



(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: **14196655.6**

(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

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

(30) Priorité: **05.12.2013 CH 20092013**

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

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

(54) **Palette d'ancre pour échappement de mouvement de montre, et procédé de fabrication adapté**

(57) Palette (3) d'échappement pour mouvement de montre mécanique, réalisée intégralement en diamant monocristallin.

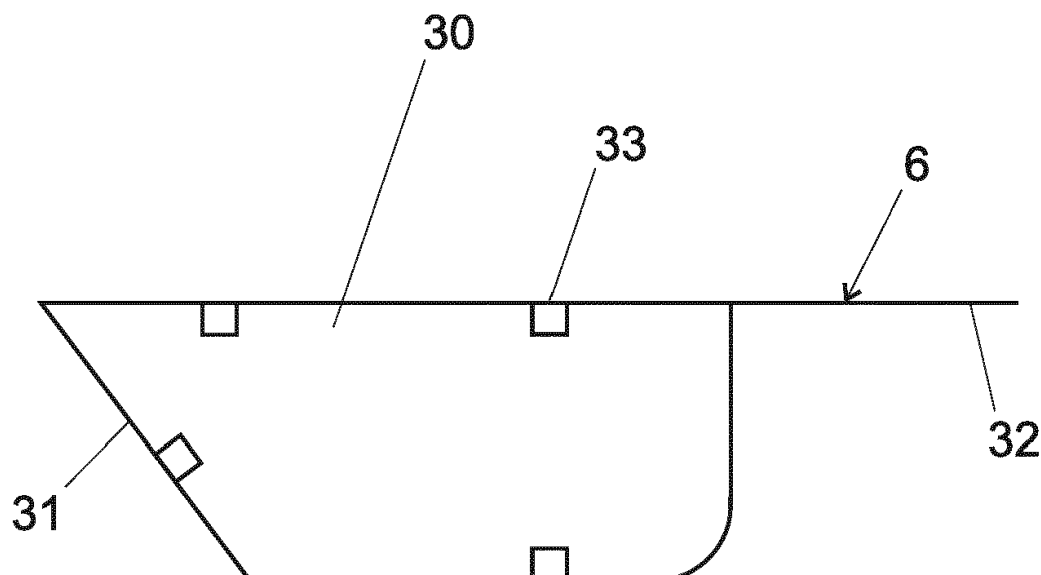


Fig.5

Description

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne une palette d'ancre d'échappement, en particulier une palette d'ancre réalisée en diamant. La présente invention concerne aussi un procédé de fabrication d'une telle palette.

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 (Damasko) 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 revêtu 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 faisceaux 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 enchevêtre-

ment de micro-structures cristallines orientées différemment les unes des autres.

[0007] Par ailleurs, les procédés de dépôt 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 revêtu 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] D'autre part, l'ancre et en particulier les palettes montées sur l'ancre doivent à la fois être capables de recevoir une impulsion de la roue d'échappement à chaque alternance, puis de bloquer cette même roue d'échappement. Un coefficient de frottement aussi réduit que possible entre le plan d'impulsion de palettes et les dents de la roue d'échappement permet d'augmenter l'efficacité énergétique de l'échappement et donc d'augmenter la marche de la montre. L'état tribologique du plan d'impulsion des palettes doit donc être aussi bon que possible. Les palettes doivent en outre être suffisamment dures pour absorber les chocs transmis par la roue d'ancre sans déformation.

[0011] Dans ce but, l'usage de palettes en rubis est répandu. Par ailleurs, DE102008029429A1 suggère en relation avec la figure 20 une ancre en silicium qui intègre les palettes et qui peut être revêtu d'une couche de DLC. Cette ancre souffre cependant des défauts inhérents au silicium, à savoir une grande fragilité.

[0012] Il serait donc souhaitable de réaliser des ancres et des palettes d'ancres dans des matériaux plus solides, plus légers et présentant un meilleur coefficient de frottement que le rubis ou les revêtements DLC conventionnels. Selon un premier aspect de l'invention, cette ancre et/ou en tous cas les palettes sont réalisés en diamant. on connaît certes déjà des pièces micromécaniques 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.

[0013] 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 »).

[0014] 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.

[0015] WO2005/017631 (Fore Eagle Co Ltd) décrit un autre balancier constitué de diamant et obtenu par gravage chimique à l'aide d'un plasma.

[0016] EP2107434A1 décrit une pièce mécanique, notamment une roue d'ancre pour l'horlogerie, en silicium ou en diamant.

[0017] EP2233989 (Ulysse Nardin Le Locle SA) décrit un ressort spiral en diamant obtenu par gravure profonde.

[0018] CH701369 décrit un ressort de barillet en diamant.

[0019] Même si l'usage de diamant pour la fabrication de pièces mécaniques est connu, son usage est réservé à la fabrication de roues, de spiraux, de balanciers, ou comme revêtement DLC pour des ancrs.

[0020] D'autre part, 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.

[0021] 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

[0022] Il existe cependant un besoin, notamment dans l'horlogerie de moyen de gamme et de haut de gamme, pour des composants micromécaniques 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.

[0023] En particulier, il existe un besoin pour des palettes d'ancres plus durables, plus légères et présentant un meilleur coefficient de frottement.

[0024] Un but de la présente invention est donc de pro-

poser une palette d'ancre pour échappement de mouvement de montre mécanique qui offre un tel compromis entre ces différentes propriétés.

[0025] Selon l'invention, ces buts sont atteints notamment au moyen d'une palette pour échappement de mouvement de montre, comportant un plan d'impulsion comme surface active, réalisée intégralement en diamant monocristallin avec un plan d'impulsion sensiblement parallèle au plan cristallin {001} ou de préférence au plan {011} du diamant.

[0026] Par « palette », on entend dans la présente demande la pièce à l'interface entre l'organe réglant et l'échappement, du côté organe réglant, qui reçoit de l'échappement l'énergie destinée à faire osciller l'organe réglant et/ou qui permet de bloquer l'échappement à chaque alternance. La palette peut être encastrée dans un bras de l'ancre, par exemple une ancre suisse. Les palettes ont souvent une forme parallélépipédique, avec un plan incliné du côté de la roue d'échappement et destiné à recevoir l'impulsion de la roue d'échappement; d'autres formes de palettes peuvent cependant être imaginées, y compris des palettes avec une face courbe du côté de la roue d'échappement. La palette peut aussi faire partie intégrale de l'ancre ou d'une autre pièce de l'échappement, qui dans ce cas peut être réalisée de manière monolithique en diamant monocristallin. La palette peut être rigide ou même flexible.

[0027] Une palette est dite « réalisée intégralement en diamant » si elle est constituée par un seul cristal de diamant, sans substrat dans une autre matière, sans revêtement de surface et généralement sans assemblage. Des impuretés en faible quantité, par exemple moins de 3%, peuvent tout au plus être présentes notamment dans le cas de diamants naturels, mais aussi de diamants synthétiques. Les impuretés peuvent par exemple être constituées par un dopage.

[0028] Un diamant est considéré monocristallin s'il est constitué d'un seul cristal, ou essentiellement d'un seul cristal à l'exception d'un nombre limité de cristaux distincts, souvent plus petits que le cristal principal, non désirés mais qui résultent par exemple du processus de fabrication ou d'une cristallisation imparfaite autour des impuretés ou des bords.

[0029] 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.

[0030] 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 ancrs 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.

[0031] 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 réglant.

[0032] 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.

[0033] 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.

[0034] L'invention part aussi de la constatation que le plan d'impulsion parallèle au plan cristallin {001} ou de préférence {011} permet d'obtenir un meilleur état tribologique après polissage qu'un plan cristallin parallèle au plan {111} ou oblique par rapport à ces plans.

[0035] La palette peut être réalisée par découpe à partir d'une plaque plate.

[0036] La découpe des plaques peut être effectuée par laser à partir d'un diamant non plat. Le laser peut être incliné pendant la découpe. La direction du laser peut être modifiée au moyen d'un miroir pendant la découpe. La découpe peut être effectuée depuis les deux extrémités de la pièce.

[0037] La découpe des pièces plates dans une plaque peut être effectuée à partir d'un laser orienté perpendiculairement à la plaque. La trajectoire de découpe peut être définie au moyen d'un logiciel de contrôle de trajectoire du laser. La trajectoire peut être optimisée pour minimiser le risque de fissure dans toute direction autre que la direction de découpe. La trajectoire peut être optimisée en tenant compte de la forme et de la dimension du faisceau laser. Des témoins d'épaisseur de polissage peuvent être découpés, afin de contrôler la profondeur à laquelle la pièce doit être polie ultérieurement.

[0038] La palette peut être réalisée en diamant monocristallin naturel ou synthétique.

[0039] Les diamants naturels monocristallins de dimension compatibles avec la fabrication de pièces mécaniques ont la réputation d'être très onéreux, en sorte qu'il existait un préjugé très important à l'encontre de leur

utilisation pour la fabrication de telles pièces. Il a cependant été constaté que de nombreux diamants naturels monocristallins sont découverts chaque année avec des formes qui ne permettent pas de les tailler afin de les utiliser en joaillerie par exemple. De tels diamants sont le plus souvent fendus pour les réduire en diamants utilisables plus petits, ou réduits en poudre de diamants pour des applications industrielles. La valeur de telles pièces est donc nettement plus faible que celle des diamants employés habituellement dans l'horlogerie et la bijouterie.

[0040] Les diamants synthétiques sont dans la vaste majorité des cas polycristallins; il est généralement considéré difficile de réaliser des diamants synthétiques monocristallins, surtout des diamants de grandes dimensions. Il a cependant été observé plus récemment que l'évolution des technologies permet de fabriquer des diamants synthétiques monocristallins de plus de 1 carat à des coûts relativement bas.

[0041] Des diamants synthétiques monocristallins peuvent par exemple être obtenus en faisant croître du carbone par croissance CVD autour d'une amorce en diamant monocristallin. L'amorce en diamant monocristallin peut être réutilisée pour faire croître successivement plusieurs diamants synthétiques monocristallins. 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.

[0042] Le diamant synthétique monocristallin peut aussi être obtenu par compression de carbone à haute pression et haute température. Cette solution résulte cependant en des coûts plus élevés, notamment pour la fabrication de diamants monocristallins de grandes dimensions.

[0043] Les diamants polycristallins sont 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.

[0044] Par contraste, les diamants monocristallins, notamment les diamants naturels monocristallins, existent 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.

[0045] Le diamant monocristallin synthétique peut être dopé. Le diamant monocristallin naturel peut être dopé.

[0046] 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.

[0047] 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'im-

puretés, 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.

[0048] Le dopage du diamant monocristallin synthétique peut être obtenu lors de sa fabrication en ajoutant des impuretés dans le gaz du réacteur CVD. Ce dopage peut être effectué pratiquement sans coût additionnel lors de la croissance d'un diamant synthétique monocristallin.

[0049] Le dopage du diamant monocristallin synthétique ou naturel peut aussi être obtenu par implantation d'ions au moyen d'un faisceau à haute énergie.

[0050] Le dopage peut être homogène dans tout le volume de la pièce.

[0051] Le dopage peut être limité à la surface, ou différent en surface et en profondeur. Le dopage peut être choisi de manière à contrôler la dureté et/ou la couleur et/ou l'élasticité et/ou la sensibilité du module d'Young à la température. Différentes pièces en diamant monocristallin du même mouvement peuvent être dopées différemment.

[0052] L'invention concerne aussi un mouvement d'horlogerie comportant une ou plusieurs pièces mécaniques fonctionnelles en diamant monocristallin.

[0053] 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.

[0054] 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, soient plus dures que la roue d'ancre avec laquelle elles collaborent; 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.

[0055] Le plan d'impulsion de la palette est obtenu en polissant les surfaces latérales de la palette après sa découpe dans une plaque de diamant monocristallin. Le polissage peut être effectué mécaniquement, par exemple avec une meule selon une direction parallèle à la direction d'impulsion.

[0056] Au moins une partie de ces surfaces mécani-

ques latérales de la palette 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.

[0057] La palette peut être tenue par vacuum pendant le polissage. On peut ainsi la positionner très précisément en hauteur, et on évite les imprécisions sur l'épaisseur de la pièce qui résultent d'une épaisseur de colle non maîtrisée dans les procédés de polissage de pièces collées employés dans l'art antérieur.

[0058] La palette peut être montée dans l'ancre avant polissage, l'ancre étant alors utilisée pour tenir la palette pendant le polissage.

[0059] Au moins une des surfaces de la palette peut être traitée thermiquement, par exemple en l'exposant à une température entre 600° et 750°C, de préférence entre 650 et 680°C, afin de brûler le carbone sous forme de graphite produit par la découpe du diamant et qui subsiste éventuellement en surface. Ce traitement thermique permet en outre de polir le diamant, par brûlure des pointes en surface, sans toutefois dégrader l'état de surface par une attaque à haute température.

[0060] Au moins une des surfaces peut être rectifiée au moyen d'un laser.

[0061] L'état d'au moins une surface du diamant est avantageusement traité à la fois par traitement thermique, par polissage mécanique et par rectification laser.

[0062] La pièce peut être polie jusqu'à ce que la surface arrive à niveau avec des marques de polissage préalablement découpées.

[0063] La pièce peut être polie aux ultrasons. Elle peut être nettoyée avec de l'essence.

Breve description des figures

[0064] Des exemples de mise en oeuvre de l'invention sont indiqués dans la description illustrée par les figures annexées dans lesquelles :

[0065] Les figures 1A à 1E illustrent différentes étapes successives d'un procédé de fabrication d'une ancre d'échappement intégrant des palettes selon l'invention.

[0066] La figure 2 illustre une ancre d'échappement intégrant des palettes selon l'invention.

[0067] Les figures 3A à 3B illustrent schématiquement une opération de polissage ou de rectification d'au moins une portion des flancs latéraux d'une palette selon l'invention.

[0068] Les figures 4A à 4C illustrent un procédé de découpe laser d'une surface plane dans un diamant au moyen d'un laser orienté selon différentes directions.

[0069] La figure 5 illustre une palette fabriquée selon le procédé de l'invention.

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

[0070] Les figures 1 à 3 illustrent schématiquement un procédé de fabrication d'une palette selon l'invention, ici intégrée à une ancre d'échappement. Un procédé similaire peut être mis en oeuvre pour fabriquer une palette discrète et séparée de l'ancre.

[0071] 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.

[0072] 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.

[0073] 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.

[0074] 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.

[0075] 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.

[0076] 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.

[0077] Dans un mode de réalisation, la dureté de la palette 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.

[0078] 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.

[0079] 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.

[0080] 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.

[0081] 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.

[0082] 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 destruc-

tion 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.

[0083] 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.

[0084] 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.

[0085] 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 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}.

[0086] 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.

[0087] 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} qui est particulièrement dur; ces plans sont en effet moins sensibles aux déviations par rapport à la surface idéale. 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 de préférence {011}. Sensiblement parallèle signifie

ici que la déviation après polissage est au maximum de $\pm 5^\circ$.

[0088] Il est possible de maintenir le diamant 1 pendant la coupe par exemple en le cimentant ou en le collant sur un support temporaire.

[0089] 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.

[0090] 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.

[0091] 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.

[0092] La rugosité de la face 11 peut aussi être réduite au moyen d'un faisceau d'ions à haute énergie parallèle à la surface.

[0093] 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.

[0094] 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 ou d'ancres.

[0095] Cette caractéristique permet de fabriquer des pièces extrêmement légères et donc de réduire l'énergie nécessaire pour les mettre en déplacement.

[0096] 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.

[0097] 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.

[0098] Au cours de l'étape illustrée sur la figure 1E, la palette 3 (ou une ancre intégrant une ou plusieurs palettes) 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. Comme la découpe des faces inférieures et supérieures, 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.

[0099] Plusieurs ancres ou plusieurs palettes peuvent être découpées dans une seule plaque.

[0100] 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 tienne 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.

[0101] 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.

[0102] 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}.

[0103] 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.

[0104] 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.

[0105] 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 est problématique notamment pour une palette 3 dont la surface d'impulsion, destinée à entrer en contact avec la roue d'ancre, est formée par une portion de cette tranche.

[0106] Afin de remédier à ce problème, une opération optionnelle de rectification des flancs 13, ou d'au moins une portion de ces flancs, peut être effectuée au moyen 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 d'impulsion 31 peut être meulée jusqu'à la profondeur de la marque 33 au moyen d'une meule recouverte de poudre de diamant polycristallin. Le meulage est de préférence effectué en orientant la meule par rapport à la surface d'impulsion de manière à meuler selon une direction sensiblement parallèle à la direction d'impulsion, c'est-à-dire à la direction de déplacement de la roue d'ancre par rapport à la palette. Bien que ce meulage soit plus lent qu'un meulage dans la direction transversale de la palette, il permet d'obtenir une micro-structuration de la surface d'impulsion avec des nervures extrêmement fines orientées parallèlement à la direction de déplacement relatif de la roue d'ancre et de la palette. On observe ainsi sur la surface d'impulsion de la palette des micro-rainures orientées dans la direction d'impulsion.

[0107] Il est possible de maintenir la palette 3 pendant le polissage par exemple en la cimentant ou en la collant sur un support temporaire, ou en la tenant par vacuum, ou de préférence en la montant avant polissage dans l'ancre aussi utilisée pour tenir les palettes pendant leur polissage.

[0108] Un polissage de la surface active 31 par sablage, faisceau ionique, ultrasons, laser pulsé (par exemple femtolaser), etc, peut aussi être envisagé, en plus ou en remplacement du polissage par meulage.

[0109] Les surfaces de la pièce 3 ainsi obtenue ne sont de préférence pas revêtue ; 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.

[0110] Cette opération permet aussi de polir la palette par brulure des pointes en surface.

[0111] 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, par exemple parallèle au plan d'impulsion 31. Dans un mode de réalisation, ce polissage ionique est effectué après le polissage par traitement thermique.

[0112] La pièce produite peut aussi être polie au moyen d'ultrasons. Elle peut être nettoyée à l'essence pour améliorer l'aspect du diamant.

[0113] Un mouvement de montre mécanique dans le cadre de l'invention peut comporter une ou plusieurs pièces en diamant monocristallin. Comme mentionné, il est possible de choisir la dureté de chaque pièce 3 en sélectionnant le type et le couleur de diamant.

Revendications

1. Palette pour échappement de mouvement de montre, comportant un plan d'impulsion comme surface active (31), **caractérisée en ce qu'elle** est réalisée intégralement en diamant monocristallin.
2. Palette selon la revendication 1, le diamant étant un diamant synthétique obtenu par procédé CVD.
3. Palette selon l'une des revendications 1 ou 2, **caractérisée en ce que** ledit plan d'impulsion est sensiblement parallèle au plan cristallin {001} ou {011} du diamant.
4. Palette selon la revendication 3, dans laquelle ladite surface active {31} se trouve dans le plan cristallin {111} du diamant.
5. Palette selon l'une des revendications 1 à 4, **caractérisée en ce qu'elle** est réalisée par découpe d'une plaque (2) de diamant monocristallin.
6. Palette selon l'une des revendications 1 à 5, le diamant comportant au maximum 3% d'impuretés de dopage, sans affecter sa structure monocristalline.
7. Palette selon la revendication 6, le dopage étant homogène dans la masse de la pièce.
8. Palette selon la revendication 6, le dopage étant différent en surface que dans la profondeur de la pièce.
9. Palette selon l'une des revendications 1 à 8, l'épaisseur étant inférieure à 160 microns.
10. Mouvement d'horlogerie comportant au moins une palette selon l'une des revendications 1 à 9.
11. Le mouvement selon la revendication 10, ladite palette d'ancre étant réalisée dans un premier type de diamant monocristallin, le mouvement comportant une roue d'ancre dans un matériau plus mou que ledit premier type de diamant monocristallin.
12. Le mouvement selon la revendication 11, la roue d'ancre étant réalisée dans un deuxième type de diamant monocristallin dopé à l'azote et plus mou que ledit premier type.
13. Procédé de fabrication d'une palette en diamant selon l'une des revendications 1 à 9, comprenant les étapes suivantes :
 - découpe d'un diamant monocristallin (1) selon un premier plan (10) ;
 - découpe du diamant monocristallin (1) selon un deuxième plan parallèle au premier plan de manière à produire une plaque (2) de diamant monocristallin ;
 - au moyen d'un laser, découpe dans ladite plaque (2) de ladite palette,
 - polissage du plan d'impulsion de la palette.
14. Procédé selon la revendication 13, le diamant étant fabriqué par procédé CVD à partir d'une amorce de diamant monocristallin.
15. Procédé selon la revendication 14, comportant une étape d'introduction d'impureté de dopage lors de la croissance du diamant par procédé CVD.
16. Procédé selon la revendication 13, la découpe étant effectuée de manière à ce que ledit plan d'impulsion (31) soit sensiblement parallèle au plan cristallin {011} du diamant.
17. Procédé selon l'une des revendications 13 à 16, ledit polissage du plan d'impulsion étant effectué mécaniquement avec une meule selon une direction sensiblement parallèle à la direction d'impulsion.
18. Procédé selon la revendication 13, ledit polissage du plan d'impulsion étant effectué par sablage, faisceau ionique, ultrason, ou laser pulsé.

19. Procédé selon l'une des revendications 13 à 18, le polissage étant effectué avec la palette fixée solidai-
rement à une ancre d'échappement.

20. Procédé selon l'une des revendications 13 à 19, 5
comportant une étape de polissage d'une surface
par traitement thermique à une température compri-
se entre 600°C et 750°C, de préférence comprise
entre 650°C et 680°C.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

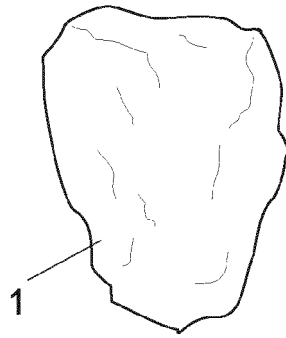


Fig.1A

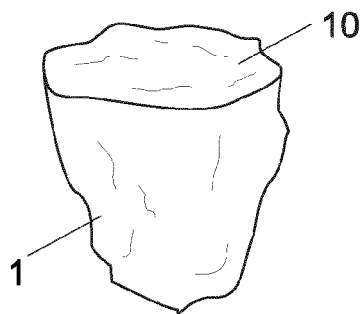


Fig.1B

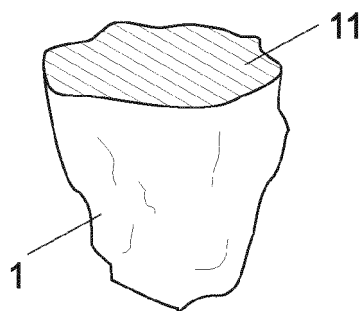


Fig.1C

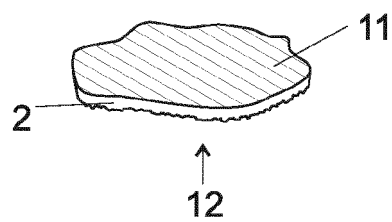


Fig.1D

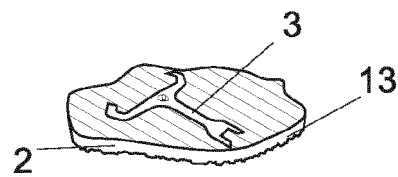


Fig.1E

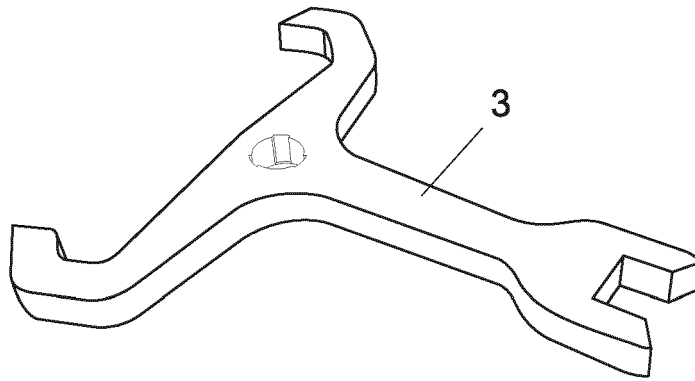


Fig.2

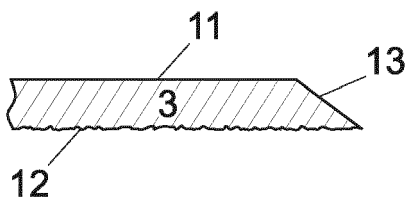


Fig.3A

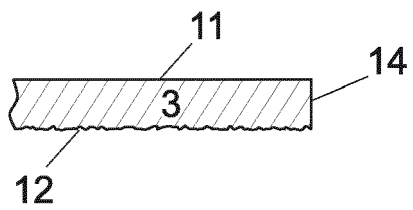
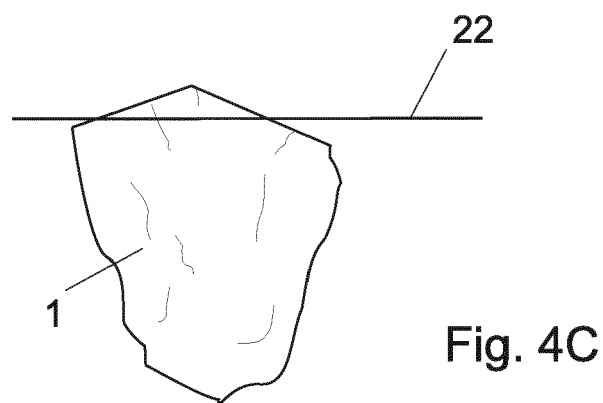
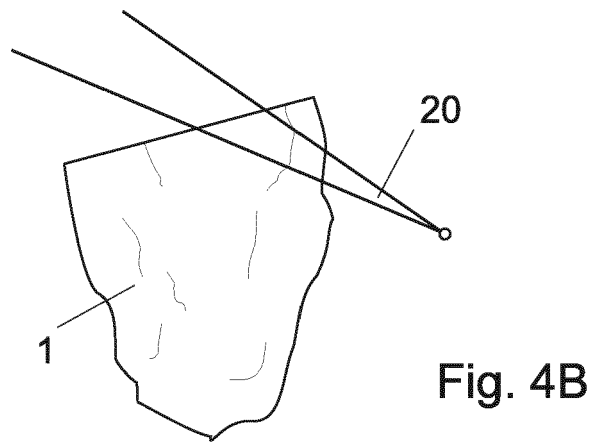
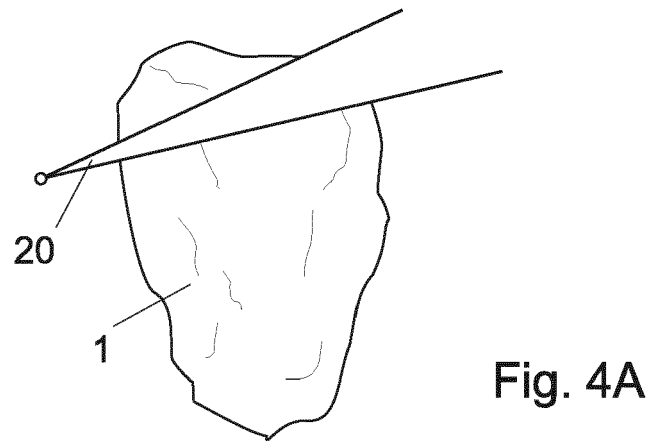


Fig.3B



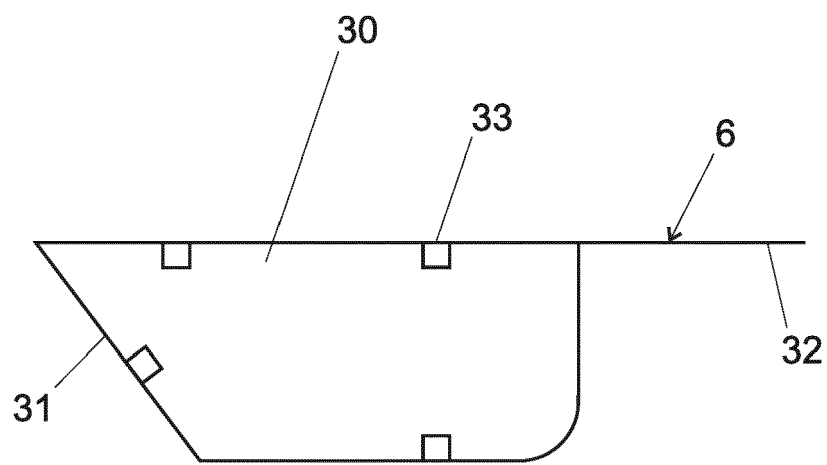


Fig.5

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 [0005]
- US 20120263909 A [0005]
- DE 102008029429 A1 [0011]
- WO 2004029733 A2 [0012]
- EP 2407831 A1 [0013]
- CH 701155 B1 [0014]
- WO 2005017631 A [0015]
- EP 2107434 A1 [0016]
- EP 2233989 A [0017]
- CH 701369 [0018]
- US 8088221 B2, Z. Shapiro [0021]
- EP 2189555 A2 [0021]
- US 2003205190 A [0021]