_{Ic} et de corrosion EXCO ont été obtenus sur éprouvettes prélevés à mi-épaisseur et mi-largeur dans la branche longue. Les résultats de Kapp ont été obtenus sur éprouvettes centrés dans la semelle du profilé contenant la branche longue.

30

Tableau 11 – Profil X

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu	24 h
TEQ(160°C)	24,71
EXCO : surface	EA
EXCO : T/2	EA
$K_{app(L-T)}$ [MPa√m]	76,2
$K_{IC(L-T)}$ [MPa√m] (B=15 mm W=30 mm)	43,8
$K_{IC(T-L)}$ [MPa√m] (B=15 mm W=30 mm)	28,4
$K_{IC(L-T)}$ [MPa√m] (B=20 mm W=76,2 mm)	45,6
$K_{IC(T-L)}$ [MPa√m] (B=20 mm W=76,2 mm)	30,0
$R_{m(L)}$ [MPa]	576
$R_{p0,2(L)}$ [MPa]	526
$A_{(L)}$ [%]	13,3
$R_{p0,2c(L)}$ [MPa]	533
$R_{m(TL)}$ [MPa]	545
$R_{p0,2(TL)}$ [MPa]	500
$A_{(TL)}$ [%]	8,2
EXCO : résistance à la corrosion exfoliante, déterminée par l'essai EXCO en surface et à mi-épaisseur (T/2)	
$K_{app(L-T)}$: mesuré avec B=6 mm	

Tableau 12 – Profil Y

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu	8 h
TEQ(160°C)	8,71 h
$K_{app(L-T)}$ [Mpa√m]	87,6
$R_{m(L)}$ [MPa]	639
$R_{p0,2(L)}$ [MPa]	609
$A_{(L)}$ [%]	12,5
$K_{app(L-T)}$: mesuré avec B=6 mm	

Tableau 13 – Profil Z

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu	8 h	24 h
TEQ(160°C)	8,71	24,71
$K_{app(L-T)}$ [MPa√m]	84,2	75,4
$K_{IC(L-T)}$ [MPa√m]	33,0	-
$K_{IC(T-L)}$ [MPa√m]	24,7	-
$R_{m(L)}$ [MPa]	650	
$R_{p0,2(L)}$ [MPa]	621	
$A_{(L)}$ [%]	12,2	
$R_{m(TL)}$ [MPa]	602	
$R_{p0,2(TL)}$ [MPa]	579	
$A_{(TL)}$ [%]	8,5	
$K_{app(L-T)}$: mesuré avec B=5 mm $K_{IC(L-T \text{ ou } T-L)}$: avec B = 25 mm et W = 76 mm		

On constate qu'une durée de 8 heures ou 24 heures pour la 2^{ème} étape de revenu donne de très bons compromis de résultats.

5

Des éprouvettes de corrosion sous contrainte ont été prélevées en fin de profilé à mi-épaisseur de la semelle en deux positions dans la section : à mi-largeur de la branche longue et à mi-largeur de la branche opposée dans la semelle. Les résultats de résistance à la corrosion sous contrainte constante dans le sens TL avec $\sigma = 300, 350$ et 400 MPa de contrainte imposée sont présentés dans le tableau 14. Le suivi de ces essais s'est arrêté après 40 jours.

10

Tableau 14

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu	8 h	24 h
TEQ(160°C)	8,71 h	24,71
$\sigma = 300$ MPa	>40j (4 échantillons)	>40j (4 échantillons)

$\sigma = 350 \text{ MPa}$	$\geq 24j$ (4 échantillons)	$> 40j$ (4 échantillons)
$\sigma = 400 \text{ MPa}$	$\geq 21j$ (4 échantillons)	$\geq 38j$ (4 échantillons)

Exemple 5 :

On a élaboré un alliage dont la composition est indiquée au tableau 15. On a coulé des
 5 billettes de filage d'un diamètre de 525 mm. Les conditions d'homogénéisation ont été
 de 15h entre 473 et 481°C après une montée en température contrôlée à 40°C/h. Après
 écoulement, on a obtenu des billettes d'un diamètre de 498 mm. Elles ont été filées dans
 un conteneur à une température comprise entre 410 et 430 °C et un lopin entre 420 et
 440°C, avec une vitesse de sortie entre 0,6 m/min et 1,0 m/min sous la forme d'une
 10 section illustrée sur la figure 3 (épaisseur de la semelle de l'ordre de 27 mm, largeur du
 renfort de l'ordre de 40 mm, largeur de la semelle de l'ordre de 205 mm et hauteur de
 l'ordre de 80 mm).

Tableau 15

Alliage	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Zr	Ti	Cr	Mn
H	6,95	1,89	2,18	0,06	0,04	0,10	0,02	0,00	0,00

15

Les produits ont été mis en solution avec une montée en température entre 1h et 2h
 jusqu'à 480±2°C, avec un palier de 3 heures à cette température. La trempe a été
 effectuée dans de l'eau froide entre 21 et 22°C. Ensuite, les sections extrudées et
 20 trempées ont été tractionnées avec un allongement permanent compris entre 1,5 et 3%.
 Les profilés ont été rectifiés pour améliorer leur rectitude. Un premier revenu de 6h à
 120°C a été réalisé. Un contrôle ultra-sons a été réalisé pour vérifier l'absence de
 défauts internes (classe A, MIL-STD-2154). Un second revenu a été effectué de 8
 heures à 160°C. L'épaisseur de la couche recristallisée à gros grains mesurée au centre
 25 de la semelle est inférieure à 1 mm.

Les résultats de l'essai de traction (sur éprouvette de section circulaire, diamètre 10 mm, prélevée en fin du profilé, à mi-épaisseur et mi-largeur dans la branche longue) sont rassemblés dans le tableau 16. Ce tableau contient aussi les résultats de ténacité et Kapp
 5 tous deux prélevés dans la semelle. Les conditions d'essai sont les mêmes que celles présentées dans l'exemple 1 exceptées pour l'épaisseur B de l'éprouvette CCT pour la caractérisation des Kapp qui est de 5 mm.

Tableau 16

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu	8 h	24 h
TEQ(160°C)	8,71	24,71
$K_{app(L-T)}$ [MPa√m]	84,1	79,3
$K_{IC(L-T)}$ [MPa√m] (semelle)	37,2	-
$K_{IC(T-L)}$ [MPa√m] (semelle)	28,8	-
$R_{m(L)}$ [MPa] (semelle)	637	
$R_{p0,2(L)}$ [MPa] (semelle)	609	
$A_{(L)}$ [%](semelle)	13,2	
$R_{m(TL)}$ [MPa] (semelle)	602	
$R_{p0,2(TL)}$ [MPa] (semelle)	577	
$A_{(TL)}$ [%](semelle)	9,9	
$K_{app(L-T)}$: mesuré avec B=5 mm		
$K_{IC(L-T \text{ ou } T-L)}$: avec B = 25 mm et W = 76 mm		

10

Exemple 6 :

Des billettes avec des compositions L, M, N et O ont été coulées avec des diamètres de 200 mm (voir tableau 17). Toutes les compositions ont subi une même homogénéisation
 15 entre 473°C et 481°C pendant 15 heures. Après homogénéisation les billettes ont été écoutées et percées au centre pour permettre le filage sur aiguille. Des tubes sans soudure ont été filés. Les ébauches de filage ont été étirées à froid pour élaborer des tubes à diamètre entre 20 et 30 mm avec une épaisseur de paroi entre 2 et 5 mm.

L'étirage à froid fait augmenter l'énergie stockée qui est le principal moteur de la recristallisation. La variation des éléments de transition (cf. tableau 17) a permis de générer des microstructures différentes. Après l'étirage ; les tubes ont été mis en solution à des températures au-dessus de 480°C pendant 1 h avant une trempe à eau froide (~20°C).

Les tubes n'ont pas été tractionnés après la trempe. Un premier palier de stabilisation pendant 6h à 120°C a été réalisé avant une cinétique complète illustrée dans les tableaux 18 à 20. Les propriétés mécaniques ont été mesurées sur des éprouvettes courbées en direction de filage L.

Tableau 17

Alliage	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Zr	Ti	Cr	Mn	Sc	Hf
L	7,01	1,84	2,37	0,06	0,03	0,14	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
M	6,79	1,79	2,30	0,06	0,03	0,13	0,04	0,00	0,00	0,07	0,00
N	6,78	1,75	2,29	0,10	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,46
O	6,74	1,82	2,31	0,12	0,04	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,41

Tableau 18 (composition L)

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu à 160 °C	TEQ	R _{m(L)} [MPa]	R _{p0,2(L)} [MPa]	A _(L) [%]
2 heures	2,77	620	571	13,7
4 heures	4,71	619	584	15,6
8 heures	8,71	606	581	9,6
12 heures	12,71	597	568	12,7
16 heures	16,71	580	541	12,0
24 heures	24,71	537	482	12,5
32 heures	32,71	521	458	12,4

Tableau 19 (composition M)

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu à 160 °C	TEQ	R _{m(L)} [MPa]	R _{p0,2(L)} [MPa]	A _(L) [%]
2 heures	2,77	653	622	14,2
12 heures	12,71	616	588	10,5
16 heures	16,71	596	560	15,1
24 heures	24,71	554	506	11,2

Tableau 20 (composition N)

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu à 160 °C	TEQ	R _{m(L)} [MPa]	R _{p0,2(L)} [MPa]	A _(L) [%]
2 heures	2,77	611	557	11,9
12 heures	12,71	593	559	11,6
24 heures	24,71	543	487	14,2

5

Tableau 21 (composition O)

Durée de la 2 ^{ème} étape du revenu à 160 °C	TEQ	R _{m(L)} [MPa]	R _{p0,2(L)} [MPa]	A _(L) [%]
2 heures	2,77	606	551	10,7
12 heures	12,71	586	554	11,3
16 heures	16,71	572	531	13,9
24 heures	24,71	535	478	12,5

L'état T6 se trouve proche du point 6 heures à 120 °C + 1 h à 160 °C.

Ces tubes sont utilisés pour des applications du marché sports et loisir : cadres, fourches

10 et guidons de cycles, battes de baseball.

REVENDEICATIONS

1. Produit filé, laminé ou forgé en alliage d'aluminium, caractérisé en ce qu'il comprend (en % massiques) :
 - 5 (a) Zn 6,7 – 7,5 % Cu 2,0 – 2,8 % Mg 1,6 – 2,2 % ;
 - (b) un ou plusieurs éléments choisis dans le groupe constitué de :

Zr 0,08 – 0,20 % Cr 0,05 - 0,40 % Sc 0,01 - 0,50 %

Hf 0,05 - 0,60 % V 0,02 - 0,20 % ;
 - (c) Fe + Si < 0,20 % ;
 - 10 (d) autres éléments $\leq 0,05$ % chacun et $\leq 0,15$ % au total ;
 - (e) le reste aluminium.

2. Produit selon la revendication 1, caractérisé en ce sa teneur en magnésium et cuivre est telle que

$3,8 < (Cu + Mg) < 4,8$,

- 15 et de manière préférée $3,9 < (Cu + Mg) < 4,7$,
- et encore plus préférentiellement $4,1 < (Cu + Mg) < 4,7$.

3. Produit selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que le rapport Cu / Mg est compris entre 1,0 et 1,5 , préférentiellement compris entre 1,1 et 1,5, et encore
 - 20 plus préférentiellement compris entre 1,1 et 1,4.

4. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que Zn est compris entre 6,9 et 7,3 %.

- 25 5. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que Cu est compris entre 2,2 et 2,6 %.

6. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que Mg est compris entre 1,7 et 2,0 %, et préférentiellement entre 1,8 et 2,0 %.
- 30
7. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce qu'il contient en plus jusqu'à 0,8 % de manganèse.

8. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que la somme de la teneur des éléments Zr, Cr, Sc, Hf, V ne dépasse pas 1%, et préférentiellement de dépasse pas 0,8 %.
- 5 9. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que Si + Fe ne dépasse pas 0,15 %.
10. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'il a subi une mise en solution, une trempe et un revenu, ledit revenu comportant un premier palier à une température comprise entre 110 °C et 125 °C, et préférentiellement entre 115 et 125 °C, et un deuxième palier à une température comprise entre 150 et 170 °C, et préférentiellement comprise entre 150 et 165 °C.
- 10 11. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce qu'il possède au moins un ensemble de propriétés (mesurées à environ 20 °C) sélectionné dans le groupe formé par les cinq ensembles :
- 15 (a) une limite d'élasticité $R_{p0.2(L)}$ d'au moins 480 MPa (et préférentiellement d'au moins 500 MPa), une résistance à la rupture $R_{m(L)}$ d'au moins 530 MPa (et préférentiellement d'au moins 555 MPa) et un $K_{IC(L-T)}$ d'au moins 36 MPa $\sqrt{m}$ (et préférentiellement d'au moins 40 MPa $\sqrt{m}$ et encore plus préférentiellement d'au moins 44 MPa $\sqrt{m}$)
- 20 (b) une limite d'élasticité $R_{p0.2(L)}$ d'au moins 550 MPa (et préférentiellement d'au moins 580 MPa, et encore plus préférentiellement d'au moins 600 MPa) et un $K_{app(L-T)}$ mesuré avec $W = 100$ mm) d'au moins 80 MPa $\sqrt{m}$ (et préférentiellement d'au moins 83 MPa $\sqrt{m}$, et encore plus préférentiellement d'au moins 87 MPa $\sqrt{m}$) ;
- 25 (c) une limite d'élasticité $R_{p0.2(L)}$ d'au moins 550 MPa (et préférentiellement d'au moins 580 MPa) et une vitesse de propagation de fissure da/dn ne dépassant pas $3 \cdot 10^{-3}$ mm/cycle (et préférentiellement de dépassant pas $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm/cycle) pour $\Delta K = 27$ MPa $\sqrt{m}$;
- 30 (d) une limite d'élasticité $R_{p0.2(L)}$ d'au moins 550 MPa (et préférentiellement d'au moins 580 MPa), une résistance à la rupture $R_{m(L)}$ d'au moins 580 MPa (et

- préférentiellement d'au moins 600 MPa) et un $K_{app(L-T)}$ mesuré avec $W = 100$ mm d'au moins $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (et préférentiellement d'au moins $83 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, et encore plus préférentiellement d'au moins $87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$);
- 5 (e) une résistance à la rupture $R_{m(L)}$ d'au moins 580 MPa (et préférentiellement d'au moins 600 MPa et encore plus préférentiellement d'au moins 620 MPa) et un $K_{app(L-T)}$ mesuré avec $W = 100$ mm d'au moins $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (et préférentiellement d'au moins $83 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, et encore plus préférentiellement d'au moins $87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$).
- 10 12. Produit selon la revendication 11, caractérisé en ce qu'il montre en plus au moins une propriété sélectionnée dans le groupe formé par :
- (a) un allongement à rupture $A_{(L)}$ d'au moins 9%, et préférentiellement d'au moins 12 % ;
- (b) une résistance à la corrosion exfoliante mesurée selon ASTM G34 d'au moins
- 15 EB.
13. Produit selon une quelconque des revendications 1 à 12, caractérisé en ce que la valeur de $K_{app(L-T)}$ à environ -50°C est au moins 98 %, et préférentiellement au moins 100 %, de la valeur mesurée à environ 20°C .
- 20 14. Produit filé selon une quelconque des revendications 1 à 13, caractérisé en ce que l'épaisseur de la couche périphérique de grains recristallisés au centre des branches longues reste
- d) inférieure à 3.0 mm quelle que soit la section ; ou
- 25 e) inférieure à 1,5 mm pour des sections de largeur inférieure à égale à 50mm, ou
- f) inférieure à $e/4$ mm (où e est l'épaisseur) pour des sections de largeur inférieure ou égale à 10 mm.
- 30 15. Élément de structure pour construction aéronautique, caractérisé en ce qu'il est fabriqué à partir d'au moins un produit selon une quelconque des revendications 1 à 14.

16. Elément de structure selon la revendication 15, caractérisé en qu'il s'agit d'un raidisseur de voilure obtenu par filage.
- 5 17. Elément de structure selon la revendication 15, caractérisé en ce qu'il s'agit d'un cadre de fuselage.
18. Tube filé selon une quelconque des revendications 1 à 7 ou 9 à 14, caractérisé en ce qu'il contient entre 0,15 et 0,60 de scandium et / ou jusqu'à 0,50 % d'hafnium.
- 10 19. Utilisation d'un tube selon la revendication 18 pour la fabrication de cadres, fourches ou guidons de cycles, ou de battes de baseball.
20. Procédé de fabrication d'un produit filé, forgé ou laminé comprenant les étapes suivantes :
- 15 (a) élaboration d'un alliage de composition selon une des revendications 1 à 9,
(b) coulée d'une forme brute telle qu'une plaque de laminage ou d'une billette de filage ou de forge,
(c) homogénéisation de ladite forme brute,
20 (d) transformation à chaud pour obtenir un premier produit intermédiaire,
(e) mise en solution dudit premier produit intermédiaire,
(f) trempe
(g) éventuellement traction contrôlée,
(h) revenu.
- 25 21. Procédé selon la revendication 20, caractérisé en ce que l'homogénéisation (étape a)) est effectué en deux étapes, avec un premier palier entre 452 et 473 °C, préférentiellement entre 457 et 473 °C, et un deuxième palier entre 465 et 484 °C, et préférentiellement entre 467 et 481 °C.
- 30 22. Procédé selon la revendication 20, caractérisé en ce que l'homogénéisation (étape a)) est effectué en une seule étape, avec une montée en température inférieure à

200°C/h, et préférentiellement entre 20 et 50°C/h jusqu'à un palier entre 465 et 484 °C, et préférentiellement entre 471 et 481 °C.

23. Procédé selon une des revendications 20 à 22, caractérisée en ce que la
5 transformation à chaud se fait par filage avec une température de lopin comprise entre 400 et 460°C, et préférentiellement comprise entre 420°C et 440 °C.
24. Procédé selon une quelconque des revendications 20 à 23, caractérisé en ce que la
10 température de mise en solution ne dépasse pas 500°C, et de manière préférée ne dépasse pas 485°C.
25. Procédé selon la revendication 24, caractérisée en ce que la mise en solution se
termine par un palier compris entre 470 et 485 °C, préférentiellement entre 475 et
15 484 °C, et encore plus préférentiellement compris entre 477 et 483 °C pendant une durée comprise entre 1 et 10 heures.
26. Procédé selon une quelconque des revendications 20 à 25, caractérisé en ce que la
traction contrôlée conduit à un allongement permanent compris entre 1 et 5 %, et
20 préférentiellement compris entre 1,5 et 3%.
27. Procédé selon une quelconque des revendications 20 à 26, caractérisé en ce que le
traitement de revenu comporte
- a) un premier palier à une température comprise entre 110 °C et 130°C, et
25 préférentiellement comprise entre 115 – 125 °C, et de façon préférée, dans ce dernier cas, pour une durée comprise entre 2 et 10 heures, et encore plus préférentiellement comprise entre 5 et 7 heures ;
- b) un deuxième palier à une température comprise entre 150 °C et 170 °C,
et préférentiellement comprise entre 155 et 165 °C, et encore plus
30 préférentiellement comprise entre 157 et 163 °C, et de façon préférée pour une durée comprise entre 4 et 12 heures, et encore plus préférentiellement comprise entre 6 et 10 heures.

1/3

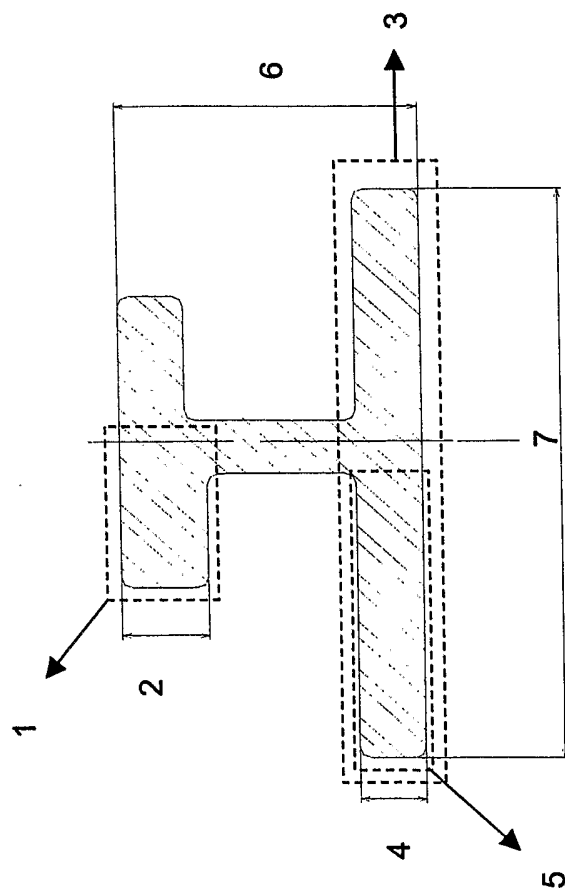


Figure 1

2/3

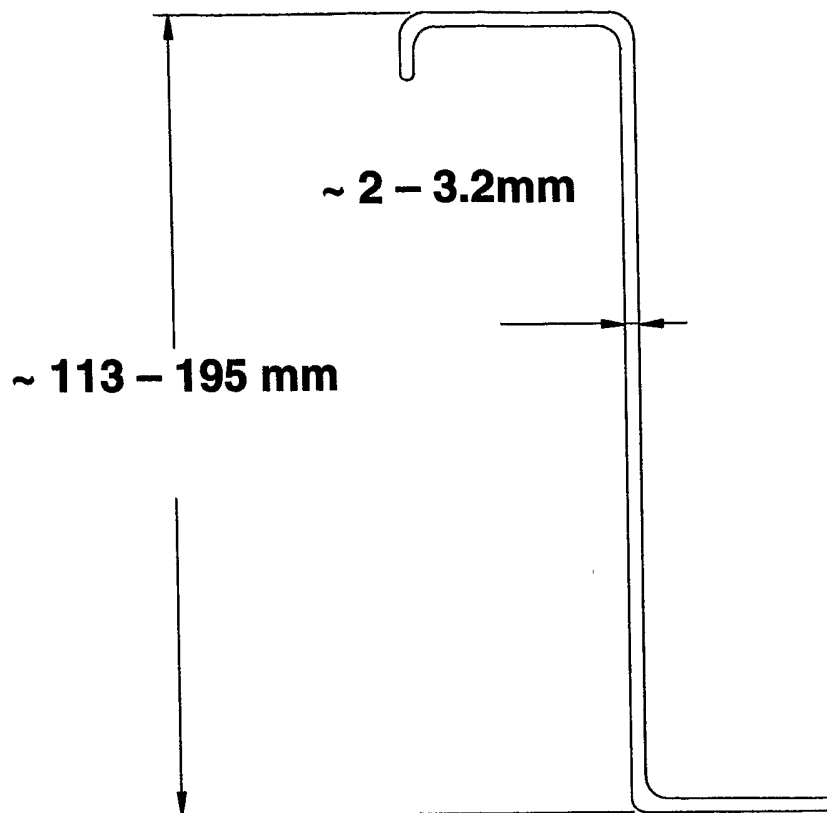


FIGURE 2

3/3

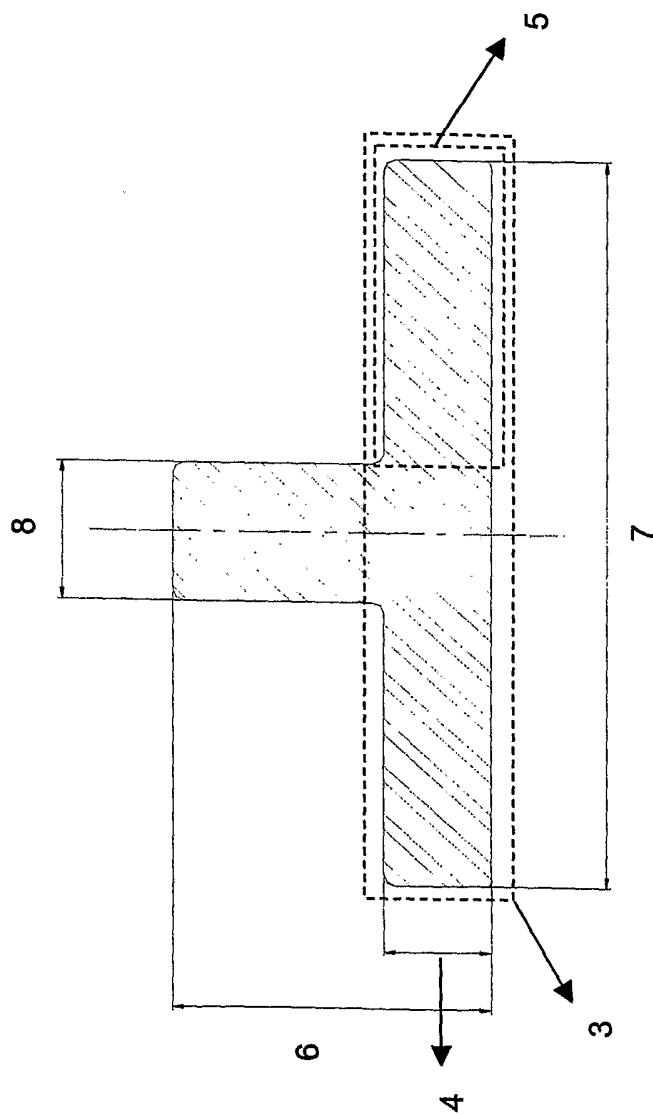


Figure 3