

(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
25 septembre 2003 (25.09.2003)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 03/078674 A2

(51) Classification internationale des brevets⁷ : C22F

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR03/00887

(22) Date de dépôt international : 20 mars 2003 (20.03.2003)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
02/03530 20 mars 2002 (20.03.2002) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **MON-
TUPET S.A.** [FR/FR]; 202, quai de Clichy, F-92110
Clichy (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **MEYER,
Philippe** [FR/FR]; 278, route de Froissy, F-60600 Ron-
querolles (FR). **MASSINON, Denis** [FR/FR]; 5 bis, rue
Bunelle, F-60140 Liancourt (FR). **JACQUET, Virginie**
[FR/FR]; 16 passage Dubail, F-75010 Paris (FR).

(74) Mandataires : **MARTIN, Jean-Jacques** etc.; Cabinet
Regimbeau, 20, rue de Chazelles, F-75847 Paris cedex 17
(FR).

(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ,
DE, DK, DM, DZ, EC, EE, 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, NI, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE,
SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (GH, GM, KE,
LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet
eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet
européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,
FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK,
TR), brevet 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 abrégia-
tions, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et
abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de
la Gazette du PCT.

(54) Title: METHOD FOR THE THERMAL TREATMENT OF FOUNDRY PIECES MADE FROM AN ALLOY BASED ON ALUMINIUM AND FOUNDRY PIECES WITH IMPROVED MECHANICAL PROPERTIES

(54) Titre : PROCEDE DE TRAITEMENT THERMIQUE DE PIECES DE FONDERIE EN ALLIAGE A BASE D'ALUMINIUM, ET PIECES DE FONDERIE PRESENTANT DES PROPRIETES MECANIQUES AMELIOREES

(57) Abstract: The invention relates to a thermal treatment method for a foundry piece made from an aluminium alloy, particularly an alloy of aluminium, silicon, magnesium and optionally copper. Said method comprises the following steps: (a) placing the piece in a solution within a first range of temperatures for a first period, (b) progressive cooling of the piece to a second temperature within a second range of temperatures lower than the first, (c) the piece is retained in the solution whilst maintaining the second range of temperatures for a second period, (d) quenching of the piece and (e) tempering the piece. The invention further relates to foundry pieces having improved mechanical properties. The above is applied to improving the machinability of pieces such as cylinder heads for internal combustion engines whilst retaining good durability.

(57) Abrégé : Un procédé de traitement thermique d'une pièce de fonderie réalisée en alliage d'aluminium, notamment en alliage d'aluminium, de silicium et de magnésium, et le cas échéant de cuivre, comprend les étapes suivantes: (a) mise en solution de la pièce dans une première gamme de températures pendant une première durée, (b) refroidissement progressif de la pièce jusqu'à une deuxième température comprise dans une deuxième gamme de températures inférieure à la première, (c) poursuite de la mise en solution de la pièce en la maintenant dans la deuxième gamme de températures pendant une deuxième durée, (d) trempe de la pièce, et (e) revenu de la pièce. L'invention propose également des pièces de fonderie présentant des propriétés mécaniques améliorées. Application à l'amélioration de l'usinabilité de pièces telles que des culasses de moteurs à combustion, tout en conservant de bonnes propriétés de tenue.



WO 03/078674 A2

« Procédé de traitement thermique de pièces de fonderie en alliage à base d'aluminium, et pièces de fonderie présentant des propriétés mécaniques améliorées »

La présente invention concerne d'une façon générale le traitement thermique des alliages de moulage à base d'aluminium et contenant du silicium, ainsi que les pièces moulées résultantes.

5 Les alliages de moulage à base d'aluminium comportent différentes familles de composition dont la plupart sont aptes au durcissement structural par traitement thermique. En particulier, on peut citer la famille Aluminium/Silicium/Magnésium représentée typiquement par les alliages de type AlSi7%Mg0.3%, AlSi7Mg0.6% ou AlSi10%Mg0.3%, et la famille Aluminium/Silicium/Cuivre/Magnésium représentée
10 typiquement par les alliages de type AlSi (5 à 10%) Cu (2 à 3.5%) Mg (0.2 à 0.3%).

Tous ces alliages sont largement utilisés pour la fabrication en grande série de composants automobiles, par exemple des culasses soumises à de très fortes sollicitations en service. Afin de maximiser les propriétés mécaniques de ces alliages, il est d'usage du moins pour les cas de sollicitations les plus sévères, de réaliser un
15 traitement thermique présentant une mise en solution et une trempe, suivies d'un revenu de durcissement structural.

Un inconvénient de ce type de traitement est qu'il peut rendre l'alliage extrêmement difficile à usiner, et ce notamment dans le cas d'alliages à durcissement structural ne comportant pas ou peu de cuivre (typiquement à des teneurs inférieures
20 ou égales à 1%).

En particulier, l'usinage de filets très fins (par exemple des filets de fixation d'injecteurs de culasses pour moteurs diesel), les perçages longs de faible diamètre ou l'ébavurage des surfaces usinées peuvent être problématiques (bavures non fragmentables difficiles à éliminer par brossage par exemple).

25 On connaît par le document EP-A-1 065 292 un procédé visant à réaliser, à la suite d'une mise en solution d'une pièce réalisée en alliage léger, ce qui peut s'assimiler à une trempe étagée, par immersion dans un bain de sel de façon à amener rapidement la température de la pièce à une valeur comprise entre 350 et

450°C. Un tel procédé connu a pour effet d'accroître la résistance à la traction du matériau de la pièce à température élevée, mais ne résout nullement les problèmes d'aptitude à l'usinage. En outre, ce procédé conduit à des pertes de caractéristiques mécaniques à température ambiante qui sont inacceptables pour des applications de type culasse de moteur à combustion.

Ainsi il n'existe aujourd'hui aucune solution pour permettre de faciliter l'usinage des pièces en alliage du type à durcissement structural ou analogues.

La présente invention vise à pallier ces inconvénients et à permettre d'obtenir des pièces de fonderie présentant un bon compromis entre les performances intrinsèques qui leur sont demandées, notamment en matière de résistance à différents types de sollicitations, et leur aptitude à l'usinage et à l'ébavurage après usinage.

Elle propose à cet effet, selon un premier aspect, un procédé de traitement thermique d'une pièce de fonderie réalisée en alliage d'aluminium, notamment en alliage d'aluminium, de silicium et de magnésium, et le cas échéant de cuivre, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

(a) mise en solution de la pièce dans une première gamme de températures pendant une première durée,

(b) refroidissement progressif de la pièce jusqu'à une deuxième température comprise dans une deuxième gamme de températures inférieure à la première,

(c) poursuite de la mise en solution de la pièce en la maintenant dans la deuxième gamme de températures pendant une deuxième durée,

(d) trempe de la pièce, et

(e) revenu de la pièce.

Certains aspects préférés, mais non limitatifs de ce procédé sont les suivants :

- la deuxième gamme de températures est choisie de manière à ce que l'alliage traité présente une résistance à la traction diminuée d'environ 10% à 40%, et de préférence d'environ 15% à 35%, par rapport à la résistance à la traction qui serait obtenue avec une mise en solution unique dans la première gamme de températures et pendant une durée égale aux première et deuxième durées cumulées.

- la deuxième gamme de températures est inférieure à la première gamme de températures d'environ 8 à 14 %.

- pour un alliage à faible teneur en cuivre (typiquement 1% en poids ou moins), la première gamme de températures est comprise entre environ 510°C et 550°C, et de préférence entre environ 520°C et 540°C.

- la première durée est alors comprise entre environ 1h et 4h, et de préférence entre environ 1h et 2h.

- la deuxième gamme de températures est alors comprise entre environ 455°C et 485°C, et de préférence entre environ 460°C et 480°C.

- la deuxième durée est alors comprise entre environ 1h et 5h, et de préférence entre environ 1h et 3h.

- la durée de l'étape (b) est alors comprise entre environ 0h30 et 3h30, et de préférence entre environ 1h et 2h30.

Selon un deuxième aspect, la présente invention propose une pièce de fonderie en alliage à base d'aluminium, notamment en alliage d'aluminium, de silicium et de magnésium et le cas échéant de cuivre, avec notamment une teneur en cuivre inférieure à environ 1% en poids, présentant une aptitude à l'usinage améliorée, caractérisée en ce qu'elle présente :

- une résistance à la traction comprise entre environ 220 Mpa et 300 Mpa,
- une limite d'élasticité à 0,2% de déformation comprise entre environ 170 Mpa et 270 Mpa,
- une dureté Brinell comprise entre environ 75 et 110.

D'autres aspects, buts et avantages de la présente invention apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée suivante d'une forme de réalisation préférée de celle-ci, donnée à titre d'exemple non limitatif et faite en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 illustre la microstructure d'un premier type d'alliage traité selon l'art antérieur,
- la figure 2 illustre la microstructure de ce même type d'alliage traité selon la présente invention,

- la figure 3 illustre la microstructure d'un deuxième type d'alliage traité selon la présente invention,

- la figure 4 illustre la microstructure de ce même type d'alliage traité d'une façon différente de la présente invention, et

5 - la figure 5 est un diagramme de propriétés mécaniques résistance/allongement illustrant les propriétés pouvant être obtenues selon l'invention.

On va maintenant décrire l'invention en détail.

Un traitement thermique selon l'invention est réalisé par une mise en
10 solution à deux paliers de température. Un premier palier est réalisé dans une gamme de hautes températures, c'est-à-dire dans la gamme de températures usuelle de mise en solution des alliages considérés que l'homme de l'art définira selon des références bien connues. Typiquement, pour des alliages contenant moins de 1% en poids de cuivre, cette première température est comprise entre environ 510°C et 550°C, de
15 préférence entre environ 520°C et 540°C, et plus particulièrement autour de 530°C. Pour des alliages ayant une teneur en cuivre plus élevée, cette température sera plus basse, par exemple comprise entre environ 475°C et 515°C, et préférentiellement autour de 495°C pour des teneurs en cuivre de 2 à 3% en poids. Pour des raisons notamment économiques, on limite ce premier palier à des durées de l'ordre de 1h à
20 4h, de préférence 1h à 2h, sachant qu'un prolongement de ce palier ne conduit pas à des améliorations significatives des propriétés finales du matériau.

Ce premier palier est suivi par un deuxième palier de mise en solution dans une deuxième gamme de températures plus basse. Toujours pour un alliage contenant au plus 1% en poids de cuivre, cette deuxième gamme de températures est comprise
25 entre environ 455°C et 485°C, de préférence entre environ 460°C et 480°C, et plus préférentiellement autour de 465°C (étant précisé que pour un alliage à teneur en cuivre de 2 à 3 % en poids, cette deuxième gamme de température se situera avantageusement entre 425°C et 455°C, et plus préférentiellement autour de 450°C).

Plus généralement, la deuxième gamme de températures est inférieure
30 d'environ 8 à 14 % à la première gamme de températures.

La durée de cette deuxième étape est de l'ordre de 1h à 5h, de préférence 1h à 3h. En effet, il apparaît qu'allonger le temps de séjour à ce deuxième palier n'apporte pas de modifications significatives aux propriétés finales, et donc là encore il est économiquement plus intéressant de réduire ce temps.

5 Le refroidissement entre les deux paliers de mise en solution est réalisé de façon à passer progressivement de la température la plus élevée à la température la plus basse en une durée comprise entre 30 minutes et 3 heures 30 minutes. De préférence, et ici encore pour des raisons principalement économiques, cette durée est comprise entre 1 heure et 2 heures 30 minutes.

10 Après ce deuxième palier de mise en solution à plus basse température, on applique une trempe selon les conditions habituelles, par exemple une trempe à l'eau.

On réalise enfin un revenu destiné à développer la précipitation durcissante de l'alliage. Ce revenu peut être choisi dans les gammes habituelles de température et de durée ; selon les propriétés recherchées il peut s'agir d'un sous-revenu, d'un
15 revenu au pic de résistance ou d'un sur-revenu.

La température du deuxième palier de mise en solution, choisie comme déterminé plus haut, permet d'aboutir à ce que les propriétés de résistance à la traction de l'alliage ainsi traité diminuent d'environ 10 à 40%, et de préférence d'environ 15 à 35%, par rapport aux propriétés qui seraient obtenues avec une mise
20 en solution unique à la première température et pendant une durée égale aux durées cumulées des deux paliers (incluse la phase de refroidissement du premier palier vers le deuxième palier), et en gardant les mêmes conditions de trempe et de revenu.

En pratique, on vise à réaliser, par rapport à un traitement thermique classique mono-palier, un compromis amélioré entre les propriétés de résistance à la
25 traction, d'allongement et d'indice de qualité. Plus particulièrement, on a constaté qu'il était préférable de se placer dans la zone de réduction de propriétés de 15 à 35% si l'on souhaitait optimiser le compromis résistance/allongement tout en bénéficiant d'une aptitude à l'usinage améliorée.

Par ailleurs, on a également constaté que cette mise en solution à deux
30 paliers réduisait très significativement les contraintes résiduelles présentes dans la pièce après la fin du traitement thermique. Ceci peut présenter des avantages

significatifs sur la tenue des pièces, notamment des culasses de moteurs à combustion, très fortement sollicitées.

On va maintenant illustrer l'invention par les exemples suivants :

5 1) Comparaison entre l'invention et l'art antérieur quant à l'impact sur le compromis résistance/allongement et sur la microstructure

Une culasse en AlSi7%Mg0.4% de deuxième fusion coulée en basse pression, dont le poids est de 18kg environ, et qui subit un traitement thermique de
10 l'art antérieur (mise en solution à la température maximale, trempe et revenu) présente des difficultés à l'usinage : les copeaux de forage de taille importante tendent à s'enrouler autour des outils de coupe (ou encore restent dans les circuits d'huile par exemple). Leur évacuation s'avère donc difficile. Ces difficultés d'usinage sont liées aux caractéristiques de l'alliage obtenues après ce traitement thermique
15 connu.

Plus précisément, après une mise en solution traditionnelle de 5 heures à 530°C suivie d'une trempe à l'eau de 90°C et d'un revenu de 5 heures à 200°C, les caractéristiques mécaniques obtenues sur la culasse sur sa face de culbuterie sont les suivantes :

20

	Résistance à la rupture	341 MPa
	Limite d'élasticité à 0.2% de déformation	298 MPa
	Allongement plastique	2,17 %
	Dureté Brinell	112
25	Indice de qualité	391 MPa

La microstructure typique après le traitement thermique habituel révèle :

- un silicium globulisé par le séjour à haute température, comme le montre la figure 1 des dessins, et

30 - une mise en solution optimale, c'est-à-dire qu'aucun composé Mg₂Si n'est observé hors solution.

On réalise maintenant sur une culasse identique, en lieu et place du traitement thermique connu, un traitement thermique comprenant une mise en solution à un premier palier de température de 530°C pendant 2 heures puis à un deuxième palier de 465°C pendant 2 heures, en laissant 1 heure à la charge pour
 5 passer de la première température à la deuxième. puis d'une trempe à l'eau à 90°C et d'un revenu de 5 heures à 200°C.

Les caractéristiques mécaniques du matériau deviennent les suivantes :

	Résistance à la rupture	231 MPa	(-32 %)
10	Limite d'élasticité à 0.2% de déformation	207 MPa	(-30 %)
	Allongement plastique	4.64 %	(+114 %)
	Dureté Brinell	90	(-20 %)
	Indice de qualité	331 MPa	(-15%)

15 La résistance à la rupture, la limite d'élasticité et la dureté, avec le traitement selon l'invention, diminuent de 20 à 32%. Cette diminution se fait au profit d'une augmentation très forte de l'allongement plastique (c'est-à-dire allongement à la rupture) (+114%).

Sur le plan de la microstructure, le traitement thermique selon la présente
 20 invention révèle la présence de silicium globulisé par la mise en solution à haute température, comme l'illustre la figure 2 des dessins, tout en obtenant l'abattement de résistances ou de dureté par rapport à la mise en solution classique.

2) Impact de la température du deuxième palier

25

Une mise en solution en deux paliers avec une deuxième température abaissée par rapport à l'exemple précédent, à savoir 450°C et 400°C respectivement, a été réalisée dans le cadre de la recherche d'une deuxième température optimale. Dans les deux cas, la mise en solution à 530°C s'effectuait pendant 2 heures, et la
 30 mise en solution à 450 ou 400°C selon le cas s'effectuait pendant 3 heures, avec une durée de 90 ou de 120 minutes pour atteindre la deuxième température.

Ici encore, la mise en solution a été suivie d'une trempe à l'eau à 90°C et d'un revenu de 5 heures à 200°C.

Mais de telles températures plus basses du deuxième palier se sont révélées causer une trop grande baisse des caractéristiques mécaniques, comme l'illustre le
5 tableau ci-dessous :

<u>Mise en solution à deux paliers, 530°C puis</u>		<u>450°C</u>	<u>400°C</u>
	Résistance à la rupture (MPa)	207 (-39%)	169 (-50%)
	Limite d'élasticité à 0.2% de déformation (MPa)	151 (-49%)	97 (-67%)
10	Allongement plastique (%)	4.22 (+94%)	8.41 (+288%)
	Dureté Brinell	70 (-37%)	61 (-45%)

3) Impact de la première étape à température élevée sur la microstructure

15 En utilisant une pièce moulée avec un alliage du type précité, modifié au strontium, on a réalisé le traitement thermique de mise en solution à deux paliers selon l'invention, ainsi qu'une mise en solution avec un palier unique à la température de 465°C. Dans le premier cas, le séjour à haute température amène le silicium à se globuliser, comme le montre la figure 3, alors que dans le deuxième cas
20 il n'y a pas de globulisation, comme le montre la figure 4.

4) Impact de l'existence de deux paliers sur les caractéristiques mécaniques

25 Les caractéristiques mécaniques sont également affectées par le type de mise en solution réalisé, en étant meilleures après une mise en solution à deux paliers.

Ainsi le diagramme illustré sur la figure 5 des dessins représente les compromis entre les résistances mécaniques (résistance à la rupture R_m et limite d'élasticité R_p à 0,2% de déformation, en MPa) et l'allongement à rupture (en %) après traitement thermique à un seul ou à deux paliers, en fonction de la température
30 du palier unique ou de celle du deuxième palier. Les carrés (cas de l'invention) et les

triangles (cas d'un traitement thermique à un seul palier) correspondent à différentes températures, comme indiqué.

Sur la figure 5, la trajectoire en trait continu T1 montre l'évolution du couple (résistance à la rupture, allongement) en fonction de la deuxième température d'une mise en solution à deux paliers, tandis que la trajectoire en trait continu T2 montre l'évolution des mêmes caractéristiques en fonction de la température d'une mise en solution à un seul palier. La trajectoire en pointillés T3 montre quant à elle l'évolution du couple (limite d'élasticité, allongement) en fonction de la deuxième température d'une mise en solution à deux paliers, tandis que la trajectoire en pointillés T4 montre l'évolution des mêmes caractéristiques en fonction de la température d'une mise en solution à un seul palier.

On a également représenté sur la figure 5 en liaison avec les courbes T1 et T3 obtenues selon l'invention, les diminutions de 10% et 40% de la résistance correspondant à un domaine de l'invention, ainsi que les diminutions de 15% et 35% correspondant à un domaine particulièrement préféré (domaine hachuré) de l'invention.

En outre, la figure 5 montre, de par les positions relatives des courbes T1 et T3 par rapport aux courbes T2 et T4, respectivement, qu'un traitement de mise en solution à deux paliers présente un compromis résistance/ allongement à rupture supérieur au même matériau soumis à un traitement thermique à un seul palier, et ceci quelque soit le niveau de la température de ce palier unique.

5) Essais d'usinabilité

Pour étudier l'impact de l'invention sur l'usinabilité, on a réalisé deux essais, l'un sur une culasse de référence réalisée selon l'art antérieur (traitement mono-palier à 530°C pendant 5 heures) comme décrit au point 1) plus haut, et avec le même alliage, et l'autre sur une culasse réalisée toujours avec le même alliage et traitée thermiquement avec deux paliers de température conformément à l'invention, à savoir pendant 2 h à 530°C et pendant 2 h à 465°C, avec un refroidissement intermédiaire pendant 1 h.

Dans les deux cas, la mise en solution a été suivie d'une trempe à l'eau à 90°C puis d'un revenu de 5 heures à 190°C.

On constate que l'usinabilité des culasses traitées selon l'invention est facilitée. A titre indicatif, on a caractérisé la plus grande facilité à usiner par une
 5 réduction de la longueur moyenne du copeau et d'une forte augmentation de la masse volumique moyenne – qui traduisent une meilleure aptitude à la fragmentation du copeau – selon le tableau ci-dessous :

	longueur moyenne des copeaux	masse volumique moyenne
Référence :	2.6 cm	0,11 g/ cm ³
Selon l'invention :	2 populations : 0,7 cm* et 2,2 cm	(mesure sur population non triée) 0,64 g/ cm ³

* population majoritaire

10

Bien entendu, la présente invention n'est nullement limitée aux formes de réalisation décrites et représentées, mais l'homme du métier saura y apporter de nombreuses variantes et modifications.

En particulier, l'homme du métier saura faire varier le profil exact de
 15 l'évolution de la température au cours du traitement thermique de mise en solution, avec notamment plus de deux paliers, ou encore des paliers dans lesquels la température peut évoluer dans une certaine gamme.

En outre, l'homme du métier saura adapter les différents paramètres en fonction principalement mais non exclusivement :

20

- du type d'alliage utilisé,
- du poids et/ou du volume de la pièce,
- de l'application envisagée,
- du type d'usinage à effectuer, etc.

REVENDICATIONS

1. Procédé de traitement thermique d'une pièce de fonderie réalisée en alliage d'aluminium, notamment en alliage d'aluminium, de silicium et de magnésium, et le cas échéant de cuivre, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :
 - (a) mise en solution de la pièce dans une première gamme de températures pendant une première durée,
 - (b) refroidissement progressif de la pièce jusqu'à une deuxième température comprise dans une deuxième gamme de températures inférieure à la première,
 - (c) poursuite de la mise en solution de la pièce en la maintenant dans la deuxième gamme de températures pendant une deuxième durée,
 - (d) trempe de la pièce, et
 - (e) revenu de la pièce.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la deuxième gamme de températures est choisie de manière à ce que l'alliage traité présente une résistance à la traction diminuée d'environ 10% à 40%, et de préférence d'environ 15% à 35%, par rapport à la résistance à la traction qui serait obtenue avec une mise en solution unique dans la première gamme de températures et pendant une durée égale aux première et deuxième durées cumulées.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la deuxième gamme de températures est inférieure à la première gamme de températures d'environ 8 à 14 %.
4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que pour un alliage à faible teneur en cuivre, la première gamme de températures est comprise entre environ 510°C et 550°C, et de préférence entre environ 520°C et 540°C.
5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que la première durée est comprise entre environ 1h et 4h, et de préférence entre environ 1h et 2h.

6. Procédé selon l'une des revendications 4 et 5, caractérisé en ce que la deuxième gamme de températures est comprise entre environ 455°C et 485°C, et de préférence entre environ 460°C et 480°C.
- 5
7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que la deuxième durée est comprise entre environ 1h et 5h, et de préférence entre environ 1h et 3h.
8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que la durée de l'étape (b) est supérieure ou égale à environ 0h30, et de préférence comprise entre environ 1h et 2h30.
- 10
9. Pièce de fonderie en alliage à base d'aluminium, notamment en alliage d'aluminium, de silicium et de magnésium et le cas échéant de cuivre, avec notamment une teneur en cuivre inférieure à environ 1% en poids, présentant une aptitude à l'usinage améliorée, caractérisée en ce qu'elle présente :
- 15
- une résistance à la traction comprise entre environ 220 Mpa et 300 Mpa,
 - une limite d'élasticité à 0,2% de déformation comprise entre environ 170 Mpa et 270 Mpa,
 - 20 - une dureté Brinell comprise entre environ 75 et 110.

1/3

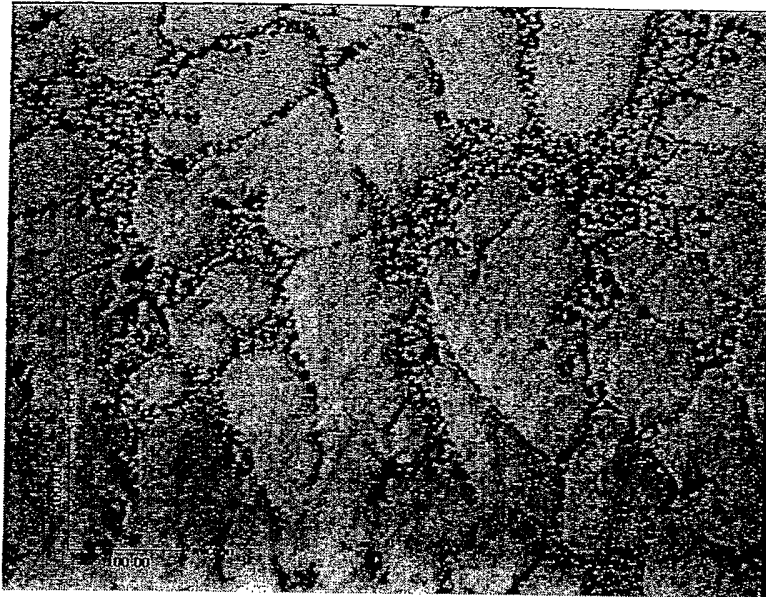


FIG. 1

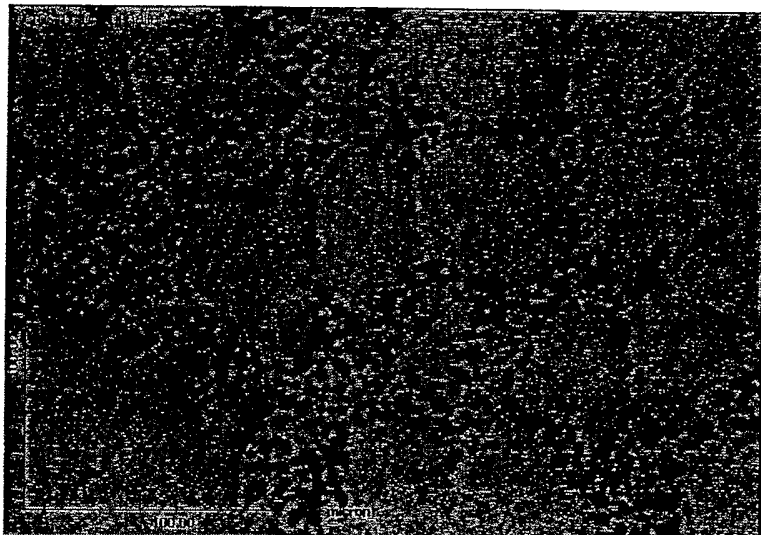


FIG. 2

2/3

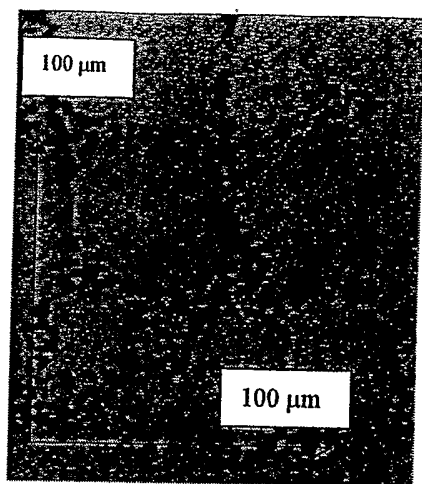


FIG. 3

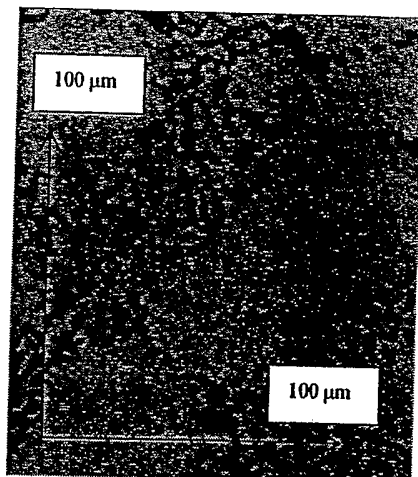


FIG. 4

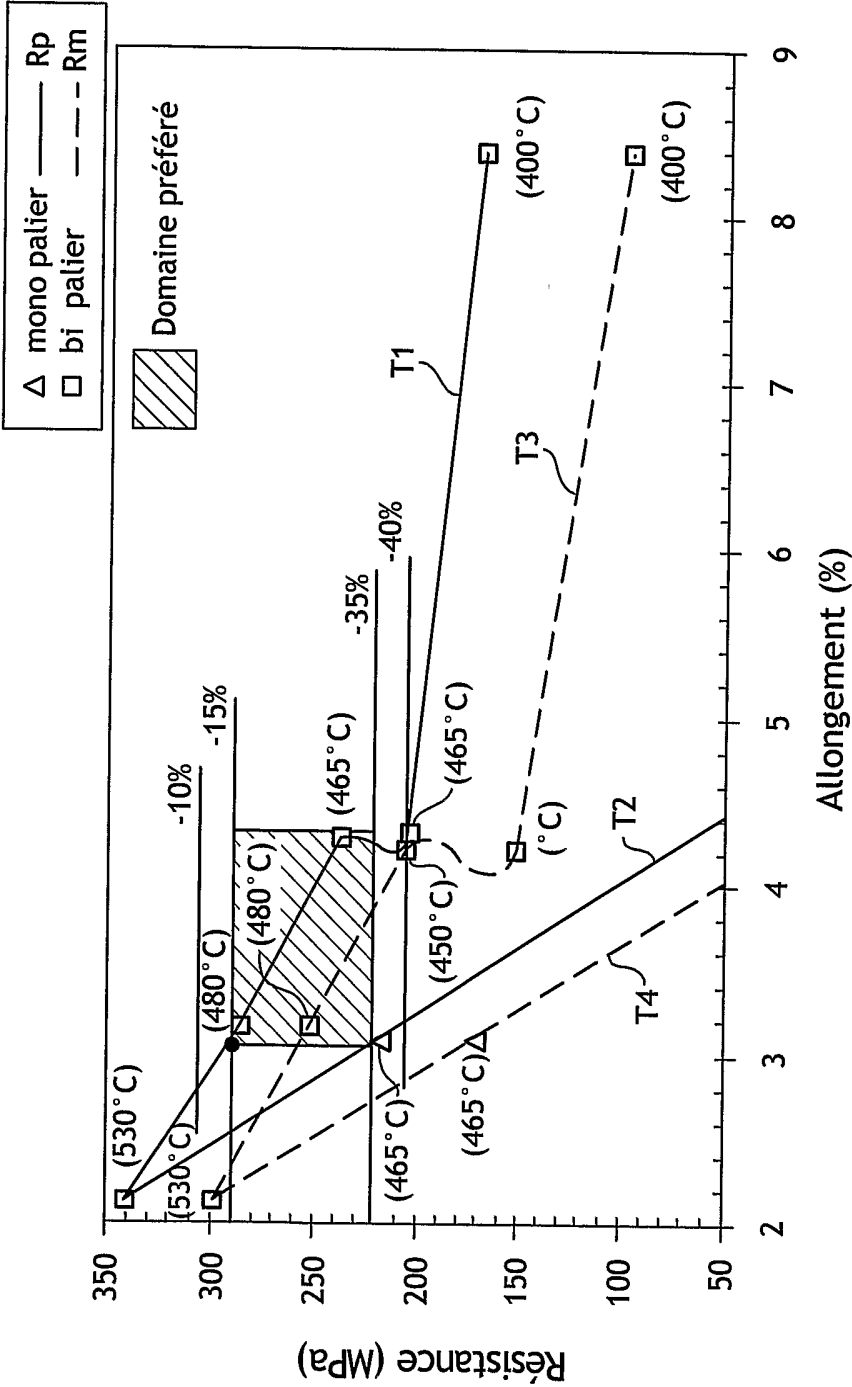


FIG.5