



CONFÉDÉRATION SUISSE

OFFICE FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

 (51) Int. Cl.<sup>3</sup>: B 22 D  
 B 22 D

 27/04  
 11/04

Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein

Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein



## (12) FASCICULE DU BREVET A5

(11)

632 686

(21) Numéro de la demande: 11276/79

(22) Date de dépôt: 19.12.1979

(30) Priorité(s): 29.12.1978 FR 78 36838

(24) Brevet délivré le: 29.10.1982

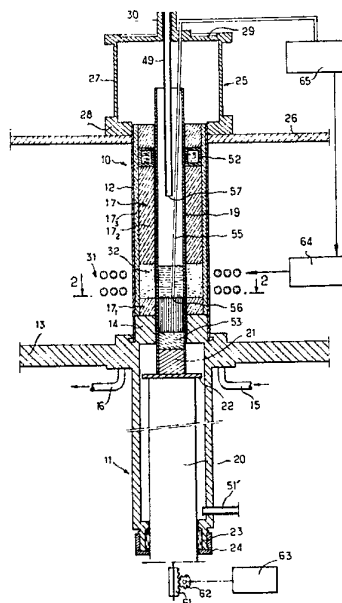
(45) Fascicule du brevet  
publié le: 29.10.1982
 (73) Titulaire(s):  
 Office National d'Etudes et de Recherches  
 Aérospatiales (O.N.E.R.A.),  
 Châtillon-sous-Bagneux (FR)

 (72) Inventeur(s):  
 Jean-Michel Hauser, Meudon (FR)  
 Fernand Pautonnier, Paris (FR)  
 Maurice Rabinovitch, Châtillon (FR)

 (74) Mandataire:  
 E. Blum & Co., Zürich

## (54) Procédé et appareillage pour la fabrication de barres en alliage par solidification unidirectionnelle.

(57) On déplace, au moyen d'un moteur (63) et par l'intermédiaire d'un piston (20), un moule (19) par rapport à un inducteur de chauffage (31) et à un bloc refroidisseur (14) disposé en dessous de l'inducteur. La position relative de l'inducteur et du bloc, ainsi que leur efficacité et la vitesse de déplacement du moule sont réglés de façon que s'établisse au sein de l'alliage contenu dans le moule un front de solidification plan ayant un gradient thermique élevé et qu'il s'y produise une orientation de la structure de l'alliage perpendiculaire à ce front. Pendant toute la durée de la solidification, on alimente le moule en poudre d'alliage par un canal (49) dont l'embouchure (57) est située au-dessus de la surface libre de l'alliage liquide, de manière que la poudre atteigne toute cette surface en une pluie fine de grains non-fondus. Le débit de poudre est réglé de manière à correspondre à la quantité d'alliage solidifié par unité de temps.



## REVENDEICATIONS

1. Procédé de fabrication de barres en alliage par solidification unidirectionnelle, selon lequel on déplace de façon continue vers le bas un moule tubulaire par rapport à une source chaude et une source froide disposée en dessous de la source chaude, la position relative des deux sources ainsi que leur efficacité et la vitesse du moule étant réglées de façon que s'établisse au sein de l'alliage contenu dans le moule un front de solidification plan et qu'il se produise une orientation de la structure de l'alliage perpendiculaire au front de solidification, caractérisé en ce qu'on alimente en continu le moule en poudre d'alliage à la composition nominale requise à un débit sensiblement constant pour maintenir une portion d'alliage liquide de volume sensiblement constant pendant toute la durée du processus de solidification de la barre et pour toute la longueur de formation de la barre, le débit d'alimentation de la poudre d'alliage correspondant à la quantité d'alliage solidifié par unité de temps au niveau dudit front.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'alimentation en poudre a lieu à débit constant.

3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la poudre d'alliage est introduite de façon à tomber sous la forme d'une pluie de grains fins répartis sur toute la surface supérieure de la portion d'alliage liquide que contient le moule.

4. Appareillage pour la mise en œuvre du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, comprenant dans un four un moule entouré d'une source chaude et d'une source froide disposée en dessous de la source chaude, des moyens pour déplacer le moule par rapport aux deux sources, des moyens pour régler la position relative et l'efficacité des sources pour établir au sein de l'alliage contenu dans le moule un front de solidification plan et pour produire une orientation de la structure de l'alliage perpendiculaire au front de solidification, caractérisé en ce qu'il comprend en outre des moyens pour alimenter en permanence le moule, pendant toute la durée du processus de solidification, en poudre d'alliage à la composition nominale requise pour maintenir dans le moule une portion d'alliage liquide de volume constant, l'alimentation en poudre étant réglée suivant un débit égal à la quantité d'alliage solidifié par unité de temps.

5. Appareillage selon la revendication 4, caractérisé en ce que les moyens d'alimentation comprennent un distributeur de poudre à débit ajustable.

6. Appareillage selon la revendication 5, caractérisé en ce que le distributeur comporte un réservoir de poudre, un plateau rotatif et une raclette, la buse de sortie du réservoir étant agencée pour distribuer la poudre sur le plateau rotatif sous la forme d'un cordon circulaire, et le tout étant agencé de façon que la poudre déposée sur le plateau soit acheminée au cours de la rotation du plateau par l'effet de la raclette qui la dirige vers l'orifice d'un conduit aboutissant au moule.

7. Appareillage selon la revendication 6, caractérisé en ce que la buse est interchangeable et la vitesse du plateau est réglable.

8. Appareillage selon l'une quelconque des revendications 5 à 7, caractérisé en ce que le conduit de sortie du distributeur de poudre débouche dans le moule à une hauteur telle, par rapport au niveau supérieur de l'alliage liquide, que la poudre tombe en pluie sur toute la surface de l'alliage liquide.

9. Barre d'alliage à structure orientée obtenue par le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3.

L'invention est relative à un procédé pour la fabrication de barres en alliage par solidification unidirectionnelle, ainsi qu'à un appareillage pour la mise en œuvre de ce procédé.

Elle s'applique à la fabrication par solidification dirigée de barres en matériaux composites renforcés par des fibres ou lamelles formées

lors de la solidification de l'alliage. Il faut entendre ici le terme barres dans son sens général, c'est-à-dire qu'il s'agit de pièces de forme allongée cylindrique, dont la section, constante, peut être circulaire, polygonale ou complexe et à partir desquelles sont fabriqués par usinage les objets souhaités.

L'invention s'applique notamment à la fabrication de barres en les matériaux composites réfractaires proposés par le brevet français N° 69.12452, le certificat d'addition N° 69.44708, le brevet français N° 74.31140 et la demande de brevet français N° 78.32151, et qui comprennent une matrice complexe en superalliage à base de nickel et/ou de fer et/ou de cobalt, contenant du chrome, ainsi qu'éventuellement d'autres éléments tels que le tungstène et l'aluminium, et dans laquelle est présente une phase de renforcement constituée par des fibres monocristallines en au moins un monocarbure d'un métal de transition. Ces matériaux, en raison de leurs très bonnes propriétés mécaniques, sont particulièrement appropriés en tant que matériaux constitutifs de pièces soumises en service à des sollicitations importantes à température élevée, comme les aubes de turbines d'avions.

Ces pièces sont fabriquées soit en partant d'ébauches ou lingots dans lesquels on usine la pièce désirée, par exemple une aube de turbine, soit directement par moulage, l'alliage étant solidifié dans un moule présentant sensiblement la forme de la pièce désirée. Dans les procédés mis en œuvre jusqu'à présent, l'alliage qui doit être soumis à la solidification unidirectionnelle est introduit préalablement en une seule fois dans le moule, soit par coulée, soit encore sous la forme d'une poudre préalliée, c'est-à-dire une poudre dont les grains sensiblement identiques présentent la composition nominale de l'alliage. Le moule est alors déplacé par rapport à une source chaude et une source froide superposées, la distance entre la source chaude et la source froide ainsi que la puissance de la source chaude, d'une part, et la vitesse de déplacement du moule, d'autre part, étant réglées de façon que s'établisse au sein de l'alliage contenu dans le moule un front de solidification rigoureusement plan avec un gradient thermique élevé au niveau dudit front, et qu'on obtienne ainsi des grains et des lamelles ou fibres de renforcement perpendiculaires au front de solidification. Pour des matériaux à fibres monocristallines de monocarbures du type de ceux de la titulaire, on établit un gradient thermique de l'ordre de 120 à 200°C/cm au niveau du front de solidification et on déplace le moule à des vitesses de l'ordre de 1 cm/h.

Jusqu'à présent, il n'a jamais été possible de fabriquer des pièces de grande longueur présentant, sur toute leur longueur, des propriétés mécaniques constantes. Il apparaît en effet, en raison de la grande hauteur de la partie liquide contenue dans le moule, un phénomène de ségrégation lié aux mouvements de convection du liquide bien connu des fondeurs. Au niveau de l'interface solide-liquide, les éléments constitutifs de l'alliage se répartissent inégalement entre la phase solide et la phase liquide, compte tenu de leurs coefficients de partage respectifs. Ainsi, par exemple, le chrome est incorporé au solide en formation dans une proportion plus faible que celle dans laquelle il est présent dans la phase liquide, cette dernière ayant donc tendance à s'enrichir en chrome au voisinage du front de solidification; par contre, le tungstène se trouve incorporé préférentiellement au solide en formation dans une proportion plus importante que celle dans laquelle il est présent dans la phase liquide, cette dernière s'appauvrissant en tungstène. Il en résulte, quand on désire fabriquer une pièce de grande longueur et que le moule contient donc, au début du processus de solidification, une partie liquide de grande hauteur, qu'au fur et à mesure de la progression de la solidification le matériau solidifié obtenu présente inévitablement des variations de composition entre la partie solidifiée en premier lieu et la partie solidifiée en dernier lieu. Cette dernière présente, eu égard aux éléments particuliers considérés ici à titre d'exemple, une teneur en chrome et une teneur en tungstène respectivement notablement supérieure et inférieure aux teneurs présentes dans la partie solidifiée en premier lieu. Il en résulte aussi que la structure métallurgique n'est pas constante d'une extrémité à l'autre du matériau fabriqué, la fraction volumique des fibres de renforcement au sein de la matrice, considérée dans les

sections transversales du matériau, évoluant d'une extrémité à l'autre en raison de l'évolution des concentrations des éléments constituant les fibres avec, en conséquence, une variation des propriétés mécaniques de la pièce modifiée.

C'est le but de l'invention de fournir un procédé de fabrication de barres en alliage par solidification unidirectionnelle, qui permette d'empêcher l'apparition de ce phénomène de ségrégation ou tout au moins d'en limiter fortement les effets et qui permette d'obtenir des barres présentant cependant de bonnes propriétés mécaniques qui demeurent constantes sur toute leur longueur.

A cet effet, le procédé selon l'invention est défini comme il est dit à la revendication 1.

Un tel procédé permet de maintenir à des valeurs sensiblement constantes les concentrations des divers constituants de l'alliage au niveau du front de solidification, la répartition inégale des constituants entre la phase solide et la phase liquide au niveau de l'interface solide-liquide étant compensée à chaque instant par l'apport d'alliage à la composition nominale au fur et à mesure que le front de solidification progresse. On obtient une pièce qui, quelle que soit sa longueur, présente dans toutes ses sections transversales une composition métallique ainsi qu'une structure métallurgique sensiblement constantes.

On entretient donc dans le moule une phase d'alliage liquide présentant une composition sensiblement constante pendant toute la durée de solidification.

La forme du moule et la vitesse de solidification permettent de déterminer le débit suivant lequel l'alliage doit être introduit dans le moule.

Un appareillage pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention est alors défini comme il est dit à la revendication 4.

Les caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront dans la description qui suit, faite à titre d'exemple et en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

la fig. 1 est une vue schématique, en coupe longitudinale, d'une partie d'un appareillage selon l'invention ;

la fig. 2 est une vue en coupe transversale selon la ligne 2-2 de la fig. 1 ;

la fig. 3 est une vue schématique en coupe d'un dispositif d'alimentation en poudre de l'appareillage selon l'invention ;

la fig. 4 est une vue en coupe selon la ligne 4-4 de la fig. 3, et

la fig. 5 est un graphique de composition d'une barre en superalliage composite élaborée conformément à l'invention.

Pour la fabrication par moulage de pièces d'alliage de longueur quelconque, à structure orientée, notamment du type comprenant une matrice complexe en un superalliage à base de nickel et/ou de cobalt et/ou de fer, contenant du chrome ainsi que d'autres éléments tels que du tungstène et de l'aluminium, et des fibres monocristallines de renforcement élaborées *in situ* en monocarbures de métaux de transition, on met en œuvre un procédé de solidification unidirectionnelle d'un alliage de départ dans un moule entouré par une source chaude et une source froide disposée sous la source chaude, en déplaçant le moule par rapport aux deux sources à une vitesse constante appropriée, la position relative desdites sources et leur efficacité étant réglées pour établir au sein de l'alliage un front de solidification plan et un gradient thermique élevé au niveau dudit front, et en alimentant en continu le moule en poudre d'alliage en quantité fonction de la progression de la solidification.

La fig. 1 montre une partie d'un appareillage selon l'invention, à savoir le four de solidification proprement dit.

Celui-ci comprend une enceinte supérieure 10 et une enceinte inférieure 11, l'extrémité inférieure de la paroi 12 de l'enceinte supérieure 10 étant encastrée dans une plaque ou châssis 13 duquel est solidaire l'enceinte inférieure 11, cette dernière présentant deux parois entre lesquelles circule de l'eau de refroidissement. Du châssis 13 est également solidaire un bloc refroidisseur 14 autour duquel est montée la paroi 12, ce bloc refroidisseur étant constitué par un manchon de cuivre traversé par des passages de circulation

d'eau, cette dernière étant amenée par une tubulure 15 et évacuée par une tubulure 16.

La paroi 12 de l'enceinte supérieure 10 est revêtue intérieurement, au-dessus du bloc de refroidissement 14, d'une garniture d'isolation thermique 17, par exemple en feutre de graphite, destinée à réduire les pertes thermiques latérales et comportant un premier manchon 17<sub>1</sub> de diamètre inférieur à celui de la paroi 12 et posé sur le bloc refroidisseur 14, un deuxième manchon 17<sub>2</sub> espacé du manchon 17<sub>1</sub> par un manchon en graphite 32 et un fourreau 17<sub>3</sub> entourant les manchons 17<sub>1</sub> et 17<sub>2</sub>. La garniture 17 de feutre de graphite, le manchon 32 et le bloc refroidisseur 14 présentent un alésage de dimension propre à permettre le déplacement d'un moule 19 avec un jeu minimal.

Un piston 20 est monté à coulissement longitudinal dans l'enceinte inférieure 11 avec interposition d'un joint d'étanchéité 23, 24, le moule 19, ouvert à ses deux extrémités, étant fixé par emboîtement de son extrémité inférieure sur le noyau 21 d'un support 22 que présente la face frontale supérieure du piston 20.

La partie supérieure de la paroi 12 de l'enceinte supérieure 10 est coiffée par un chapeau 25 fixé sur une bride 26 et comprenant une paroi latérale 27, un fond 28 et un couvercle 29 présentant en son centre un raccord tubulaire 30 destiné à le mettre en communication avec un dispositif d'alimentation du moule en alliage qui sera décrit ci-après en référence à la fig. 3.

Un inducteur 31, entourant la paroi 12 de l'enceinte supérieure, forme la source chaude de l'appareillage, le manchon en graphite 32, intercalé entre les manchons 17<sub>1</sub> et 17<sub>2</sub> de la garniture isolante 17, jouant le rôle de résistor.

Le moule 19 est constitué par un tube de faible épaisseur, de 0,5 à 1,5 mm, en oxyde réfractaire comme de l'alumine de très grande pureté (supérieure à 99,5%), très faiblement poreux (moins de 10%) et fabriqué, par exemple, par projection au chalumeau oxy-acétylénique ou au pistolet à plasma sur un modèle de la barre à solidifier. Un moule ainsi réalisé résiste chimiquement aux matériaux à forte teneur en carbone quand ils se trouvent à l'état liquide et présente une résistance thermique faible qui n'entrave pas l'obtention d'un gradient thermique élevé (de l'ordre de 120 à 200°C/cm). Ne présentant pas une tenue mécanique suffisante pour pouvoir être utilisé sans cuisson préalable, un tel moule risque de se déformer par fluage à haute température. Il est prévu d'entourer le moule de pièces de frettage 33 (voir fig. 2), ces dernières pouvant être constituées par des anneaux de graphite enfilés les uns sur les autres autour du moule, ou bien par une gaine en matériau composite carbone-carbone.

Un dispositif distributeur de poudre 34 (fig. 3), relié au four de solidification par le raccord 30, comprend un boîtier 34 à fond 35 sur lequel est fixée une potence 36 de support d'un réservoir de poudre 37 muni d'une buse interchangeable 38 de déversement de poudre, un orifice 39 de remplissage du réservoir de poudre 37 étant ménagé dans le couvercle 40 du boîtier 34. Le couvercle 40 porte un moteur 41 d'entraînement à vitesse réglable d'un axe vertical 42 logé à l'intérieur du boîtier 34 et portant à son autre extrémité un plateau horizontal rotatif 43.

Au cours du fonctionnement du distributeur, de la buse 38 du réservoir de poudre 37 s'écoule, sur le plateau 43, un cordon calibré de poudre préalliée 44, laquelle, lors de la rotation du plateau 43 (fig. 4), est acheminée, par une raclette 45 portée par un bras 46 monté fixe sur un tenon 47, dans l'ouverture d'introduction d'un entonnoir 48 dont le canal de sortie 49 est monté dans l'alésage du raccord tubulaire 30 et débouche à l'intérieur du moule 19. Le débit de la poudre est réglé par le choix du diamètre de la buse 38 et par le réglage de la vitesse de rotation du plateau 43.

Le volume intérieur libre du four peut être dégazé et placé sous atmosphère réductrice, par exemple de l'argon contenant 5% d'hydrogène, introduit par une canalisation d'amenée 51 traversant le couvercle du distributeur de poudre 34, et évacué par une canalisation 51' disposée à la partie inférieure de l'enceinte inférieure 11 du four. Dans le même but de piéger l'oxygène de l'atmosphère du four,

il est prévu de disposer dans la garniture d'isolation thermique 17 de l'enceinte supérieure 10 du four un creuset 52, rempli d'un agent désoxydant, par exemple des copeaux de Ti-Zr (50/50), ledit creuset étant situé en un emplacement tel que, lorsque le four est mis en marche, la température à laquelle il se trouve est celle correspondant à l'activité désoxydante du matériau qu'il contient.

Un appareillage selon l'invention est mis en œuvre de la façon suivante:

Sur le noyau 21 du support 22 en acier réfractaire, dont la section est identique à la section interne du moule 19, aux jeux de dilatation près, on place un bloc d'alliage, ou pied de barreau 53, de même composition que la poudre et également de même section que l'intérieur du moule, aux jeux de dilatation près. On enfle alors le moule 19 sur le bloc 53, puis sur le noyau 21, et on place ensuite les pièces de fretage 33 autour du moule. On déplace le piston 20 portant le moule au moyen d'une crémaillère 61 et d'un engrenage 62 couplé à un moteur 63, de telle sorte que la face supérieure du pied de barreau 53 se trouve au niveau de la partie supérieure du résistor 32. On ferme alors l'enceinte, on la dégage, on la remplit d'un mélange d'argon et d'hydrogène en légère surpression, et on porte progressivement le résistor 32 à sa température de service par induction haute fréquence, fournie par l'inducteur 31 alimenté par une source 64. La distance entre le résistor 32 et le bloc refroidisseur 14, ainsi que le régime de chauffage, sont réglés de façon que l'isotherme correspondant au point de fusion de l'alliage à solidifier soit placé dans la zone à flux thermique unidirectionnel et vertical, c'est-à-dire dans la zone où les échanges de chaleur par la paroi latérale de l'appareillage sont inexistantes, grâce à la présence de la garniture isolante 17, et, plus précisément, de façon que l'interface solidement liquide se trouve à quelques millimètres en dessous du niveau inférieur du résistor 32, la position du front de solidification étant indiquée par un thermocouple 55 dont la soudure sensible 56 est placée immédiatement au-dessus du niveau du front de solidification, dans la partie liquide de l'alliage. Le thermocouple 55 est relié à un contrôleur de température 65 qui ajuste l'énergie alimentant l'inducteur 31 pour maintenir constante la température de la région de la soudure sensible 56 du thermocouple 55.

On place le canal 49 d'alimentation en poudre dans le moule avec son orifice de sortie 57 situé à une distance telle de la surface libre de l'alliage liquide contenu dans le moule que, d'une part, la température de la zone dans laquelle est placé ledit orifice de sortie 57 est insuffisante pour qu'y fondent les grains de poudre et que, d'autre part, ces derniers sont déversés en pluie fine et se répartissent sur toute la surface de l'alliage liquide.

On alimente alors le moule en poudre en entraînant en rotation le plateau tournant 43, et on déplace simultanément le moule vers le bas. Le débit d'alimentation en poudre est réglé de façon que le niveau supérieur de l'alliage liquide reste dans la même position par rapport aux éléments fixes du four de solidification, autrement dit, de façon que le volume d'alliage liquide que contient le moule reste constant.

Compte tenu de la vitesse de solidification et de la dimension du moule, on calcule la quantité d'alliage solidifié par unité de temps et on règle de façon correspondante le débit d'alimentation en poudre du moule par un choix convenable de la dimension de la buse 38, par un réglage de la position de son orifice par rapport au plateau 43 et de la vitesse de rotation de ce plateau.

Après une durée de quelques minutes de déplacement du moule, on atteint un régime thermique stationnaire ainsi qu'un régime stationnaire de diffusion des éléments de l'alliage de la phase solide à la phase liquide. Le faible volume de la phase liquide et l'apport constant de poudre présentant la composition nominale de l'alliage à solidifier dans la partie liquide de volume constant permettent de maintenir une composition moyenne constante dans le liquide bien que la répartition des éléments soit différente dans la phase liquide et la phase solide au niveau du front de solidification et malgré le brassage du liquide par convection. L'alliage solidifié présente ainsi des ségrégations beaucoup plus réduites qu'un alliage de même

composition nominale qui serait solidifié par tout autre procédé connu ne comportant pas d'alimentation dosée du moule en alliage à mesure que la solidification progresse et dans lequel toute la masse d'alliage serait initialement à l'état liquide.

Le déplacement du moule, l'alimentation en poudre et le chauffage sont interrompus lorsque la surface du bain liquide atteint l'extrémité supérieure du moule. La longueur de ce dernier et la course disponible pour son déplacement constituent donc les seules limitations pour la longueur de la pièce obtenue par solidification unidirectionnelle.

#### Exemple 1:

Une barre en superalliage à base de nickel, de composition pondérale suivante: base Ni-10% Cr-10% W-20% Co-4% Al-4,9% Nb-0,55% C, est fabriquée par le procédé selon l'invention dans un moule présentant la section transversale montrée sur la fig. 2, à savoir une section en forme de parallélogramme de 22 sur 35 mm présentant des angles de 75° arrondis.

On place le moule dans le four et on l'alimente en alliage de façon que la hauteur de la zone fondue, à la température maximale de service, à savoir 1600°C, soit de l'ordre de 50 mm. Le gradient thermique établi est de l'ordre de 140°C/cm et la vitesse de solidification, autrement dit la vitesse de déplacement du moule, est de 1,2 cm/h.

On a montré sur la fig. 5 les courbes représentatives de la teneur de la barre obtenue en chacun des éléments autres que celui constituant la base, à savoir le nickel, en portant en abscisses la longueur solidifiée en millimètres et en ordonnées la teneur en pourcent en poids de chacun des éléments. De ces courbes, il ressort que, si l'on supprime au début de la barre une partie de longueur équivalant à la hauteur de la zone liquide, à savoir environ 50 mm, les teneurs de la barre obtenue en chacun des éléments varient de moins de 5% (en valeur relative) sur toute la longueur de la barre, et de moins de 2% (en valeur relative) si l'on excepte l'élément chrome. La structure fibreuse orientée, à savoir constituée par la matrice renforcée par des fibres de monocarbure de niobium, est parfaite sur toute la longueur et aucune évolution de la fraction volumique des fibres de monocarbure de niobium n'est décelable.

Les courbes représentatives de la concentration en éléments en fonction de la longueur solidifiée tendent toutes vers une asymptote dont l'ordonnée est la teneur de l'élément correspondant dans l'alliage mère. Cette constatation confirme le fait qu'on peut obtenir des barres d'alliage solidifié de longueur quelconque qui ne présentent pas de ségrégation sur leur longueur eu égard à leur composition métallique et à leur structure métallurgique, et cela en éliminant toujours la première partie de zone solidifiée, c'est-à-dire celle correspondant à la hauteur de la zone liquide.

#### Exemple 2:

On solidifie, dans les mêmes conditions que celles de l'exemple 1, une barre en alliage de composition pondérale suivante: base Ni-10% Co-4% Cr-10% W-16% Al-4,2% Nb-0,46% C-2% Mo.

Les variations des teneurs en chacun des éléments, y compris les éléments d'addition, de la barre obtenue après solidification sont analogues à celles de l'exemple 1. La structure fibreuse du composite est sans défaut sur toute la longueur solidifiée et on ne discerne pas d'évolution de la fraction volumique des fibres.

#### Exemple 3:

Des barres en l'alliage de l'exemple 1, d'une part, et en celui de l'exemple 2, d'autre part, de section rectangulaire et de dimensions 12 x 65 mm, à bouts arrondis, sont obtenues par solidification unidirectionnelle dans les mêmes conditions que celles des exemples 1 et 2.

Les variations des teneurs en éléments d'addition dans les barres obtenues sont analogues à celles des exemples 1 et 2. La structure du composite obtenu est également parfaitement fibreuse, à fraction volumique constante sur toute la partie solidifiée.

### Exemple de comparaison

A titre de comparaison, on a préparé par solidification unidirectionnelle une barre en le même alliage que celui indiqué dans l'exemple 1, présentant la même section transversale que dans ledit exemple et d'une longueur totale de 250 mm, correspondant à une longueur réalisable à l'aide des procédés antérieurs.

Une barre a été préparée par solidification unidirectionnelle suivant un procédé usuel sans alimentation en continu (procédé A), la longueur totale de la partie fondue initialement étant égale à 250 mm. On a d'autre part préparé par solidification unidirection-

nelle une barre de même longueur, mais suivant le procédé avec alimentation en continu de poudre préalliée conforme à l'invention (procédé B), la hauteur de la zone fondue étant de 50 mm.

Dans l'un ou l'autre procédé, le gradient thermique établi était de 140°C/cm, et la vitesse de solidification de 1,2 cm/h.

On a effectué des coupes transversales des deux barres obtenues et on a déterminé la proportion pondérale en certains des éléments dans chacune de ces coupes.

Les résultats de ces déterminations sont rassemblés dans le tableau.

Tableau

Comparaison des composition de barres d'alliage obtenues par solidification unidirectionnelle, de même longueur totale:

A — par un procédé usuel sans alimentation en continu (longueur totale de la partie fondue initialement: 250 mm)

B — par le procédé avec alimentation en continu en poudre préalliée (hauteur de la zone fondue: 50 mm)

Distance à partir du début de solidification (mm)	Cr (%)		W (%)		C (%)	
	A	B	A	B	A	B
15	8,8	9,1	11,8	9,51	0,61	0,55
50	9,0	9,54	11,65	9,38	0,57	0,53
100	9,45	9,83	11,4	9,50	0,54	0,53
155	10,4	9,95	10,8	9,38	0,535	0,53
200	10,8	9,99	10,5	9,40	0,525	0,53
Ecart relatif de composition entre les cotes 50 et 200 mm	18	4,5	11	1*	10	0*

\* Aux précisions de dosage près.

Fig.1

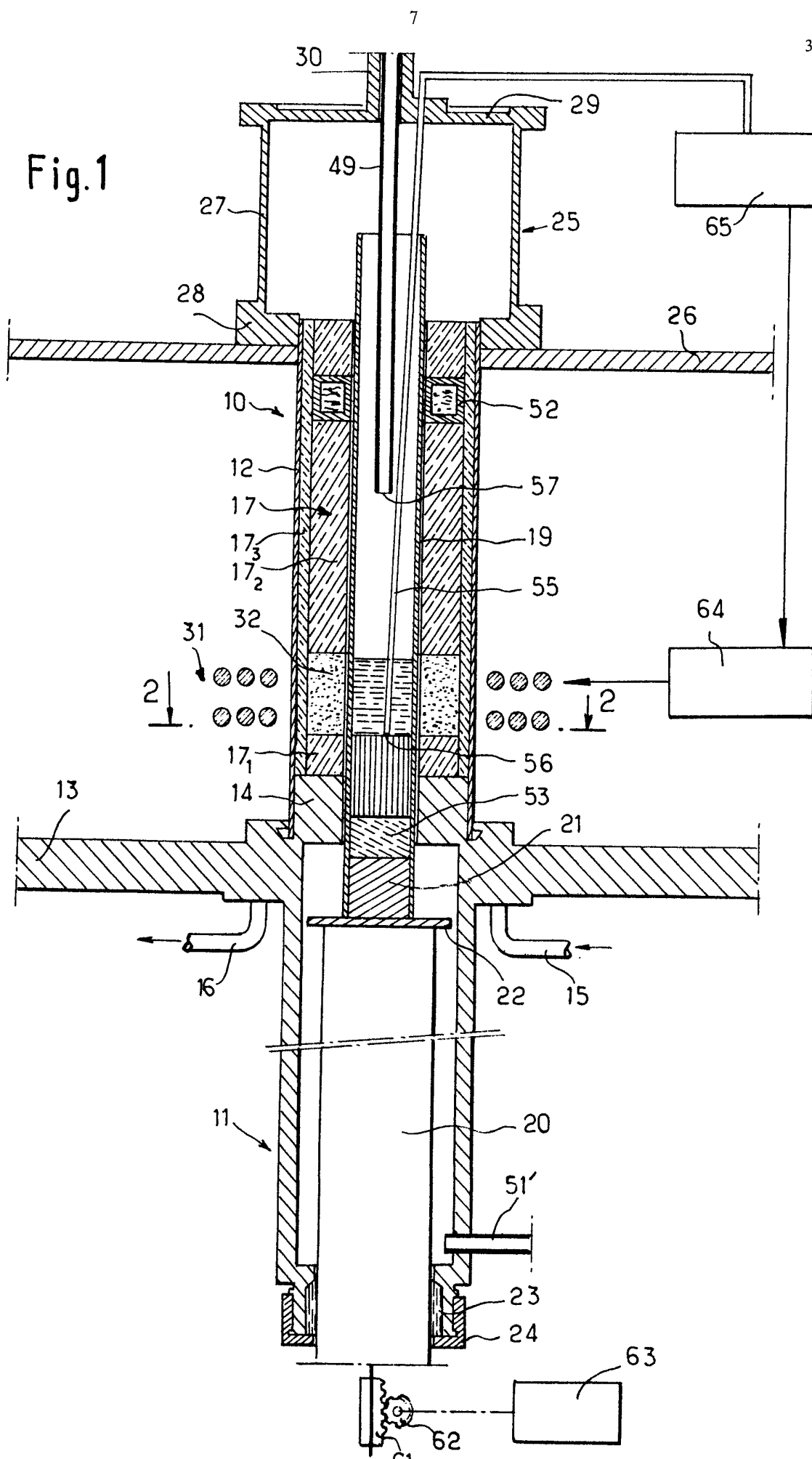


Fig. 2

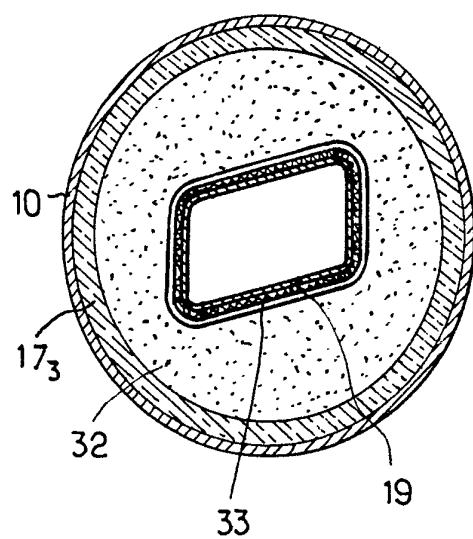


Fig. 3

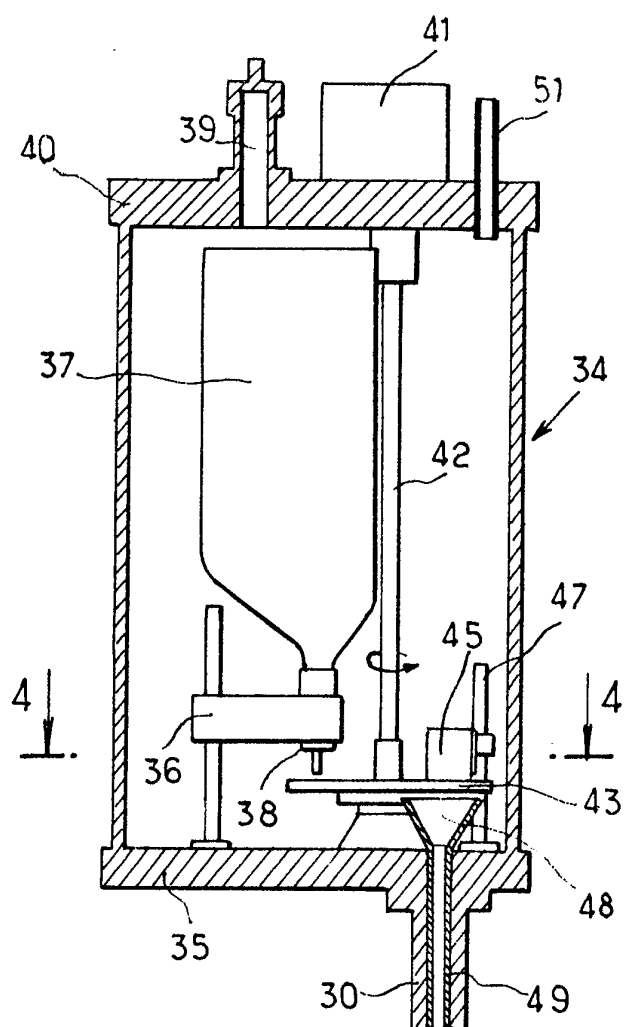


Fig. 4

