



(11)

EP 3 706 934 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
27.10.2021 Bulletin 2021/43

(51) Int Cl.:
B22D 13/06 (2006.01) **B22D 27/02** (2006.01)
B22D 21/00 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **18804376.4**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2018/052736

(22) Date de dépôt: **06.11.2018**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2019/092354 (16.05.2019 Gazette 2019/20)

(54) DISPOSITIF ET PROCÉDÉ DE FABRICATION D'UNE ÉBAUCHE EN ALLIAGE MÉTALLIQUE PAR COULÉE CENTRIFUGE

VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINES
METALLLEGIERUNGSROHLINGS DURCH SCHLEUDERGIESSEN

DEVICE AND METHOD FOR MANUFACTURING A METAL ALLOY BLANK BY CENTRIFUGAL
CASTING

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

(56) Documents cités:
**CN-A- 1 796 023 CN-A- 100 999 804
FR-A1- 3 017 062 FR-A1- 3 019 561
JP-A- 2001 096 350 US-A1- 2017 173 677**

(30) Priorité: **07.11.2017 FR 1760453**

(43) Date de publication de la demande:
16.09.2020 Bulletin 2020/38

(73) Titulaire: **Safran Aircraft Engines
75015 Paris (FR)**

(72) Inventeur: **FERRER, Laurent
77550 Moissy-Cramayel (FR)**

(74) Mandataire: **Cabinet Beau de Loménie
158, rue de l'Université
75340 Paris Cedex 07 (FR)**

- **YANG Y ET AL: "SOLIDIFICATION OF ALLOYS IN ELECTROMAGNETIC FIELD", ZEITSCHRIFT FÜR METALLKUNDE, CARL HANSER, MUNICH, DE, vol. 91, no. 4, 1 avril 2000 (2000-04-01), pages 280-284, XP000931909, ISSN: 0044-3093, DOI: 10.1007/BF01111228**
- **WU X Q ET AL: "STRUCTURE CHARACTERISTICS IN INDUSTRIALLY CENTRIFUGALLY CAST 25CR20NI STAINLESS STEEL TUBES SOLIDIFIED UNDER DIFFERENT ELECTROMAGNETIC FIELD INTENSITY", JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, ASM INTERNATIONAL, MATERIALS PARK, OH, US, vol. 8, no. 5, 1 octobre 1999 (1999-10-01), pages 525-530, XP000877762, ISSN: 1059-9495, DOI: 10.1361/105994999770346549**

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

EP 3 706 934 B1

Description

Arrière-plan de l'invention

[0001] La présente invention concerne la fabrication d'ébauches en alliage métallique par coulée centrifuge d'un alliage métallique en fusion, et notamment d'ébauches d'aube pour turbomachine, en particulier d'aube pour turboréacteur aéronautique.

[0002] La figure 1 représente un dispositif de fabrication connu pouvant être utilisé pour cette fabrication. Le dispositif de fabrication 100 comprend, dans une enceinte 150 fermée et étanche, un creuset 110 et une roue de coulée centrifuge 120.

[0003] Le creuset 110 est adapté pour effectuer la fusion de l'alliage métallique, qui est par exemple fourni sous la forme d'un lingot d'alliage métallique 116. Une fois cette fusion effectuée, l'alliage métallique en fusion est versé dans la roue de coulée centrifuge 120.

[0004] La roue de coulée centrifuge 120 est rotative autour d'un axe de rotation A et comprend un moule 122 pour recevoir l'alliage métallique en fusion. Le moule 122 s'étend dans une direction radiale R par rapport à l'axe de rotation A. On pourra se référer par exemple au document FR 3 017 062 A1 pour la construction du moule 122.

[0005] La roue de coulée centrifuge 120 est mise en rotation autour de son axe de rotation A. Durant cette rotation, l'alliage métallique en fusion est entraîné rapidement par la force centrifuge au fond du moule 122. La vitesse de rotation de la roue de coulée centrifuge 120 est choisie de telle sorte que cette force centrifuge est nettement supérieure à la force de gravité. L'alliage métallique en fusion se solidifie progressivement, à une vitesse de solidification inférieure à la vitesse de remplissage du moule 122 ; ainsi, la solidification s'effectue sur l'ensemble du moule 122, jusqu'à obtenir l'ébauche en alliage métallique désirée. L'ébauche en alliage métallique est ensuite extraite du moule 122, et peut par la suite subir des étapes industrielles ultérieures (traitements thermiques, usinage, forgeage...) pour aboutir à une pièce finale.

[0006] L'étape de fonderie qui vient d'être décrite présente l'avantage de diminuer la porosité due au retrait de l'alliage métallique lors de la solidification de l'ébauche en alliage métallique. Cependant, elle présente aussi des inconvénients, que l'on comprendra en se reportant aux figures 2 et 3.

[0007] La figure 2 représente schématiquement l'ébauche métallique solidifiée en coupe selon le plan C-C de la figure 1 et permet d'en observer la microstructure métallurgique (les parois du moule 122 et de la roue centrifuge 120 ont été omises pour simplifier le dessin).

[0008] Au niveau de son centre, l'ébauche métallique solidifiée 146 présente une région centrale B1, constituée de grains grossièrement équiaxes.

[0009] Près de ses parois, l'ébauche 146 présente une « peau » B3 constituée de grains équiaxes de plus faibles

dimensions que dans la région centrale B1.

[0010] Entre la région centrale B1 et la « peau » B3, l'ébauche 146 présente une région intermédiaire B2 constituée de grains colonnaires (aussi connus sous la dénomination de grains basaltiques). Cette région intermédiaire B2 est mieux visible sur les figures 3A et 3B, qui sont des photographies de coupes selon la direction radiale R de deux ébauches métalliques en TA6V (alliage à base de titane comprenant en masse 6% d'aluminium et 4% de vanadium) obtenues selon le procédé qui vient d'être décrit, et où les régions B1, B2 et B3 ont été indiquées.

[0011] Les grains colonnaires de la région intermédiaire B2 induisent une très forte anisotropie, qui est problématique pour les étapes industrielles ultérieures.

[0012] Notamment, lorsque l'on souhaite usiner l'ébauche, puisque les propriétés mécaniques et dynamiques de l'ébauche dans la région intermédiaire B2 sont très différentes selon la direction considérée (perpendiculairement à l'axe des grains colonnaires ou parallèlement à leur axe), les réponses du matériau aux efforts de l'usinage diffèrent en fonction de l'angle de coupe par rapport à l'axe des grains colonnaires. Par ailleurs, les relaxations des contraintes de l'usinage sont également anisotropes.

[0013] L'usinage de l'ébauche doit être conçu pour tenir compte des facteurs qui précèdent, ce qui tend à le complexifier.

[0014] Les pièces que l'on souhaite réaliser par usinage de l'ébauche doivent aussi être dimensionnées pour tenir compte des facteurs qui précèdent, ce qui conduit fréquemment à une utilisation non-optimale du matériau de l'ébauche.

[0015] De plus, les directions des axes des grains colonnaires peuvent varier d'une région de l'ébauche à l'autre (ce que l'on voit par exemple sur la figure 3B) : dans ce cas, les propriétés mécaniques et dynamiques de l'ébauche, même dans une direction considérée, peuvent différer d'une région à l'autre d'une même ébauche et/ou d'une ébauche à l'autre. La conception de l'usinage est alors encore plus complexe. Il se peut même que certaines des ébauches soient totalement inutilisables pour l'usinage, auquel cas elles doivent être rebutées.

[0016] On voit donc que la fabrication par coulée centrifuge décrite ci-dessus n'est pas avantageuse du point de vue économique et industriel lorsque les ébauches doivent être usinées par la suite.

[0017] De plus, puisque l'ébauche présente une microstructure métallurgique complexe et variée, ses propriétés d'emploi (notamment mécaniques) sont très dispersées. Les pièces fabriquées à partir de cette ébauche doivent être dimensionnées en conséquence, ce qui tend à les alourdir. Ceci est particulièrement indésirable lorsque la pièce à fabriquer est une aube pour turboréacteur aéronautique, car de telles aubes doivent être le plus légères possible dans l'intérêt des performances du turboréacteur.

[0018] Par ailleurs, l'anisotropie induite par les grains

colonnaires de la région intermédiaire B2, et les interfaces entre la région intermédiaire B2 à grains colonnaires et les régions B1 et B3 à grains équiaxes, rendent très difficiles, voire même impraticables, des opérations simples de mise en forme à chaud de l'ébauche, telles que le forgeage, le laminage ou l'extrusion. Or, ces opérations peuvent apporter de nouvelles propriétés mécaniques au matériau de l'ébauche. Il existe donc un besoin d'un nouveau procédé de fabrication d'une ébauche en alliage métallique par coulée centrifuge qui permette de diminuer l'anisotropie de l'ébauche et de simplifier et rendre moins coûteuses les opérations ultérieures à effectuer sur l'ébauche.

[0019] Les documents brevet CN 1 796 023 A, CN 100 999 804 A et JP 2001-096350 A, et les articles Yang et al., "Solidification of Alloys in Electromagnetic Field", Zeitschrift für Metallkunde, Carl Hanser, Munich, DE, vol. 91, no. 4, 2000-04-01, pages 280-284, XP000931909, et Wu et al., "Structure Characteristics in Industrially Centrifugally Cast 25Cr20Ni Stainless Steel Tubes Solidified under Different Electromagnetic Field Intensity", Journal of Materials Engineering and Performance, ASM International, Materials Park, OH, US, vol. 8, no. 5, 1999-10-01, pages 525-530, XP000877762, divulguent d'autre part des dispositifs de coulée dans lesquels le moule lui-même est entraîné en rotation autour de son propre axe.

[0020] US-A2017/173 677 divulgue un dispositif avec toutes les caractéristiques techniques selon la préambule de la revendication présente 1 ainsi qu'un procédé de fabrication d'une ébauche en alliage métallique avec les caractéristiques techniques de la préambule de la revendication présente 10.

Objet et résumé de l'invention

[0021] Pour répondre au moins partiellement à ce besoin, la présente invention fournit un dispositif de fabrication d'une ébauche en alliage métallique par coulée centrifuge d'un alliage métallique en fusion, comprenant une roue de coulée centrifuge, la roue de coulée centrifuge étant rotative autour d'un axe de rotation et comprenant un moule pour recevoir l'alliage métallique en fusion, le moule s'étendant dans une direction radiale par rapport à l'axe de rotation, le dispositif comprenant au moins un aimant arrangé de manière à induire un courant électrique dans le moule lors de la rotation de la roue de coulée centrifuge autour de l'axe de rotation.

[0022] Le courant électrique induit par l'aimant crée une force de Laplace qui tend à brasser l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule. Grâce à ce brassage, l'ébauche en alliage métallique présente, après solidification, une macrostructure homogène, quasiment dépourvue de grains colonnaires, et donc quasiment isotrope, ce qui élimine les inconvénients décrits plus haut.

[0023] De plus, grâce à ce brassage, l'ébauche ne présente quasiment aucune porosité résiduelle après refroidissement. On évite ainsi de devoir faire subir à l'ébauche

une étape de compression isostatique à chaud (« Hot Isostatic Pressing » ou HIP en anglais), étape qui permet également de résorber ces porosités résiduelles mais présente l'inconvénient d'être longue et très coûteuse.

[0024] Selon une possibilité, la roue de coulée centrifuge comprend un bobinage entourant un volume intérieur du moule et configuré de telle sorte que l'aimant induise un courant électrique dans le bobinage lors de ladite rotation de la roue de coulée centrifuge autour de l'axe de rotation.

[0025] De cette manière, un courant induit est généré non seulement dans l'alliage métallique en fusion (et éventuellement dans la structure de la roue de coulée centrifuge), mais aussi dans le bobinage. La force de Laplace s'exerçant sur l'alliage métallique en fusion est plus intense. Il en résulte que le brassage de l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule est plus intense, ce qui améliore encore l'homogénéité de l'ébauche en alliage métallique. On notera par ailleurs qu'il n'est pas nécessaire de raccorder le bobinage à une source d'électricité, puisqu'un courant induit est généré à distance dans le bobinage. Ceci évite de prévoir un raccordement particulier du bobinage à une source d'électricité non solidaire de la roue de coulée centrifuge, qui serait complexe du point de vue mécanique (risque de blocage de la roue de coulée centrifuge par les fils d'alimentation).

[0026] Selon une possibilité, l'aimant est un aimant annulaire ou circulaire dont l'axe est parallèle à l'axe de rotation.

[0027] De cette manière, le champ magnétique généré par l'aimant est sensiblement uniforme sur l'ensemble du volume balayé par le moule lors de la rotation de la roue de coulée centrifuge.

[0028] Selon une possibilité, le dispositif comprend une pluralité d'aimants disposés de façon espacée autour de l'axe de rotation.

[0029] De cette manière, le champ magnétique agissant sur le moule varie lors de la rotation de la roue de coulée centrifuge. Il s'ensuit que le courant électrique induit dans le moule, et donc la force de Laplace s'exerçant sur l'alliage métallique en fusion, est variable lors de la rotation de la roue de coulée centrifuge, ce qui améliore le brassage de l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule.

[0030] Selon une possibilité, les aimants sont en nombre pair, et les polarités desdits aimants alternent régulièrement autour de l'axe de rotation.

[0031] De cette manière, le champ magnétique agissant sur le moule change périodiquement de sens lors de la rotation de la roue de coulée centrifuge, ce qui améliore encore le brassage de l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule.

[0032] Selon une possibilité, l'aimant est non solidaire de la roue de coulée centrifuge, et le dispositif comprend en outre un aimant permanent solidaire de la roue de coulée centrifuge et s'étendant en partie à travers le bobinage.

[0033] Selon une possibilité, l'aimant est un aimant an-

nulaire ou circulaire dont l'axe est parallèle à l'axe de rotation.

[0034] Selon une possibilité, les pôles de l'aimant permanent et de l'aimant se faisant face ont des noms contraires.

[0035] De cette manière, le champ magnétique agissant sur le moule est quasiment uniforme au niveau du bobinage. Ceci augmente l'intensité du courant électrique induit par l'aimant dans le bobinage, et donc du brassage de l'alliage métallique en fusion.

[0036] Selon une possibilité, le dispositif comprend une pluralité d'aimants non solidaires de la roue de coulée centrifuge et disposés de façon espacée autour de l'axe de rotation.

[0037] Selon une possibilité, les aimants non solidaires de la roue de coulée centrifuge sont en nombre pair, et les polarités desdits aimants alternent régulièrement autour de l'axe de rotation.

[0038] Selon une possibilité, l'axe de rotation est vertical.

[0039] De cette manière, le dispositif d'équilibrage de la roue de coulée centrifuge est plus simple. La construction et le fonctionnement du dispositif sont donc simplifiés. En outre, le brassage de l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule est moins perturbé. En effet, lors de la rotation de la roue, l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule est soumis à la force centrifuge et à la force de gravité. La force centrifuge est toujours radiale à l'axe de rotation. Si l'axe de rotation est vertical, la direction de la force de gravité ne varie pas non plus lors de la rotation de la roue, de sorte que le brassage est moins perturbé.

[0040] Selon une possibilité, la direction radiale est parallèle à l'horizontale.

[0041] De cette manière, la construction de la roue de coulée centrifuge est plus simple, en particulier si l'axe de rotation est vertical.

[0042] La présente invention fournit également un procédé de fabrication d'une ébauche en alliage métallique, comprenant les étapes suivantes :

- fusion de l'alliage métallique ;
- versage de l'alliage métallique en fusion dans une roue de coulée centrifuge, la roue de coulée centrifuge étant rotative autour d'un axe de rotation et comprenant un moule pour recevoir l'alliage métallique en fusion, le moule s'étendant dans une direction radiale par rapport à l'axe de rotation ;
- rotation de la roue de coulée centrifuge autour de son axe de rotation et solidification de l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule, de manière à obtenir l'ébauche en alliage métallique ; et
- extraction de l'ébauche en alliage métallique du moule,

dans lequel, pendant l'étape de rotation, on applique un champ magnétique au moule, de manière à induire un

courant électrique dans le moule.

[0043] Selon une possibilité, la roue de coulée centrifuge comprend un bobinage entourant un volume intérieur du moule, et, pendant l'étape de rotation, le champ magnétique induit un courant électrique dans le bobinage.

[0044] Le procédé selon l'invention procure les mêmes avantages que le dispositif selon l'invention.

[0045] Selon une possibilité, l'alliage métallique est un alliage à base de titane ou de nickel. Par « à base de titane » (respectivement « à base de nickel »), on entend que le titane (respectivement le nickel) est sensiblement, en masse, l'élément majoritaire de l'alliage.

[0046] Les alliages métalliques à base de titane ou de nickel sont parmi les alliages couramment utilisés pour réaliser des ébauches de pièces fortement sollicitées mécaniquement, telles que des aubes pour turbomachine, et plus particulièrement des aubes pour turboréacteur aéronautique.

[0047] Selon une possibilité, l'ébauche en alliage métallique est une ébauche d'aube pour turbomachine, en particulier d'aube pour turboréacteur aéronautique.

Brève description des dessins

[0048] L'invention sera bien comprise et ses avantages apparaîtront mieux, à la lecture de la description détaillée qui suit de plusieurs modes de réalisations, représentés à titre d'exemples non limitatifs. La description se réfère aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 représente schématiquement un dispositif de fabrication par coulée centrifuge connu ;
- la figure 2 représente schématiquement l'ébauche métallique solidifiée obtenue par le dispositif de la figure 1, en coupe selon le plan C-C de la figure 1 ;
- les figures 3A et 3B sont des photographies de coupes de deux ébauches métalliques obtenues par le dispositif de la figure 1, selon la direction R de la figure 1 ;
- la figure 4 représente schématiquement un dispositif de fabrication par coulée centrifuge selon l'invention ;
- la figure 5 est une vue partielle en perspective et écorchée du dispositif de la figure 4 ;
- la figure 6 est une vue de dessus de la roue de coulée centrifuge et de l'aimant, selon une autre variante de l'invention ;
- la figure 7 est une vue de dessus analogue à la figure 6, selon encore une autre variante de l'invention ;
- la figure 8 est une vue de dessus analogue à la figure 7, selon encore une autre variante de l'invention ;
- la figure 9 est en vue de côté d'une partie de la roue de coulée centrifuge, selon encore une autre variante de l'invention ;
- la figure 10 est une vue en perspective de la figure 9, représentant une première possibilité de mise en œuvre de la variante de la figure 9 ;

- la figure 11 est une vue en perspective de la figure 9, représentant une autre possibilité de mise en œuvre de la variante de la figure 9.

Description détaillée de l'invention

[0049] La figure 4 représente schématiquement un dispositif de fabrication 10 d'une ébauche en alliage métallique par coulée centrifuge d'un alliage métallique en fusion.

[0050] Le dispositif de fabrication 10 comprend, dans une enceinte 50 fermée et étanche, un dispositif de fusion 610, une roue de coulée centrifuge 20 (qu'on appellera dans la suite « la roue 20 » par commodité) et un aimant 40.

[0051] Le dispositif de fusion 610 est adapté pour fournir un alliage métallique en fusion. Dans un exemple, le dispositif de fusion 610 effectue la fusion d'un alliage métallique fourni sous la forme d'un lingot d'alliage métallique 616. Dans un autre exemple, les différents constituants de l'alliage métallique sont introduits individuellement dans le dispositif de fusion 610, puis fondus ensemble de manière à obtenir l'alliage métallique en fusion.

[0052] L'alliage métallique est choisi parmi les alliages adaptés pour la pièce finale à fabriquer à partir de l'ébauche.

[0053] Sans vouloir limiter la portée du présent exposé, l'alliage métallique peut être, par exemple, un alliage à base céramique, un acier, un alliage à base de titane, ou encore un alliage à base de nickel.

[0054] Parmi les alliages à base de titane, on envisage notamment :

- les alliages de titane conventionnels présentant une structure cristallographique identique à celle du titane pur, comme par exemple : TA6V, Ti-17, Ti 10-2-3, Ti-5553, β 16, β 21S ; et
- les alliages intermétalliques à base de titane, présentant une ou plusieurs phases de structures cristallographiques différentes de celle du titane pur.

[0055] Parmi les alliages intermétalliques à base de titane, on envisage particulièrement les aluminures de titane, parmi lesquels :

- les aluminures de titane à phases γ et α_2 colonnaire, tels que : le Ti-48Al-1V-0,3C, le Ti-48Al-2Cr-2Nb (aussi connu sous la désignation « GE 48-2-2 ») ou le Ti-48Al-2Nb-0,75Cr-0,3Si (aussi connu sous la désignation « Daido RNT650 ») ;
- les aluminures de titane à phases γ et α_2 équiaxe, tels que le Ti-45Al-2Nb-2Mn + 0,8TiB₂ (aussi connu sous la désignation « Howmet 45XD »), le Ti-47Al-2Nb-2Mn + 0,8TiB₂ (aussi connu sous la désignation « Howmet 47XD »), le Ti-47Al-2W-0,5Si-0,5B (aussi connu sous la désignation « ABB-23 ») ou le Ti-48Al-1,3Fe-1,1V-0,3B ;

- les aluminures à phases β , γ et α_2 équiaxe, tels que le Ti-47,3Al-2,2Nb-0,5Mn-0,4W-0,4Mo-0,23Si, le Ti-46,5Al-3Nb-2Cr-0,2W-0,2Si-0,1C (aussi connu sous la désignation « K5SC »), le Ti-46Al-5Nb-1W, le Ti-47Al-3,7(Cr,Nb,Mn,Si)-0,5B (aussi connu sous la désignation « GKSS-TAB »), le Ti-45Al-8(Nb,B,C) (aussi connu sous la désignation « GKSS TNB »), le Ti-46,5Al-1,5Cr-2Nb-0,5Mo-0,13B-0,3C (aussi connu sous la désignation « 395M »), le Ti-46Al-2,5Cr-1Nb-0,5Ta-0,01B (aussi connu sous la désignation « Plansee γ -MET »), le Ti-47Al-1Re-1W-0,2Si (aussi connu sous la désignation « Onera G4 »), le Ti-43Al-9V-0,3Y, le Ti-42Al-5Mn, le Ti-43Al-4Nb-1Mo-0,1B, ou le Ti-45Al-4Nb-4Ta.

[0056] On précise que dans la liste ci-dessus, toutes les valeurs numériques désignent le pourcentage atomique (at%) de l'élément qu'elles précèdent. Ainsi, l'alliage Ti-48Al-2Cr-2Nb comprend, en pourcentage atomique, 48% d'Al, 2% de Cr, 2% de Nb, et du titane (Ti) en complément à 100%.

[0057] Parmi les alliages à base de nickel, on envisage notamment les alliages de nickel conventionnels tels que le René 77 ou DS 200, ou encore les superalliages de nickel tel que le AM1.

[0058] Le dispositif de fusion 610 peut être, par exemple :

- un four de fusion par arc électrique d'une électrode métallique dans un creuset froid sous vide ou sous pression réduite, dénommé plus couramment par les termes anglais « Vacuum Arc Remelting (VAR) furnace » ou « Skull VAR furnace » ;
- un four de fusion par induction sous vide ou sous pression réduite, dénommé plus couramment par le terme anglais « Vacuum Induction Melting (VIM) furnace » ;
- un four de fusion par torches plasma sous pression réduite, dénommé plus couramment par le terme anglais « Plasma Arc Melting (PAM) furnace » ;
- un four de fusion par bombardement électronique sous vide, dénommé plus couramment par le terme anglais « Electronic Bombardment (EB) furnace » ;
- ou une combinaison de ceux-ci.

[0059] Selon le type de dispositif de fusion 610 choisi, l'enceinte 50 est commandée pour fournir l'atmosphère requise :

- vide ; ou
- pression réduite et commandée d'un gaz inerte vis-à-vis de l'alliage métallique ; ou
- pression réduite et commandée d'un gaz réagissant avec l'alliage métallique, afin de modifier la composition chimique de l'alliage métallique pendant sa fusion.

[0060] L'alliage métallique en fusion sortant du dispo-

sitif de fusion 610 est versé dans la roue 20.

[0061] La roue 20 comprend un moyeu 30 au moins un moule 22 fixé au moyeu 30.

[0062] Le moyeu 30 comprend un canal central 32 et plusieurs canaux d'amenée 33 communiquant chacun avec un moule 22.

[0063] Afin de faciliter le versage de l'alliage métallique en fusion, le moyeu 30 peut être pourvu d'un entonnoir 31 débouchant sur le canal central 32.

[0064] Le moyeu 30 est susceptible d'être entraîné en rotation autour d'un axe de rotation A, par exemple à l'aide d'un moteur (non représenté). Ainsi, la roue 20 est rotative autour de l'axe de rotation A.

[0065] Afin de simplifier le dispositif d'équilibrage de la roue 20, l'axe A est de préférence vertical.

[0066] La figure 5 montre en perspective un moule 22 fixé sur le moyeu 30 (l'entonnoir 31 a été omis pour ne pas surcharger le dessin).

[0067] Le moule 22 s'étend dans une direction radiale R1 par rapport à l'axe A (voir figure 4). De préférence, afin de simplifier la construction de la roue 20, cette direction radiale R1 est perpendiculaire à l'axe A. Ainsi, si l'axe A est vertical, la direction radiale R1 est parallèle à l'horizontale.

[0068] Le moule 22 est apte à recevoir l'alliage métallique en fusion, ici dans une cavité 22B. Pour cela, le moule 22 est typiquement réalisé dans un métal, un alliage métallique ou une céramique suffisamment résistants pour résister aux contraintes thermiques liées au contact avec l'alliage mécanique en fusion.

[0069] La cavité 22B peut présenter une section rectangulaire ou cylindrique. Cette section peut avantageusement être constante sur toute la longueur de la cavité 22B.

[0070] Selon la direction radiale R1, la cavité 22B présente typiquement une longueur nettement supérieure à la dimension maximale de sa section, par exemple au moins 3 fois, et de préférence au moins 5 fois plus grande que la dimension maximale de sa section. Après solidification, l'ébauche en alliage métallique a alors la forme générale d'un barreau.

[0071] La cavité 22B communique avec un canal d'amenée 33 via une amenée 22A, qui est éventuellement de section plus réduite que la cavité 22B.

[0072] Plusieurs moules 22 peuvent être fixés au moyeu 30 comme on peut le voir sur les figures 4 et 5. Par exemple, plusieurs moules 22 peuvent être espacés régulièrement autour de l'axe A. Les moules 22 peuvent également être superposés de manière à former plusieurs (deux sur les figures 4 et 5) niveaux de moules 22.

[0073] Les moules 22 peuvent être séparables du moyeu 30, de sorte qu'ils peuvent être remplacés individuellement et/ou séparés un à un du moyeu 30 afin d'en extraire l'ébauche en alliage métallique après solidification.

[0074] Comme on l'a mentionné plus haut, le dispositif de fabrication 10 comprend également au moins un aimant. Dans la suite, par commodité, on parlera de

« l'aimant », désigné par la référence 40 ; il est toutefois à noter que les caractéristiques présentées dans la suite en rapport avec l'aimant 40 peuvent s'appliquer à un seul, tous ou certains des aimants.

[0075] Dans la suite, le champ magnétique généré par l'aimant 40 est noté H.

[0076] Dans la présente description, « aimant » englobe aussi bien les aimants permanents que les électroaimants, sauf mention contraire.

[0077] Lorsque la roue 20 tourne autour de l'axe A (la direction de rotation D est indiquée sur les figures 6 à 11), le champ magnétique H induit un courant électrique dans le moule 22. Ce courant électrique est induit dans les parois 23 du moule 22 (tout particulièrement s'il est réalisé dans un métal ou un alliage métallique), et également dans l'alliage métallique en fusion contenu dans la cavité 22B. Ce courant électrique génère un champ magnétique induit dans le moule 22. Comme cela est connu, ce champ magnétique induit crée une force de Laplace.

[0078] Cette force de Laplace tend à brasser l'alliage métallique en fusion en cours de solidification dans la cavité 22B.

[0079] Le brassage de l'alliage métallique en fusion dans la cavité 22B a pour effets :

- à l'avant du front de solidification de l'alliage métallique (autrement dit dans sa partie encore en fusion), de permettre aux germes de grains de croître dans les trois dimensions, ce qui favorise la formation de grains équiaxes ;
- au niveau du front de solidification, de briser la pointe des éventuels grains colonnaires, ce qui défavorise la formation de grains colonnaires et a en plus l'avantage d'apporter de nouveaux germes de grains équiaxes.

[0080] On comprend donc que le brassage de l'alliage métallique en fusion favorise considérablement la formation de grains équiaxes par rapport à la formation de grains colonnaires. Par conséquent, l'ébauche en alliage métallique présente une macrostructure homogène, quasiment dépourvue de grains colonnaires, et donc quasiment isotrope, ce qui élimine les inconvénients discutés ci-dessus.

[0081] De plus, le brassage permet de constamment ré-homogénéiser la composition chimique de l'alliage métallique en fusion, aussi bien à l'avant du front de solidification qu'au niveau du front de solidification. Ceci permet d'éviter toute ségrégation locale, et par conséquent toute ségrégation positive alignée ou exsudation dans l'ébauche.

[0082] De plus, au niveau du front de solidification, le brassage permet d'améliorer l'alimentation en alliage métallique en fusion pendant le retrait de solidification. L'ébauche ne présente par conséquent quasiment aucune porosité résiduelle après refroidissement. On évite ainsi de devoir faire subir à l'ébauche une étape de com-

pression isostatique à chaud (« Hot Isostatic Pressing » ou HIP en anglais).

[0083] Le dispositif de fabrication 10 permet donc d'obtenir une ébauche métallique aux propriétés mécaniques et structurelles améliorées, qui peut être plus facilement usinée et/ou soumise à des opérations de mise en forme à chaud (forgeage, laminage, extrusion...). Par ailleurs, les opérations ultérieures à effectuer sur l'ébauche sont moins coûteuses, car l'étape de compression isostatique à chaud n'est plus nécessaire.

[0084] Afin de renforcer le brassage de l'alliage métallique en fusion, le moule 22 peut être pourvu d'un bobinage 60, que l'on voit sur la figure 5.

[0085] Le bobinage 60 comprend une, ou plus typiquement plusieurs, spires connectées électriquement entre elles. Les spires du bobinage 60 entourent un volume intérieur du moule 22. Dans l'exemple représenté sur la figure 5, ce volume intérieur est la cavité 22B toute entière. Il pourrait aussi s'agir d'une partie seulement de la cavité 22B.

[0086] Au sens de la présente description, le fait que les spires du bobinage 60 entourent un volume intérieur du moule 22 signifie que ledit volume intérieur est contenu dans le volume délimité par les spires du bobinage 60. Ainsi, les spires du bobinage 60 peuvent être noyées dans les parois 23 du moule 22 comme représenté sur la figure 5, ou bien disposées sur la surface extérieure des parois 23.

[0087] Lorsque la roue 20 tourne autour de l'axe A, un courant électrique I est induit dans le bobinage 60, en plus du courant induit dans les parois 23 du moule 22 et dans l'alliage métallique en fusion. La force de Laplace s'exerçant sur l'alliage métallique en fusion est donc plus intense, ce qui améliore le brassage de l'alliage métallique en fusion.

[0088] De préférence, les spires s'étendent parallèlement à la direction radiale R1. Ceci maximise l'aire balayée par le bobinage pendant la rotation de la roue 20, en particulier si la cavité 22B présente une longueur nettement supérieure à la dimension maximale de sa section comme expliqué ci-dessus.

[0089] Comme représenté sur la figure 6, l'aimant 40 peut être un aimant annulaire 40C dont l'axe est parallèle à l'axe A. Il peut également s'agir d'un aimant circulaire.

[0090] L'aimant 40C permet d'obtenir un champ magnétique H sensiblement uniforme sur l'ensemble du volume balayé par le moule 22 lors de la rotation de la roue 20.

[0091] De préférence, l'axe de l'aimant 40C est confondu avec l'axe A. Le champ magnétique H est alors davantage uniforme sur l'ensemble du volume balayé par le moule 22 lors de la rotation de la roue 20.

[0092] En variante, comme représenté sur la figure 7, le dispositif comprend une pluralité (ici trois) d'aimants 40-1, 40-2, 40-3 chacun arrangé de manière à induire un courant électrique dans le moule 22 et éventuellement dans le bobinage 60.

[0093] Les aimants 40-1, 40-2, 40-3 sont disposés de

façon espacée autour de l'axe A. En d'autres termes, entre les aimants 40-1, 40-2, 40-3, il existe des espaces dépourvus d'aimants. Par conséquent, le champ magnétique H varie selon la position angulaire du moule 22. Il s'ensuit que le courant électrique induit par l'aimant dans le moule 22, et donc la force de Laplace, dans le moule 22 est variable lors de la rotation de la roue 30, ce qui améliore le brassage de l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule 22.

[0094] De préférence, afin de simplifier la construction du dispositif de fabrication 10, les aimants 40-1, 40-2, 40-3 sont tous identiques.

[0095] Il est également préférable que les aimants 40-1, 40-2, 40-3 soient régulièrement espacés entre eux.

[0096] Les aimants 40-1, 40-2, 40-3 peuvent avoir la forme de segments annulaires dont l'axe est parallèle à l'axe A comme représenté sur la figure 7. Il peut également s'agir de segments circulaires. Comme dans la variante de la figure 6, il est préférable que l'axe des segments annulaires ou circulaires soit confondu avec l'axe A.

[0097] De préférence, comme représenté sur la figure 8, les aimants sont en nombre pair (ici, quatre aimants 40-1 à 40-4), et les polarités des aimants alternent régulièrement autour de l'axe A. En d'autres termes, en suivant le sens de rotation de la roue 20, le pôle des aimants 40-1 à 40-4 faisant face à la roue 20 est alternativement Nord, Sud, Nord, Sud,

[0098] Ainsi, le champ magnétique H s'appliquant au moule 22 change périodiquement de sens lors de la rotation de la roue 20, ce qui améliore encore le brassage de l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule 22. Si les aimants 40-1 à 40-4 sont régulièrement espacés et identiques, le champ magnétique H est alternatif.

[0099] Selon encore une autre variante représentée schématiquement sur la figure 9, le dispositif 10 comprend en outre un aimant permanent 40M solidaire de la roue 20. L'aimant 40 se présente quant à lui sous la forme d'un aimant 40S non solidaire de la roue 20. Typiquement, l'aimant 40S est fixe par rapport à l'enceinte 50. L'aimant permanent 40M s'étend en partie à travers le bobinage 60 du moule 22.

[0100] De préférence, les pôles de l'aimant permanent 40M et de l'aimant 40S se faisant face ont des noms contraires (c'est-à-dire que si l'un des pôles est Nord, l'autre est Sud). Ainsi, au niveau des spires situées entre l'aimant permanent 40M et l'aimant 40S, le champ magnétique H est quasiment uniforme, comme représenté schématiquement sur la figure 9. Ceci augmente l'intensité du courant électrique induit dans le bobinage 60 et donc l'intensité du brassage.

[0101] En outre, si les spires du bobinage 60 s'étendent parallèlement à la direction radiale R1, les lignes du champ magnétique H sont alignées avec les spires du bobinage, ce qui augmente encore l'intensité du courant induit dans le bobinage 60 et donc l'intensité du brassage.

[0102] Comme représenté sur la figure 10, l'aimant

40S peut être un aimant annulaire dont l'axe est parallèle à l'axe A. Il peut également s'agir d'un aimant circulaire.

[0103] Un tel aimant annulaire ou circulaire permet d'obtenir un champ magnétique H sensiblement uniforme sur l'ensemble du volume balayé par le moule 22 lors de la rotation de la roue 20. Comme représenté sur les figures 9 et 10, il est préférable que les pôles de l'aimant permanent 40M et de l'aimant annulaire ou circulaire 40S se faisant face aient des noms contraires.

[0104] En variante, comme représenté sur la figure 11, le dispositif comprend une pluralité (ici trois) d'aimants 40S-1, 40S-2, 40S-3 non solidaires de la roue 20 et chacun arrangé de manière à induire un courant électrique dans le moule 22 et éventuellement dans le bobinage 60.

[0105] Dans la variante représentée sur la figure 11, les aimants 40S-1, 40S-2, 40S-3 sont tels que leurs pôles ont tous un nom contraire à celui de l'aimant 40M auquel ils font face (c'est-à-dire que si les pôles des aimants 40S-1, 40S-2, 40S-3 sont Nord, le pôle de l'aimant 40M auquel ils font face est Sud).

[0106] Dans une autre variante (non représentée), les aimants non solidaires sont en nombre pair de la roue 20 sont en nombre pair, et les polarités desdits aimants alternent régulièrement autour de l'axe A. En d'autres termes, en suivant le sens de rotation de la roue 20, le pôle de ces aimants faisant face à la roue 20 est alternativement Nord, Sud, Nord, Sud,

[0107] Quoique la présente invention ait été décrite en se référant à des exemples de réalisation spécifiques, il est évident que des modifications et changements peuvent être effectués sur ces exemples sans sortir de la portée générale de l'invention telle que définie par les revendications.

Revendications

1. Dispositif de fabrication (10) d'une ébauche en alliage métallique par coulée centrifuge d'un alliage métallique en fusion, comprenant une roue de coulée centrifuge (20), la roue de coulée centrifuge (20) étant rotative autour d'un axe de rotation (A) et comprenant un moule (22) pour recevoir l'alliage métallique en fusion, le moule s'étendant dans une direction radiale (R1) par rapport à l'axe de rotation (A), le dispositif étant **caractérisé en ce qu'il** comprend au moins un aimant (40, 40S) arrangé de manière à induire un courant électrique dans le moule (22) lors de la rotation de la roue de coulée centrifuge (20) autour de l'axe de rotation (A).
2. Dispositif selon la revendication 1, dans lequel la roue de coulée centrifuge (20) comprend un bobinage (60) entourant un volume intérieur du moule (22) et configuré de telle sorte que l'aimant (40, 40S) induise un courant électrique dans le bobinage (60) lors de ladite rotation de la roue de coulée centrifuge (20) autour de l'axe de rotation (A).

3. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, dans lequel l'aimant (40, 40S) est un aimant annulaire ou circulaire dont l'axe est parallèle à l'axe de rotation (A).

4. Dispositif selon la revendication 1 ou 2, comprenant une pluralité d'aimants (40-1, 40-2, 40-3) disposés de façon espacée autour de l'axe de rotation (A).

5. Dispositif selon la revendication 4, dans lequel les aimants (40-1, 40-2, 40-3, 40-4) sont en nombre pair, et les polarités desdits aimants alternent régulièrement autour de l'axe de rotation (A).

6. Dispositif selon la revendication 2, dans lequel l'aimant (40S) est non solidaire de la roue de coulée centrifuge (20), et comprenant en outre un aimant permanent (40M) solidaire de la roue de coulée centrifuge (20) et s'étendant en partie à travers le bobinage (60).

7. Dispositif selon la revendication 6, dans lequel l'aimant (40S) est un aimant annulaire ou circulaire dont l'axe est parallèle à l'axe de rotation (A), et les pôles de l'aimant permanent (40M) et de l'aimant (40S) se faisant face ont des noms contraires.

8. Dispositif selon la revendication 6, comprenant une pluralité d'aimants (40S-1, 40S-2, 40S-3) non solidaires de la roue de coulée centrifuge (20) et disposés de façon espacée autour de l'axe de rotation (A).

9. Dispositif selon la revendication 8, dans lequel les aimants non solidaires de la roue de coulée centrifuge (20) sont en nombre pair, et les polarités desdits aimants alternent régulièrement autour de l'axe de rotation (A).

10. Procédé de fabrication d'une ébauche en alliage métallique, comprenant les étapes suivantes :

- fusion de l'alliage métallique ;
- versage de l'alliage métallique en fusion dans une roue de coulée centrifuge (20), la roue de coulée centrifuge étant rotative autour d'un axe de rotation (A) et comprenant un moule (22) pour recevoir l'alliage métallique en fusion, le moule s'étendant dans une direction radiale (R1) par rapport à l'axe de rotation (A) ;
- rotation de la roue de coulée centrifuge (20) autour de son axe de rotation et solidification de l'alliage métallique en fusion à l'intérieur du moule (22), de manière à obtenir l'ébauche en alliage métallique ; et
- extraction de l'ébauche en alliage métallique du moule (22),

le procédé étant **caractérisé en ce que**, pendant l'étape de rotation, on applique un champ magnéti-

que (H) au moule (22), de manière à induire un courant électrique induit dans le moule (22).

11. Procédé selon la revendication 10, dans lequel la roue de coulée centrifuge (20) comprend un bobinage (60) entourant un volume intérieur du moule (22), et dans lequel, pendant l'étape de rotation, le champ magnétique (H) induit un courant électrique dans le bobinage (60).
12. Procédé selon la revendication 10 ou 11, dans lequel l'alliage métallique est un alliage à base de titane.

Patentansprüche

1. Vorrichtung (10) zur Fertigung eines Rohlings aus Metalllegierung durch Schleudergießen einer geschmolzenen Metalllegierung, umfassend ein Schleudergießrad (20), wobei das Schleudergießrad (20) um eine Drehachse (A) drehbar ist und eine Form (22) zur Aufnahme der geschmolzenen Metalllegierung umfasst, wobei sich die Form in einer radialen Richtung (R1) in Bezug auf die Drehachse (A) erstreckt, wobei die Vorrichtung **dadurch gekennzeichnet ist, dass** sie mindestens einen Magneten (40, 40S) umfasst, der so angeordnet ist, dass er beim Drehen des Schleudergießrads (20) um die Drehachse (A) einen elektrischen Strom in der Form (22) induziert.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei das Schleudergießrad (20) eine Spule (60) umfasst, die ein Innenvolumen der Form (22) umgibt und derart konfiguriert ist, dass der Magnet (40, 40S) einen elektrischen Strom in der Spule (60) induziert, wenn sich das Schleudergießrad (20) um die Drehachse (A) dreht.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Magnet (40, 40S) ein ringförmiger oder kreisförmiger Magnet ist, dessen Achse parallel zur Drehachse (A) verläuft.
4. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, umfassend eine Vielzahl von Magneten (40-1, 40-2, 40-3), die beabstandet um die Drehachse (A) angeordnet sind.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, wobei die Magnete (40-1, 40-2, 40-3, 40-4) in einer geraden Anzahl vorliegen, und sich die Polaritäten der Magnete regelmäßig um die Drehachse (A) abwechseln.
6. Vorrichtung nach Anspruch 2, wobei der Magnet (40S) nicht mit dem Schleudergießrad (20) fest verbunden ist und umfassend zusätzlich einen Dauermagneten (40M), der mit dem Schleudergießrad (20) fest verbunden ist und sich teilweise durch die Spule (60) erstreckt.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, wobei der Magnet (40S) ein ringförmiger oder kreisförmiger Magnet ist, dessen Achse parallel zu der Drehachse (A) verläuft, und wobei die einander zugewandten Pole des Dauermagneten (40M) und des Magneten (40S) gegensätzliche Bezeichnungen haben.
8. Vorrichtung nach Anspruch 6, umfassend eine Vielzahl von Magneten (40S-1, 40S-2, 40S-3), die nicht mit dem Schleudergießrad (20) fest verbunden und beabstandet um die Drehachse (A) angeordnet sind.
9. Vorrichtung nach Anspruch 8, wobei die Magnete, die nicht fest mit dem Schleudergießrad (20) verbunden sind, in gerader Anzahl vorliegen und sich die Polaritäten dieser Magnete regelmäßig um die Drehachse (A) abwechseln.
10. Verfahren zur Herstellung eines Rohlings aus Metalllegierung, umfassend die folgenden Schritte:

- Schmelzen der Metalllegierung;
- Schleudergießen der geschmolzenen Metalllegierung in einem Schleudergießrad (20), wobei das Schleudergießrad um eine Drehachse (A) drehbar ist und eine Form (22) zur Aufnahme der geschmolzenen Metalllegierung umfasst, wobei sich die Form in einer radialen Richtung (R1) in Bezug auf die Drehachse (A) erstreckt,
- Drehen des Schleudergießrads (20) um seine Drehachse und Erstarren der geschmolzenen Metalllegierung im Innern der Form (22), um den Rohling aus Metalllegierung zu erhalten; und
- Entnehmen des Rohlings aus Metalllegierung aus der Form (22),

wobei das Verfahren **dadurch gekennzeichnet ist, dass** während des Schritts des Drehens ein Magnetfeld (H) auf die Form (22) angewendet wird, um einen induzierten elektrischen Strom in der Form (22) zu induzieren.

11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei das Schleudergießrad (20) eine Spule (60) umfasst, die ein Innenvolumen der Form (22) umgibt, und wobei das Magnetfeld (H) während des Schritts des Drehens einen elektrischen Strom in der Spule (60) induziert.
12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, wobei es sich bei der Metalllegierung um eine Legierung auf Titanbasis handelt.

Claims

1. A device (10) for manufacturing a metal alloy blank by centrifugal casting of a molten metal alloy, comprising a centrifugal casting wheel (20), the centrif-

- ugal casting wheel (20) being rotary about an axis of rotation (A) and comprising a mold (22) for receiving the molten metal alloy, the mold extending in a radial direction (R1) with respect to the axis of rotation (A),
the device being **characterized in that** it comprises at least one magnet (40, 40S) arranged in such a way as to induce an electric current in the mold (22) during the rotation of the centrifugal casting wheel (20) about the axis of rotation (A). 5 10
2. The device according to claim 1, wherein the centrifugal casting wheel (20) comprises a coil (60) surrounding an internal volume of the mold (22) and configured in such a way that the magnet (40, 40S) induces an electric current in the coil (60) during said rotation of the centrifugal casting wheel (20) about the axis of rotation (A). 15
3. The device according to claim 1 or 2, wherein the magnet (40, 40S) is an annular or circular magnet, the axis of which is parallel to the axis of rotation (A). 20
4. The device according to claim 1 or 2, comprising a plurality of magnets (40-1, 40-2, 40-3) arranged in a spaced manner about the axis of rotation (A). 25
5. The device according to claim 4, wherein the magnets (40-1, 40-2, 40-3, 40-4) are even in number, and the polarities of said magnets alternate evenly about the axis of rotation (A). 30
6. The device according to claim 2, wherein the magnet (40S) does not form a single part with the centrifugal casting wheel (20), and further comprising a permanent magnet (40M) forming a single part with the centrifugal casting wheel (20) and extending partly across the coil (60). 35
7. The device according to claim 6, wherein the magnet (40S) is an annular or circular magnet, the axis of which is parallel to the axis of rotation (A), and the poles of the permanent magnet (40M) and of the magnet (40S) facing it have opposite names. 40 45
8. The device according to claim 6, comprising a plurality of magnets (40S-1, 40S-2, 40S-3) not forming a single part with the centrifugal casting wheel (20) and arranged in a spaced manner about the axis of rotation (A). 50
9. The device according to claim 8, wherein the magnets not forming a single part with the centrifugal casting wheel (20) are even in number, and the polarities of said magnets alternate evenly about the axis of rotation (A). 55
10. A method for manufacturing a metal alloy blank,

comprising the following steps:

- melting of the metal alloy;
- pouring of the molten metal alloy into a centrifugal casting wheel (20), the centrifugal casting wheel being rotary about an axis of rotation (A) and comprising a mold (22) for receiving the molten metal alloy, the mold extending in a radial direction (R1) with respect to the axis of rotation (A);
- rotation of the centrifugal casting wheel (20) about its axis of rotation and solidification of the molten metal alloy inside the mold (22), in such a way as to obtain the metal alloy blank; and
- extraction of the metal alloy blank from the mold (22),

the method being **characterized in that**, during the rotation step, a magnetic field (H) is applied to the mold (22), in such a way as to induce an electric current in the mold (22).

11. The method according to claim 10, wherein the centrifugal casting wheel (20) comprises a coil (60) surrounding an internal volume of the mold (22), and wherein, during the rotation step, the magnetic field (H) induces an electric current in the coil (60).
12. The method according to claim 10 or 11, wherein the metal alloy is a titanium-based alloy.

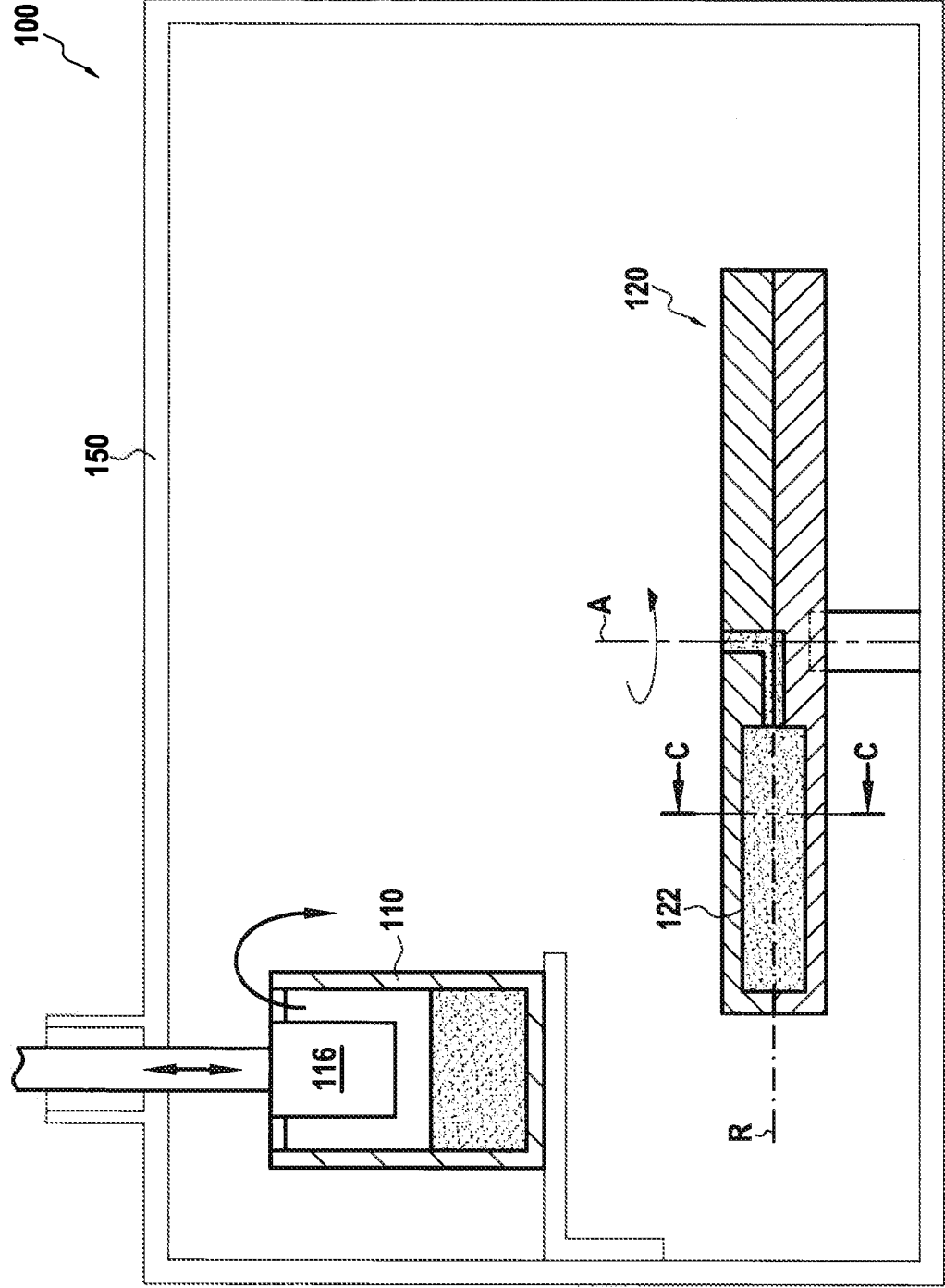


FIG.1

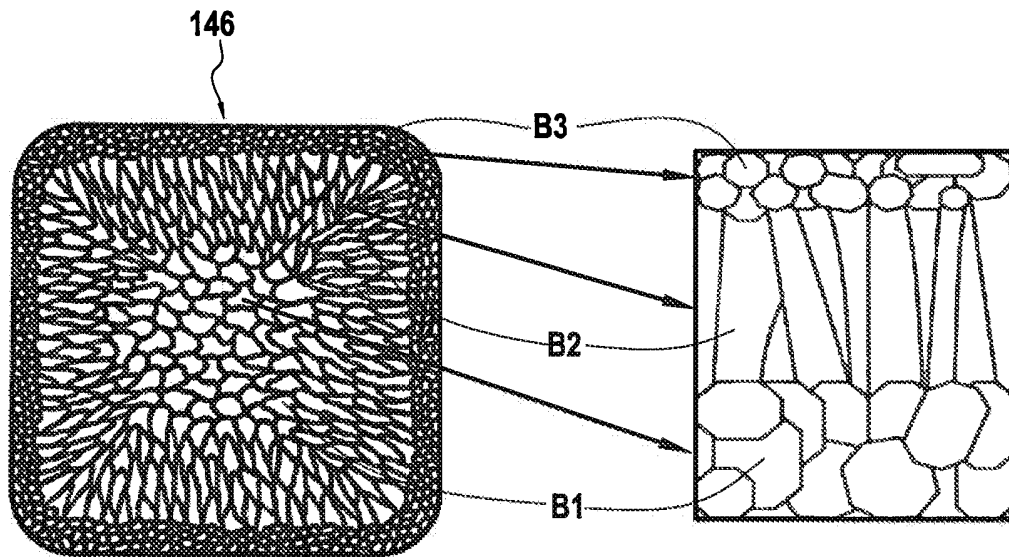


FIG.2

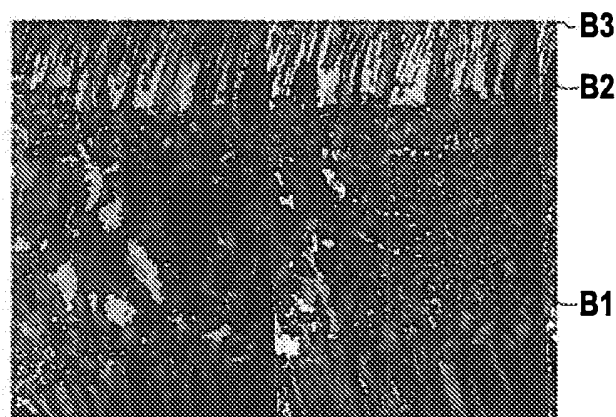


FIG.3A

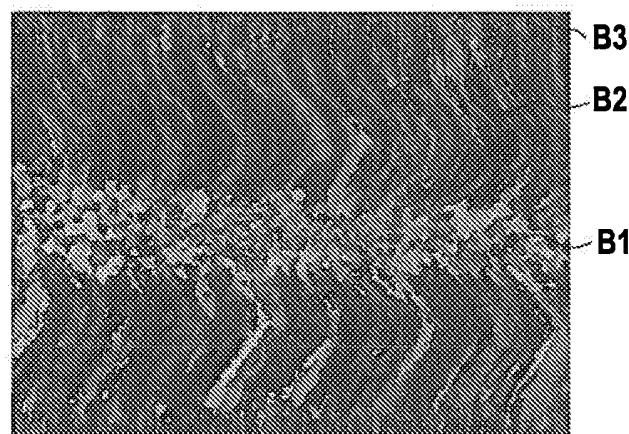
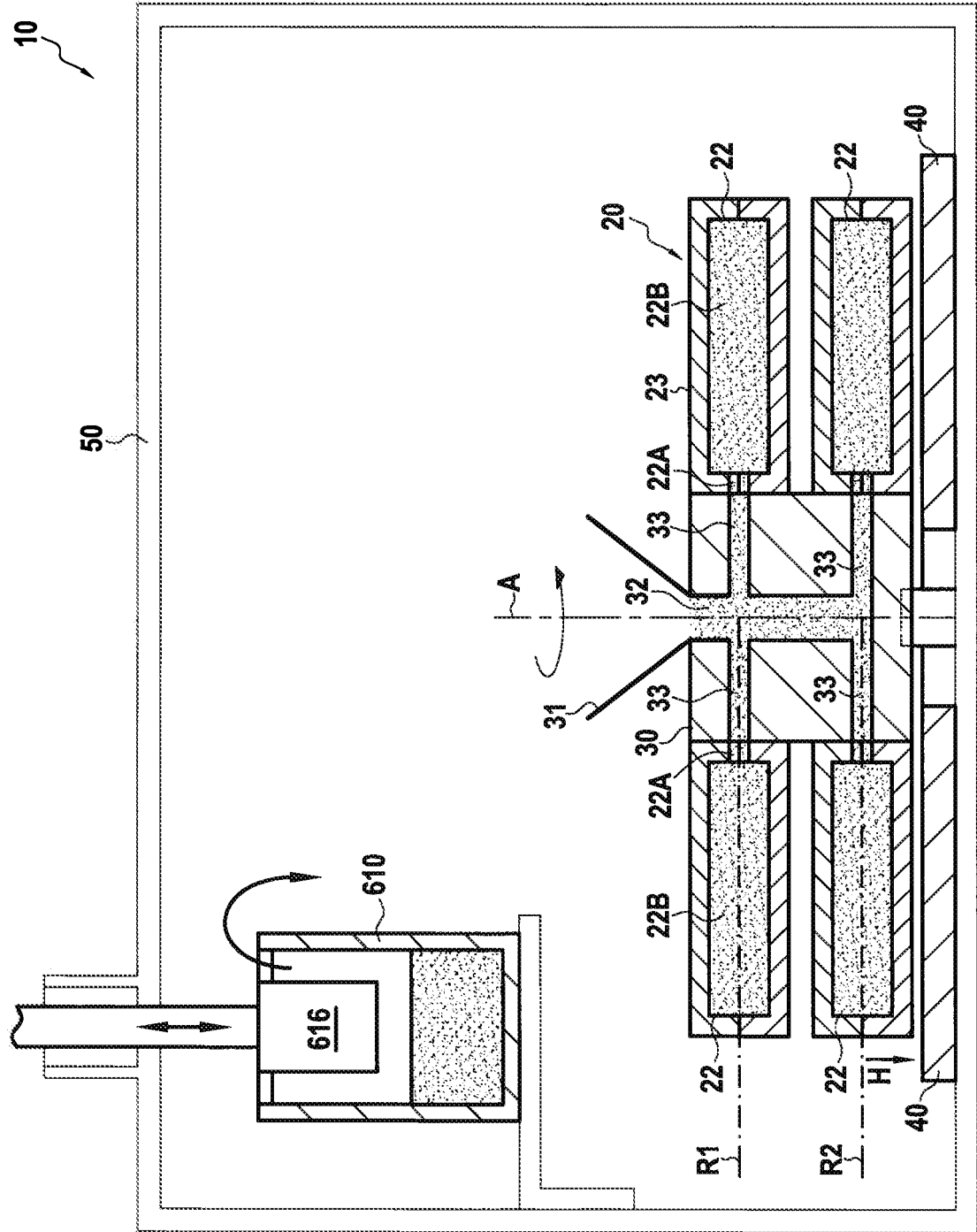


FIG.3B

FIG.4



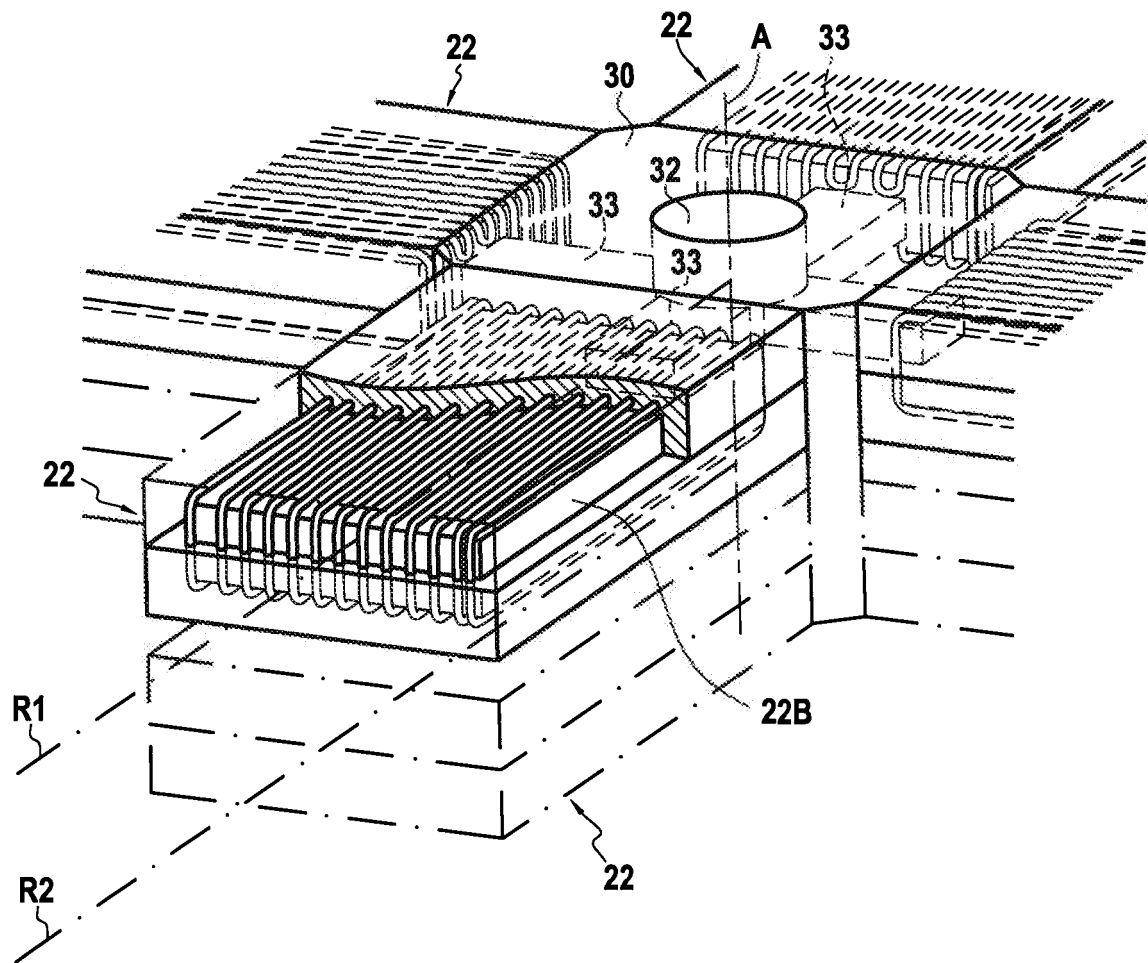
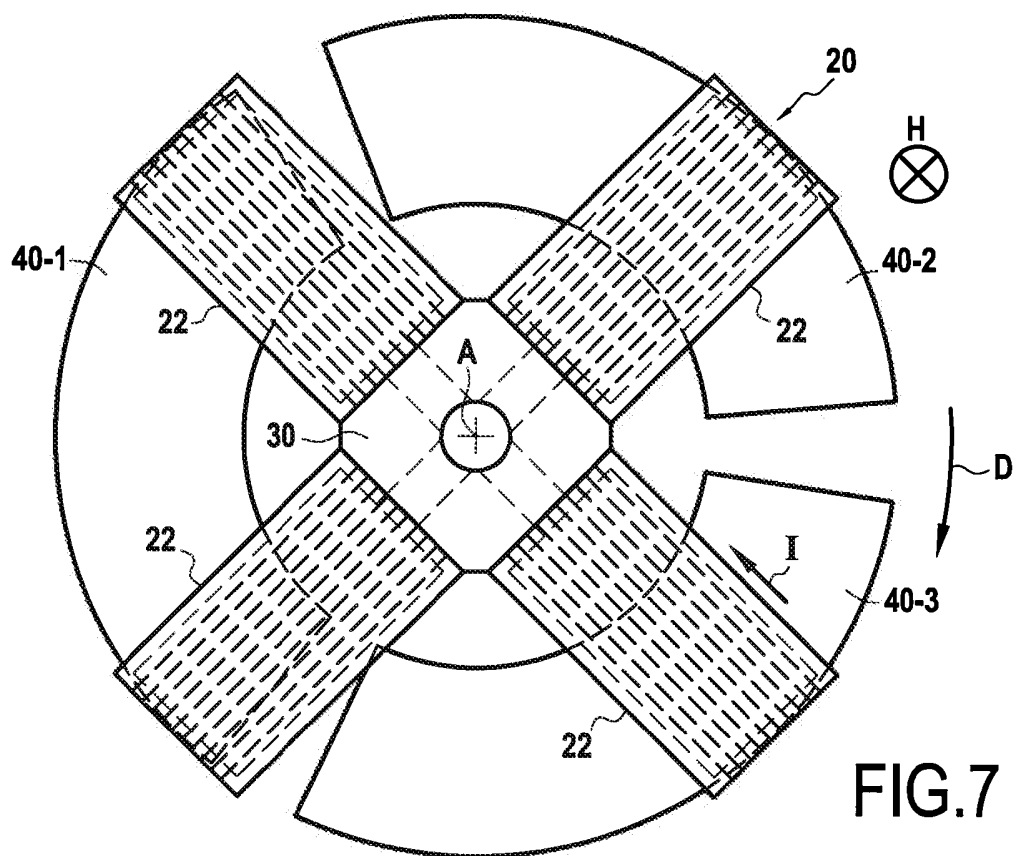
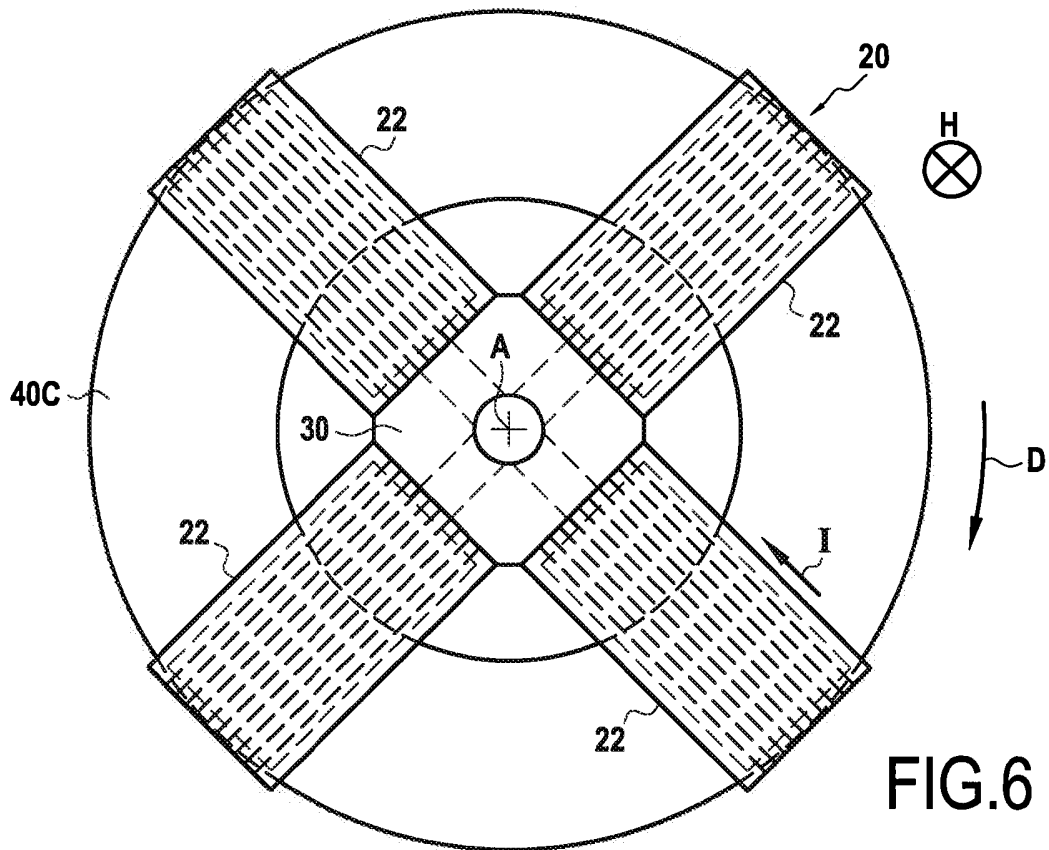
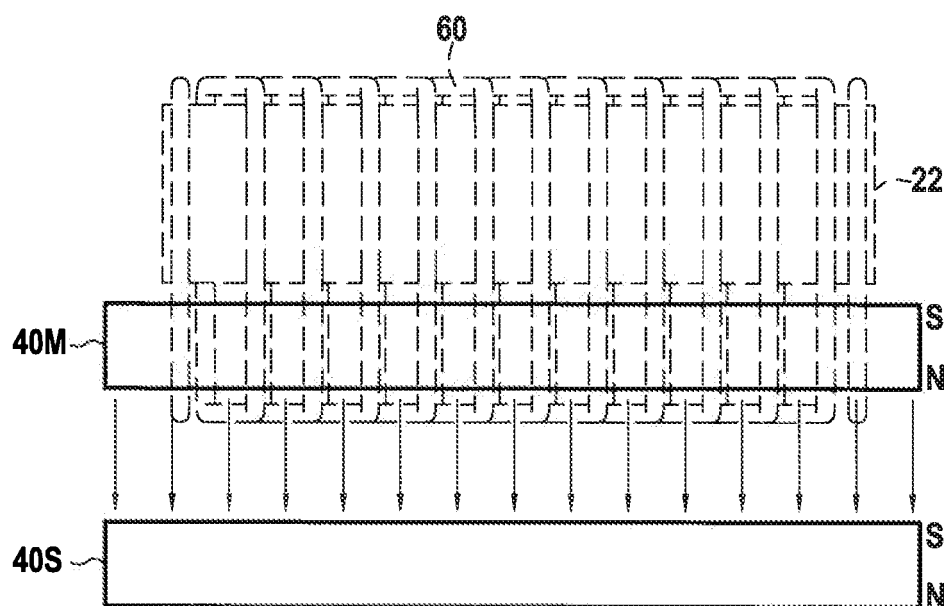
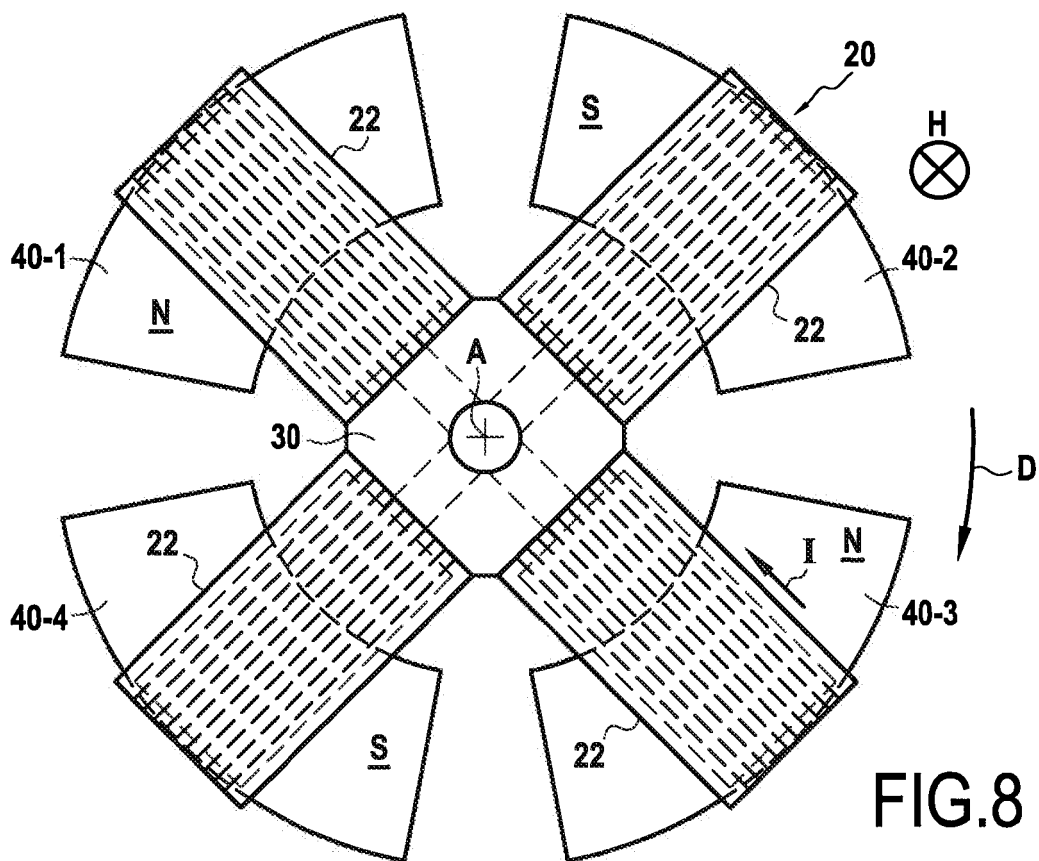


FIG.5





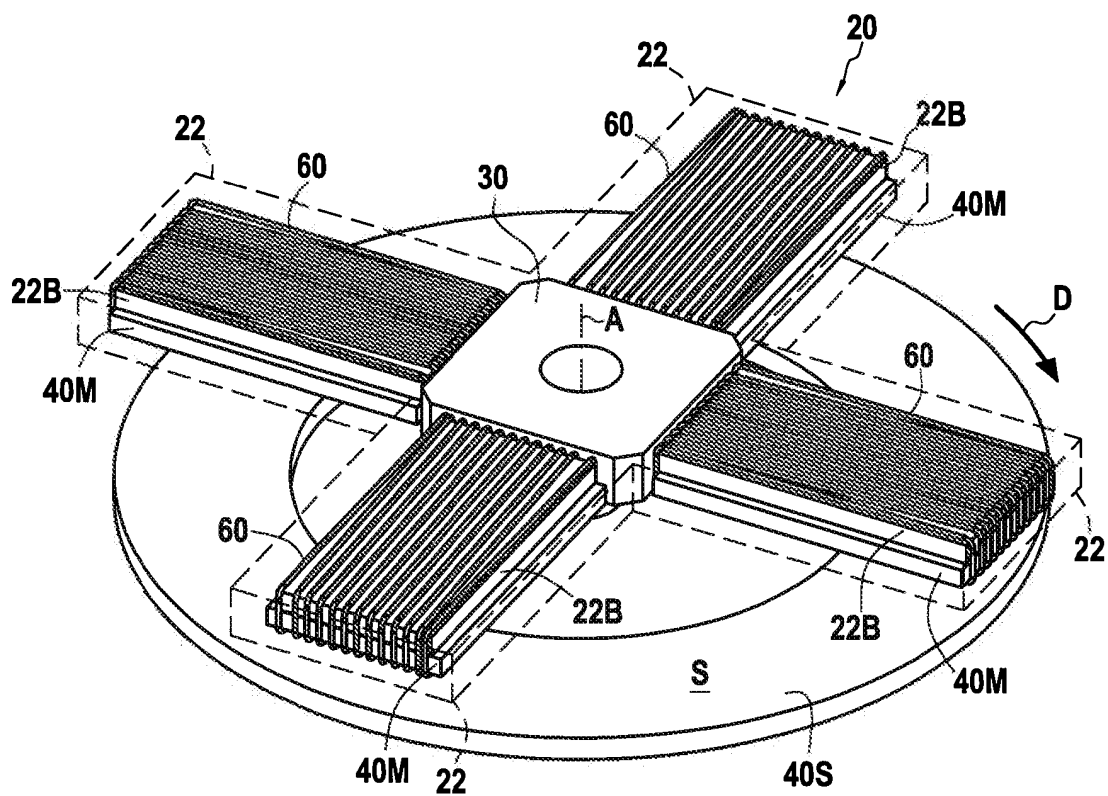


FIG.10

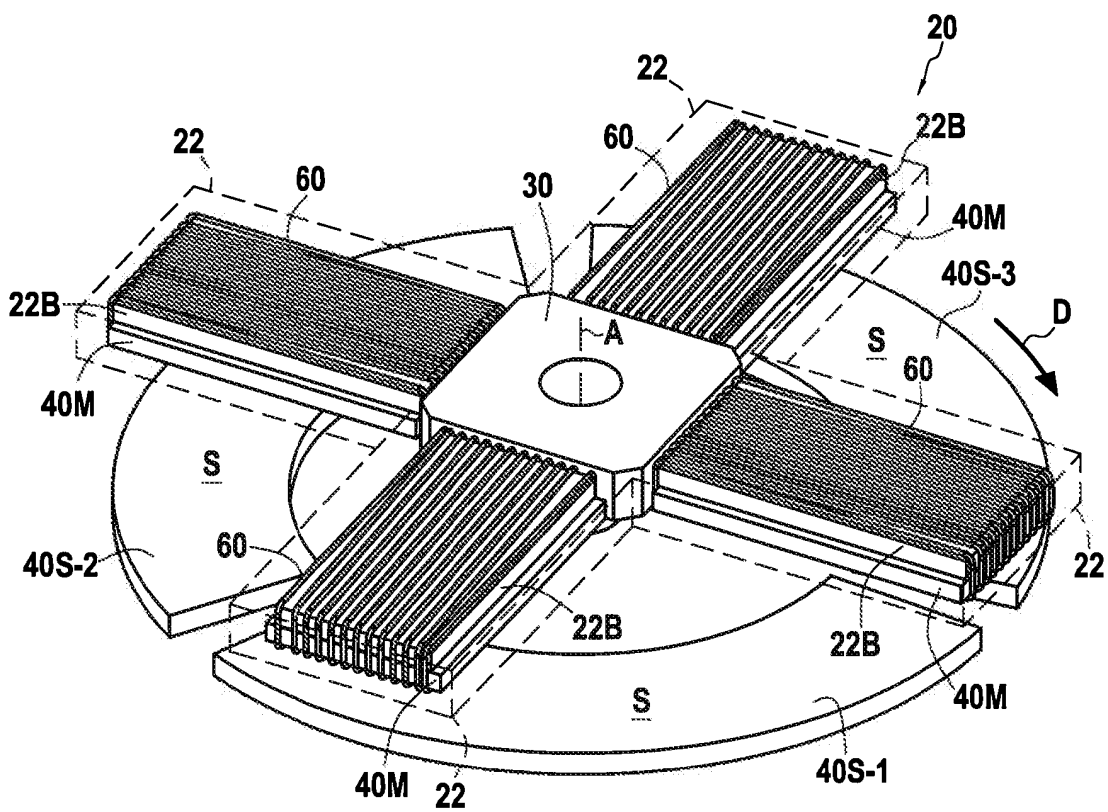


FIG.11

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- FR 3017062 A1 [0004]
- CN 1796023 A [0019]
- CN 100999804 A [0019]
- JP 2001096350 A [0019]
- US 2017173677 A [0020]

Littérature non-brevet citée dans la description

- Solidification of Alloys in Electromagnetic Field. **YANG et al.** Zeitschrift fur Metallkunde. Carl Hanser, 01 Avril 2000, vol. 91, 280-284 [0019]
- Structure Characteristics in Industrially Centrifugally Cast 25Cr20Ni Stainless Steel Tubes Solidified under Different Electromagnetic Field Intensity. **WU et al.** Journal of Materials Engineering and Performance, ASM International. Materials Park, 01 Octobre 1999, vol. 8, 525-530 [0019]