

CONFÉDÉRATION SUISSE
INSTITUT FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

(11) CH 718 688 A2

Demande de brevet pour la Suisse et le Liechtenstein

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

(51) Int. Cl.: G04D 3/02 (2006.01)
G04D 7/00 (2006.01)
G04B 13/02 (2006.01)
B23B 5/14 (2006.01)
G04B 17/32 (2006.01)

(12) **DEMANDE DE BREVET**

(21) Numéro de la demande: 00623/21

(22) Date de dépôt: 31.05.2021

(43) Demande publiée: 15.12.2022

(71) Requérant:
Petitpierre SA, Chemin des Murgiers
2016 Cortaillod (CH)

(72) Inventeur(s):
Philippe Jacot, 2022 Bevaix (CH)
Ivan Calderon, 2014 Bole (CH)

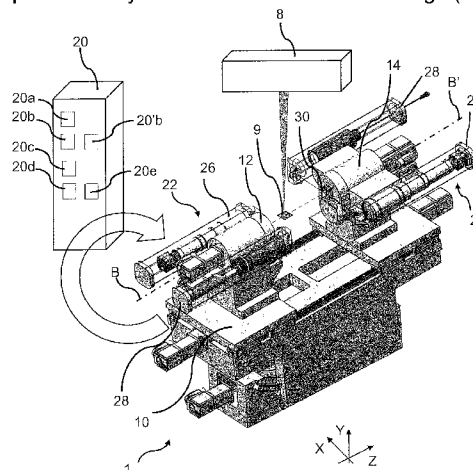
(74) Mandataire:
BOVARD SA Neuchâtel Conseils en propriété
intellectuelle, Rue des Noyers 11
2000 Neuchâtel (CH)

(54) **Machine d'usinage d'une pièce micromécanique et procédé d'usinage mis en oeuvre par ladite machine.**

(57) La présente invention concerne une machine d'usinage (1) d'une pièce présentant un axe de rotation, ladite machine d'usinage (1) comprenant des moyens d'usinage de précision sans force (8) agencés pour usiner la pièce, au moins une première broche (12), un premier dispositif de serrage agencé pour serrer la pièce à usiner et la monter sur la première broche (12), et un système de pilotage (20). Ladite machine d'usinage (1) comprend un premier système de mesure optique (22) de la pièce agencé pour au moins mesurer les dimensions réelles de la pièce lorsqu'elle est montée sur la première broche (12). Le système de pilotage (20) est agencé pour piloter en continu des moyens de commande (20b) du premier système de mesure optique (22), des moyens de comparaison (20c) des dimensions réelles mesurées de la pièce avec des dimensions prédéterminées de la pièce à atteindre après usinage, des moyens de correction (20d) pour modifier des paramètres d'usinage en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce avec les dimensions prédéterminées et des moyens de commande (20e) des moyens d'usinage de précision sans force (8) pour commander un usinage puis alternativement des mesures des dimensions réelles de la pièce montée sur la première broche (12) et un usinage de la pièce montée sur la première broche (12) selon les paramètres d'usinage modifiés en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce montée sur la première broche (12) avec les dimensions prédé-

terminées, jusqu'à ce que les dimensions réelles mesurées de la pièce montée sur la première broche (12) correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre, ledit système de pilotage (20) permettant un usinage en boucle fermée à partir des dimensions réelles mesurées de la pièce.

L'invention concerne également un procédé d'usinage d'une pièce au moyen d'une telle machine d'usinage (1).



Description

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne une machine d'usinage d'une pièce, notamment une pièce micromécanique, présentant au moins une surface de révolution d'axe de rotation A, ladite machine d'usinage comprenant des moyens d'usinage de précision sans force agencés pour usiner la pièce, un tour comprenant au moins une première broche présentant un axe de rotation B s'étendant selon l'axe Z dans un repère XYZ, ladite première broche étant mobile en translation selon l'axe Z et en rotation autour de son axe de rotation B, un premier dispositif de serrage agencé pour serrer la pièce à usiner et la monter sur la première broche, et un système de pilotage agencé pour gérer des paramètres d'usinage.

[0002] La présente invention concerne également un procédé d'usinage d'une pièce, notamment une pièce micromécanique, mis en oeuvre par ladite machine d'usinage.

[0003] La présente invention concerne également une pièce, notamment une pièce micromécanique, usinée obtenue par un tel procédé d'usinage.

Etat de la technique

[0004] De telles pièces, notamment des pièces micromécaniques, peuvent être par exemple des axes de précision pouvant être de très petites dimensions comme des pivots d'horlogerie, tels que des axes de balancier par exemple, mettant en jeu de très petits diamètres, jusqu'à 60 microns ou moins.

[0005] Traditionnellement, les machines de tournage par usinage sans force ou sans effort, tels que tournage par laser femto seconde, tournage par électroérosion ou tournage par procédé électrochimique sont pilotées de manière standard, c'est-à-dire que les pièces sont usinées puis extraites de la zone d'usinage et mesurées.

[0006] Les résultats des mesures servent à corriger les paramètres d'usinage de la machine afin d'obtenir les dimensions des pièces dans les tolérances désirées.

[0007] De ce fait, lorsque l'on procède de la sorte, un défaut d'usinage n'est détecté qu'après coup relativement longtemps après que la pièce a été complètement usinée.

[0008] L'état de la machine d'usinage aura alors toutes les chances d'avoir évolué (en termes de dilatation thermique ou autres facteurs responsables de dérive), rendant la correction de la machine d'usinage sur la base de la mesure de la pièce relativement inexacte voir erronée.

[0009] D'autre part, traditionnellement, les axes de précision usinés par tournage (y compris tournage par usinage sans effort, tels que tournage par laser femto seconde, tournage par électroérosion ou tournage par procédé électrochimique) à partir de lopins ou d'ébauches utilisent des broches et des contre-broches de tournage traditionnelles munies de serrages par pince, par mandrin, ou par d'autres types de serrage existants. Ces types de serrage de reprise ne permettent pas de garantir un haut niveau de concentricité des usinages de reprise. Des contre-pointes peuvent être utilisées pour améliorer l'usinage, mais ces dernières ne sont en principe pas utilisables dans le cas de très petites pièces. On est alors obligé d'usiner la pièce entière en un seul serrage en sacrifiant la matière qui se trouve dans le serrage. Ce mode permet d'assurer les concentricités entre les différents diamètres de la pièce. Toutefois, la coupe finale de la pièce requiert en principe l'utilisation d'une contre-broche qui soutiendra la pièce lors de cette opération. Ce mode d'usinage ne permet pas de diviser l'usinage de la pièce en broche et contre-broche, ce qui diminue la productivité de la machine d'un facteur pouvant aller jusqu'à 2.

[0010] La présente invention vise à remédier à ces inconvénients en proposant une machine d'usinage et un procédé d'usinage de pièces, notamment de pièces micromécaniques, telles que des axes de pivotement horloger, à partir de lopins ou d'ébauches, permettant d'obtenir des pièces usinées présentant des qualités extrêmes de concentricité, de coaxialité, de précision et de tolérance.

Divulgateion de l'invention

[0011] A cet effet, l'invention concerne une machine d'usinage d'une pièce, notamment une pièce micromécanique, présentant au moins une surface de révolution d'axe de rotation A, ladite machine d'usinage comprenant des moyens d'usinage de précision sans force agencés pour usiner la pièce, un tour comprenant au moins une première broche présentant un axe de rotation B s'étendant selon l'axe Z dans un repère XYZ, ladite première broche étant mobile en translation selon l'axe Z et en rotation autour de son axe de rotation B, un premier dispositif de serrage agencé pour serrer la pièce à usiner et la monter sur la première broche, et un système de pilotage agencé pour gérer des paramètres d'usinage.

[0012] Selon l'invention, ladite machine d'usinage comprend un premier système de mesure optique de la pièce agencé pour au moins mesurer les dimensions réelles de la pièce lorsqu'elle est montée sur la première broche au moyen du premier dispositif de serrage, et le système de pilotage comprend :

- des moyens d'enregistrement de dimensions prédéterminées de la pièce à atteindre après usinage avec une tolérance prédéfinie,

- des moyens de commande du premier système de mesure optique pour mesurer et enregistrer des dimensions réelles de la pièce montée sur la première broche,
- des moyens de comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce avec les dimensions prédéterminées,
- des moyens de correction pour modifier les paramètres d'usinage en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce avec les dimensions prédéterminées,
- des moyens de commande des moyens d'usinage de précision sans force pour usiner la pièce en fonction des paramètres d'usinage,

ledit système de pilotage étant agencé pour piloter en continu lesdits moyens de commande du premier système de mesure optique, lesdits moyens de comparaison, lesdits moyens de correction et lesdits moyens de commande des moyens d'usinage pour commander un usinage puis alternativement des mesures des dimensions réelles de la pièce montée sur la première broche et un usinage de la pièce montée sur la première broche selon les paramètres d'usinage modifiés en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce montée sur la première broche avec les dimensions prédéterminées, jusqu'à ce que les dimensions réelles mesurées de la pièce montée sur la première broche correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie, ledit système de pilotage permettant un usinage en boucle fermée à partir des dimensions réelles mesurées de la pièce.

[0013] La présente invention concerne également un procédé d'usinage d'une pièce, notamment une pièce micromécanique, présentant au moins une surface de révolution d'axe de rotation A au moyen de la machine d'usinage telle que définie ci-dessus, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- a) enregistrer des dimensions prédéterminées de la pièce à atteindre après usinage avec une tolérance prédéfinie ;
- b) se munir d'une pièce à usiner ;
- c) monter la pièce à usiner dans l'une des broches de la machine d'usinage au moyen de son dispositif de serrage ;
- d) usiner la pièce à usiner montée sur sa broche en rotation par les moyens d'usinage de précision sans force ;
- e) mesurer les dimensions de la pièce usinée selon l'étape précédente au moyen du système de mesure optique de la machine d'usinage pour obtenir des dimensions réelles mesurées de la pièce montée sur sa broche ;
- f) comparer les dimensions réelles mesurées à l'étape e) aux dimensions prédéterminées enregistrés à l'étape a) ;
- g) si les dimensions réelles mesurées à l'étape e) diffèrent des dimensions prédéterminées avec la tolérance prédéfinie, modifier les paramètres d'usinage gérés par le système de pilotage en fonction de la comparaison des mesures obtenues à l'étape f) ;
- h) usiner la pièce montée sur sa broche en rotation par les moyens d'usinage de précision sans force en fonction des paramètres d'usinage modifiés à l'étape g) ;
- i) répéter les étapes e) à h) jusqu'à ce que, à l'étape f), les dimensions réelles mesurées à l'étape e) et comparées selon l'étape f) correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie.

[0014] Le procédé selon l'invention s'applique à chaque pièce à usiner de sorte que toute pièce usinée est alors mesurée et contrôlée.

[0015] Une telle machine et un tel procédé d'usinage permettent d'obtenir des pièces usinées présentant des qualités extrêmes de concentricité, de coaxialité, de précision et de tolérance.

Brève description des dessins

[0016] D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée suivante d'un mode de réalisation de l'invention, donné à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique d'une machine d'usinage selon l'invention;
- la figure 2 est une vue schématique d'une broche, du dispositif de serrage et d'un système de mesure optique ;
- la figure 3 est une vue schématique d'une broche et d'un dispositif de correction de la concentricité;
- la figure 4 est une vue agrandie d'une pièce montée sur son dispositif de serrage ;
- la figure 5 est une vue de détail de la figure 3 montrant la broche, le dispositif de serrage et le dispositif de correction de la concentricité ;
- la figure 6 est une vue de détail du dispositif de serrage monté sur la broche et du dispositif de correction de la concentricité ;

- la figure 7 est une vue en coupe du dispositif de serrage monté sur la broche et du dispositif de correction de la concentricité ;
- la figure 8 est une représentation schématique des étapes du procédé selon l'invention ; et
- la figure 9 est une représentation schématique des étapes de correction de la concentricité.

Modes de réalisation de l'invention

[0017] En référence à la figure 1, la présente invention concerne une machine d'usinage 1 d'une pièce 2, notamment une pièce micromécanique, présentant au moins une surface de révolution d'axe de rotation A. Une telle pièce est représentée par exemple sur la figure 9. Cette pièce 2 peut être par exemple un axe de pivotement de précision pouvant être de très petites dimensions comme axe de pivotement d'horlogerie, mettant en jeu de très petits diamètres, jusqu'à 60 microns ou moins.

[0018] De tels axes de précision peuvent être en matériaux durs, tels que des matériaux métalliques du type aciers trempés, aciers inoxydables, Inconel, ou des verres métalliques, des céramiques ou des matériaux à base de carbure de silicium.

[0019] L'axe de pivotement horloger comprend à chacune de ses extrémités un pivot 4, dans le prolongement d'un tige 6. Classiquement, au moins lesdits pivots présentent une surface de révolution, et sont destinés à venir chacun pivoter dans un palier, typiquement dans un orifice d'une pierre ou rubis.

[0020] L'axe de pivotement horloger présente traditionnellement un diamètre inférieur ou égal à 2 mm et le pivot 4 présente un diamètre extérieur inférieur ou égal à 200 µm, de préférence inférieur ou égal à 100 µm, préférentiellement inférieur ou égal à 90 µm, et plus préférentiellement inférieur ou égal à 60 µm, quand l'axe de pivotement 2 est à l'état fini, prêt à être utilisé. Le pivot 4 est de type conique par exemple.

[0021] L'axe de pivotement horloger peut présenter une pluralité de sections de diamètres différents, définissant classiquement des portées et des épaulements, réalisés par usinage.

[0022] L'axe de pivotement peut être un axe de balancier par exemple. Bien évidemment, d'autres types d'axes de pivotement horlogers sont envisageables comme par exemple des axes de mobiles horlogers, typiquement des pignons d'échappement, des arbres de barillet ou encore des tiges d'ancre. Dans ce cas, l'axe de pivotement peut comporter des éléments fonctionnels liés à son utilisation. Par exemple, l'axe peut comporter une denture, un taraudage ou un crochet pour la fixation du ressort dans le cas d'un arbre de barillet. Les pièces de ce type présentent au niveau du corps des diamètres inférieurs de préférence à 2 mm, et des pivots de diamètre inférieur de préférence à 0.2 mm comme décrit ci-dessus, avec une précision de quelques microns. La pièce décrite ici est un axe de pivotement configuré pour convenir de préférence aux applications horlogères, mais il est bien évident qu'elle peut être utilisée dans toute autre application requérant la même configuration d'axe de pivotement.

[0023] La pièce 2 à usiner montée sur la machine d'usinage 1 peut être un morceau de matériau usinable sans effort, un brut ou un lopin qui sera au moins partiellement usiné dans la machine d'usinage 1 pour donner une ébauche, qui pourra subir ensuite une étape de reprise et/ou de finition par un autre procédé si besoin. De préférence la pièce 2 à usiner montée sur la machine d'usinage 1 est un lopin qui sera entièrement usiné et fini dans la machine d'usinage 1 pour obtenir la pièce présentant ses dimensions finales au moyen de la seule et même machine d'usinage 1.

[0024] La pièce 2 à usiner montée sur la machine d'usinage 1 peut être aussi une ébauche, c'est-à-dire une pièce déjà partiellement usinée au moyen d'un autre procédé et d'une autre machine, par exemple par enlèvement de copeaux via un procédé de décolletage traditionnel ou d'usinage conventionnel ou toute autre méthode d'enlèvement de matière, et qui sera reprise et/ou finie sur la machine d'usinage 1 pour obtenir la pièce présentant ses dimensions finales.

[0025] La machine d'usinage 1 comprend des moyens d'usinage de précision sans force 8 agencés pour usiner la pièce 2. Dans la présente description, on appelle usinage sans force ou sans effort d'usinage non conventionnel selon lequel il n'y a pas d'action mécanique transmise par contact direct et effort entre un outil et la pièce, contrairement à un usinage conventionnel où il existe un contact direct entre l'outil et la pièce et dans lequel d'importantes forces de coupe sont impliquées. Un usinage sans force est donc un usinage sans contact direct entre la pièce à usiner et un outil d'usinage qui serait susceptible d'exercer un effort ou une contrainte sur ladite pièce.

[0026] D'une manière avantageuse, les moyens d'usinage de précision sans force 8 sont agencés pour attaquer la matière radialement et/ou tangentiellement et/ou axialement à la pièce 2 à usiner, alors que cette dernière est en rotation.

[0027] D'une manière avantageuse, les moyens d'usinage de précision sans force comprennent des moyens d'usinage par tournage par femto laser, par tournage électrochimique (electrochemical machining (ECM)), ou par tournage par électroérosion (par exemple EDM (electrical discharge machining) par fil).

[0028] De préférence, les moyens d'usinage de précision sans force sont un femto laser qui délivre des pulses de haute énergie sur des durées extrêmement faibles (de l'ordre de 10-15 seconde). Cela permet des processus d'ablation de matière sans dégât à l'interface d'usinage. Quasiment toutes les matières peuvent être usinées par ce processus.

[0029] Avantageusement le laser pulsé femto seconde est un laser de longueurs d'onde comprises par exemple entre 200 nm et 2000 nm, de préférence entre 400 nm et 1 000 nm, bornes incluses. Les caractéristiques du laser peuvent être

par exemple : puissance moyenne entre 1 W et 100 W, énergie par pulse entre 20 μ J et 4000 μ J, fréquence entre 100 kHz et 1000 kHz, durée d'impulsion entre 100 fs et 2 ps.

[0030] Le laser peut être piloté au moyen d'une tête de scan 2D (2 axes) ou d'une tête de précession d'au moins 3 axes, et de préférence 5 axes. De tels dispositifs sont disponibles sur le marché.

[0031] Le laser est piloté et programmé pour créer une zone d'action 9, dans la course de la pièce 2 à usiner montée sur la machine 1.

[0032] La machine d'usinage comprend également un tour numérique 10 comprenant au moins une première broche 12 et une deuxième broche 14 faisant office de contre-broche.

[0033] La première broche 12 présente un axe de rotation B s'étendant selon l'axe Z dans un repère XYZ, ladite première broche étant mobile en translation selon l'axe Z et en rotation autour de son axe de rotation B.

[0034] De même, la deuxième broche 14 présente un axe de rotation B' s'étendant selon l'axe Z dans le repère XYZ, en regard de la première broche 12, ladite deuxième broche 14 étant mobile en translation selon l'axe Z et en rotation autour de son axe de rotation B'.

[0035] Chaque broche 12, 14 est entraînée en rotation, alimentée par un moteur 15 (cf. figure 3).

[0036] Comme le montrent par exemple les figures 2 et 4, la première broche 12 est associée à un premier dispositif de serrage 16 agencé pour serrer une première extrémité de la pièce 2 à usiner, et laisser libre la seconde extrémité en exposant la partie à usiner de la pièce 2, et pour monter ladite pièce 2 sur ladite première broche 12.

[0037] De même, la deuxième broche 14 est associée à un deuxième dispositif de serrage 18 agencé pour serrer la deuxième extrémité de la pièce à usiner, et laisser libre la première extrémité en exposant l'autre partie à usiner de la pièce 2, et pour monter ladite pièce 2 sur ladite deuxième broche 14.

[0038] Les dispositifs de serrage 16, 18 seront décrits en détails ultérieurement.

[0039] La machine comprend également un système de pilotage 20 agencé pour gérer des paramètres d'usinage qui comprennent notamment les caractéristiques de fonctionnement des moyens d'usinage de précision sans force 8, telles que, par exemple, dans le cas d'un femto laser, la puissance, l'énergie par pulse, la fréquence, la durée d'impulsion, les différentes profondeurs de passe, le mouvement (circulaire, oscillatoire, ...) du laser ajouté à son mouvement primaire par rapport à la pièce 2, éventuellement les angles d'attaque (p. ex. : mouvements de précession), etc...

[0040] Les paramètres d'usinage comprennent également la vitesse de rotation des broches 12, 14 (qui peut être constante ou réglée dynamiquement, par exemple synchronisée avec la vitesse du faisceau laser), et l'angle d'inclinaison des broches par rapport au „plan“ d'usinage ou par rapport aux deux autres plans de l'espace cartésien.

[0041] Le système de pilotage 20 est également agencé pour gérer le positionnement des moyens d'usinage de précision sans force 8 par rapport à la pièce 2 à usiner et le positionnement du dispositif de serrage 16, 18 par rapport à sa broche 12, 14 respectivement.

[0042] La machine 1 peut comprendre également un dispositif d'alimentation des pièces, un robot de chargement et de déchargement agencé pour prendre une pièce dans le dispositif d'amenée, positionner la pièce dans l'un des dispositifs de serrages sur une broche, puis la retirer après usinage de la partie exposée, positionner la pièce dans l'autre dispositif de serrage sur l'autre broche, puis retirer la pièce usinée et la décharger.

[0043] La machine peut comprendre également un système de climatisation, un dispositif de refroidissement à eau pour le laser, ainsi que toutes les connectiques et alimentations nécessaires à son fonctionnement.

[0044] Conformément à la présente invention, la machine d'usinage 1 comprend un premier système de mesure optique 22 de la pièce 2 agencé pour au moins mesurer les dimensions réelles de la pièce 2 lorsqu'elle est montée sur la première broche 12 au moyen du premier dispositif de serrage 16.

[0045] De même, notamment lorsque la deuxième broche 14 est utilisée pour procéder à un usinage, la machine peut avantageusement comprendre un deuxième système de mesure optique 24 de la pièce 2 agencé pour au moins mesurer les dimensions réelles de la pièce 2 lorsqu'elle est montée sur la deuxième broche 14 au moyen du deuxième dispositif de serrage 18.

[0046] Ainsi, chaque système 22, 24 de mesure par voie optique des dimensions réelles de la pièce montée sur sa broche est intégré à la machine permettant des mesures in situ, sans avoir à retirer la pièce de sa broche.

[0047] Avantageusement, chaque système de mesure optique 22, 24 comprend une optique télécentrique 26 associée à un éclairage télécentrique 28 permettant une illumination collimatée, comme représenté sur la figure 2. Chaque système de mesure optique 22, 24 est agencé pour créer un champ de mesure 30 autour de la pièce 2 montée sur son dispositif de serrage 16, 18, comme le montrent les figures 1 et 4.

[0048] De plus, selon l'invention, le système de pilotage 20 comprend :

- des moyens d'enregistrement 20a de dimensions prédéterminées de la pièce à atteindre après usinage avec une tolérance prédéfinie, les dimensions prédéterminées à atteindre après usinage pouvant être les dimensions d'une

ébauche lorsque la pièce à usiner est un morceau de matériau usinable sans effort, un brut ou un lopin, usiné partiellement dans la machine 1 pour obtenir ladite ébauche, l'ébauche étant ensuite finie par un autre procédé, ou les dimensions finales de la pièce lorsque la pièce à usiner est un lopin entièrement usiné et fini ou une ébauche finie dans la machine 1 pour obtenir ladite pièce ;

- des moyens de commande 20b du premier système de mesure optique 22 pour mesurer et enregistrer des dimensions réelles de la pièce montée sur la première broche 12 ;
- des moyens de commande 20'b du deuxième système de mesure optique 24, lorsqu'il est présent, pour mesurer et enregistrer les dimensions réelles de la pièce montée sur la deuxième broche 14 ;
- des moyens de comparaison 20c des dimensions réelles mesurées de la pièce avec les dimensions prédéterminées ;
- des moyens de correction 20d pour modifier les paramètres d'usinage, tels que les caractéristiques du laser ou la vitesse de rotation des broches 12, 14, en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce avec les dimensions prédéterminées ;
- des moyens de commande 20e des moyens d'usinage de précision sans force 8 pour usiner la pièce en fonction des paramètres d'usinage.

[0049] D'une manière particulièrement avantageuse, le système de pilotage 20 est agencé pour piloter en continu lesdits moyens de commande 20b du premier système de mesure optique 22, lesdits moyens de comparaison 20c, lesdits moyens de correction 20d et lesdits moyens de commande 20e des moyens d'usinage 8 pour commander un premier usinage de la partie exposée de la pièce 2 montée sur la première broche 12, puis alternativement des mesures des dimensions réelles de la pièce 2 montée sur la première broche 12 et un usinage de la pièce 2 toujours montée sur la première broche 12 selon les paramètres d'usinage modifiés en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce montée sur la première broche 12 avec les dimensions prédéterminées, jusqu'à ce que les dimensions réelles mesurées de la pièce 2 montée sur la première broche 12 correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie, ledit système de pilotage 20 permettant un usinage en boucle fermée à partir des dimensions réelles mesurées de la pièce 2 montée sur la première broche 12.

[0050] De même, le système de pilotage 20 est agencé pour piloter en continu lesdits moyens de commande 20'b du deuxième système de mesure optique 24, lorsqu'il est présent, lesdits moyens de comparaison 20c, lesdits moyens de correction 20d et lesdits moyens de commande 20e des moyens d'usinage 8 pour commander un premier usinage de l'autre partie exposée de la pièce 2 montée sur la deuxième broche 14, puis alternativement des mesures des dimensions réelles de la pièce 2 montée sur la deuxième broche 14 et un usinage de la pièce 2 toujours montée sur la deuxième broche 14 selon les paramètres d'usinage modifiés en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce montée sur la deuxième broche 14 avec les dimensions prédéterminées, jusqu'à ce que les dimensions réelles mesurées de la pièce 2 montée sur la deuxième broche 14 correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie, ledit système de pilotage 20 permettant un usinage en boucle fermée à partir des dimensions réelles mesurées de la pièce 2 montée sur la deuxième broche 14.

[0051] Ainsi le système de pilotage 20 est agencé pour créer une boucle fermée de contrôles dimensionnels continus des pièces et d'usinages corrigés en fonction du contrôle dimensionnel précédent, la pièce à usiner restant sur sa broche, dans son dispositif de serrage. La pièce obtenue est usinée avec une précision extrême de l'ordre inférieur ou égal à $\pm 1 \mu\text{m}$.

[0052] Les dispositifs de serrage 16, 18 et leur montage sur leur broche respective 12, 14, sont maintenant décrits en détail en référence aux figures 3 à 7.

[0053] D'une manière particulièrement avantageuse, chaque dispositif de serrage 16, 18 comprend un système de serrage ou de maintien par le vide de la pièce à usiner 2, tel qu'un système Venturi intégré, agencé pour créer une dépression et maintenir la pièce 2 plaquée dans son dispositif de serrage 16, 18.

[0054] Plus particulièrement, et en référence à la figure 7, chaque dispositif de serrage 16, 18 comprend une tête de serrage 32 présentant un orifice dans lequel est introduite une extrémité de la pièce 2 à usiner, ledit orifice communiquant avec le système Venturi via un canal 34.

[0055] De plus, il est également prévu un système de maintien par le vide 36 du dispositif de serrage 16, 18 sur sa broche respective 12, 14, relié au système Venturi intégré, la dépression créée permettant également de maintenir chaque dispositif de serrage 16, 18 plaqué sur sa broche respective 12, 14, dans une position fixe au moins pendant les usinages.

[0056] D'une manière particulièrement avantageuse, comme l'usinage de précision sans force mis en oeuvre selon l'invention, notamment par femto laser, se fait sans effort mécanique, il est alors possible d'utiliser un système de serrage par le vide pour maintenir la pièce dans son dispositif de serrage et un système de maintien par le vide pour maintenir le dispositif de serrage sur sa broche.

[0057] D'une manière avantageuse, le système de pilotage 20 est agencé pour contrôler le vide afin de pouvoir déplacer le dispositif de serrage dans le plan X-Y au moins selon l'axe Y quand cela sera nécessaire pour corriger la concentricité, comme cela sera décrit ci-dessous. Ainsi, chaque dispositif de serrage 16, 18 est agencé pour être maintenu sur sa broche respective 12, 14 selon l'axe Z et pour pouvoir être déplacé dans le plan X-Y au moins selon l'axe Y par une commande du système de pilotage 20 pour corriger la concentricité.

[0058] A cet effet, chaque système de mesure optique 22, 24 de la pièce 2 est agencé pour également mesurer la concentricité de ladite pièce à usiner 2 montée sur sa broche 12, 14, entre l'axe de rotation A de la pièce 2 et l'axe de rotation B, B' de la broche 12, 14 respectivement.

[0059] De plus, la machine d'usinage 1 comprend un dispositif de correction de la concentricité 40 associé à chaque dispositif de serrage 16, 18, ledit dispositif de correction 40 étant agencé pour pouvoir déplacer en translation le dispositif de serrage 16, 18 dans le plan X-Y selon l'axe Y.

[0060] Plus particulièrement, et en référence aux figures 5 à 7, le dispositif de correction de la concentricité 40 comprend une tringle 42 agencée pour pouvoir coopérer radialement selon l'axe Y avec le pourtour extérieur du dispositif de serrage 16, 18, par appui sur ledit pourtour, et une came de correction 44 comprenant un excentrique, coopérant avec ladite tringle 42 par appui sur ladite tringle 42, et agencée pour être entraînée en rotation en étant solidaire d'un arbre 45 entraîné par un moteur 46.

[0061] Le flasque 48 de la broche 12, 14 présente un logement 50 dans lequel le dispositif de serrage 16, 18 est positionné avec un certain jeu au moins en Y pour pouvoir positionner et recentrer si nécessaire ledit dispositif de serrage 16, 18 par rapport à l'axe de sa broche 12, 14. En outre le logement 50 présente une ouverture radiale 52 permettant le passage de la tringle 42 pour pouvoir venir radialement au contact avec ledit dispositif de serrage 16, 18 lorsqu'il est actionné par la came de correction 44.

[0062] La came de correction 44 est agencée pour être commandée par le système de pilotage 20 pour déplacer la tringle 42 en translation selon l'axe Y, comme représenté par la flèche F, afin de déplacer le dispositif de serrage 16, 18 en translation selon l'axe Y en fonction de la concentricité à corriger.

[0063] De plus, le système de pilotage 20 est agencé pour commander un déplacement angulaire de la broche 12, 14 dans le plan X-Y en fonction de la concentricité à corriger.

[0064] Plus particulièrement, le système de pilotage 20 est agencé pour commander un déplacement angulaire de la broche 12, 14 dans le plan X-Y et/ou pour commander un déplacement du dispositif de serrage 16, 18 en translation dans le plan X-Y selon l'axe Y via le dispositif de correction 40 de sorte que les axes de rotation A, B, respectivement B' de la pièce à usiner 2 et de sa broche 12, 14 respectivement soient confondus avant usinage.

[0065] Ainsi, la position radiale de chaque dispositif de serrage 16, 18 serrant la pièce 2 est corrigée par rapport à l'axe de rotation B, B' de la broche 12, 14 associée avant usinage, permettant d'obtenir une pièce usinée présentant des qualités extrêmes de concentricité et de coaxialité.

[0066] Avantagusement, chaque système de mesure optique 22, 24 de la pièce 2 est agencé pour mesurer la rugosité réelle de la pièce à usiner, le système de pilotage 20 étant agencé pour comparer ladite rugosité réelle avec une rugosité prédéterminée à atteindre, et pour modifier les paramètres d'usinage en fonction de la comparaison de la rugosité réelle de la pièce avec la rugosité prédéterminée.

[0067] L'invention se rapporte également au procédé d'usinage d'une pièce 2, notamment une pièce micromécanique, présentant au moins une surface de révolution d'axe de rotation A au moyen d'une machine d'usinage 1 telle que décrite ci-dessus.

[0068] Le procédé selon l'invention comporte avantagusement les étapes suivantes, en référence à la figure 8 :

- a) enregistrer avec les moyens d'enregistrement 20a du système de pilotage 20 des dimensions prédéterminées de la pièce 2 à atteindre après usinage avec une tolérance prédéfinie, correspondant à une pièce modèle 54, lesdites dimensions prédéterminées à atteindre après usinage pouvant être les dimensions d'une ébauche lorsque la pièce à usiner est un morceau de matériau usinable sans effort, un brut ou un lopin, usiné partiellement dans la machine 1 pour obtenir ladite ébauche, l'ébauche étant ensuite finie par un autre procédé, ou les dimensions finales de la pièce lorsque la pièce à usiner est un lopin entièrement usiné et fini ou une ébauche finie dans la machine 1 pour obtenir ladite pièce;
- b) se munir d'une pièce 2 à usiner;
- c) monter la pièce 2 à usiner dans l'une 12 des broches 12, 14 de la machine d'usinage 1 au moyen de son dispositif de serrage 16 associé, maintenu par le vide, ledit dispositif de serrage 16 ayant été au préalable positionné de manière centrée sur sa broche 12 et le positionnement de la broche 12 et le positionnement initial des moyens d'usinage de précision sans force 8, notamment un laser femto-seconde pour positionner correctement sa zone d'action 9, ayant été réglés au préalable au moyen d'une pièce de test;
- d) usiner par les moyens d'usinage de précision sans force 8, notamment un laser femto-seconde, la partie exposée de la pièce 2 à usiner en attaquant la matière radialement et/ou tangentiellement et/ou axialement à la pièce 2 montée sur sa broche 12 en rotation via son dispositif de serrage 16; l'usinage est programmé pour réaliser au plus près la pièce modèle 54;

- e) mesurer et enregistrer les dimensions de la pièce 2 usinée selon l'étape précédente dans le champ de mesure 30 au moyen du système de mesure optique associé 22 prévu dans la machine d'usinage 1 et des moyens de commande 20b du système de pilotage 20 pour obtenir des dimensions réelles mesurées de la pièce 2 montée sur sa broche associée 12;
- f) comparer les dimensions réelles mesurées à l'étape e) aux dimensions prédéterminées de la pièce modèle 54 enregistrées à l'étape a) au moyen des moyens de comparaison 20c du système de pilotage 20;
- g) si les dimensions réelles mesurées à l'étape e) diffèrent des dimensions prédéterminées avec la tolérance prédéfinie, modifier les paramètres d'usinage gérés par le système de pilotage 20 en fonction de la comparaison des mesures obtenues à l'étape f) au moyen des moyens de correction 20d; les paramètres d'usinage modifiés sont plus particulièrement, dans le cas d'un femto laser, les caractéristiques du laser à savoir la puissance, l'énergie par pulse, la fréquence, la durée d'impulsion, et/ou la vitesse de rotation de la broche associée 12;
- h) usiner la partie exposée de la pièce 2 en attaquant la matière radialement et/ou tangentiellement et/ou axialement à la pièce 2 montée sur sa broche en rotation 12 par les moyens d'usinage de précision sans force 8, commandés par les moyens de commande 20e du système de pilotage 20, en fonction des paramètres d'usinage modifiés à l'étape g) ;
- i) répéter les étapes e) à h) jusqu'à ce que, à l'étape f), les dimensions réelles mesurées à l'étape e) et comparées selon l'étape f) correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre de la pièce modèle 54, avec ladite tolérance prédéfinie.

[0069] Ensuite, dans le cas où il est prévu d'usiner l'autre partie de la pièce 2 après usinage de la partie exposée de la pièce 2 montée sur la broche 12, le procédé d'usinage selon l'invention comprend avantageusement les étapes suivantes :

- c') retirer, par le robot, la pièce 2 usinée de son dispositif de serrage 16 maintenu sur la broche 12 et la monter dans l'autre broche 14 de la machine d'usinage 1 au moyen de son dispositif de serrage 18 associé, maintenu par le vide, ledit dispositif de serrage 18 ayant été au préalable positionné de manière centrée sur sa broche 14 et le positionnement de la broche 14 et le positionnement initial des moyens d'usinage de précision sans force 8, notamment un laser femto-seconde pour positionner correctement sa zone d'action 9, ayant été réglés au préalable au moyen d'une pièce de test ;
- d') usiner par les moyens d'usinage de précision sans force 8, notamment un laser femto-seconde, la partie exposée de la pièce 2 à usiner en attaquant la matière radialement et/ou tangentiellement et/ou axialement à la pièce 2 montée sur sa broche 14 en rotation via son dispositif de serrage 18; l'usinage est programmé pour réaliser au plus près la pièce modèle 54;
- e') mesurer et enregistrer les dimensions de la pièce 2 usinée selon l'étape précédente dans le champ de mesure associé 30 au moyen du système de mesure optique associé 24 prévu dans la machine d'usinage 1 et des moyens de commande 20'b du système de pilotage 20 pour obtenir des dimensions réelles mesurées de la pièce 2 montée sur sa broche associée 14;
- f') comparer les dimensions réelles mesurées à l'étape e') aux dimensions prédéterminées de la pièce modèle 54 enregistrées à l'étape a) au moyen des moyens de comparaison 20c du système de pilotage 20;
- g') si les dimensions réelles mesurées à l'étape e') diffèrent des dimensions prédéterminées avec la tolérance prédéfinie, modifier les paramètres d'usinage gérés par le système de pilotage 20 en fonction de la comparaison des mesures obtenues à l'étape f') au moyen des moyens de correction 20d; les paramètres d'usinage modifiés sont plus particulièrement, dans le cas d'un femto laser, les caractéristiques du laser à savoir la puissance, l'énergie par pulse, la fréquence, la durée d'impulsion, et/ou la vitesse de rotation de la broche associée 14;
- h') usiner la partie exposée de la pièce 2, en attaquant la matière radialement et/ou tangentiellement et/ou axialement à la pièce 2 montée sur sa broche en rotation 14 par les moyens d'usinage de précision sans force 8, commandés par les moyens de commande 20e du système de pilotage 20, en fonction des paramètres d'usinage modifiés à l'étape g') ;
- i') répéter les étapes e') à h') jusqu'à ce que, à l'étape f), les dimensions réelles mesurées à l'étape e') et comparées selon l'étape f') correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre de la pièce modèle 54, avec ladite tolérance prédéfinie.

[0070] Ces étapes du procédé d'usinage de la pièce 2 sur la deuxième broche 14 sont optionnelles et peuvent être mises en oeuvre ou pas selon les configurations de la pièce 2.

[0071] D'une manière avantageuse, le procédé d'usinage selon l'invention comprend, avant usinage selon l'étape d) et/ou d'), les étapes intermédiaires suivantes, en référence à la figure 9:

- j) mesurer la concentricité de la pièce 2 à usiner montée sur sa broche 12, 14 entre l'axe de rotation A et l'axe de rotation de la broche B, B' respectivement par le système de mesure optique associé 22, 24 respectivement, de la machine d'usinage 1 ;
- k) corriger la concentricité de la pièce 2 à usiner par rapport à l'axe de rotation B, respectivement B' de sa broche associée 12, respectivement 14, par déplacement de son dispositif de serrage 16, respectivement 18, au moyen du dispositif de correction de la concentricité 40 associé, de sorte que les axes de rotation A, B, respectivement B', de la pièce 2 à usiner et de sa broche associée 12, respectivement 14, soient confondus.

[0072] Plus particulièrement, l'étape k) comprend une première sous-étape k1) de correction angulaire de la broche 12, 14 dans le plan XY par déplacement angulaire la broche 12, 14 et donc du dispositif de serrage associé 16, 18, la rotation de la broche 12, 14 étant commandée par le système de pilotage 20 en fonction de la concentricité à corriger.

[0073] L'étape k) comprend une deuxième sous-étape k2) de correction radiale du dispositif de serrage 16, 18 par son déplacement en translation dans le plan XY selon l'axe Y, comme montré par la flèche F, au moyen de la tringle 42 venue en appui radial, poussée par la came de correction 44 entraînée en rotation et commandée par le système de pilotage 20 en fonction de la concentricité à corriger. Lors de cette sous-étape k2), le système de pilotage 20 est agencé pour contrôler le vide afin de pouvoir déplacer le dispositif de serrage 16, 18 dans le plan X-Y au moins selon l'axe Y pour le recentrer par rapport à l'axe de sa broche associée 12, 14.

[0074] La correction de la concentricité est par exemple nécessaire lorsque le dispositif de serrage est décentré par rapport à sa broche lorsque la pièce à usiner est mise en place dans son dispositif de serrage. Selon la position du dispositif de serrage, seule l'étape k2) peut être nécessaire. Si les axes de la broche et de la pièce à usiner sont coaxiaux dès le départ, seule l'étape j) de mesure de la concentricité est mise en oeuvre, l'étape k) n'étant pas nécessaire.

[0075] D'une manière avantageuse, l'étape a) du procédé d'usinage de l'invention peut comprendre également l'enregistrement, avec les moyens d'enregistrement 20a du système de pilotage 20, d'une rugosité prédéterminée de la pièce à atteindre après usinage. L'étape e), respectivement e'), comprend alors une mesure de la rugosité réelle de la pièce 2 au moyen du système de mesure optique associé 22, 24, l'étape f), respectivement f'), comprend alors une comparaison de ladite rugosité réelle avec la rugosité prédéterminée à atteindre, l'étape g), respectivement g'), comprend alors une modification des paramètres d'usinage en fonction de la comparaison de la rugosité réelle de la pièce avec la rugosité prédéterminée, et les étapes e) à h), respectivement e') à h'), sont alors répétées jusqu'à ce que, à l'étape f), respectivement f'), les dimensions réelles et la rugosité réelle mesurées à l'étape e), respectivement e'), et comparées selon l'étape f), respectivement f'), correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie et à la rugosité prédéterminée à atteindre.

[0076] Les différentes étapes b) à i), c') à i'), j) et k) décrites ci-dessus s'appliquent à chaque pièce 2 à usiner. Toutes les pièces 2 sont alors mesurées et contrôlées.

[0077] La machine d'usinage 1 et le procédé d'usinage mis en oeuvre par ladite machine d'usinage 1 selon l'invention permettent de réaliser un usinage en boucle fermée, alternant les mesures dimensionnelles in situ des pièces par des systèmes optiques et l'usinage des pièces selon des paramètres d'usinage corrigés en fonction des résultats desdites mesures dimensionnelles des pièces, sans démonter la pièce de sa broche, permettant d'obtenir des pièces usinées dans des précisions extrêmes, inférieures ou égal à $\pm 1 \mu\text{m}$.

[0078] De plus, la machine d'usinage 1 et le procédé d'usinage mis en oeuvre par ladite machine d'usinage 1 selon l'invention permettent, avant usinage, de mesurer par des systèmes optiques la concentricité de rotation de la pièce à usiner dans sa broche et de corriger la position radiale du dispositif de serrage de la pièce par rapport à l'axe de rotation de sa broche en fonction de la mesure de concentricité réalisée, permettant d'obtenir des pièces usinées présentant des qualités extrêmes de concentricité et de coaxialité.

[0079] Il est bien évident que le dispositif de correction de la concentricité 40 et les éléments nécessaires à son fonctionnement peut être utilisé dans une machine d'usinage pour recentrer le dispositif de serrage d'une pièce par rapport à sa broche indépendamment de l'usinage en boucle fermé décrit ci-dessus.

Revendications

1. Machine d'usinage (1) d'une pièce (2) présentant au moins une surface de révolution d'axe de rotation A, ladite machine d'usinage (1) comprenant des moyens d'usinage de précision sans force (8) agencés pour usiner la pièce, un tour (10) comprenant au moins une première broche (12) présentant un axe de rotation B s'étendant selon l'axe Z dans un repère XYZ, ladite première broche (12) étant mobile en translation selon l'axe Z et en rotation autour de son axe de rotation B, un premier dispositif de serrage (16) agencé pour serrer la pièce (2) à usiner et la monter sur la première broche (12), et un système de pilotage (20) agencé pour gérer des paramètres d'usinage, caractérisée

en ce que ladite machine d'usinage (1) comprend un premier système de mesure optique (22) de la pièce (2) agencé pour au moins mesurer les dimensions réelles de la pièce (2) lorsqu'elle est montée sur la première broche (12) au moyen du premier dispositif de serrage (16), et en ce que le système de pilotage (20) comprend :

- des moyens d'enregistrement (20a) de dimensions prédéterminées de la pièce à atteindre après usinage avec une tolérance prédéfinie,
- des moyens de commande (20b) du premier système de mesure optique (22) pour mesurer et enregistrer des dimensions réelles de la pièce (2) montée sur la première broche (12),
- des moyens de comparaison (20c) des dimensions réelles mesurées de la pièce (2) avec les dimensions prédéterminées,
- des moyens de correction (20d) pour modifier les paramètres d'usinage en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce (2) avec les dimensions prédéterminées,
- des moyens de commande (20e) des moyens d'usinage de précision sans force (8) pour usiner la pièce (2) en fonction des paramètres d'usinage,

ledit système de pilotage (20) étant agencé pour piloter en continu lesdits moyens de commande (20b) du premier système de mesure optique (22), lesdits moyens de comparaison (20c), lesdits moyens de correction (20d) et lesdits moyens de commande (20e) des moyens d'usinage de précision sans force (8) pour commander un usinage puis alternativement des mesures des dimensions réelles de la pièce (2) montée sur la première broche (12) et un usinage de la pièce (2) montée sur la première broche (12) selon les paramètres d'usinage modifiés en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce (2) montée sur la première broche (12) avec les dimensions prédéterminées, jusqu'à ce que les dimensions réelles mesurées de la pièce (2) montée sur la première broche (12) correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie, ledit système de pilotage (20) permettant un usinage en boucle fermée à partir des dimensions réelles mesurées de la pièce (2).

2. Machine d'usinage selon la revendication 1, caractérisée en ce que le tour (10) comprend une deuxième broche (14) présentant un axe de rotation B' s'étendant selon l'axe Z en regard de la première broche (12), ladite deuxième broche (14) étant mobile en translation selon l'axe Z et en rotation autour de son axe de rotation B', en ce que la machine d'usinage (1) comprend un deuxième dispositif de serrage (18) agencé pour serrer la pièce (2) à usiner et la monter sur la deuxième broche (14) et un deuxième système de mesure optique (24) de la pièce (2) agencé pour au moins mesurer les dimensions réelles de la pièce (2) lorsqu'elle est montée sur la deuxième broche (14) au moyen du deuxième dispositif de serrage (18), le système de pilotage (20) comprenant des moyens de commande (20'b) du deuxième système de mesure optique (24) pour mesurer et enregistrer les dimensions réelles de la pièce (2) montée sur la deuxième broche (14) et étant agencé pour piloter en continu lesdits moyens de commande (20'b) du deuxième système de mesure optique (24), lesdits moyens de comparaison (20c), lesdits moyens de correction (20d) et lesdits moyens de commande (20e) des moyens d'usinage de précision sans force (8) pour commander un usinage puis alternativement des mesures des dimensions réelles de la pièce (2) montée sur la deuxième broche (14) et un usinage de la pièce (2) montée sur la deuxième broche (14) selon les paramètres d'usinage modifiés en fonction de la comparaison des dimensions réelles mesurées de la pièce (2) montée sur la deuxième broche (14) avec les dimensions prédéterminées, jusqu'à ce que les dimensions réelles mesurées de la pièce (2) montée sur la deuxième broche (14) correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie.
3. Machine d'usinage selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les moyens d'usinage de précision sans force (8) sont agencés pour attaquer la matière de la pièce (2) à usiner radialement et/ou tangentiellement et/ou axialement à ladite pièce (2).
4. Machine d'usinage selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les moyens d'usinage de précision sans force (8) comprennent des moyens d'usinage par tournage par femto laser, par tournage électrochimique, ou par tournage par électroérosion.
5. Machine d'usinage selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que le système de mesure optique (22, 24) comprend une optique télécentrique (26) associée à un éclairage télécentrique (28).
6. Machine d'usinage selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que le dispositif de serrage (16, 18) comprend un système de serrage par le vide de la pièce (2) à usiner.
7. Machine d'usinage selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce qu'elle comprend un système de maintien par le vide (36) du dispositif de serrage (16, 18) sur sa broche respective (12, 14).
8. Machine d'usinage selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que le dispositif de serrage (16, 18) est agencé pour être maintenu sur sa broche respective (12, 14) selon l'axe Z et pour pouvoir être déplacé dans un plan X-Y au moins selon l'axe Y par une commande du système de pilotage (20).
9. Machine d'usinage selon la revendication 8, caractérisée en ce que le système de mesure optique (22, 24) de la pièce (2) est agencé pour mesurer la concentricité de la pièce (2) à usiner montée sur sa broche (12, 14) entre l'axe de rotation A et l'axe de rotation B, respectivement B' de la broche (12, 14), en ce que la machine d'usinage (1) comprend un dispositif de correction (40) de la concentricité associé à un dispositif de serrage (16, 18), ledit dispositif de correction (40) étant agencé pour pouvoir déplacer en translation son dispositif de serrage (16, 18) dans le plan X-Y selon l'axe Y, et en ce que le système de pilotage (20) est agencé pour commander un déplacement angulaire

de la broche (12, 14) dans le plan X-Y et/ou pour commander un déplacement du dispositif de serrage (16, 18) en translation selon l'axe Y via son dispositif de correction (40) de sorte que les axes de rotation (A, B, B') de la pièce (2) à usiner et de sa broche (12, 14) soient confondus avant usinage.

10. Machine d'usinage selon la revendication 9, caractérisée en ce que le dispositif de correction (40) de la concentricité comprend une tringle (42) agencée pour pouvoir coopérer avec le dispositif de serrage associé (16, 18) et une came de correction (44) coopérant avec ladite tringle (42) et agencée pour être entraînée en rotation et commandée par le système de pilotage (20) pour déplacer ladite tringle (42) selon l'axe Y afin de déplacer le dispositif de serrage (16, 18) en translation selon l'axe Y en fonction de la concentricité à corriger.
11. Machine d'usinage selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que le système de mesure optique (22, 24) de la pièce (2) est agencé pour mesurer la rugosité réelle de la pièce (2) à usiner, et en ce que le système de pilotage (20) est agencé pour comparer ladite rugosité réelle avec une rugosité prédéterminée à atteindre, et pour modifier les paramètres d'usinage en fonction de la comparaison de la rugosité réelle de la pièce (2) avec la rugosité prédéterminée.
12. Machine d'usinage selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les paramètres d'usinage comprennent les caractéristiques de fonctionnement des moyens d'usinage de précision sans force (8), la vitesse de rotation des broches (12, 14) et l'inclinaison des broches (12, 14).
13. Machine d'usinage selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que les dimensions prédéterminées à atteindre après usinage sont les dimensions d'une ébauche lorsque la pièce (2) à usiner est un morceau de matériau usinable sans effort, un brut ou un lopin, usiné partiellement pour obtenir ladite ébauche, ou les dimensions finales de la pièce lorsque la pièce (2) à usiner est un lopin usiné ou une ébauche finie pour obtenir ladite pièce.
14. Procédé d'usinage d'une pièce (2) présentant au moins une surface de révolution d'axe de rotation A au moyen d'une machine d'usinage (1) selon l'une des revendications 1 à 13, caractérisé en ce que ledit procédé comprend les étapes suivantes :
 - a) enregistrer des dimensions prédéterminées de la pièce à atteindre après usinage avec une tolérance prédéfinie ;
 - b) se munir d'une pièce (2) à usiner ;
 - c) monter la pièce (2) à usiner dans l'une des broches (12) de la machine d'usinage (1) au moyen de son dispositif de serrage (16) ;
 - d) usiner la pièce (2) montée sur sa broche (12) en rotation par les moyens d'usinage de précision sans force (8) ;
 - e) mesurer les dimensions de la pièce (2) usinée selon l'étape précédente au moyen du système de mesure optique (22) de la machine d'usinage (1) pour obtenir des dimensions réelles mesurées de la pièce (2) montée sur sa broche (12) ;
 - f) comparer les dimensions réelles mesurées à l'étape e) aux dimensions prédéterminées enregistrées à l'étape a) ;
 - g) si les dimensions réelles mesurées à l'étape e) diffèrent des dimensions prédéterminées avec la tolérance prédéfinie, modifier les paramètres d'usinage gérés par le système de pilotage (20) en fonction de la comparaison des mesures obtenues à l'étape f) ;
 - h) usiner la pièce (2) montée sur sa broche (12) en rotation par les moyens d'usinage de précision sans force (8) en fonction des paramètres d'usinage modifiés à l'étape g) ;
 - i) répéter les étapes e) à h) jusqu'à ce que, à l'étape f), les dimensions réelles mesurées à l'étape e) et comparées selon l'étape f) correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie.
15. Procédé d'usinage selon la revendication 14, caractérisé en ce que ledit procédé comprend, après usinage de la pièce sur l'une des broches (12), les étapes suivantes :
 - c') retirer la pièce usinée de l'une des broches (12) et la monter dans l'autre broche (14) de la machine d'usinage (1) au moyen de son dispositif de serrage (18) ;
 - d') usiner la pièce (2) montée sur sa broche (14) en rotation par les moyens d'usinage de précision sans force (8) ;
 - e') mesurer les dimensions de la pièce (2) usinée selon l'étape précédente au moyen du système de mesure optique (24) de la machine d'usinage (1) pour obtenir des dimensions réelles mesurées de la pièce (2) montée sur sa broche (14) ;
 - f') comparer les dimensions réelles mesurées à l'étape e') aux dimensions prédéterminées enregistrées à l'étape a) ;
 - g') si les dimensions réelles mesurées à l'étape e') diffèrent des dimensions prédéterminées avec la tolérance prédéfinie, modifier les paramètres d'usinage gérés par le système de pilotage en fonction de la comparaison des mesures obtenues à l'étape f') ;
 - h') usiner la pièce (2) montée sur sa broche (14) en rotation par les moyens d'usinage de précision sans force (8) en fonction des paramètres d'usinage modifiés à l'étape g') ;
 - i') répéter les étapes e') à h') jusqu'à ce que, à l'étape f'), les dimensions réelles mesurées à l'étape e') et comparées selon l'étape f') correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie.
16. Procédé d'usinage selon l'une des revendication 14 et 15, caractérisé en ce qu'il comprend, avant usinage selon l'étape d) ou d'), les étapes intermédiaires suivantes :
 - j) mesurer la concentricité de la pièce (2) à usiner montée sur sa broche (12, 14) entre l'axe de rotation A et l'axe de rotation (B, B') de la broche (12, 14) par le système de mesure optique associé (22, 24) de la machine d'usinage (1) ;

- k) corriger la concentricité de la pièce (2) à usiner par rapport à l'axe de rotation (B, B') de sa broche (12, 14) par déplacement de son dispositif de serrage (16, 18) de sorte que les axes de rotation (A, B, B') de la pièce (2) à usiner et de sa broche (12, 14) soient confondus.
17. Procédé d'usinage selon l'une des revendication 14 à 16, caractérisé en ce que l'étape a) comprend l'enregistrement d'une rugosité prédéterminée de la pièce à atteindre après usinage, en ce que l'étape e), respectivement e'), comprend une mesure de la rugosité réelle de la pièce (2) au moyen du système de mesure optique associé (22, 24), en ce que l'étape f), respectivement f'), comprend une comparaison de ladite rugosité réelle avec la rugosité prédéterminée à atteindre, en ce que l'étape g), respectivement g'), comprend une modification des paramètres d'usinage en fonction de la comparaison de la rugosité réelle de la pièce avec la rugosité prédéterminée, et en ce que les étapes e) à h), respectivement e') à h'), sont répétées jusqu'à ce que, à l'étape f), respectivement f'), les dimensions réelles et la rugosité réelle mesurées à l'étape e), respectivement e'), et comparées selon l'étape f), respectivement f'), correspondent aux dimensions prédéterminées à atteindre avec ladite tolérance prédéfinie et à la rugosité prédéterminée à atteindre.
 18. Procédé d'usinage selon l'une des revendications 14 à 17, caractérisé en ce que les moyens d'usinage de précision sans force (8) comprennent des moyens d'usinage par tournage par femto laser, par tournage électrochimique, ou par tournage par électroérosion.
 19. Procédé d'usinage selon l'une des revendication 14 à 18, caractérisé en ce que les paramètres d'usinage comprennent les caractéristiques de fonctionnement des moyens d'usinage de précision sans force (8), la vitesse de rotation des broches (12, 14) et l'inclinaison des broches (12, 14).
 20. Procédé d'usinage selon l'une des revendications 14 à 19, caractérisé en ce que les dimensions prédéterminées à atteindre après usinage sont les dimensions d'une ébauche lorsque la pièce à usiner est un morceau de matériau usinable sans effort, un brut ou un lopin, usiné partiellement pour obtenir ladite ébauche, ou les dimensions finales de la pièce lorsque la pièce à usiner est un lopin usiné ou une ébauche finie pour obtenir ladite pièce.
 21. Pièce usinée obtenue par le procédé d'usinage selon l'une des revendications 14 à 20.

Fig. 1

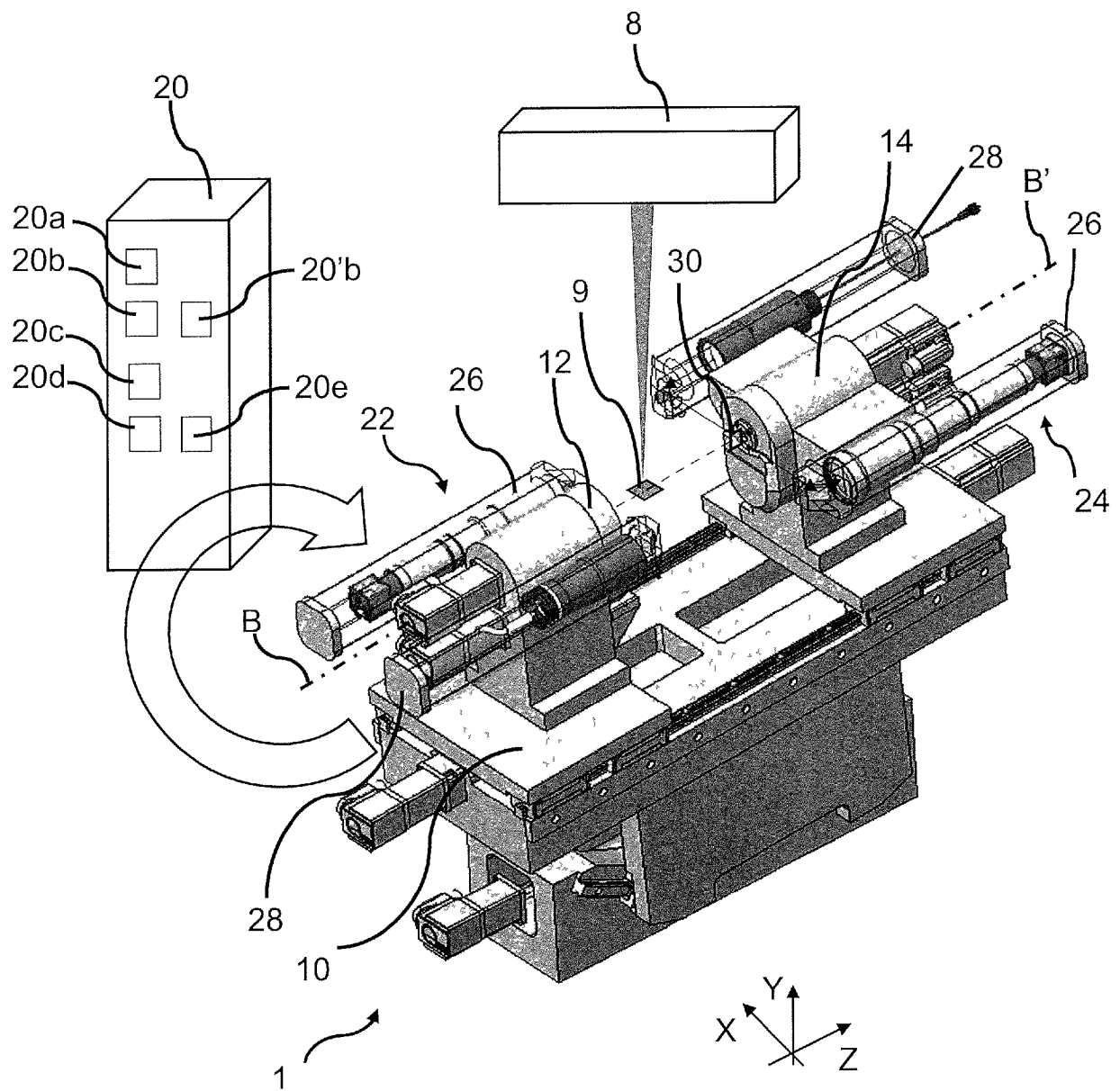


Fig. 2

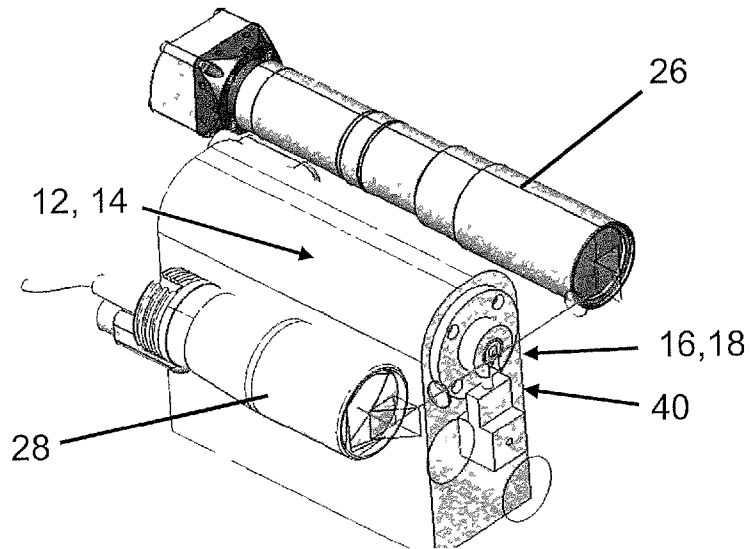


Fig. 3

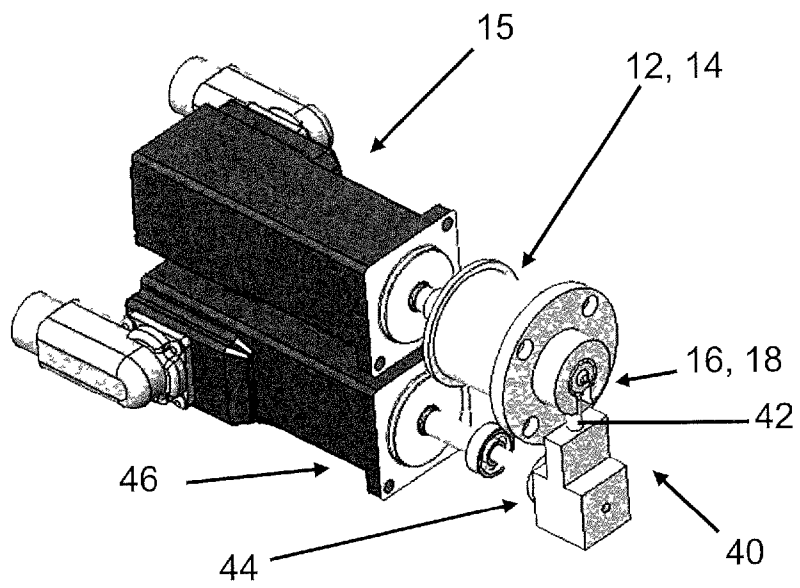


Fig. 4

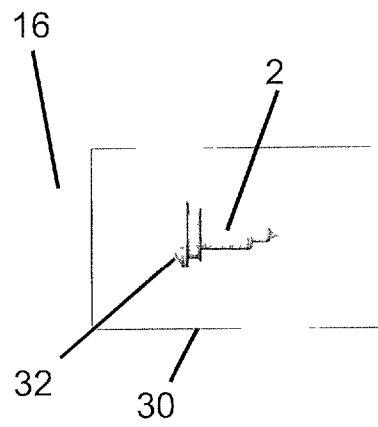


Fig. 5

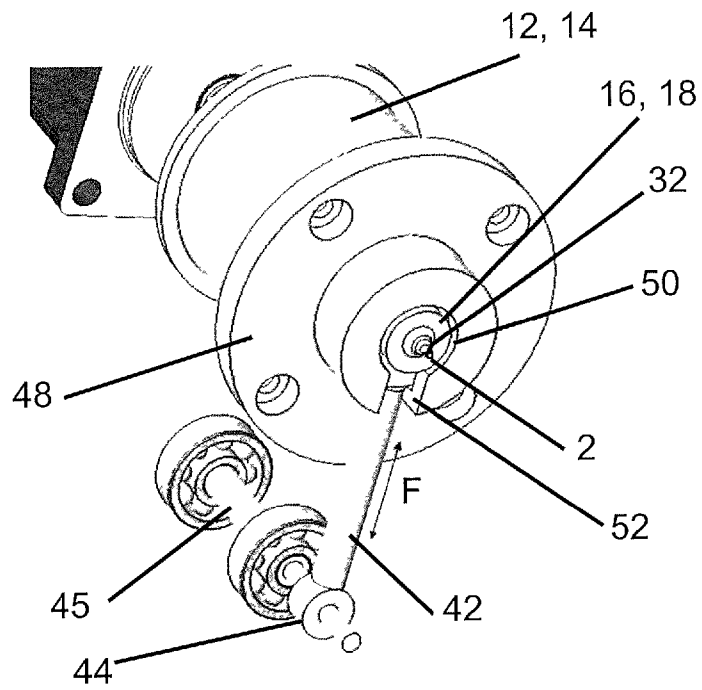


Fig. 6

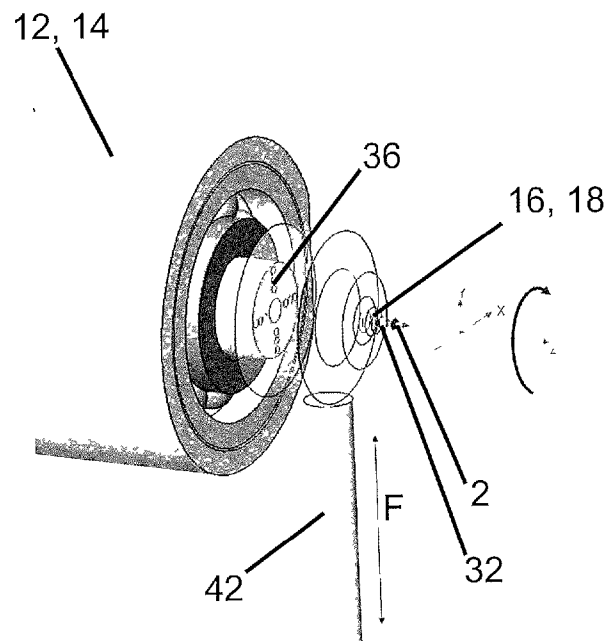


Fig. 7

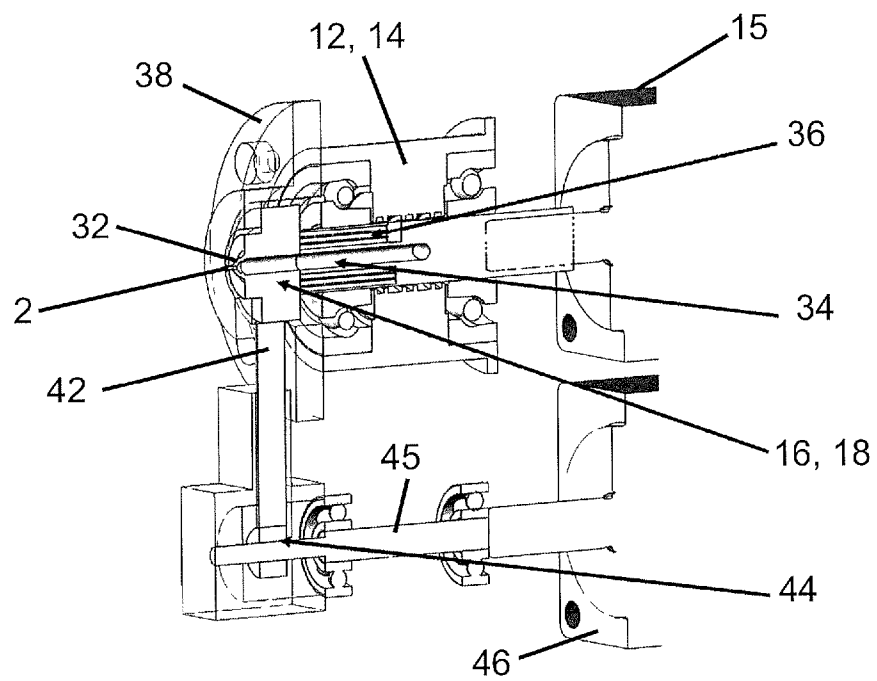


Fig. 8

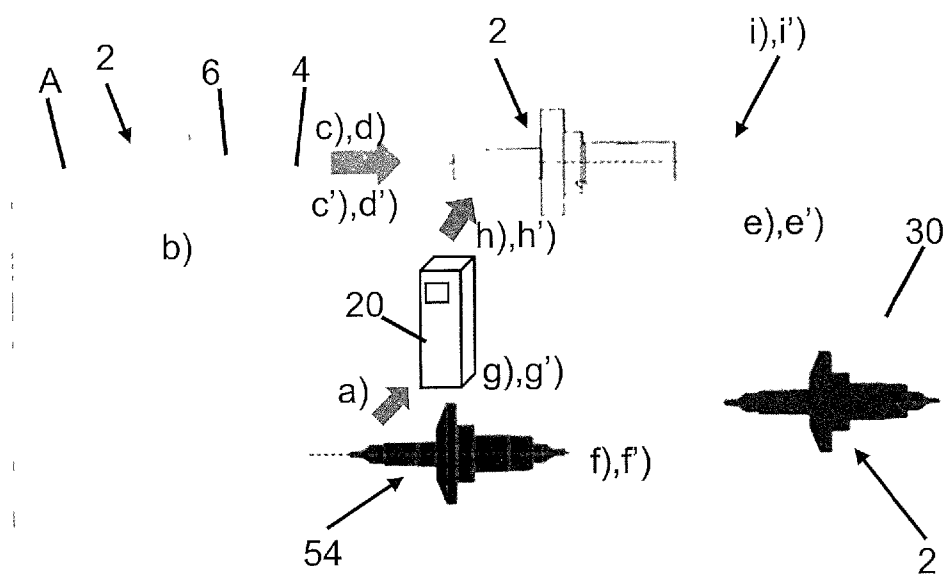


Fig. 9

