(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 741 876 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention de la délivrance du brevet:
09.12.2015 Bulletin 2015/50

(21) Numéro de dépôt: **12758546.1**

(22) Date de dépôt: **06.08.2012**

(51) Int Cl.:
B22D 27/00 *(2006.01)* ***B22D 29/00*** *(2006.01)*
B22C 9/04 *(2006.01)* ***B22D 27/04*** *(2006.01)*

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2012/051852

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2013/021130 (14.02.2013 Gazette 2013/07)

(54) **PROCEDE DE FONDERIE DE PIECES METALLIQUES MONOCRISTALLINES**

VERFAHREN ZUM GIESSEN VON MONOKRISTALLINEN METALLTEILEN

METHOD FOR CASTING MONOCRYSTALLINE METAL PARTS

(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

(30) Priorité: **09.08.2011 FR 1157264**

(43) Date de publication de la demande:
18.06.2014 Bulletin 2014/25

(73) Titulaire: **Snecma**
75015 Paris (FR)

(72) Inventeurs:
- **CHAN, Céline, Yanxi**
  F-77550 Moissy-Cramayel Cedex (FR)
- **MARIE, Benoît, Georges, Jocelyn**
  F-77550 Moissy-Cramayel Cedex (FR)
- **LOCATELLI, David**
  F-77550 Moissy-Cramayel Cedex (FR)

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

(56) Documents cités:
EP-A1- 0 570 271
EP-A1- 0 763 604
EP-A2- 0 079 692
EP-A2- 0 149 942
US-A- 4 116 723

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 2 741 876 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Description

Arrière-plan de l'invention

[0001] La présente invention concerne le domaine de la fonderie, et en particulier la fonderie de pièces métalliques monocristallines.

[0002] Les alliages métalliques traditionnels sont polycristallins équiaxes : à l'état solide, ils forment une pluralité de grains de taille sensiblement identique, typiquement de l'ordre de 1 mm, mais d'orientation plus ou moins aléatoire. Les joints entre grains constituent des points faibles dans une pièce métallique produite en un tel alliage. L'utilisation d'additifs pour renforcer ces joints inter-grains présente toutefois le défaut de réduire la température du point de fusion, ce qui est particulièrement inconvénient quand les pièces ainsi produites sont destinées à être utilisées à haute température.

[0003] Afin de résoudre cet inconvénient, des alliages polycristallins colonnaires ont été initialement proposés dont les grains se solidifient avec une orientation déterminée. Ceci permet, en orientant les grains dans la direction de charge principale de la pièce métallique, d'augmenter la résistance de ces pièces dans une direction particulière. Toutefois, même dans des pièces soumis à des efforts fortement orientés suivant un axe particulier, comme par exemple les aubes de turbine soumises aux forces centrifuges, il peut aussi être avantageux d'offrir une résistance accrue dans les autres axes.

[0004] Avec cet objet, depuis la fin des années 1979, des nouveaux alliages métalliques dits monocristallins ont été développés permettant la production en fonderie de pièces formées par un seul grain. Typiquement ces alliages monocristallins sont des alliages de nickel avec une concentration de titanium et/ou d'aluminium inférieure à 10% molaire. Ainsi, après leur solidification, ces alliages forment des solides biphasiques, avec une première phase Y et une deuxième phase Y'. La phase Y présente un réseau cristallin cubique à face centrée, dans lequel les atomes de nickel, aluminium et/ou titanium peuvent occuper n'importe quelle des positions. Par contre, dans la phase Y', les atomes d'aluminium et/ou titanium forment une configuration cubique, occupant les huit coins du cube, tandis que des atomes de nickel occupent les faces du cube.

[0005] Un de ces nouveaux alliages est l'alliage de nickel « AM1 » développé conjointement par la SNECMA et les laboratoires de l'ONERA, l'Ecole des Mines de Paris, et IMPHY SA. Les pièces produites en un tel alliage peuvent atteindre non seulement des tenues mécaniques particulièrement élevées dans tous les axes d'effort, mais aussi une tenue thermique améliorée, puisqu'on peut se passer des additifs destinés à lier plus fortement entre eux les grains cristallins. Ainsi, des pièces métalliques produites à base de tels alliages monocristallins peuvent être avantageusement utilisées, par exemple, dans les parties chaudes de turbines.

[0006] Toutefois, même en utilisant ces alliages spéciaux, il peut être difficile d'éviter un phénomène de recristallisation pendant la production de telles pièces, introduisant des nouveaux grains cristallins, et donc des nouveaux points faibles dans la pièce. Dans un procédé de fonderie traditionnel, l'alliage fondu est coulé dans une cavité d'un moule à travers au moins un canal de coulée dans le moule, le moule est décoché après solidification de l'alliage, afin de libérer la pièce, et celle-ci est ensuite soumise à un traitement thermique, tel que par exemple une trempe dans lequel le métal est d'abord chauffé, pour ensuite être refroidi rapidement, afin d'homogénéiser les phases Y et Y' dans le monocristal sans provoquer sa fusion.

[0007] Toutefois, les chocs mécaniques auxquels les pièces sont soumises après la coulée peuvent déstabiliser localement le réseau cristallin du monocristal. Ensuite, le traitement thermique peut déclencher des recristallisations intempestives dans les endroits ainsi déstabilisés, perdant ainsi le caractère monocristallin de la pièce et introduisant des points faibles dans celle-ci. Même avec des grands efforts, il est très difficile d'éviter des chocs mécaniques dans la manipulation de moules pouvant avoir une masse de plusieurs dizaine de kilos, d'autant plus que le décochage du moule implique, en soi, des chocs mécaniques. D'autre part, une réduction limitée de la température de traitement thermique, seule, ne permet pas d'empêcher sensiblement ces phénomènes de recristallisation.

Objet et résumé de l'invention

[0008] La présente invention vise à remédier à ces inconvénients. Pour cela, l'invention vise à proposer un procédé de fonderie qui permette de limiter en grande partie les phénomènes de recristallisation suite au traitement thermique des pièces après solidification de l'alliage coulé dans le moule.

[0009] Ce but est atteint grâce au fait que, dans un procédé de fonderie suivant au moins un mode de réalisation de l'invention, le traitement thermique est effectué après solidification de l'alliage dans le moule mais avant la fin du décochage.

[0010] Grâce à ces dispositions, le traitement thermique est effectué avant des opérations pouvant fragiliser la structure cristalline du monocristal formant la pièce. Alors que la personne du métier aurait pu penser que la présence au moins de restes du moule pendant le traitement thermique pourrait affecter l'efficacité de celui-ci, il s'avère que le traitement thermique peut être ainsi avancé sans effets délétères sur la pièce métallique et qu'au contraire, cet avancement permet

d'éviter des recristallisations intempestives pendant le traitement thermique.

[0011] En particulier, si ledit décochage du moule comporte une première étape de décochage au marteau, et une étape subséquente de décochage au jet d'eau, ledit traitement thermique peut être effectué avantageusement avant au moins le décochage au jet d'eau, qui se révèle être souvent à la source de phénomènes de recristallisation lors de traitements thermiques subséquents.

[0012] Dans des modes de réalisation alternatifs, il serait toutefois envisageable d'effectuer le traitement thermique même avant le décochage initial du moule. Dans ce cas, on lutterait contre lesdits phénomènes de recristallisation par d'autres moyens, notamment géométriques.

[0013] Suivant un deuxième aspect de la présente invention, ledit canal de coulée peut comporter au moins au moins une zone de transition adjacente à ladite cavité, avec un rayon d'arrondi non inférieur à 0,3 mm entre ledit canal de coulée et ladite cavité afin d'éviter un coude prononcé dans l'écoulement de l'alliage fondu, coude qui pourrait donner lieu à une zone de recristallisation de l'alliage. En particulier, le canal de coulée peut présenter, dans cette zone de transition, une section élargie, par rapport à une section en amont, en direction d'un axe principal d'une section de la cavité perpendiculaire au canal de coulée. Plus particulièrement, après la coulée, cette zone de transition pourrait former au moins un voile métallique plus fin que le canal de coulée en amont, et plus particulièrement au moins un tel voile métallique de chacun de deux côtés opposés du canal de coulée. Quand le moule contient au moins un noyau pénétrant dans ladite cavité et occupant un espace adjacent audit canal de coulée afin de former une cavité dans la pièce métallique, ladite zone de transition peut former, après la coulée, au moins un voile métallique adjacent audit noyau et plus fin que le canal de coulée en amont. Chaque voile métallique adjacent au noyau peut présenter un bord extérieur suivant une ligne sensiblement concave adjacente sur une surface du noyau. La zone de transition peut former au moins un voile métallique de chaque côté dudit noyau. Dans ce cas, lesdits voiles métalliques adjacents au noyau peuvent présenter des bords extérieurs se rejoignant aux extrémités, de manière à entourer le noyau.

[0014] De cette manière, lors de la coulée, cette zone de transition permet de remplir la cavité de manière sensiblement simultanée sur toute sa largeur, évitant ainsi de créer, lors de la solidification de l'alliage, des irrégularités dans la structure cristalline du monocristal. Ces irrégularités pourraient en effet provoquer, lors de l'étape de traitement thermique, une recristallisation locale formant un point faible dans la pièce métallique.

[0015] Afin d'augmenter la production de pièces métalliques, le moule peut contenir une pluralité de cavités, arrangées en grappe, pour mouler une pluralité de pièces métalliques simultanément.

[0016] Le procédé suivant l'invention est particulièrement approprié pour la production de certaines pièces métalliques, comme les aubes de turbomachine. La présente invention se rapporte aussi aux pièces métalliques obtenues par ce procédé.

Brève description des dessins

[0017] L'invention sera bien comprise et ses avantages apparaîtront mieux, à la lecture de la description détaillée qui suit, d'un mode de réalisation représenté à titre d'exemple non limitatif. La description se réfère aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 illustre un procédé de fonderie de l'art antérieur ;
- la figure 2 illustre un procédé de fonderie suivant un mode de réalisation de la présente invention ;
- la figure 3 illustre la connexion entre un canal de coulée et une cavité de moulage d'un moule de l'art antérieur ;
- la figure 4 est une vue en perspective d'une pièce métallique produite suivant le procédé de la figure 2 ; et
- la figure 5 et une coupe transversale de la pièce métallique de la figure 4 dans le plan V-V.

Description détaillée de l'invention

[0018] Un procédé classique de fonderie, tel qu'utilisé par exemple dans la production d'aubes de turbomachine et plus particulièrement d'aubes de turbine haute pression, est illustré sur la figure 1. Dans une première étape, un moule céramique 150 est produit, typiquement par le procédé de la cire perdue, bien que d'autres procédés classiques puissent être utilisés alternativement. Ce moule céramique 150 comporte une grappe de cavités 151 reliées par des canaux de coulée 152 à un orifice 153 à l'extérieur du moule 150. Chaque cavité 151 est conformée pour mouler une pièce métallique à produire. Dans ce cas, les pièces à produire étant creuses, le moule 150 comporte aussi des noyaux 155 pénétrant dans chacune des cavités 151. Après cette première étape, dans une étape de coulée, un alliage fondu 154 est versé dans l'orifice 153 pour remplir les cavités 151 à travers les canaux de coulée 152.

[0019] Après solidification de l'alliage, dans une troisième étape, on procède au décochage initial du moule 150 au marteau, afin de libérer du moule 150 les pièces métalliques 156 unies en une grappe 157. Afin d'éliminer les derniers restes du moule 150, on procède ensuite à une étape supplémentaire de décochage par jet d'eau. Dans l'étape suivante S105, les pièces individuelles 156 sont découpées de la grappe 157. Les noyaux 155 sont ensuite décochés de chaque

pièce 156 dans l'étape suivante, et les pièces 156 sont finalement traitées thermiquement. Ce traitement thermique peut être, par exemple, une trempe, dans laquelle les pièces 156 sont brièvement chauffées, pour être ensuite rapidement refroidies, afin d'endurcir l'alliage des pièces.

[0020] Parmi les alliages pouvant être utilisés dans ce procédé, on compte notamment les alliages dits monocristallins, qui permettent la production de pièces formées par un seul grain cristallin, ou monocristal. Toutefois, dans ce procédé de l'art antérieur, le traitement thermique, dont l'objet est en fait l'homogénéisation des phases Y et Y' dans le monocristal, peut déclencher des phénomènes de recristallisation fragilisant localement les pièces. Afin d'éviter cet inconvénient, dans un procédé de fonderie suivant un mode de réalisation de l'invention illustré sur la figure 2, l'ordre des opérations est modifié, de manière à avancer l'étape de traitement thermique.

[0021] Ainsi, dans ce procédé illustré sur la figure 2, la première étape est aussi la production d'un moule céramique 250. Comme dans l'art antérieur, ce moule céramique 250 peut aussi être produit par le procédé de la cire perdue, ou par un autre procédé alternatif parmi ceux connus de la personne du métier. En outre, comme dans l'art antérieur, ce moule céramique 250 comporte une grappe de cavités 251 reliées par des canaux de coulée 252 à un orifice 253 à l'extérieur du moule 250. Chaque cavité 251 est aussi conformée pour mouler une pièce métallique à produire. En outre, les pièces à produire étant aussi creuses, le moule 250 comporte également des noyaux 255 pénétrant dans chacune des cavités 251.

[0022] Après la première étape, et aussi comme dans l'art antérieur, dans une étape de coulée, un alliage fondu 254 est versé dans l'orifice 253 pour remplir les cavités 251 à travers les canaux de coulée 252. Après solidification de l'alliage, dans une troisième étape, on procède aussi au décochage initial du moule 250 au marteau, afin de libérer du moule 250 les pièces métalliques 256 unies en une grappe 257. Toutefois, dans ce procédé, après ce décochage initial, or procède directement à l'étape de traitement thermique. Pendant ce traitement thermique, les pièces métalliques 256, formant encore une grappe 257 avec encore des restes du moule 250, sont directement soumises à, par exemple, une trempe, dans laquelle les pièces 256 sont brièvement chauffées, pour être ensuite rapidement refroidies.

[0023] Afin d'éliminer les derniers restes du moule 250, on peut procéder ensuite au décochage par jet d'eau dans l'étape suivante. Finalement, les pièces individuelles 256 sont découpées de la grappe 257, et les noyaux 255 sont ensuite décochés de chaque pièce 256, déjà traitée thermiquement avant le décochage au jet d'eau.

[0024] Grâce à l'avancement de l'étape de traitement thermique, il est possible de réduire les phénomènes de recristallisation lors de cette étape. Toutefois, afin de réduire cette recristallisation de manière encore plus complète et surtout plus fiable, il convient aussi de donner une forme appropriée aux canaux de coulée 252. Dans la figure 3, on peut voir la connexion entre un canal de coulée 152 et une cavité de moulage 151 dans le moule 150 de l'art antérieur. Cette connexion forme des coudes très prononcés entre le canal 152 et la cavité 151, coudes qui peuvent provoquer la formation de zones de recristallisation 160 pendant le traitement thermique.

[0025] Dans le moule 250 du procédé illustré sur la figure 2, afin d'éviter la formation de telles zones de recristallisation dans chaque pièce 256 autour des canaux de coulée 252, ces canaux 252 peuvent comprendre des zones de transition adjacentes aux cavités 251. Dans cette zone de transition, le canal de coulée 252 s'élargit progressivement dans la direction d'un axe principal X d'une section S de la cavité 251 dans un plan A perpendiculaire au canal de coulée, de manière à ce que le rayon d'arrondi entre le canal de coulée 252 et la cavité 251 ne soit pas inférieur à 0,3 mm. En particulier, dans le mode de réalisation illustré, dans lequel le moule 250 comporte aussi au noyau 253 adjacent au canal de coulée 252, cette zone de transition s'élargit d'un côté et d'autre du noyau 253, ainsi que du côté opposé au noyau 253. Quand la cavité 251 et le canal 252 seront remplis de métal, celui-ci formera ainsi un voile 261 du côté opposé au noyau 253, et deux voiles 262, 263 adjacents au noyau 253, un de chaque côté du noyau 253, comme illustré sur les figures 4 et 5. Ces voiles 261, 262, 263 sont, perpendiculairement à l'axe X, sensiblement plus fins que le canal de coulée 252 en amont de la zone de transition.

[0026] Lors de l'étape de coulée, la présence de la zone de transition permet ainsi de distribuer le débit d'alliage fondu sensiblement dans toute la largeur de la cavité 251, évitant ainsi la formation de zones de recristallisation subséquente.

[0027] La pièce monocristalline 256 illustrée sur la figure 4 est une aube de turbine. Elle y est illustrée en état brut de démoulage, c'est-à-dire, avec le métal solidifié hors-pièce dans le canal de démoulage 252. Ce métal forme ainsi une tige centrale 275, des voiles 261,262 et 263, et une section élargie 276 adjacente à la tête d'aube 265. Pendant la coulée, l'alliage fondu s'écoule de la tête d'aube 265, à travers le pied d'aube 266, jusqu'à un canal de coulée 252 connecté à une autre cavité 251 plus en aval. L'écoulement de l'alliage fondu suit ainsi sensiblement la direction de l'axe principal Z de l'aube. Le voile 261, qui s'étend en direction du bord de fuite 267 de l'aube, présente un bord extérieur 268 avec un segment amont concave et un segment aval convexe. En coupe transversale, ce bord extérieur 268 présente un rayon de courbure R qui n'évolue que très graduellement de la tige centrale 275 à la section élargie 276. Les voiles 262 et 263, qui s'étendent en direction du bord d'attaque 269 de l'aube de chaque côté du noyau 253, présentent des bords extérieurs respectifs 270,271 sensiblement concaves longeant le noyau 253. Ces bords extérieurs 270, 271 se rejoignent par leurs extrémités au-dessus du noyau 253 et devant celui-ci, formant ainsi deux raccordements 272,273, de manière à entourer le noyau 253. En coupe transversale, ces voiles 262, 263 présentent des rayons de courbure R' et R" sur les surfaces adjacentes aux bords extérieurs 270, 271 afin d'éviter la germination de défauts métallurgiques

indésirables à proximité du noyau 253. La surface de transition 277 des voiles 261,262 et 263 et la tige 275 à la section élargie 276 est également arrondie pour éviter la germination de tels défauts.

[0028] Parmi les alliages pouvant être utilisés dans ce procédé, on compte notamment les alliages monocristallins de nickel, tels que, notamment, les AM1 et AM3 de SNECMA, mais aussi d'autres comme les CMSX-2®, CMSX-4®, CMSX-6 ®, et CMSX-10 ® du C-M Group, les René® N5 et N6 de General Electric, les RR2000 et SRR99 de Rolls-Royce, et les PWA 1480, 1484 et 1487 de Pratt & Whitney, entre autres. Le tableau 1 illustre les compositions de ces alliages :

Tableau 1 : Compositions d'alliages de nickel monocristallins en % massique

Alliage	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Nb	Re	Hf	C	B	Ni
CMSX-2	8,0	5,0	0,6	8,0	5,6	1,0	6,0	-	-	-	-	-	Bal
CMSX-4	6,5	9,6	0,6	6,4	5,6	1,0	6,5	-	3,0	0,1	-	-	Bal
CMSX-6	10,0	5,0	3,0	-	4,8	4,7	6,0	-	-	0,1	-	-	Bal
CMSX-10	2,0	3,0	0,4	5,0	5,7	0,2	8,0	-	6,0	0,03	-	-	Bal
René N5	7,0	8,0	2,0	5,0	6,2	-	7,0	-	3,0	0,2	-	-	Bal
René N6	4,2	12,5	1,4	6,0	5,75	-	7,2	-	5,4	0,15	0,05	0,004	Bal
RR2000	10,0	15,0	3,0	-	5,5	4,0	-	-	-	-	-	-	Bal
SRR99	8,0	5,0	-	10,0	5,5	2,2	12,0	-	-	-	-	-	Bal
PWA1480	10,0	5,0	-	4,0	5,0	1,5	12,0	-	-	-	0,07	-	Bal
PWA1484	5,0	10,0	2,0	6,0	5,6	-	9,0	-	3,0	0,1	-	-	Bal
PWA1487	5,0	10,0	1,9	5,9	5,6	-	8,4	-	3,0	0,25	-	-	Bal
AM1	7,0	8,0	2,0	5,0	5,0	1,8	8,0	1,0	-	-	-	-	Bal
AM3	8,0	5,5	2,25	5,0	6,0	2,0	3,5	-	-	-	-	-	Bal

[0029] Quoique la présente invention ait été décrite en se référant à un exemple de réalisation spécifique, il est évident que des différentes modifications et changements peuvent être effectués sur ces exemples sans sortir de la portée générale de l'invention telle que définie par les revendications. Par exemple, dans un mode de réalisation alternatif, le traitement thermique pourrait être effectué même avant le décochage initial du moule. En outre, des caractéristiques individuelles des différents modes de réalisation évoqués peuvent être combinées dans des modes de réalisation additionnels. Par conséquent, la description et les dessins doivent être considérés dans un sens illustratif plutôt que restrictif.

Revendications

1. Procédé de fonderie de pièces métalliques monocristallines (256), comportant au moins les étapes de :

   coulée d'un alliage fondu (254) dans une cavité (251) d'un moule (250) à travers au moins un canal de coulée (252) dans le moule (250) ;
   traitement thermique de l'alliage ; et
   décochage du moule (250) ; et
   caractérisé en ce que le traitement thermique est effectué après solidification de l'alliage dans le moule (250) mais avant la fin du décochage.

2. Procédé de fonderie suivant la revendication 1, dans lequel ledit décochage du moule (250) comporte une première étape de décochage au marteau, et une étape subséquente de décochage au jet d'eau, ledit traitement thermique étant effectué avant au moins le décochage au jet d'eau.

3. Procédé de fonderie suivant l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel ledit canal de coulée (252) comporte au moins une zone de transition adjacente à ladite cavité (251), avec un rayon d'arrondi non inférieur à 0,3 mm entre ledit canal de coulée (252) et ladite cavité (251).

4. Procédé de fonderie suivant la revendication 3, dans lequel ledit canal de coulée (252) présente une section trans-

versale élargie, par rapport à une section en amont, dans la direction d'un axe principal (X) d'une section (S) de la cavité (251) dans un plan (A) perpendiculaire au canal de coulée (252).

5. Procédé de fonderie suivant la revendication 4, dans lequel, après la coulée, ladite zone de transition forme au moins un voile métallique (261,262,263) plus fin que le canal de coulée (252) en amont.

6. Procédé de fonderie suivant la revendication 5, dans lequel, après la coulée, ladite zone de transition forme, de chacun de deux côtés opposés du canal de coulée (252), au moins un voile métallique (261,262,263) plus fin que le canal de coulée (252) en amont.

7. Procédé de fonderie suivant l'une quelconque des revendications 5 ou 6, dans lequel ledit moule contient au moins un noyau (255) pénétrant dans ladite cavité et occupant un espace adjacent audit canal de coulée (252) afin de former une cavité dans la pièce métallique (256), et dans lequel ladite zone de transition forme, après la coulée, au moins un voile métallique (262,263) adjacent audit noyau (255) et plus fin que le canal de coulée (252) en amont.

8. Procédé de fonderie suivant la revendication 7, dans lequel, après la coulée, ladite zone de transition forme au moins un voile métallique (262,263) adjacent audit noyau (255) de chacun de deux côtés opposés du noyau (255).

9. Procédé de fonderie de pièces métalliques monocristallines (256), comportant au moins les étapes de :

coulée d'un alliage fondu (254) dans une cavité (251) d'un moule (250) à travers au moins un canal de coulée (252) dans le moule (250) ;
traitement thermique de l'alliage ; et
décochage du moule (250) ;
caractérisé en ce que ledit canal de coulée (252) comporte au moins une zone de transition adjacente à ladite cavité (251), avec un rayon d'arrondi non inférieur à 0,3 mm entre ledit canal de coulée (252) et ladite cavité (251).

10. Procédé de fonderie de pièces métalliques monocristallines (256) suivant la revendication 9, dans lequel ledit canal de coulée (252) présente une section transversale élargie, par rapport à une section en amont, dans la direction d'un axe principal (X) d'une section (S) de la cavité (251) dans un plan (A) perpendiculaire au canal de coulée (252).

11. Procédé de fonderie de pièces métalliques monocristallines (256) suivant la revendication 10, dans lequel, après la coulée, ladite zone de transition forme au moins un voile métallique (261,262,263) plus fin que le canal de coulée (252) en amont.

12. Procédé de fonderie de pièces métalliques monocristallines (256) suivant la revendication 11, dans lequel, après la coulée, ladite zone de transition forme, de chacun de deux côtés opposés du canal de coulée (252), au moins un voile métallique (261,262,263) plus fin que le canal de coulée (252) en amont.

13. Procédé de fonderie de pièces métalliques monocristallines (256) suivant l'une quelconque des revendications 11 ou 12, dans lequel ledit moule contient au moins un noyau (255) pénétrant dans ladite cavité et occupant un espace adjacent audit canal de coulée (252) afin de former une cavité dans la pièce métallique (256), et dans lequel ladite zone de transition forme, après la coulée, au moins un voile métallique (262,263) adjacent audit noyau (255) et plus fin que le canal de coulée (252) en amont.

14. Procédé de fonderie de pièces métalliques monocristallines (256) suivant la revendication 13, dans lequel ledit voile métallique (262,263) adjacent au noyau (255) présente un bord extérieur (270, 271) suivant une ligne sensiblement concave adjacente sur une surface du noyau (255).

15. Procédé de fonderie de pièces métalliques monocristallines (256) suivant l'une quelconque des revendications 13 ou 14, dans lequel, après la coulée, ladite zone de transition forme au moins un voile métallique (262,263) adjacent audit noyau (255) de chacun de deux côtés opposés du noyau (255).

16. Procédé de fonderie de pièces métalliques monocristallines (256) suivant la revendication 15, dans lequel lesdits voiles métalliques (262,263) adjacents au noyau (255) présentent des bords extérieurs (270, 271) se rejoignant aux extrémités, de manière à entourer le noyau (253).

17. Procédé de fonderie suivant l'une quelconque des revendications 1 à 16, dans lequel ladite pièce métallique (256)

est une aube de turbomachine.

18. Procédé de fonderie suivant l'une quelconque des revendications 1 à 17, dans lequel ledit moule (250) contient une pluralité de cavités (251), arrangées en grappe, afin de mouler une pluralité de pièces métalliques (256) simultanément.

19. Pièce métallique monocristalline (256) produite par un procédé de fonderie suivant l'une quelconque des revendications 1 à 18.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Gießen von monokristallinen Metallteilen (256), umfassend wenigstens die Schritte:

des Gießens einer geschmolzenen Legierung (254) in einen Hohlraum (251) einer Form (250) durch wenigstens einen Gießkanal (252) in der Form (250),
der Wärmebehandlung der Legierung und
des Auspackens der Form (250), und
dadurch gekennzeichnet, dass die Wärmebehandlung nach Erstarren der Legierung in der Form (250), aber vor dem Ende des Auspackens durchgeführt wird.

2. Gießverfahren nach Anspruch 1, wobei das Auspacken der Form (250) einen ersten Schritt eines Auspackens mit dem Hammer und einen nachfolgenden Schritt eines Auspackens mit Wasserstrahl umfasst, wobei die Wärmebehandlung vor wenigstens dem Wasserstrahl-Auspacken durchgeführt wird.

3. Gießverfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Gießkanal (252) wenigstens einen an den Hohlraum (251) angrenzenden Übergangsbereich, mit einem Abrundungsradius von nicht weniger als 0,3 mm zwischen dem Gießkanal (252) und dem Hohlraum (251) umfasst.

4. Gießverfahren nach Anspruch 3, wobei der Gießkanal (252) einen Querschnitt aufweist, der gegenüber einem vorgelagerten Querschnitt, in der Richtung einer Hauptachse (X) eines Querschnitts (S) des Hohlraums (251) in einer Ebene (A) senkrecht zu dem Gießkanal (252) erweitert ist.

5. Gießverfahren nach Anspruch 4, wobei der Übergangsbereich nach dem Gießen wenigstens einen Metallsteg (261, 262, 263), das feiner als der vorgelagerte Gießkanal (252) ist, bildet.

6. Gießverfahren nach Anspruch 5, wobei der Übergangsbereich nach dem Gießen auf einer jeden von zwei entgegengesetzten Seiten des Gießkanals (252) wenigstens einen Metallsteg (261, 262, 263), der feiner als der vorgelagerte Gießkanal (252) ist, bildet.

7. Gießverfahren nach einem der Ansprüche 5 oder 6, wobei die Form wenigstens einen Kern (255) umfasst, der in den Hohlraum eindringt und einen an den Gießkanal (252) angrenzenden Raum einnimmt, um einen Hohlraum in dem Metallteil (256) zu bilden, und wobei der Übergangsbereich nach dem Gießen wenigstens einen Metallsteg (262, 263) bildet, der an den Kern (255) angrenzt und feiner als der vorgelagerte Gießkanal (252) ist.

8. Gießverfahren nach Anspruch 7, wobei der Übergangsbereich nach dem Gießen wenigstens einen an den Kern (255) angrenzenden Metallsteg (262, 263) auf jeder von zwei entgegengesetzten Seiten des Kerns (255) bildet.

9. Verfahren zum Gießen von monokristallinen Metallteilen (256), umfassend wenigstens die Schritte:

des Gießens einer geschmolzenen Legierung (254) in einen Hohlraum (251) einer Form (250) durch wenigstens einen Gießkanal (252) in der Form (250),
der Wärmebehandlung der Legierung und
des Auspackens der Form (250),
dadurch gekennzeichnet, dass der Gießkanal (252) wenigstens einen an den Hohlraum (251) angrenzenden Übergangsbereich mit einem Abrundungsradius von nicht weniger als 0,3 mm zwischen dem Gießkanal (252) und dem Hohlraum (251) umfasst.

10. Verfahren zum Gießen von monokristallinen Metallteilen (256) nach Anspruch 9, wobei der Gießkanal (252) einen Querschnitt aufweist, der gegenüber einem vorgelagerten Querschnitt, in der Richtung einer Hauptachse (X) eines Querschnitts (S) des Hohlraums (251) in einer Ebene (A) senkrecht zu dem Gießkanal (252) erweitert ist.

11. Verfahren zum Gießen von monokristallinen Metallteilen (256) nach Anspruch 10, wobei der Übergangsbereich nach dem Gießen wenigstens einen Metallsteg (261, 262, 263), der feiner als der vorgelagerte Gießkanal (252) ist, bildet.

12. Verfahren zum Gießen von monokristallinen Metallteilen (256) nach Anspruch 11, wobei der Übergangsbereich nach dem Gießen auf einer jeden von zwei entgegengesetzten Seiten des Gießkanals (252) wenigstens einen Metallsteg (261, 262, 263), der feiner als der vorgelagerte Gießkanal (252) ist, bildet.

13. Verfahren zum Gießen von monokristallinen Metallteilen (256) nach einem der Ansprüche 11 oder 12, wobei die Form wenigstens einen Kern (255) umfasst, der in den Hohlraum eindringt und einen an den Gießkanal (252) angrenzenden Raum einnimmt, um einen Hohlraum in dem Metallteil (256) zu bilden, und wobei der Übergangsbereich nach dem Gießen wenigstens einen Metallsteg (262, 263) bildet, der an den Kern (255) angrenzt und feiner als der vorgelagerte Gießkanal (252) ist.

14. Verfahren zum Gießen von monokristallinen Metallteilen (256) nach Anspruch 13, wobei der an den Kern (255) angrenzende Metallsteg (262, 263) einen Außenrand (270, 271) aufweist, der einer im Wesentlichen konkaven, benachbarten Linie auf einer Oberfläche des Kerns (255) folgt.

15. Verfahren zum Gießen von monokristallinen Metallteilen (256) nach einem der Ansprüche 13 oder 14, wobei der Übergangsbereich nach dem Gießen wenigstens einen an den Kern (255) angrenzenden Metallsteg (262, 263) auf jeder von zwei entgegengesetzten Seiten des Kerns (255) bildet.

16. Verfahren zum Gießen von monokristallinen Metallteilen (256) nach Anspruch 15, wobei die an den Kern (255) angrenzenden Metallstege (262, 263) Außenränder (270, 271) aufweisen, die an den Enden zusammenlaufen, um den Kern (255) zu umschließen.

17. Gießverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei das Metallteil (256) eine Schaufel einer Turbomaschine ist.

18. Gießverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei die Form (250) eine Vielzahl von traubenförmig angeordneten Hohlräumen (251) enthält, um eine Vielzahl von Metallteilen (256) gleichzeitig zu formen.

19. Monokristallines Metallteil (256), das durch ein Gießverfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18 hergestellt ist.

Claims

1. A foundry method of casting monocrystalline metal parts (256), the method comprising at least the steps of:

casting a molten alloy (254) into a cavity (251) of a mold (250) through at least one casting channel (252) in the mold (250);
subjecting the alloy to heat treatment; and
removing the mold (250);
the method being **characterized in that** the heat treatment is performed after the alloy has solidified in the mold (250) and before the end of mold removal.

2. A foundry method according to claim 1, wherein said removal of the mold (250) comprises a first step of removal by hammering and a subsequent step of removal by water jet, said heat treatment being performed at least before the removal by water jet.

3. A foundry method according to either preceding claim, wherein said casting channel (252) includes at least one transition zone adjacent to said cavity (251), the transition zone having a rounded portion of radius not less than 0.3 mm between said casting channel (252) and said cavity (251).

4. A foundry method according to claim 3, wherein said casting channel (252) presents, relative to an upstream section,

a cross-section that is enlarged in the direction of a main axis (X) of a section (S) of the cavity (251) in a plane (A) that is perpendicular to the casting channel (252).

5. A foundry method according to claim 4, wherein, after casting, said transition zone forms at least one metal web (261, 262, 263) that is thinner than the casting channel (252) upstream.

6. A foundry method according to claim 5, wherein, after casting, said transition zone forms at least one metal web (261, 262, 263) on each of two opposite sides of the casting channel (252), which at least one metal web is thinner than the casting channel (252) upstream.

7. A foundry method according to claim 5 or claim 6, wherein said mold contains at least one core (255) penetrating into said cavity and occupying a space adjacent to said casting channel (252) so as to form a cavity in the metal part (256), and wherein, after casting, said transition zone forms at least one metal web (262, 263) adjacent to said core (255) and thinner than the casting channel (252) upstream.

8. A foundry method according to claim 7, wherein, after casting, said transition zone forms at least one metal web (262, 263) adjacent to said core (255) on each of two opposite sides of the core (255).

9. A foundry method of casting monocrystalline metal parts (256), the method comprising at least the steps of:

casting a molten alloy (254) into a cavity (251) of a mold (250) through at least one casting channel (252) in the mold (250);
subjecting the alloy to heat treatment; and
removing the mold (250);
characterized in that said casting channel (252) includes at least one transition zone adjacent to said cavity (251), the transition zone having a rounded portion of radius not less than 0.3 mm between said casting channel (252) and said cavity (251).

10. A foundry method of casting monocrystalline metal parts (256) according to claim 9, wherein said casting channel (252) presents, relative to an upstream section, a cross-section that is enlarged in the direction of a main axis (X) of a section (S) of the cavity (251) in a plane (A) that is perpendicular to the casting channel (252).

11. A foundry method of casting monocrystalline metal parts according to claim 10, wherein, after casting, said transition zone forms at least one metal web (261, 262, 263) that is thinner than the casting channel (252) upstream.

12. A foundry method of casting monocrystalline parts (256) according to claim 11, wherein, after casting, said transition zone forms at least one metal web (261, 262, 263) on each of two opposite sides of the casting channel (252), which at least one metal web is thinner than the casting channel (252) upstream.

13. A foundry method of casting monocrystalline metal parts (256) according to claim 11 or claim 12, wherein said mold contains at least one core (255) penetrating into said cavity and occupying a space adjacent to said casting channel (252) so as to form a cavity in the metal part (256), and wherein, after casting, said transition zone forms at least one metal web (262, 263) adjacent to said core (255) and thinner than the casting channel (252) upstream.

14. A foundry method of casting monocrystalline metal parts (256) according to claim 13, wherein said metal web (262, 263) adjacent to the core (255) presents an outer edge (270, 271) following a substantially concave line adjacent on a surface of the core (255).

15. A foundry method of casting monocrystalline metal parts (256) according to claim 13 or claim 14, wherein, after casting, said transition zone forms at least one metal web (262, 263) adjacent to said core (255) on each of two opposite sides of the core (255).

16. A foundry method of casting monocrystalline metal parts (256) according to claim 15, wherein said metal webs (262, 263) adjacent to the core (255) present outer edges (270, 271) that join together at the ends so as to surround the core (255).

17. A foundry method according to any one of claims 1 to 16, wherein said metal part (256) is a turbine engine blade.

18. A foundry method according to any one of claims 1 to 17, wherein said mold (250) contains a plurality of cavities (251) arranged as a bunch in order to mold a plurality of metal parts (256) simultaneously.

19. A monocrystalline metal part (256) produced by a foundry method according to any one of claims 1 to 18.

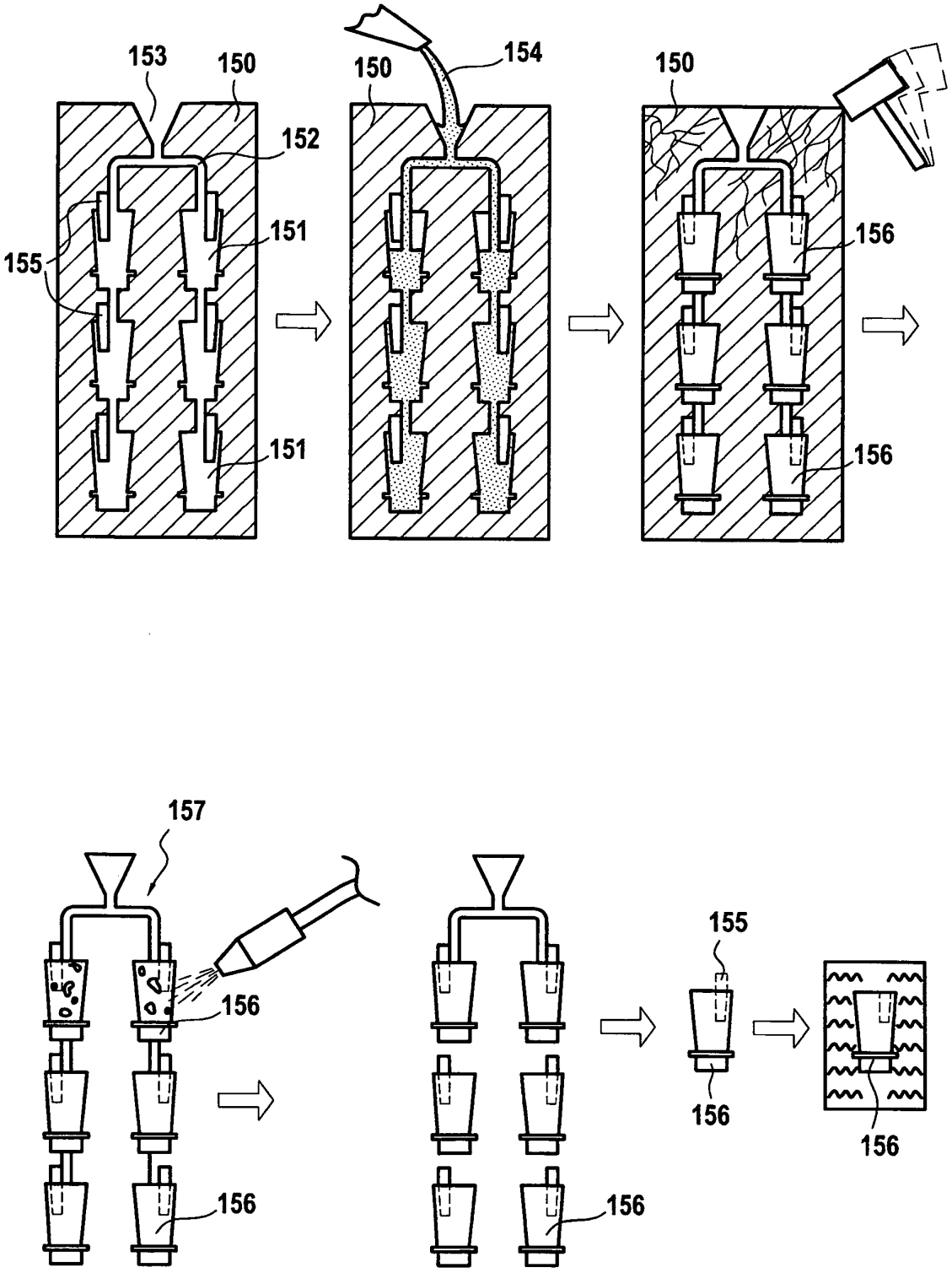
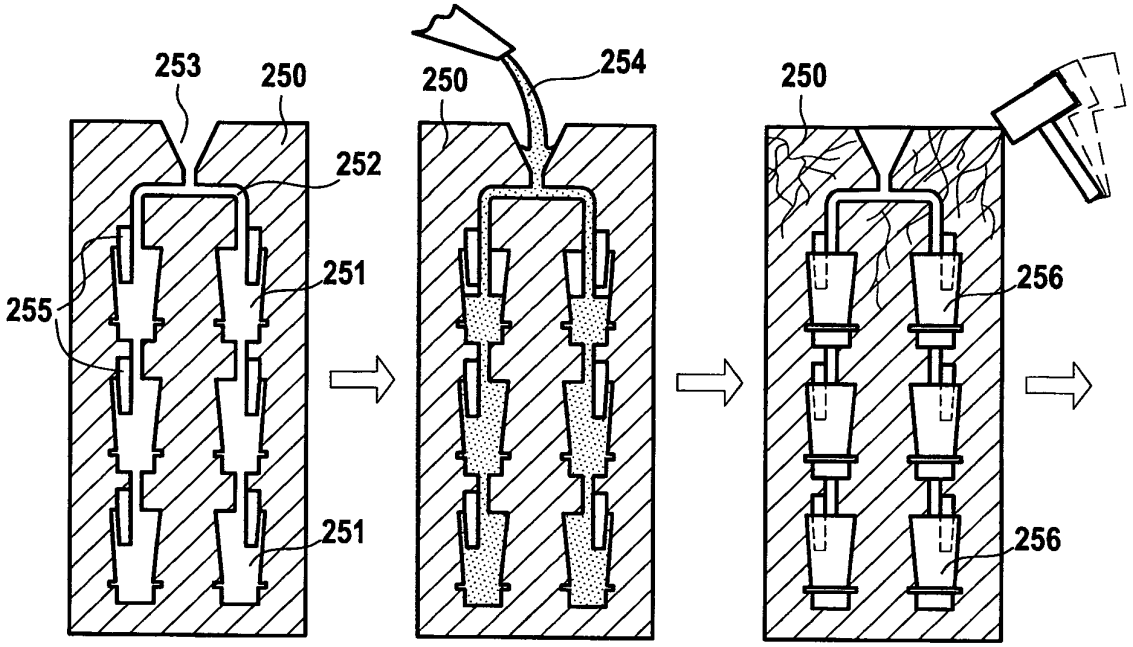

153
150
152
151
155
151
150
154
150
156
156
157
156
156
155
156
156

FIG.1


253
250
252
251
255
251
250
254
250
256
256

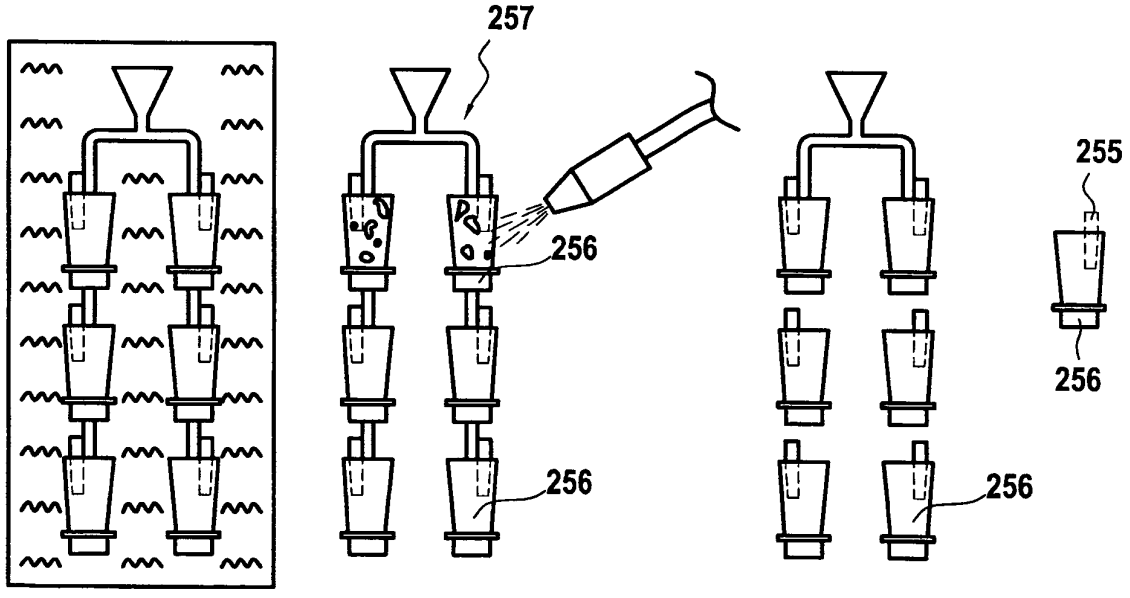

257
256
256
256
255
256

FIG.2

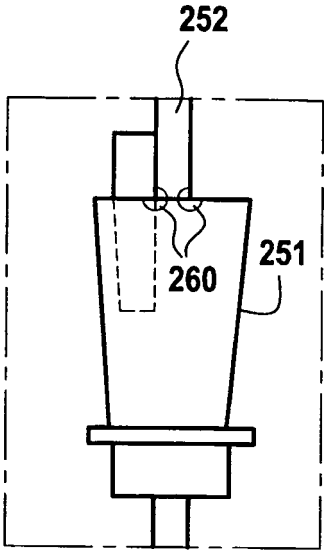


FIG.3

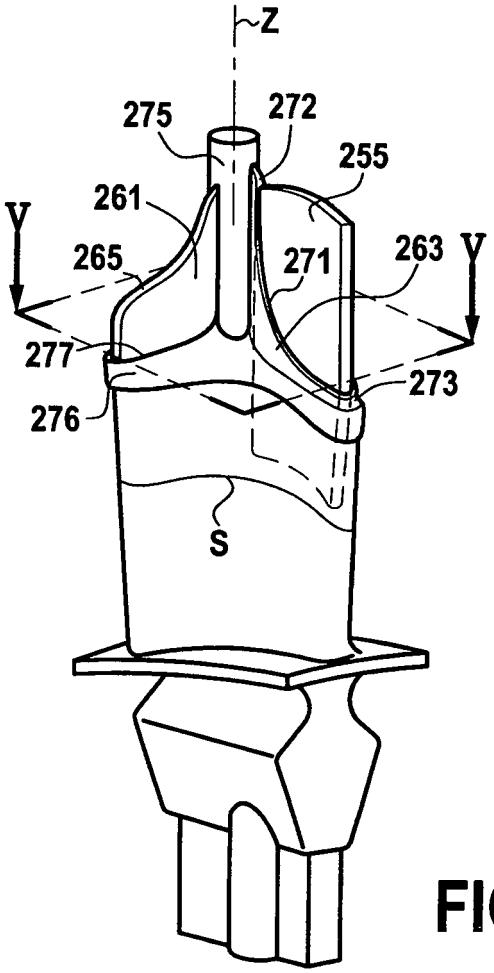


FIG.4

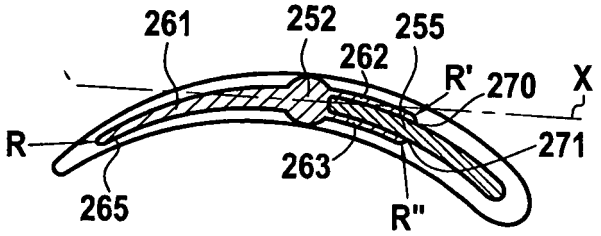


FIG.5