



(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
01.07.2015 Bulletin 2015/27

(51) Int Cl.:
G04B 15/14 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **14196656.4**

(22) Date de dépôt: **05.12.2014**

(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
 Etats d'extension désignés:
BA ME

(30) Priorité: **05.12.2013 CH 20102013**

(71) Demandeur: **TGM Developpement SA**
2300 La Chaux-de-Fonds (CH)

(72) Inventeurs:
 • **Mikhaïlov, Serguei**
2014 Bole (CH)
 • **Goloviatinski, Sergey**
2016 Cortaillod (CH)

(74) Mandataire: **P&TS SA (AG, Ltd.)**
Av. J.-J. Rousseau 4
P.O. Box 2848
2001 Neuchâtel (CH)

(54) **Procédé de fabrication d'une pièce mécanique en diamant pour mouvement de montre, et pièce fabriquée selon ce procédé**

(57) Procédé de fabrication d'une pièce mécanique (3) fonctionnelle en diamant monocristallin, comprenant les étapes suivantes :
 Découpe par laser de la pièce dans une plaque en dia-

mant monocristallin ;
 Polissage d'une surface de la pièce par oxydation sélective de carbone sous forme non diamantique en surface.

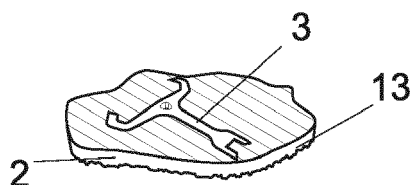


Fig.1E

Description

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne une un procédé de fabrication d'une pièce mécanique pour mouvement de montre, par exemple une roue, un pignon, une roue d'ancre, une ancre d'échappement, un ressort-spiral, un pont, une platine, une bascule, un ressort-lame, ou un autre composant fonctionnel micro-mécanique dans l'organe réglant, dans le rouage ou dans une complication du mouvement. La présente invention concerne également une pièce en diamant fabriquée selon ce procédé.

Etat de la technique

[0002] Les pièces mécaniques pour mouvements de montre mécaniques sont le plus souvent réalisées en métal. Les pièces mobiles, par exemple les axes, les roues, les pignons, l'ancre d'échappement, la roue d'échappement, le balancier, les ressorts et le spiral sont fréquemment réalisés en acier, ou en acier elinvar pour le spiral. La platine et les ponts sont généralement réalisés en laiton ou en acier. D'autres matériaux sont employés de manière plus marginale, par exemple le rubis pour les paliers ou les palettes, ou la céramique pour certains roulements.

[0003] Des recherches intensives ont été menées afin de remplacer ces matériaux conventionnels et d'éviter certains de leurs inconvénients. A titre d'exemple, le silicium est aujourd'hui utilisé de manière industrielle pour la fabrication des organes de l'échappement ou du spiral notamment. EP732635A1 (CSEM) décrit une pièce micro-mécanique, par exemple une ancre pour mouvement d'horlogerie, découpée dans une plaque en silicium par attaque au moyen d'un gaz plasma autour d'un masque de forme ménagé préalablement sur la face de la plaque.

[0004] Le silicium a l'avantage d'être facile à usiner, de manière reproductible, avec des technologies parfaitement maîtrisées pour la fabrication de circuits intégrés ou de MEMS notamment. Il présente cependant certains inconvénients, notamment un état de surface tribologique insuffisant et un coefficient de frottement relativement élevé.

[0005] CH669109A1 (The Swatch Group R&D Ltd) suggère d'améliorer cet état de surface en déposant une couche de carbone DLC (« Diamond Like Carbon ») sur le silicium. De manière similaire, US2002/114225 (Damasco) décrit notamment une ancre d'échappement en acier revêtu d'une couche DLC (« Diamond Like Carbon »). US2012/0263909 (Diamaze Microtechnology SA et al.) décrit un autre exemple de pièce mécanique revêtue de diamant ou d'une couche DLC.

[0006] Les revêtements DLC possèdent certaines des propriétés du diamant naturel, bien que leur structure cristalline soit très différente. De manière générale, ces revêtements sont produits à l'aide d'un procédé de dépôt de carbone par plasma, par arcs filtrés, par fais-

ceaux ioniques, par pulvérisation cathodique etc. Ces procédés rapides, à haute énergie, ne permettent pas aux atomes de carbones de s'arranger selon la disposition cubique sp³ typique du diamant ; l'arrangement des atomes est globalement amorphe, avec un enchevêtrement de micro-structures cristallines orientées différemment les unes des autres.

[0007] Par ailleurs, les procédés de déposition de revêtement DLC connus génèrent un matériau comportant des proportions importantes, supérieure à 10%, d'hydrogène, de carbone graphitique ou d'autres composants.

[0008] Une pièce en acier ou en silicium revêtue d'une couche DLC présente donc des états de surface tribologiques qui sont certes améliorés, mais encore loin d'être parfaits. L'adhésion du revêtement DLC sur le substrat constitue en outre un point de faiblesse. En tous les cas, l'étape supplémentaire nécessaire pour la déposition de cette couche DLC complique la fabrication. Par ailleurs, il est difficile de contrôler précisément la forme de la pièce après le dépôt du revêtement.

[0009] Les ancres dans l'échappement des mouvements mécaniques sont en particulier soumises à des contraintes sévères. Il est tout d'abord souhaitable de réduire leur masse et leur moment d'inertie au maximum afin de limiter l'énergie nécessaire à l'oscillation à fréquence élevée de ces pièces mobiles, et donc d'augmenter la réserve de marche de la montre. L'ancre, en particulier la palette d'ancre, est cependant soumise à des chocs répétés à chaque alternance, ou lors de chocs de la montre, et doit donc présenter une solidité suffisante. On désire en outre généralement une ancre rigide et qui ne se déforme pas à chaque alternance, ce qui limite également l'épaisseur minimale de la pièce.

[0010] On connaît par ailleurs des pièces micromécaniques fabriquées en diamant. Ainsi, WO2004/029733A2 (Fore Eagle Co Ltd) décrit des composants horlogers réalisés au moins partiellement dans ce matériau. Ce document énumère différents avantages du diamant, notamment sa dureté, un faible coefficient de frottement, une bonne résistance aux chocs, une résistance mécanique élevée, un module d'élasticité élevé, un faible coefficient de dilatation thermique, la transparence et la capacité de ne pas se rayer.

[0011] DE102008029429A1 suggère de fabriquer des pièces micromécaniques horlogères en diamant ou en silicium recouvert d'une couche DLC.

[0012] EP2407831A1 (Rolex SA) décrit un spiral pour oscillateur horloger qui peut être réalisé dans un matériau à faible densité comme le silicium, le diamant ou le quartz. Le spiral peut être réalisé par un procédé de gravage chimique à l'aide d'un plasma (« DRIE, Deep Reactive Ion Etching »).

[0013] CH701155B1 (Complitime SA) décrit un balancier pour pièce d'horlogerie comportant une planche qui peut être en diamant, en quartz, en silicium ou en corindon.

[0014] WO2005/017631 (Fore Eagle Co Ltd) décrit un autre balancier constitué de diamant et obtenu par gra-

vage chimique à l'aide d'un plasma.

[0015] EP2107434A1 décrit une pièce mécanique, notamment une roue d'ancre pour l'horlogerie, en silicium ou en diamant.

[0016] EP2233989 (Ulysse Nardin Le Locle SA) décrit un ressort spiral en diamant obtenu par gravure profonde.

[0017] CH701369 décrit un ressort de barillet en diamant.

[0018] Le type de diamant utilisé pour les pièces ci-dessus n'est généralement pas précisé dans ces documents. En pratique, il s'agit toujours de diamant synthétique polycristallin dont le coût est 10 à 50% plus bas que celui du diamant naturel, et qui peut être produit dans des formes convenant à l'usage prévu.

[0019] On connaît différentes méthodes de fabrication de diamant synthétique. US8088221 B2 (Z. Shapiro) décrit un procédé de fabrication de diamant synthétique à basse température et relativement basse pression. EP2189555A2 (Apollo Diamond Inc) décrit un autre procédé de production de diamant synthétique. Des procédés par croissance CVD ou par détonation d'explosifs ont aussi été suggérés notamment dans US2003/205190.

Bref résumé de l'invention

[0020] Il existe un besoin, notamment dans l'horlogerie de moyen de gamme et de haut de gamme, pour des composants micro-mécaniques réalisés dans des matériaux offrant un meilleurs compromis entre les propriétés recherchées de dureté, résistance mécanique, légèreté, faible dilatation thermique, stabilité du module d'élasticité, et facilité d'usinage à haute précision.

[0021] Un but de la présente invention est donc de proposer un procédé de fabrication d'une pièce mécanique pour application horlogère qui offre un tel compromis entre ces différentes propriétés.

[0022] Selon l'invention, ces buts sont atteints notamment au moyen d'un procédé de fabrication d'une pièce mécanique fonctionnelle en diamant monocristallin, comprenant les étapes suivantes :

Découpe par laser de la pièce dans une plaque en diamant monocristallin ;

Polissage d'une surface de la pièce par oxydation sélective de carbone sous forme non diamantique en surface. Par pièce mécanique fonctionnelle, on entend dans la présente demande une pièce qui remplit une fonction mécanique, en sorte qu'il n'est pas possible de retirer cette pièce, sans affecter au moins une fonction du mouvement de montre. Une pièce purement décorative, ou un élément d'habillage horloger, n'est donc pas considérée comme une pièce mécanique fonctionnelle.

[0023] Les diamants polycristallins connus dans l'art antérieur pour la fabrication de pièces mécaniques sont

extrêmement durs, plus durs que les diamants naturels monocristallins usuels. Cependant, contrairement aux préjugés, une dureté aussi importante n'est pas toujours nécessaire ni même avantageuse pour un composant horloger. Cette dureté entraîne un coût de polissage élevé, et une usure plus rapide des pièces moins dures en contact.

[0024] Les diamants polycristallins sont en outre le plus souvent transparents ou gris; en raison des multiples interfaces entre les différents grains de cristaux avec différentes orientations, ils produisent peu ou pas de reflets, et pratiquement pas d'effets d'irisation.

[0025] L'invention part notamment de la constatation que le diamant monocristallin présente de nombreux avantages par rapport au diamant polycristallin plus répandu, et encore davantage par rapport aux revêtements DLC.

[0026] En particulier, les diamants monocristallins ont l'avantage par rapport aux diamants polycristallins d'être extrêmement solides; aucune amorce de fente n'existe en effet entre les différents grains. Cette solidité permet de réaliser avec la même solidité des pièces plus fines et donc plus légères. Par exemple, il est possible de réaliser en diamant monocristallin des pièces telles que, sans limitation, des roues d'ancres ou des ancres avec une épaisseur inférieure à 120 microns, de préférence inférieure à 100 microns, par exemple entre 20 et 60 microns. Dans le cas d'une palette, l'épaisseur est avantageusement comprise entre 100 et 400 microns, par exemple 320 microns, ou entre 100 et 160 microns, de préférence entre 100 et 120 microns. De telles épaisseurs ne seraient pratiquement pas réalisables avec des pièces en acier, en silicium ou en diamant polycristallin, car ces pièces seraient trop fragiles et très difficiles à monter sans les casser.

[0027] Grâce à cette finesse extrême, il est possible d'une part de réduire l'épaisseur du mouvement, et surtout de réduire l'inertie des pièces en mouvement. Cela permet d'augmenter la réserve de marche de la montre, et d'augmenter la fréquence d'oscillation de l'organe régulant.

[0028] Les diamants monocristallins peuvent être réalisés dans une grande variété de couleur, notamment transparent, noir, bleu, jaune, rouge etc. D'autre part, les jeux de lumière qui se reflètent sur différentes faces orientées de diverses façons produisent des effets d'irisation très appréciés.

[0029] D'autre part, les diamants monocristallins ont généralement un état de surface plus lisse que les diamants polycristallins ou les revêtements DLC, dont la structure en grains ne permet pas d'obtenir une surface tribologique optimale.

[0030] Des diamants synthétiques monocristallins peuvent par exemple être obtenus en faisant croître du carbone par croissance CVD autour d'une amorce en diamant monocristallin. Il est important que l'amorce soit en diamant monocristallin pour que la structure qui se dépose soit elle-même monocristalline. Le carbone peut

être obtenu à partir de méthane dans un réacteur CVD.

[0031] Le diamant synthétique monocristallin peut aussi être obtenu par compression de carbone à haute pression et haute température.

[0032] L'invention part aussi de la constatation que le diamant monocristallin peut être découpé de manière précise au moyen d'un faisceau laser. Ce procédé de découpe a cependant l'inconvénient de libérer des atomes de carbone en surface, qui se déposent sur la surface du diamant cristallin sous forme de graphite ou sous une autre forme non diamantique (c'est-à-dire dans une organisation non cristalline, ou sous forme de cristal différent du diamant). Il en résulte une surface noire, peu esthétique, et un coefficient de frottement en surface qui est moins bon que celui du diamant poli.

[0033] Selon un aspect de l'invention, ces résidus de carbone non diamantique (par exemple de graphite) sont éliminés par oxydation, sans attaquer le carbone avec une structure diamantique.

[0034] L'oxydation peut être obtenue par traitement thermique à une température comprise entre 600°C et 750°C, de préférence comprise entre 650°C et 680°C.

[0035] L'oxydation peut aussi être obtenue par traitement thermique à une température inférieure à 650°C dans une atmosphère enrichie en oxygène.

[0036] L'oxydation peut aussi être obtenue grâce à un traitement de surface par plasma d'oxygène ou de fluor.

[0037] Le procédé d'oxydation permet de polir la pièce en brûlant les impuretés, les pointes, les déchets de coupe, et le carbone sous forme de graphite en surface.

[0038] Le procédé peut comporter une étape supplémentaire de polissage d'une surface par faisceaux d'ions.

[0039] La pièce mécanique peut en outre comporter des surfaces latérales. Au moins une partie de ces surfaces mécaniques peut être polie ou corrigée, par exemple avec un faisceau laser ou un faisceau d'ions. De manière avantageuse, au moins une portion de ces surfaces est corrigée afin d'avoir un état tribologique meilleur qu'avant la correction. Au moins une portion peut être corrigée de manière à ce que cette portion soit sensiblement perpendiculaire aux faces inférieures et supérieures de la pièce.

[0040] L'invention concerne aussi un procédé de fabrication d'une pièce mécanique fonctionnelle en diamant synthétique monocristallin, comprenant les étapes suivantes :

- Mise à disposition d'une amorce de diamant monocristallin ;
- Déposition de carbone par procédé CVD sur ladite amorce de diamant ;
- Simultanément, introduction d'impuretés de dopage lors de la croissance du diamant.

[0041] L'invention part ainsi de la constatation que le dopage permet de contrôler différentes propriétés mécaniques et/ou optiques de la pièce, par exemple sa du-

reté, son module d'élasticité, la variation du module d'élasticité en fonction de la température, sa couleur etc.

[0042] Le diamant comporte de préférence au maximum 3% d'impuretés de dopage, sans affecter sa structure monocristalline. Ce seuil permet de modifier les propriétés mécaniques désirées du diamant sans pour autant affecter sa structure monocristalline.

[0043] Le diamant monocristallin dopé est obtenu en introduisant volontairement un élément dopant dans le diamant, soit lors de la croissance d'un diamant synthétique, soit dans un diamant synthétique ou naturel déjà formé.

[0044] L'opération de dopage permet ainsi de produire un diamant différent des diamants que l'on trouve dans la nature, et différents des diamants monocristallins synthétiques non dopés. La différence provient du type d'impuretés, de leur répartition et/ou de leur concentration. Le dopage est choisi de manière à modifier les propriétés mécaniques et tribologiques de la pièce en diamant.

[0045] Au moins un dopage est avantageusement effectué dans la masse de la pièce, de manière homogène, de manière à affecter les propriétés mécaniques de l'ensemble de la pièce, en profondeur.

[0046] Ce dopage peut être effectué pratiquement sans coût additionnel lors de la croissance d'un diamant synthétique monocristallin.

[0047] Un dopage peut aussi être effectué en surface. Le dopage peut être différent en surface et en profondeur. La densité de dopage peut être différente en profondeur et en surface. Le produit dopant peut être différent en surface et en profondeur. Les impuretés peuvent être introduites différemment en surface et en profondeur.

[0048] Le diamant peut être un diamant noir dopé au bore.

[0049] Les impuretés peuvent être introduites dans le diamant lors de la croissance organique du diamant.

[0050] Dans un mode de réalisation, la pièce mécanique fabriquée en diamant monocristallin dopé peut être une pièce plate, par exemple une pièce utilisée dans l'organe réglant d'une montre mécanique, par exemple une ancre ou une roue d'ancre.

[0051] La pièce mécanique peut être une pièce plate réalisée par découpe à partir d'une plaque plate. La découpe peut être effectuée par laser.

[0052] La pièce mécanique peut être une pièce à plusieurs niveaux plats obtenus par attaque thermochimique à partir d'une pièce plate à un seul niveau.

[0053] La pièce mécanique plate peut être un ressort spiral pour l'organe réglant d'une montre mécanique. La rigidité élevée du diamant monocristallin permet d'obtenir des fréquences d'oscillation élevées avec des spiraux de petit diamètre.

[0054] La pièce mécanique peut être un ressort, par exemple un ressort de bascule, un ressort plat, etc.

[0055] La pièce mécanique peut aussi être une palette destinée à équiper une ancre d'échappement dans un autre matériau, par exemple une ancre en acier.

[0056] La pièce mécanique peut aussi être un pont,

une platine, etc.

[0057] La pièce mécanique en diamant monocristallin peut être rigide, par exemple dans le cas d'un pont, d'une platine, d'une bascule, d'une palette, d'une ancre, d'une roue etc.

[0058] La pièce mécanique en diamant monocristallin peut être flexible, par exemple dans le cas d'un spiral, d'un ressort, d'une lame flexible, etc.

[0059] La pièce plate peut être réalisée par découpe d'une plaque (wafer) de diamant monocristallin dopé.

[0060] L'invention concerne aussi un mouvement d'horlogerie comportant au moins une pièce en diamant monocristallin dopé, par exemple une ancre, une palette d'ancre, une roue d'ancre ou un spiral en diamant monocristallin dopé.

[0061] Différents pièces mécaniques du même mouvement peuvent être réalisées en différentes variétés de diamant monocristallin. Par exemple, différentes pièces mécaniques du même mouvement peuvent être réalisées en différentes couleurs de diamant monocristallin. Il a été relevé dans le cadre de l'invention que la couleur du diamant monocristallin, qui est due aux impuretés, influence sa dureté. Par exemple, le diamant monocristallin transparent est moins dur que le diamant monocristallin noir, dopé avec des ions de bore. Le type ou la couleur de diamant monocristallin choisi pour différentes pièces d'un même mouvement est donc déterminé en fonction de la dureté désirée, ou en fonction d'autres propriétés mécaniques dépendant de cette couleur.

[0062] Afin de réduire l'usure, il est avantageux que les palettes de l'ancre d'échappement, ou l'ancre complète si les palettes sont intégrées, soit plus dure que la roue d'ancre avec laquelle elle collabore ; une roue d'ancre moins dure que les palettes permet d'amortir les chocs. Dans un mode de réalisation, le mouvement de montre comporte par exemple une ancre ou une palette d'ancre dans un diamant monocristallin dur, et une roue d'ancre dans un diamant monocristallin moins dur. L'ancre ou les palettes peuvent être par exemple en diamant monocristallin noir dopé au bore tandis que la roue d'ancre peut être en diamant monocristallin transparent ou jaune.

[0063] De manière générale, le mouvement peut comporter plusieurs pièces en diamant monocristallin avec des dopages différents.

[0064] Le procédé peut comporter une étape supplémentaire de dopage superficiel par injection d'ions dopants en surface au moyen d'un faisceau d'ions.

[0065] Les impuretés peuvent comporter du bore qui permet d'augmenter la dureté sans affecter la structure cristalline du diamant.

Brève description des figures

[0066] Des exemples de mise en oeuvre de l'invention sont indiqués dans la description illustrée par les figures annexées dans lesquelles :

- Les figures 1A à 1E illustrent différentes étapes successives d'un procédé de fabrication d'une pièce mécanique selon l'invention.

- 5 • La figure 2 illustre un exemple de pièce mécanique selon l'invention.

- Les figures 3A à 3B illustrent schématiquement une opération de polissage ou de rectification d'au moins une portion des flancs latéraux d'une pièce selon l'invention.

- 10 • Les figures 4A à 4C illustrent schématiquement un procédé de découpe en tranche de diamant.

- 15 • La figure 5 illustre schématiquement la découpe d'une palette selon l'invention.

Exemple(s) de mode de réalisation de l'invention

[0067] Les figures 1 à 3 illustrent schématiquement un procédé de fabrication d'une pièce mécanique fonctionnelle selon l'invention.

[0068] La figure 1A illustre un diamant monocristallin 1 non taillé employé pour fabriquer une ou plusieurs pièces selon l'invention. Le diamant monocristallin peut être un diamant naturel ou un diamant synthétique, d'un poids avantageusement supérieur à 1 carat, de préférence supérieur à 3 carats.

[0069] Dans le cas d'un diamant naturel, il peut s'agir d'un diamant ayant une forme ou d'autres propriétés le rendant impropre à une valorisation pour un usage en joaillerie.

[0070] Un diamant monocristallin synthétique peut être produit par exemple au moyen d'un arc filtré afin de déposer du carbone sur une amorce de diamant monocristallin, sans apport d'hydrogène ou d'autres matériaux. Une autre possibilité est d'effectuer un dépôt CVD de carbone produit à partir d'un hydrocarbure tel que le méthane sur une amorce de diamant monocristallin. L'amorce peut être réutilisée après découpe de plaques dans la masse déposée au-dessus de l'amorce.

[0071] Une troisième possibilité, moins avantageuse, est de produire un diamant monocristallin synthétique en soumettant une source de carbone à une haute température et à une haute pression simultanée. D'autres procédés pourront être utilisés.

[0072] Le diamant monocristallin ainsi formé peut être dopé. Dans un mode de réalisation, le produit dopant peut être introduit au cours de la formation du diamant synthétique, par exemple en ajoutant des traces de produit dopant dans l'arc filtré respectivement dans le réacteur CVD. Dans un autre mode de réalisation, le produit dopant est ajouté après la formation du diamant synthétique, par exemple au moyen d'un faisceau d'ions à haute énergie. Le dopage peut être effectué de manière homogène dans toute la masse du diamant, et/ou uniquement en surface. Un premier dopage peut être effectué dans

la masse et un dopage différent, par exemple avec un autre produit dopant et/ou avec une autre concentration, peut être effectué en surface.

[0073] Le dopage peut être sélectionné afin de modifier la dureté des pièces produites à partir de ce diamant; selon le produit dopant, il est possible d'augmenter ou de réduire cette dureté. Par exemple, l'inclusion d'azote comme produit dopant permet de réduire la dureté d'une pièce, tandis que l'inclusion d'ions bores permet de l'augmenter.

[0074] Dans un mode de réalisation, la dureté d'une palette en diamant monocristallin est augmentée par dopage, par exemple en incluant des ions bores, tandis qu'une roue d'ancre en diamant monocristallin destinée à collaborer avec cette palette dans l'échappement est non dopée, ou dopée de manière à réduire sa dureté, par exemple à l'azote, afin d'obtenir une dureté inférieure à celle de la palette. Il est en effet avantageux de disposer de palettes très dures, pour réduire leur usure et le coefficient de frottement sur le plan d'impulsion, et d'une roue d'échappement moins dure pour absorber le choc de l'ancre à chaque oscillation. Dans un autre mode de réalisation, la roue d'ancre est dopée avec une concentration relativement élevée d'azote, tandis que la palette est dopée avec une concentration moins élevée d'azote. L'inclusion d'azote lors de la fabrication du diamant monocristallin synthétique par croissance CVD permet en effet d'augmenter la vitesse de fabrication, et donc de réduire le coût, tout en obtenant des palettes qui restent plus dures que les palettes en rubis conventionnelles.

[0075] Le dopage peut aussi être sélectionné de manière à contrôler la couleur du diamant. Le dopage peut être choisi de manière à contrôler le module d'Young du diamant. Le dopage peut être choisi de manière à réduire la sensibilité du module d'Young à la température, afin de produire des pièces dont la rigidité soit aussi indépendante que possible de la température. Le dopage peut être choisi de manière à réduire le coefficient de dilatation du diamant, afin de produire des pièces dont les dimensions soient aussi indépendantes que possible de la température.

[0076] Le produit dopant et la concentration de ce produit sont en outre choisis de manière à ne pas interférer avec la structure monocristalline du diamant, ou à limiter au maximum cette interférence. Dans un mode de réalisation, le diamant est dopé avec des ions de bore. Différents diamants utilisés pour la production de différentes pièces dans une même montre peuvent être dopés différemment en fonction des propriétés recherchées.

[0077] Le dopage au bore effectué lors de la croissance organique du diamant synthétique a l'avantage de produire un diamant noir non radioactif, au contraire des procédés de dopage par introduction d'ions à haute énergie.

[0078] Le diamant monocristallin 1 est ensuite découpé comme illustré sur la figure 1B, par exemple au moyen d'une scie à diamant, ou fendu à l'aide d'un marteau et d'une lame, d'un arc électrique, d'un faisceau ionique,

ou de préférence découpé au moyen d'un laser de façon à obtenir une surface 10 plane. Le laser est avantageusement un laser pulsé, par exemple un laser pulsé à une fréquence de 5 à 40 GHz.

5 **[0079]** Dans le mode de réalisation illustré sur les figures 4A à 4C, le diamant est découpé en tranche depuis un premier côté au moyen d'un premier faisceau laser 20. Le faisceau laser est pivoté au moyen d'un miroir mobile, de manière à émettre dans un cône avec un angle d'ouverture inférieur à 5°. Le diamant est ensuite attaqué depuis l'autre côté au moyen d'un autre faisceau laser 21 pivoté dans un cône (figure 4B). Il est aussi possible d'utiliser le même faisceau laser pour attaquer les deux côtés de la pièce, en la retournant entre les deux découpes. Cet usinage en cône permet d'élargir la zone d'ablation et d'éviter les mauvais états de surface et la destruction de la structure cristalline qui risque de se produire si l'ablation était effectuée dans un canal étroit, en provoquant une élévation de température excessive. Le procédé est comparable, toutes proportions gardées, à celui d'un bûcheron tronçonnant un tronc au moyen de deux entailles en biais depuis chaque côté du tronc.

25 **[0080]** La surface convexe ainsi produite par ce tronçonnage est ensuite rectifiée ou aplatie, comme illustré sur la figure 4C, au moyen d'un faisceau laser orienté parallèlement à la surface de la plaque que l'on souhaite produire. La fréquence de pulsation de ce laser peut être par exemple entre 10 et 100 KHz, afin d'obtenir une découpe précise sans les problèmes de modifications de la structure cristalline causés par la haute énergie des lasers pulsés plus rapidement.

30 **[0081]** Il est possible de scanner le diamant brut au préalable à l'aide d'un scanner 3D afin de déterminer le plan de coupe optimal permettant d'obtenir le maximum de pièces 3 et/ou de faciliter le clivage; par exemple, une coupe selon un plan tétraédrique du cristal sera préférée car elle est plus rapide et permet d'obtenir une surface plus propre.

35 **[0082]** Dans un premier mode de réalisation, le plan de coupe est déterminé afin d'obtenir une surface active de la pièce orientée selon le plan cristallin {111} qui est généralement le plus dur. Dans le cas d'une plaque destinée à la fabrication d'un ressort spiral horloger, le plan de coupe est de préférence parallèle au plan {111} du diamant. Dans le cas d'une plaque destinée à la fabrication de palettes pour ancre d'horlogerie, le plan de coupe est de préférence distinct du plan {111} et choisi de manière à permettre la découpe de palettes dont la surface d'impulsion, obtenue dans la tranche des plaques découpées, est parallèle au plan d'orientation cristalline {111}.

40 **[0083]** Il a cependant été constaté dans le cadre de l'invention que même si le plan cristallin {111} est le plus dur, cette dureté décroît très brusquement en cas de légère déviation par rapport à ce plan idéal. Par exemple, une pièce découpée ou polie selon un plan qui dévie ne serait-ce que de quelques degrés par rapport au plan {111} présente une dureté et un état de surface nettement

diminués. Il est cependant difficile, notamment dans le cadre d'une fabrication industrielle, de fabriquer des pièces comportant des surfaces orientées précisément selon le plan {111}, sans aucune déviation. On souhaite par ailleurs parfois réaliser des palettes dont la surface d'impulsion est non plane.

[0084] Par conséquent, dans un mode de réalisation préférentiel, le plan de coupe est déterminé afin de d'obtenir une surface active de la pièce orientée sensiblement selon le plan cristallin {001} ou de préférence selon le plan {011} ; bien que moins durs que le plan idéal {111}, ces plans sont moins sensibles aux déviations par rapport à la surface idéale. Dans le cas d'une plaque destinée à la fabrication d'un ressort spiral horloger, le plan de coupe est de préférence sensiblement parallèle au plan {001} ou {011} du diamant. Dans le cas d'une plaque destinée à la fabrication de palettes pour ancre d'horlogerie, le plan de coupe est de préférence choisi de manière à permettre la découpe de palettes dont la surface d'impulsion, obtenue dans la tranche des plaques découpées, est sensiblement parallèle au plan d'orientation cristalline {001} ou au plan {011}. Sensiblement parallèle signifie ici que la déviation après polissage est au maximum de $\pm 5^\circ$.

[0085] Il est possible de maintenir le diamant 1 pendant la coupe par exemple en le cimentant ou en le collant sur un support temporaire.

[0086] La face brute 10 obtenue au terme de cette découpe est ensuite rectifiée et/ou polie de manière à obtenir une face plane polie 11 comme illustrée sur la figure 1C.

[0087] La rectification de la face 11 peut être effectuée, comme indiqué, au moyen d'un laser, par exemple d'un laser pulsé entre 10 et 100KHz.

[0088] Le polissage de la face 11 peut être effectué sur une meule rotative couverte de poudre de diamant synthétique, par exemple de poudre de diamant polycristallin.

[0089] La rugosité de la face 11 peut aussi être réduite au moyen d'un faisceau d'ions à haute énergie parallèle à la surface.

[0090] Le diamant est ensuite découpé selon une nouvelle coupe parallèle à la première coupe, de manière à obtenir une plaque fine 2 comme illustrée sur la figure 1D. Cette découpe délicate est avantageusement effectuée par laser pour éviter des chocs qui pourraient casser la plaque. Comme la découpe de la face supérieure, cette découpe peut être effectuée selon le procédé illustré sur les figures 4a à 4c, c'est-à-dire au moyen d'un ou deux faisceaux lasers déviés par un miroir pour produire une zone d'ablation conique.

[0091] Selon le type de pièce désiré, ce procédé permet de tailler des plaques extrêmement fines dans un diamant monocristallin, par exemple des plaques d'une épaisseur inférieure à 400 microns, par exemple des plaques d'une épaisseur comprise entre 100 et 400 microns, par exemple 320 microns, ou entre 100 et 160 microns, idéalement entre 100 et 120 microns, dans le cas de

plaques destinées à l'usinage de palettes, et des plaques d'une épaisseur comprise entre 20 et 120 microns, par exemple entre 40 et 80 microns, par exemple de 60 microns, dans le cas de fabrication de roues d'ancres, d'ancres, de roues, de spiraux, de ressorts ou de bascules par exemple.

[0092] Cette caractéristique permet de fabriquer des pièces extrêmement légères et donc de réduire l'énergie nécessaire pour les mettre en déplacement.

[0093] La face inférieure 12 de la plaque 2 est relativement brute. Pour beaucoup d'applications, notamment en horlogerie, cet aspect non parfaitement poli est entièrement satisfaisant puisque cette face est non visible. Il est cependant envisageable en réalisant une pièce légèrement plus épaisse de polir également cette face 12, par exemple par polissage mécanique sur une meule et/ou laser. Dans un mode de réalisation, la pièce est tenue sans colle lors de son polissage, de préférence par vacuum. Il est ainsi possible de contrôler très précisément l'épaisseur de la pièce après polissage, sans que cette épaisseur ne dépende de l'épaisseur de la colle.

[0094] La plaque 2 produite peut être contrôlée visuellement afin d'éliminer les plaques qui présentent trop d'impuretés ou une structure non monocristalline. Dans un mode de réalisation, ce contrôle est effectué en illuminant la plaque avec une lumière polarisée faisant ressortir les imperfections. Le contrôle peut être manuel ou effectué à au moyen d'une caméra et d'un logiciel d'analyse d'images.

[0095] Au cours de l'étape illustrée sur la figure 1E, la pièce 3 est découpée dans la surface de la plaque 2. Cette découpe est par exemple obtenue au moyen d'un faisceau laser perpendiculaire à l'une des surfaces 11, 12 ou au plan médian de la plaque 2. Dans l'exemple des figures 1E et 2, la pièce 3 ainsi découpée est une ancre d'échappement pour mouvement de montre. Il est aussi possible de réaliser d'autres pièces micromécaniques à l'aide du procédé décrit ci-dessus, par exemple une roue d'ancre ou un ressort spiral ou une autre roue. Plusieurs pièces différentes peuvent être découpées dans une seule plaque.

[0096] La figure 5 illustre un exemple de trajectoire possible du faisceau laser 6 lors de l'usinage d'une palette dans une plaque 11. Le faisceau laser peut avoir une dimension relativement grande, par exemple un diamètre maximal de l'ordre de 20 microns. La forme de ce faisceau 6 est généralement non circulaire, par exemple elliptique. La trajectoire de découpe est donc avantageusement déterminée par un logiciel agencé pour déterminer une trajectoire du faisceau lumineux qui tient compte de la dimension, de la forme et de l'orientation de ce faisceau par rapport à la pièce à découper, de manière à obtenir une pièce après libération dont les dimensions correspondent aux dimensions souhaitées.

[0097] La trajectoire est de préférence entamée à distance de la pièce à produire, sur une portion 32 qui n'appartient pas à la pièce produite. On évite ainsi les déformations dues au perçage initial. La trajectoire est en outre

de préférence optimisée, en tenant compte de l'orientation cristalline du diamant, de manière à ce que les fissures éventuelles qui se propagent depuis le point d'ablation aient un maximum de chances de suivre le bord de la pièce, ou de s'éloigner de cette pièce. Par exemple, sur la figure 5, les risques de fissures maximal se produisent à partir du point de perçage initial 32 ; la position de ce point est donc de préférence choisie de manière à ce que la direction de fissure la plus probable suive exactement la ligne suivie par le faisceau.

[0098] Comme indiqué plus haut, la pièce à découper est orientée sur la plaque de diamant 11 de manière à ce que la surface active de la pièce se trouve dans le plan cristallin {111}. Dans le cas illustré d'une palette, la surface active 31 est constituée par la surface d'impulsion (plan ou non plan) destinée à être mise en contact avec la roue d'ancre. La palette est donc découpée dans la plaque 11 de façon à ce que cette surface 31 se trouve précisément dans le plan {111}.

[0099] Les éléments 33 sur la figure 5 sont des témoins de découpe utilisés pendant l'étape ultérieure de polissage afin de définir la profondeur idéale de polissage. Le polissage sera donc effectué précisément jusqu'au moment où ces marques disparaissent complètement.

[0100] D'autres plaques similaires à la plaque 2 peuvent ensuite être découpées dans le même diamant 1, afin de réaliser d'autres pièces identiques à, ou différentes de la pièce 3.

[0101] Dans un mode de réalisation, des facettes sont obtenues par découpe et/ou polissage dans une des faces supérieure et/ou inférieure 11 ou 12, de manière à contrôler la direction dans laquelle la lumière traverse la pièce 3 et les reflets ou irisations produits sur les différentes faces. La pièce reste cependant essentiellement plane ; dans un mode de réalisation préférentiel, le rapport entre l'épaisseur et la plus petite longueur est supérieur à 10, avantageusement supérieur à 50, par exemple supérieur à 100.

[0102] Il est aussi possible de découper dans la pièce 3 un logo, une inscription ou un motif au moyen du laser. Cette découpe peut être traversante ou borgne ; elle permet par exemple d'offrir une protection contre la contrefaçon en rendant la copie extrêmement difficile.

[0103] Le procédé de découpe dans une plaque 2 de la pièce 3 au moyen d'un laser a l'inconvénient de produire des flancs latéraux 13 non perpendiculaires aux faces 11, 12, comme représenté de façon exagérée sur la figure 3A. Le diamant étant plus ou moins transparent, la découpe est en fait obtenue par l'attaque du plasma produit par l'interaction entre la lumière laser et l'air. Il en résulte des flancs non perpendiculaires et peu lisses. Cette qualité de surface n'est généralement pas problématique pour des pièces 3 ou des portions de pièces 3 qui ne sont pas destinées à entrer en contact avec d'autres pièces. Dans certains cas, ces surfaces irrégulières sont cependant indésirables soit pour des raisons esthétiques, ou parce qu'il est nécessaire de contrôler avec précision la forme de la pièce et la quantité de ma-

tière, par exemple dans le cas d'un ressort-spiral. Dans le cas d'une pièce ou d'une portion de pièce destinée à entrer en contact avec d'autres composants du mouvement, il est donc souhaitable de contrôler le profil et l'état de surface des flancs 13. Ces exigences sont particulièrement importantes si la pièce 3 est une palette d'ancre, une portion d'ancre formant palette, ou une dent d'une roue d'ancre ou d'une autre roue.

[0104] Dans un tel cas, une opération optionnelle de rectification des flancs 13, ou d'au moins une portion de ces flancs, peut être effectuée au moyen d'un laser ou d'une meule afin d'obtenir des flancs 14 plus lisses et perpendiculaires aux surfaces 11, 12, comme illustré sur la figure 3B. Dans le cas d'une palette, au moins la surface active 31 peut être meulée jusqu'à la profondeur de la marque 33 au moyen d'une meule recouverte de poudre de diamant polycristallin. Dans le cas d'une roue d'ancre, la portion de chaque dent destinée à être mise en contact avec la palette peut être polie ou rectifiée au moyen d'un faisceau laser. Dans le cas d'une pièce tournante, par exemple d'une roue ou d'une palette, ce meulage est de préférence effectué en orientant la meule par rapport à la pièce de manière à meuler selon une direction sensiblement parallèle à la tangente de la pièce, de manière à créer des micro-rainures parallèles à la direction de frottement de la pièce lors de son usage.

[0105] Les surfaces de la pièce 3 ainsi obtenue ne sont de préférence pas revêtues ; le diamant monocristallin présente un état de surface pratiquement idéal aussi bien d'un point de vue esthétique que pour ce qui est du coefficient de frottement ou de la résistance aux chocs par exemple. Il arrive cependant que les surfaces 11, 12, 13 ou 14 soient recouvertes de traces de carbone graphité résultant de la destruction de la structure en diamant lors des opérations de découpe ou de polissage. Afin d'éliminer ces traces, il est possible dans le cadre de l'invention de soumettre la pièce 3 à un traitement thermique, par exemple en la laissant quelques secondes ou quelques minutes dans un four entre 600° et 750°C, de préférence entre 650 et 680°C, de préférence à l'air ambiant ; cette opération permet de brûler le graphite résiduel en surface sans affecter le carbone sous forme de diamant, et d'améliorer ainsi l'état de surface de la pièce. Il est aussi possible d'utiliser une température plus basse avec un taux d'oxygène plus élevé, ou d'oxyder le carbone non cristallin sans attaquer le diamant en employant par exemple un plasma oxygéné ou fluoré.

[0106] Cette opération permet aussi de polir la palette par brulure des pointes en surface.

[0107] La pièce produite peut aussi être polie au moyen d'un faisceau d'ions (« ion etching »), par exemple d'un faisceau d'ions parallèle à la surface à polir. Dans un mode de réalisation, ce polissage ionique est effectué après le polissage par traitement thermique.

[0108] La pièce produite peut aussi être polie au moyen d'ultrasons. Elle peut être nettoyée à l'essence pour améliorer l'aspect du diamant.

[0109] Un mouvement de montre mécanique dans le

cadre de l'invention peut comporter une ou plusieurs pièces 3 en diamant monocristallin. Il est possible de choisir la dureté de chaque pièce 3 en sélectionnant le type et le couleur de diamant. Par exemple, une pièce pour laquelle une dureté maximale est requise pourra être réalisée en diamant synthétique, par exemple en diamant synthétique noir dopé au bore. Une pièce pour laquelle une dureté aussi importante n'est pas souhaitée pourra être réalisée en diamant synthétique transparent, en diamant naturel, etc. Différentes pièces en diamant de différentes couleur et de différents types peuvent être combinées dans un seul mouvement. Il est par exemple avantageux de réaliser une palette ou une ancre en diamant monocristallin très dur, et une roue d'ancre en diamant monocristallin légèrement moins dure afin d'amortir les chocs.

Numéros de référence employés sur les figures

[0110]

- 1 Diamant monocristallin
- 10 Face coupée non polie
- 11 Face coupée polie
- 12 Face opposée non polie
- 13 Face latérale non rectifiée
- 14 Face latérale rectifiée
- 2 Plaque de diamant découpée
- 3 Pièce mécanique fonctionnelle

Revendications

1. Procédé de fabrication d'une pièce mécanique (3) fonctionnelle en diamant monocristallin, comprenant les étapes suivantes :

Découpe par laser de la pièce (3) dans une plaque en diamant monocristallin ;
Polissage d'une surface de la pièce par oxydation sélective de carbone sous forme non diamantique en surface.

2. Le procédé de la revendication 1, ladite oxydation étant obtenue par traitement thermique à une température comprise entre 600°C et 750°C, de préférence comprise entre 650°C et 680°C.
3. Le procédé de la revendication 1, ladite oxydation étant obtenue par traitement thermique à une température inférieure à 650°C dans une atmosphère enrichie en oxygène.
4. Le procédé de la revendication 1, ladite oxydation étant obtenue grâce un traitement de surface par plasma d'oxygène ou de fluor.
5. Le procédé de l'une des revendications 1 à 4, ladite

plaque étant une plaque de diamant synthétique obtenue par le procédé suivant :

Mise à disposition d'une amorce de diamant monocristallin ;
Déposition de carbone par procédé CVD sur ladite amorce de diamant ;
Simultanément, introduction d'impuretés de dopage lors de la croissance du diamant.

6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, comportant une étape de dopage superficiel par injection d'ions dopants en surface au moyen d'un faisceau d'ions.
7. Procédé selon l'une des revendications 5 à 6, le dopage comportant du bore.
8. Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, le dopage comportant de l'azote.
9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, comportant une étape de polissage d'une surface par faisceaux d'ions.
10. Pièce mécanique (3) fonctionnelle en diamant monocristallin pour mouvement de montre, **caractérisée en ce qu'elle** est fabriquée selon un procédé comprenant les étapes de l'une des revendications 1 à 10.
11. Pièce mécanique selon la revendication 10, le diamant étant dopé de manière homogène dans la masse de la pièce.
12. Pièce mécanique selon la revendication 10, le diamant étant dopé de manière différente en surface que dans la profondeur de la pièce.
13. Pièce selon la revendication 10, **caractérisée en ce que** l'épaisseur de la pièce (2) est comprise entre 20 et 400 microns.
14. Pièce selon la revendication 10, constituée par un ressort ou une bascule.
15. Mouvement d'horlogerie comportant au moins une pièce selon l'une des revendications 10 à 14
16. Le mouvement selon la revendication 15, comportant plusieurs pièces en diamant monocristallin avec des dopages différents.

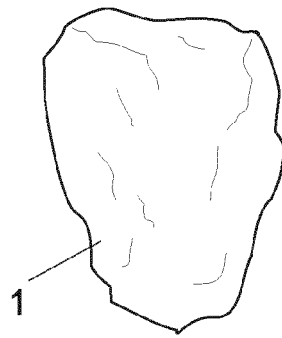


Fig. 1A

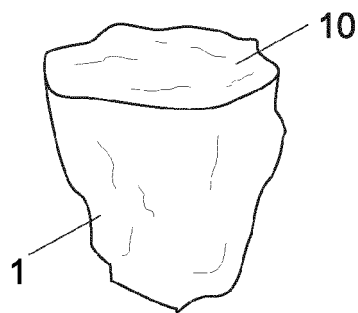


Fig. 1B

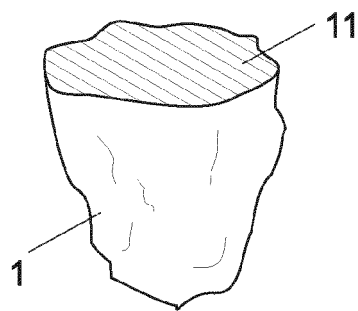


Fig. 1C

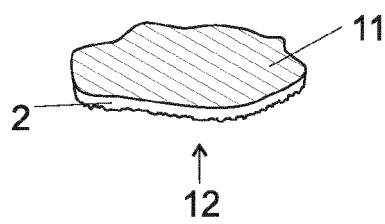


Fig. 1D

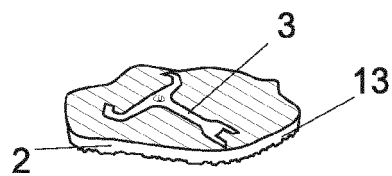


Fig. 1E

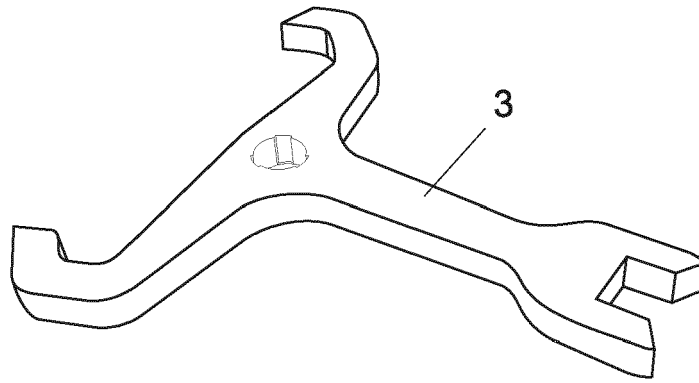


Fig.2

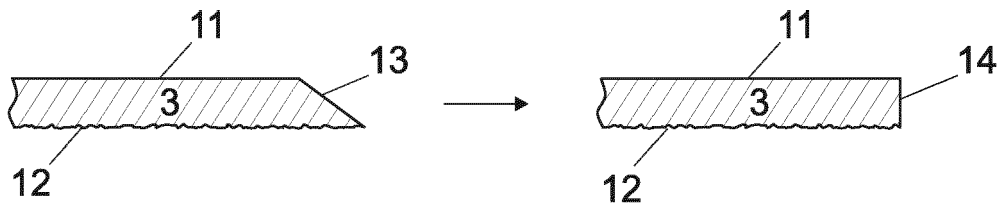


Fig.3A

Fig.3B

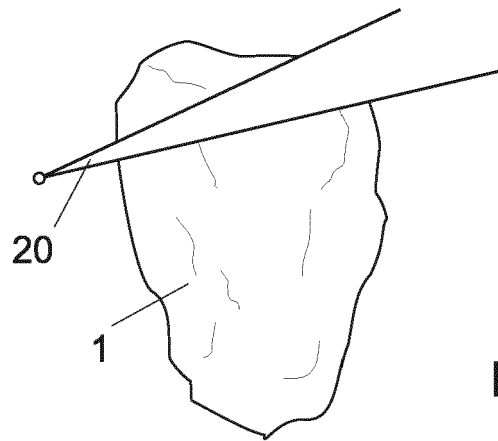


Fig. 4A

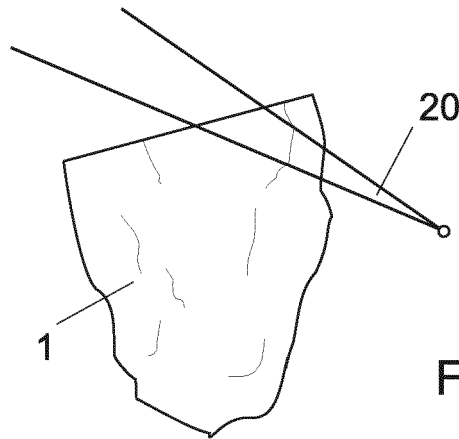


Fig. 4B

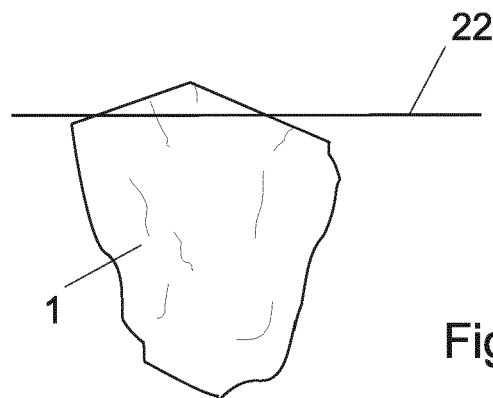


Fig. 4C

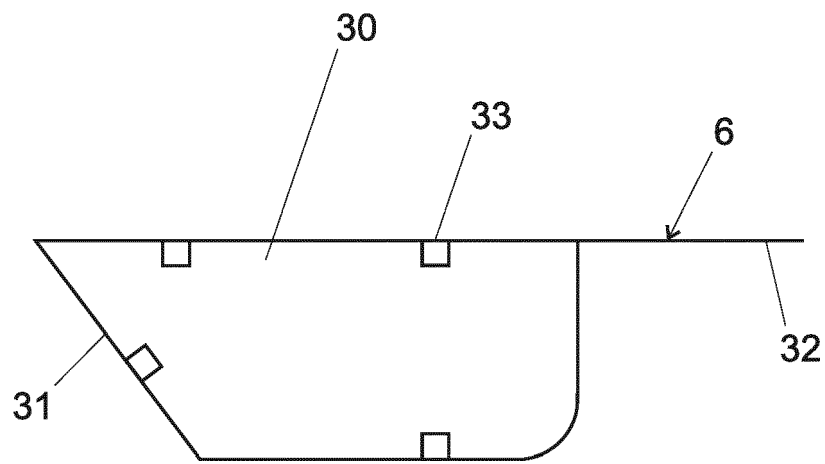


Fig.5

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

- EP 732635 A1 **[0003]**
- CH 669109 A1 **[0005]**
- US 2002114225 A, Damasko **[0005]**
- US 20120263909 A **[0005]**
- WO 2004029733 A2 **[0010]**
- DE 102008029429 A1 **[0011]**
- EP 2407831 A1 **[0012]**
- CH 701155 B1 **[0013]**
- WO 2005017631 A **[0014]**
- EP 2107434 A1 **[0015]**
- EP 2233989 A **[0016]**
- CH 701369 **[0017]**
- US 8088221 B2, Z. Shapiro **[0019]**
- EP 2189555 A2 **[0019]**
- US 2003205190 A **[0019]**