

(19)



(11)

EP 2 647 740 A1

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:

09.10.2013 Bulletin 2013/41

(51) Int Cl.:

C25D 7/06 (2006.01)**C25D 7/10** (2006.01)**B24B 27/06** (2006.01)**B24D 11/00** (2006.01)**B24D 18/00** (2006.01)**C25D 15/02** (2006.01)(21) Numéro de dépôt: **13161835.7**(22) Date de dépôt: **29.03.2013**

(84) Etats contractants désignés:

**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

Etats d'extension désignés:

BA ME(30) Priorité: **02.04.2012 FR 1253018**

(71) Demandeurs:

- **Commissariat à l'Énergie Atomique
et aux Énergies Alternatives
75015 Paris (FR)**
- **THERMOCOMPACT
74370 Metz Tassy (FR)**

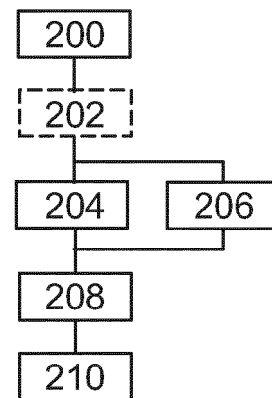
(72) Inventeurs:

- **LY, Michel
74000 ANNECY (FR)**
- **COUSTIER, Fabrice
73100 AIX LES BAINS (FR)**
- **WEBER, Xavier
74000 ANNECY (FR)**

(74) Mandataire: **Colombo, Michel et al****Brevinnov****310 avenue Berthelot
69008 Lyon (FR)**(54) **Procédé et appareil de fabrication d'un fil de découpe**

(57) Ce procédé de fabrication d'un fil de découpe comporte:

- a) le déplacement (200, 204) de l'âme centrale, à l'intérieur d'un bain d'électrolyte contenant des particules abrasives et des ions d'un liant, à une vitesse V_1 dans la direction longitudinale de l'âme centrale,
- b) l'application (204) d'une différence de potentiels entre l'âme centrale en déplacement et une électrode de travail pour provoquer le dépôt par l'électrolyse du liant et des particules abrasives sur l'âme centrale,
- en même temps que les étapes a) et b), la création (204), à l'aide de pales ou d'une pompe, d'un courant d'électrolyte à l'intérieur du bain parallèlement à l'âme centrale et dans la direction de déplacement de l'âme de manière à entraîner la circulation de l'électrolyte le long de l'âme centrale à une vitesse V_2 non nulle égale à la vitesse V_1 à plus ou moins 5 m/min près.

**Fig. 19**

Description

[0001] L'invention concerne un procédé et un appareil de fabrication d'un fil de découpe formé de particules abrasives maintenues sur une âme centrale par un liant.

[0002] Des procédés connus comportent :

- a) le déplacement de l'âme centrale, à l'intérieur d'un bain d'électrolyte contenant les particules abrasives et des ions du liant, à une vitesse V_1 dans la direction longitudinale de l'âme centrale, et
- b) l'application d'une différence de potentiels entre l'âme centrale en déplacement et une électrode de travail pour provoquer le dépôt par l'électrolyse du liant et des particules abrasives sur l'âme centrale.

[0003] Dans les procédés connus, la vitesse de déplacement de l'âme centrale dans le bain d'électrolyte est limitée généralement à moins de 5 m/min. En effet, si l'âme centrale se déplace plus rapidement dans le bain d'électrolyte, cela accroît les turbulences hydrodynamiques qui deviennent alors suffisamment fortes pour empêcher ou pour décoller les particules abrasives qui se sont déposées sur l'âme centrale avant que le liant ne puisse les recouvrir pour les maintenir fixées sur cette âme centrale.

[0004] De l'état de la technique est également connu de :

- EP2277660A1,
- GB1279623A,
- US3506546A,
- US3894924A,
- EP0641872A1,
- EP0297982A1.

[0005] L'invention vise à proposer un procédé plus rapide de fabrication d'un tel fil de découpe. Elle a donc pour objet un procédé de fabrication d'un fil de découpe conforme à la revendication 1.

[0006] Dans le procédé ci-dessus, puisque le bain d'électrolyte se déplace à la même vitesse que l'âme centrale, les turbulences hydrodynamiques qui apparaissent sont limitées même si l'âme centrale se déplace à une vitesse supérieure à 5 m/min. Il devient donc possible de déposer les particules abrasives sur une âme centrale qui se déplace beaucoup plus rapidement. Le procédé de fabrication permet donc une fabrication plus rapide du fil de découpe.

[0007] Les modes de réalisation de ce procédé peuvent comporter une ou plusieurs des caractéristiques des revendications dépendantes de procédé.

[0008] Ces modes de réalisation du procédé présentent en outre l'avantage suivant :

- limiter l'écart entre les vitesses V_2 et V_1 à moins de 1 m/min permet de limiter les turbulences hydrodynamiques et donc de déposer et de maintenir plus

de particules abrasives sur l'âme centrale qu'avec les procédés traditionnels de fabrication.

[0009] L'invention a également pour objet un appareil de fabrication d'un fil de découpe conforme à la revendication 5.

[0010] Les modes de réalisation de cet appareil de fabrication peuvent comporter une ou plusieurs des caractéristiques des revendications dépendantes d'appareil.

[0011] Les modes de réalisation de cet appareil de fabrication présentent en outre les avantages suivants :

- utiliser des buses pour projeter le bain d'électrolyte selon une vitesse non nulle perpendiculairement à la direction longitudinale de l'âme centrale permet d'accroître la quantité de particules abrasives qui s'accrochent sur l'âme centrale ;
- utiliser plusieurs buses de projection uniformément réparties le long de la périphérie permet d'augmenter l'uniformité de la répartition des particules abrasives sur la périphérie de l'âme centrale ;
- monter les buses déplaçables en rotation permet de répartir les particules abrasives le long d'un parcours prédéfini, par exemple hélicoïdal, sur la périphérie extérieure de l'âme centrale ;
- projeter le bain d'électrolyte à une vitesse supérieure à la vitesse V_1 augmente la quantité de particules abrasives accrochées sur l'âme centrale.

[0012] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en se référant aux dessins sur lesquels :

- la figure 1 est une illustration schématique d'un appareil de fabrication d'un fil de découpe,
- la figure 2 est une illustration en coupe transversale du fil de découpe fabriqué à l'aide de l'appareil de la figure 1 ;
- la figure 3 est une illustration schématique en coupe transversale d'une particule abrasive du fil de la figure 2 ;
- les figures 4, 5 et 7 sont des illustrations schématiques de différents modes de réalisation d'un dispositif d'aimantation d'une âme centrale du fil de la figure 2 ;
- la figure 6 est une illustration schématique d'une section de l'âme centrale du fil de la figure 2 aimantée à l'aide du dispositif de la figure 5 ;
- les figures 8 et 9 sont des illustrations schématiques d'un autre dispositif d'aimantation de l'âme centrale et des particules abrasives du fil de la figure 2 ;
- la figure 10 est une illustration schématique d'un dispositif d'aimantation des particules abrasives de la figure 3 ;
- la figure 11 est une illustration schématique d'un récipient contenant un bain d'électrolyte de l'appareil de la figure 1 ;

- les figures 12, 13 et 14 sont des illustrations schématiques en coupe transversale de différents modes de réalisation d'un jeu de buses utilisé dans le récipient de la figure 11 ;
- les figures 15, 16, 17 et 18 représentent différents modes de réalisation de la particule abrasive de la figure 3 ;
- la figure 19 est un organigramme d'un procédé de fabrication du fil de la figure 2 à l'aide de l'appareil de la figure 1 ;
- la figure 20 est un organigramme d'un autre procédé de fabrication du fil de la figure 2.

[0013] Dans ces figures, les mêmes références sont utilisées pour désigner les mêmes éléments.

[0014] Dans la suite de cette description, les caractéristiques et fonctions bien connues de l'homme du métier ne sont pas décrites en détail.

[0015] Dans cette description, lorsque des valeurs de perméabilité relative d'un matériau magnétique sont données, elles le sont pour une fréquence nulle.

[0016] Les termes « Induction magnétique » et « aimantation » sont utilisés comme des synonymes. Les termes « induction magnétique rémanente » ou « rémanence magnétique » sont également utilisés comme des synonymes. Il s'agit de l'induction magnétique générée, en absence de champ magnétique extérieur, par un matériau magnétique qui a au préalable été aimanté. Dans ce cas, on dit également que le matériau magnétique présente une aimantation rémanente ou qu'il est aimanté de façon permanente.

[0017] Par la suite, par « aimanter », on désigne le fait qu'une pièce présente un moment magnétique non nul. L'aimantation de la pièce peut être permanente, c'est-à-dire persister même en absence de champ magnétique extérieur. On parle alors d'aimantation permanente. La pièce forme alors un aimant permanent si l'induction magnétique permanente à sa surface est supérieure à 0,1 mT à la température ambiante. Les matériaux utilisés pour réaliser un aimant permanent sont généralement des matériaux magnétiques durs. Par matériau magnétique dur, on désigne un matériau dont la coercitivité est supérieure à 5mT et, de préférence, supérieure à 10mT ou 50 mT. Généralement, il s'agit de matériaux comprenant une grande quantité de fer, de cobalt, de nickel et/ou de terres rares. Par grande quantité, on désigne par exemple le fait que plus de la moitié ou plus de 90% de la masse du matériau est composée d'un ou d'une combinaison de ces éléments.

[0018] L'aimantation de la pièce peut aussi disparaître dès que ce matériau magnétique n'est plus exposé à un champ magnétique extérieur. Cette pièce ne présente donc pas d'aimantation permanente. Ici, on considère qu'une pièce est désaimantée si son aimantation permanente est strictement inférieure à 0,1 mT et, typiquement, inférieure à 0,05 mT. Généralement, la pièce est alors réalisée dans un matériau magnétique doux, c'est-à-dire des matériaux dont la coercitivité est strictement

inférieure à 1 mT.

[0019] La figure 1 représente un appareil 2 de fabrication d'un fil 3 de découpe. Un fil de découpe est destiné à découper un matériau dur par frottement ou abrasion. Ici, on considère qu'un matériau est dur si sa microdureté sur l'échelle de Vickers est supérieure à 400 Hv50 ou supérieur ou égale à 4 sur l'échelle de Mohs. Dans cette description, les microduretés Vickers sont exprimées pour une charge de 50 gramme force, c'est-à-dire pour une force de 0,49N. Toutefois, l'homme du métier sait qu'il faut ajuster la charge en fonction de l'épaisseur du matériau sur lequel les mesures sont réalisées pour que la taille de l'empreinte Vickers soit inférieure à l'épaisseur du matériau. Ici, ce fil de découpe est destiné à découper du silicium monocristallin ou polycristallin ou encore du saphir ou du carbure de silicium.

[0020] Avant de décrire plus en détail l'appareil 2, le fil 3 fabriqué par cet appareil 2 est décrit en référence aux figures 2 et 3.

[0021] Le fil 3 comporte une âme centrale 4 sur la périphérie de laquelle sont fixées des particules abrasives 6 maintenues sur l'âme centrale par un liant 8. Typiquement, l'âme centrale se présente sous la forme d'un fil simple présentant une résistance à la traction supérieure à 2 000 ou 3 000 MPa et, généralement, inférieure à 5 000 MPa.

[0022] L'allongement à la rupture de l'âme 4 est supérieur à 1 % et, de préférence, supérieur à 2 %. A l'inverse, l'allongement à la rupture de l'âme 4 ne doit pas être trop important et, par exemple, doit rester en dessous de 10 ou 5 %. L'allongement à la rupture représente ici l'augmentation de la longueur de l'âme 4 avant que celle-ci ne se rompe.

[0023] Dans ce mode de réalisation, l'âme 4 a une section transversale circulaire. Par exemple, le diamètre de l'âme 4 est compris entre 70 μm et 1 mm. Le diamètre de l'âme 4 dépend souvent du matériau que l'on souhaite découper. Par exemple, le diamètre de l'âme 4 est compris entre 200 et 450 μm ou 1 mm pour découper des lingots de silicium tandis qu'il est compris entre 70 et 100 ou 200 μm pour découper des tranches de silicium connues sous le terme anglais de « wafer ». Dans ce mode de réalisation, l'âme 4 est réalisée dans un matériau électriquement conducteur. On considère qu'un matériau est électriquement conducteur si sa résistivité est inférieure à $10^{-5} \Omega\cdot\text{m}$ à 20°C. Ici, l'âme 4 est également réalisée dans un matériau magnétique dont la perméabilité relative est supérieure à 50 et, de préférence, supérieure à 100 ou 200. Par exemple, l'âme 4 est réalisée en acier au carbone ou en acier inoxydable ferritique ou en acier laitonné. La masse linéique m de l'âme 6 est, par exemple, comprise entre 10mg/m et 500mg/m et, de préférence, entre 50mg/m et 200mg/m.

[0024] Les particules abrasives 6 forment des dents à la surface de l'âme 4 qui vont venir éroder le matériau à découper. Ces particules abrasives doivent donc être plus dures que le matériau à découper.

[0025] Le diamètre de ces particules 6 est compris ente

1 μm et 500 μm et inférieur au tiers du diamètre de l'âme 4. Ici, dans ce mode de réalisation, le diamètre des particules 6 est compris entre 10 et 22 μm pour une âme de diamètre 0,12mm. Lorsque ces particules 6 ne sont pas des sphères, le diamètre correspond au plus grand diamètre hydraulique de ces particules.

[0026] Le liant 8 a pour fonction de maintenir les particules abrasives 6 fixées sans aucun degré de liberté sur l'âme 4.

[0027] De préférence, le liant 8 est un liant métallique car ces liants sont plus durs que des résines et permettent donc de maintenir de façon plus efficace les particules abrasives sur l'âme 4. Ici, le liant est du nickel.

[0028] Dans ce mode de réalisation, le liant 8 est déposé en deux couches successives 10 et 12. L'épaisseur de la couche 10 est faible. Par exemple, elle est inférieure à la moitié du diamètre moyen des particules abrasives. Cette couche 10 permet juste de fixer faiblement les particules abrasives 6 sur l'âme centrale.

[0029] La couche 12 a une épaisseur plus importante. Par exemple, l'épaisseur de la couche 12, dans la direction radiale, est supérieure à 0,5 fois le diamètre moyen des particules abrasives. L'épaisseur de la couche 12 est généralement supérieure ou égale à 0,7 fois le diamètre moyen des particules abrasives. L'épaisseur de la couche 12 reste cependant classiquement inférieure ou égale au diamètre moyen des particules abrasives.

[0030] Cette couche 12 permet d'empêcher l'arrachement des particules abrasives 6 lorsque le fil 3 est utilisé pour découper une pièce.

[0031] La figure 3 représente plus en détail une particule 6 abrasive. Chaque particule abrasive 6 comporte un grain abrasif 16 réalisé dans un matériau plus dur que le matériau à scier. Par exemple, la dureté du grain abrasif 16 est supérieure à 430 Hv50 sur l'échelle de Vickers et, de préférence, supérieure ou égale à 1 000 Hv50. Sur l'échelle de Mohs, la dureté des grains 16 est supérieure à 7 ou 8. Par exemple, les grains 16 sont des grains de diamant.

[0032] Chaque grain 16 est recouvert d'un revêtement 18 en matériau magnétique dont la perméabilité relative est supérieure ou égale à 50 et, de préférence, supérieure ou égale à 100. Le matériau magnétique utilisé est par exemple un matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique. Sa température de Curie est supérieure à la température atteinte lors d'un dépôt électrolytique des particules abrasives 6 sur l'âme 4. De préférence, le matériau est également un matériau électriquement conducteur pour faciliter la fixation des particules 6 par le liant 8 sur l'âme 4. Par exemple, le matériau utilisé est de préférence un matériau ferromagnétique comportant l'un des éléments suivants : du fer, du cobalt, du nickel ou un alliage de samarium-cobalt ou du Néodyme.

[0033] L'épaisseur du revêtement 18 est suffisante pour que le volume de matériau magnétique dans la particule abrasive 6 permette de soulever cette particule lorsqu'elle est placée dans un gradient d'induction magnétique de 30T/m et, de préférence, de 10T/m. Typi-

quement, pour cela, le volume du matériau magnétique représente plus de 1 % ou 5 % du volume de la particule abrasive 6. Par exemple, son épaisseur est comprise entre 0,5 et 100 % du diamètre du grain 16 de la particule abrasive 6 et, de préférence, entre 2 et 50 % du diamètre du grain 16 de la particule abrasive 6.

[0034] L'épaisseur est généralement supérieure à 2,5 μm pour obtenir un revêtement 18 recouvrant plus de 90 % de la surface extérieure du grain 16.

[0035] Le revêtement 18 est par exemple déposé sur le grain 7 par pulvérisation cathodique plus connue sur le terme anglais de « sputtering », par électrolyse, par dépôt chimique en phase vapeur (plus connu sur le terme anglais de CVD : « Chemical Vapor Déposition ») ou par électrolyse chimique sans courant.

[0036] Sur la figure 1, le sens de déroulement de l'âme 4 est représenté par une flèche F. Par la suite, l'amont et l'aval sont définis par rapport au sens de la flèche F.

[0037] Les différents éléments de l'appareil 2 sont décrits dans l'ordre où ils sont rencontrés par l'âme 4 en suivant le sens de déroulement.

[0038] L'appareil 2 comporte une bobine 24 sur laquelle est enroulée l'âme 4 à revêtir des particules abrasives 6.

[0039] Ensuite, l'appareil 2 comporte éventuellement un dispositif 26 d'aimantation de l'âme centrale 4. Des modes de réalisation de ce dispositif sont décrits en référence aux figures 4 à 7.

[0040] Puis, l'âme 4 rencontre un point A de contact mécanique avec un conducteur électrique 32 raccordé électriquement à la borne négative d'une source 28 de tension continue. Par exemple, le point A est réalisé à l'aide d'une poulie conductrice 30 électriquement raccordée à la borne négative de la source 28 par le conducteur 32. Cette poulie 30 comporte typiquement une gorge à l'intérieur de laquelle frotte l'âme centrale 4 lorsque celle-ci est déroulée. Par exemple, la poulie 30 est montée libre en rotation autour d'un axe perpendiculaire à la direction longitudinale de l'âme 4.

[0041] La source 28 génère un courant d'électrolyse i_e . Typiquement, la densité du courant d'électrolyse i_e est supérieure à 5 A/dm² et, généralement, inférieure à 50 A/dm². La densité de courant est le rapport entre la l'intensité du courant i_e est la surface de l'âme 4 immergée dans le bain d'électrolyse.

[0042] L'appareil 2 comporte un récipient 34 contenant un bain 36 d'électrolyte dans lequel est immergée l'âme 4.

[0043] Le bain 36 comprend un électrolyte 38 et les particules abrasives 6 dispersées dans cet électrolyte.

[0044] L'électrolyte 38 est typiquement une solution aqueuse, contenant des ions du liant 8 c'est-à-dire ici des ions Ni²⁺. Par exemple, il s'agit d'une solution connue sous le nom de « solution de Nickel de Watts ».

[0045] Une électrode 40 électriquement raccordée à la borne positive de la source 28 est également immergée dans le bain 36. Cette électrode forme donc une anode tandis que la partie de l'âme 4 immergée dans le bain 36

forme la cathode.

[0046] Typiquement, l'électrode 40 s'étend parallèlement à la direction longitudinale de l'âme 4.

[0047] Éventuellement, à la place du dispositif 26 ou en plus du dispositif 26, un dispositif 44 d'aimantation des particules abrasives 6 et de l'âme 4 immergée dans le bain 36 est prévu à proximité de ce bain 36. Un mode de réalisation de ce dispositif 44 est décrit en référence aux figures 8 et 9.

[0048] En aval du bain 36, l'appareil 2 comprend un autre point B de contact mécanique entre l'âme 4 et un conducteur électrique 46. Le conducteur 46 est électriquement raccordé à la borne négative de la source 28. Le point de contact est par exemple réalisé à l'aide d'une poulie 48. Cette poulie 48 est typiquement identique à la poulie 30.

[0049] A la sortie du bain 36, l'âme centrale 4 est recouverte des particules abrasives 6 maintenues sur cette âme centrale par la couche 10. Pour renforcer l'adhésion des particules abrasives 6 sur l'âme centrale, l'appareil 2 comporte un second récipient 50 contenant un bain 52 d'électrolyte dans lequel est de nouveau immergée l'âme centrale 4 pour déposer la couche 12 de liant.

[0050] Le bain 52, contrairement au bain 36, est dépourvu de particules abrasives. Le bain 52 est essentiellement formé du liant 8 c'est-à-dire ici d'une solution comportant des ions Ni^{2+} .

[0051] Le récipient 50 comporte une électrode 54 raccordée à la borne positive d'une source 56 de tension continue. Cette électrode 54 forme donc une anode.

[0052] La borne négative de la source 56 est raccordée à deux points de contact mécanique C et D entre l'âme centrale 4 et des conducteurs électriques 58 et 60. Ces points de contact C et D sont situés, respectivement, en amont et en aval du bain 52. Ils sont chacun réalisés à l'aide de poulies, respectivement 62 et 64. Ces poulies 62 et 64 sont par exemple identiques à la poulie 30.

[0053] A la sortie du bain 52, la couche 12 a été déposée.

[0054] Les pointillés en aval de la poulie 64 indiquent qu'éventuellement d'autres dispositifs peuvent être introduits dans l'appareil 2 pour appliquer des traitements supplémentaires au fil fabriqué. Ces traitements étant conventionnels, ceux-ci n'ont pas été représentés ici.

[0055] Enfin, le fil 3 est enroulé sur une bobine 68. La bobine 68 est entraînée en rotation par un moteur 70 pour tirer le fil à travers les bains d'électrolyte 36 et 52.

[0056] La figure 4 représente plus en détail un mode de réalisation possible du dispositif 26 d'aimantation de l'âme 4. Le dispositif 26 a pour fonction d'aimanter de façon permanente l'âme centrale de manière à ce que celle-ci présente un moment magnétique le long d'une direction radiale de l'âme 4. Cette aimantation permanente crée une induction magnétique permanente à la surface de l'âme 4 au moins supérieure à 0,1 mT ou 0,4 mT et, de préférence, supérieure à 0,5 mT. Pour aimanter de façon permanente l'âme 4, le dispositif 26 applique un champ magnétique continu de forte intensité sur l'âme

4. Par induction magnétique de forte intensité, on désigne ici une induction magnétique dont l'intensité est supérieure à 0,1 T et, de préférence, supérieure à 0,5 ou 1 T. Par champ magnétique de forte intensité, on désigne un champ magnétique dont l'intensité est supérieure à 800 A/m et, de préférence, supérieure à 4 kA/m ou 8 kA/m. Dans le cas du dispositif 26, ce champ magnétique de forte intensité est appliqué parallèlement à une direction radiale de l'âme 4.

[0057] A cet effet, le dispositif 26 comporte une bobine 80, dans laquelle circule un courant continu, enroulée autour d'un noyau magnétique 82. Les extrémités de la bobine 80 sont raccordées à une source de courant continu 84.

[0058] Le noyau 82 est en forme de « C ». Les extrémités de ce noyau 82 se resserrent l'une en face de l'autre pour former un entrefer 84. L'âme 4 traverse cet entrefer 84 au fur et à mesure qu'elle est déroulée dans le sens de déroulement. Le dispositif 26 crée donc un moment magnétique radial avec un seul pôle sud et un seul pôle nord diamétralement opposé sur la périphérie de l'âme centrale. Ce pôle nord et ce pôle sud s'étendent dans la direction longitudinale de l'âme centrale.

[0059] Le fait d'aimanter l'âme centrale de façon permanente permet d'attirer plus fortement et plus rapidement les particules abrasives sur cette âme centrale. De plus, et éventuellement, cela permet de se passer du dispositif 44 d'aimantation. Dans ce dernier cas, c'est l'âme centrale elle-même qui constitue la source d'induction magnétique apte à attirer les particules abrasives.

[0060] La figure 5 représente un dispositif 90 d'aimantation de l'âme centrale susceptible d'être utilisé à la place du dispositif 26. Ce dispositif 90 est apte à créer une alternance, sur la périphérie de l'âme 4, de plusieurs pôles sud et plusieurs pôles nord. Par exemple, dans ce mode de réalisation, le dispositif 90 comporte trois noyaux magnétiques 92 à 94 en forme de « C » répartis autour de la périphérie de l'âme 4. Ici, ces noyaux 92 à 94 sont dans un même plan perpendiculaire à la direction longitudinale de l'âme 4. Les extrémités de chacun des noyaux sont tournées vers une portion respective de l'âme 4 et situées suffisamment à proximité de cette âme 4 pour que les lignes de champ de chacun des noyaux se rebouclent par l'intermédiaire de l'âme 4.

[0061] Le dispositif 90 comprend également des bobines 96 à 98 pour générer dans chacun des noyaux 92 à 94 un champ magnétique de forte intensité. Chaque bobine 96 à 98 est raccordée à une source de courant 100 à 102 respective.

[0062] La figure 6 représente la répartition des pôles sud et nord sur la périphérie de l'âme 4 créée à l'aide du dispositif 90. Sur cette figure, les carrés en pointillés autour d'un « S » représentent des pôles sud tandis que ces mêmes carrés en pointillés autour d'un « N » représentent un pôle nord. Pour obtenir la répartition des pôles sud et pôles nord représentée sur la figure 6, le sens du courant généré par les sources 100 à 102 a été inversé à intervalles de temps régulier. Ainsi, en plus d'obtenir

une alternance de pôles sud et de pôles nord le long de la périphérie de l'âme 4, on obtient en même temps une alternance de pôles sud et de pôles nord dans la direction longitudinale de cette âme 4. La répartition de plusieurs pôles sud et pôles nord sur la périphérie de l'âme 4 permet de favoriser une orientation des particules aimantées déposées sur l'âme 4 au détriment d'une autre.

[0063] La figure 7 représente un dispositif 104 d'aimantation de l'âme centrale 4. Ce dispositif 104 peut être utilisé en lieu et place du dispositif 26. Contrairement au dispositif précédemment décrit, ce dispositif 104 aimante l'âme centrale de façon permanente uniquement dans la direction longitudinale de l'âme 4. L'aimantation permanente de l'âme 4 dans sa direction longitudinale est alors typiquement supérieure à 1 ou 4 mT. En effet, l'âme 4 ainsi aimantée présente sur sa surface une aimantation permanente dans la direction radiale dont l'intensité est supérieure à 0,1 ou 0,4 mT. Sur la figure 7, cette aimantation permanente radiale est représentée par des flèches 105.

[0064] De plus, cette aimantation radiale est assez uniformément répartie sur la périphérie de l'âme 4, ce qui favorise une répartition homogène des particules abrasives 6 sur toute la périphérie de cette âme 4.

[0065] Par exemple, le dispositif 104 comporte un solénoïde 106 enroulé autour d'un axe 107. Le solénoïde 106 est raccordé à une source 108 de courant continu pour générer un champ magnétique de forte intensité. L'âme 4 traverse le solénoïde 106 le long de l'axe 107 lorsqu'elle est déroulée.

[0066] Les figures 8 et 9 représentent plus en détail le dispositif 44 d'aimantation. Le dispositif 44 comporte plusieurs sources de champ magnétique continu. Chaque source de champ magnétique crée un moment magnétique dans l'âme 4 permettant d'attirer les particules abrasives sur celle-ci. Ici, les différentes sources de champ magnétique sont réalisées à l'aide d'un même groupe d'aimants permanents déplaçable entre une première position, représentée sur la figure 8 et une seconde position représentée sur la figure 9. Pour simplifier les figures 8 et 9, seul un aimant permanent 110 a été représenté. Cet aimant permanent génère une induction magnétique permanente supérieure à 0,1 T ou un champ magnétique supérieur à 800 A/m ou 4 kA/m ou 8 kA/m.

[0067] Dans la première position, les lignes de champ 110A de l'aimant 110 traversent de part en part la section transversale de l'âme 4 de manière à ce que celle-ci présente un premier moment magnétique parallèle à une première direction radiale représentée sur la figure 8 par une flèche M1. Dans la seconde position représentée sur la figure 9, l'aimant 110 est déplacé dans une position telle que ses lignes de champ 110A traversent l'âme 4 de manière à ce que celle-ci présente un moment magnétique parallèle à une seconde direction radiale représentée par une flèche M2 sur cette figure 9. La direction M1 est décalée angulairement par rapport à la direction M2 d'un angle compris entre 20° et 160° et, de préférence, compris entre 75° et 115°. Ici, cet angle est égal à

90° à $\pm 5^\circ$ près.

[0068] Le dispositif 44 comporte ici un actionneur 112 apte à déplacer l'aimant 110 entre ses première et seconde positions.

[0069] La figure 10 représente un dispositif 114 d'aimantation, par l'âme 4, des particules abrasives 6 présentes dans le bain 36. Ce dispositif 114 peut être utilisé en plus ou à la place des dispositifs 26 et 44. Le dispositif 114 comprend une source de courant 116 raccordée électriquement aux points de contact A et B par, respectivement, des conducteurs électriques 117 et 118. Par exemple, le contact mécanique entre l'âme 4 et les conducteurs 117 et 118 est assuré via les poulies 30 et 48 précédemment décrites. La source 116 permet de faire circuler un courant continu i_a d'aimantation. Le courant i_a se superpose au courant i_e d'électrolyse mais, contrairement à ce dernier, l'intensité de ce courant i_a reste constante dans toute la portion de l'âme 4 immergée dans le bain 36. Ainsi, l'âme 4 génère une induction magnétique qui aimante les particules abrasives 6 de sorte que celles-ci sont ensuite attirées vers l'âme 4. Ainsi, dans ce mode de réalisation, c'est l'âme 4 qui forme la source d'induction magnétique qui attire les particules abrasives sur elle. Dans ce mode de réalisation, de préférence, le conducteur 46 est omis pour que le courant d'électrolyse i_e et le courant d'aimantation i_a s'additionnent à l'intérieur de l'âme 4.

[0070] La figure 11 représente plus en détail un mode de réalisation du récipient 34. Les différents aménagements de ce récipient permettent d'accélérer la vitesse à laquelle l'âme 4 se déplace dans le bain 36 sans diminuer ou en augmentant la quantité de particules abrasives déposées sur l'âme 4. Pour simplifier la figure 11, l'électrode 40 n'a pas été représentée.

[0071] Le récipient 34 comprend un conduit rectiligne 120 dans lequel circule le bain 36 parallèlement à une direction X. La direction X est parallèle à la direction longitudinale de l'âme 4 et dirigée dans le sens F. Cette direction X forme avec des directions Y et Z un repère orthogonal. Le sens de circulation du bain 36 dans le récipient 34 est représenté par des flèches. Le conduit 120 s'étend depuis une extrémité amont 122 jusqu'à une extrémité aval 124.

[0072] L'âme 4 traverse le conduit 120 depuis l'extrémité 122 jusqu'à l'extrémité 124 de manière à être immergée à l'intérieur du bain 36.

[0073] Le récipient 34 comprend également des conduits de retour pour ramener le bain 36 de l'extrémité 124 vers l'extrémité 122. Pour simplifier la figure 11, seuls deux conduits 126 et 128 de retour ont été représentés.

[0074] Les conduits 126 et 128 s'étendent entre les extrémités 122 et 124. Ils débouchent dans l'extrémité 122 au travers d'un jeu 130 de buses de projection. Les buses du jeu 130 forment des jets de bain 36 qui viennent heurter l'âme 4 avec une vitesse non nulle dans une direction radiale à l'âme 4. Typiquement, la composante radiale V_3 de cette vitesse est supérieure à $V_1/2$ ou $3V_1/4$ ou égale à V_1 , où V_1 est la vitesse de déplacement de

l'âme 4 à l'intérieur du bain 36. De préférence, la composante V_3 est également inférieure à $1,5V_1$. Si la composante V_3 de la vitesse est supérieure à 50% de la vitesse V_1 , alors la quantité de particules abrasives approchant le fil, puis accrochées sur celui-ci, est suffisante. Si la composante V_3 est supérieure à 150% de la vitesse V_1 , alors des turbulences sont créées, et malgré le grand nombre de particules approchant de l'âme, la quantité de particules accrochées sur l'âme n'est pas nécessairement accrue. Par exemple, la composante radiale de la vitesse de projection est supérieure à 1 m/min et, de préférence, supérieure à 10 ou 60 m/min. Le fait de projeter le bain 36 sur l'âme 4 dans une direction radiale permet d'augmenter la quantité de particules abrasives déposées sur cette âme 4 par rapport à une situation identique où de telles buses ne seraient pas utilisées.

[0075] L'appareil 2 comprend également un dispositif 132 pour faire avancer le bain 36 à une vitesse V_2 parallèle à la direction X dans le conduit 120. Ici, le dispositif 132 est par exemple formé de pompes d'aspiration du bain 36. Chacune de ces pompes étant montée dans l'un des conduits 126 et 128.

[0076] Le dispositif 132 est réglé pour que la vitesse V_2 du bain 36 parallèlement à la direction X dans le conduit 120 soit égale à la vitesse V_1 de l'âme 4 qui se déplace à l'intérieur du conduit 120. Ici, on considère que la vitesse V_2 est égale à la vitesse V_1 si celles-ci sont égales à ± 5 m/min et, de préférence, à ± 1 m/min ou 20 cm/min.

[0077] La vitesse V_2 du bain 36 est mesurée à 1 ou 2 mm de distance de la périphérie de l'âme 4 et à plus de 1 ou 2 mm des parois du conduit 120.

[0078] Typiquement, la vitesse V_1 est supérieure à 6 m/min ou 10 m/min et, de préférence, supérieure à 30 ou 50 m/min.

[0079] La figure 12 représente plus en détail le jeu 130 de buses en coupe transversale. Le jeu 130 comporte plusieurs buses 140 de projection du bain 36 sur l'âme 4. Chaque jet provoqué par une buse 140 est représenté par une flèche sur la figure 12. Dans ce mode de réalisation, les buses 140 sont uniformément réparties le long de la périphérie de l'âme 4. Cela permet de répartir plus uniformément les particules abrasives sur la périphérie de l'âme 4. Typiquement, l'extrémité des buses 140 est à moins de 5 mm et, de préférence, à moins de 1 mm de la périphérie de l'âme 4. Ici, les buses 140 sont par exemple des trous aménagés dans une paroi circulaire 142. Les buses 140 sont réparties le long d'une portion immergée de l'âme 4. Cette portion représente typiquement moins de la moitié ou du quart de la totalité de la longueur de l'âme 4 immergée dans le bain 36. La portion où se trouvent les buses 140 est en amont de la portion immergée de l'âme 4 dépourvue de buse.

[0080] La figure 13 représente un jeu 150 de buses qui peut être utilisé en lieu et place du jeu 130. Ce jeu 150 est identique au jeu 130 sauf que la répartition des buses 140 n'est pas uniforme le long de la périphérie de l'âme 4. Par exemple, ici, les buses 140 sont disposées uni-

quement dans un plan supérieur et un plan inférieur situés, respectivement, au-dessus et en dessous de l'âme 4.

[0081] La figure 14 représente un jeu 160 de buses susceptible d'être utilisé en lieu et place du jeu 130. Ce jeu 160 est identique au jeu 130 sauf que les buses 140 sont uniformément réparties uniquement en vis-à-vis de deux secteurs angulaires de l'âme 4 diamétralement opposés. Typiquement, chaque secteur angulaire s'étend sur plus 10° ou 25°. Ces deux secteurs angulaires sont séparés l'un de l'autre par des secteurs angulaires dépourvus de buse qui s'étendent, chacun, sur plus de 10° ou 25°. De plus, dans ce mode de réalisation, un actionneur 162 est prévu pour déplacer en rotation le jeu 160 autour d'un axe 164 parallèle à la direction X. Ici, l'axe 164 est confondu avec l'axe de l'âme 4. Une flèche K représente le sens de rotation des buses 140 autour de l'âme 4. Le jeu 160 permet de répartir les particules abrasives 6 sur un parcours hélicoïdal le long de la périphérie extérieure de l'âme 4.

[0082] Les figures 15 à 18 représentent d'autres modes de réalisation possibles pour les particules abrasives 6. Par exemple, la figure 15 représente une particule abrasive 170 identique à la particule 6 sauf que le revêtement 18 est remplacé par un revêtement 172. Le revêtement 172 est identique au revêtement 18 sauf que celui-ci est aimanté de façon permanente de manière à présenter une induction magnétique permanente à sa surface supérieure ou égale à 0,1 ou 1 mT et, de préférence, supérieure ou égale à 5 mT dans une direction normale à sa surface. Lorsque la particule abrasive 170 est utilisée en lieu et place de la particule abrasive 6, les dispositifs d'aimantation 26, 44 et 114 peuvent être omis. C'est alors la particule 170 elle-même qui forme la source d'induction magnétique capable d'attirer cette particule sur l'âme 4. Ce qui vient d'être indiqué pour la particule 170 s'applique également aux autres modes de réalisation suivants de la particule abrasive.

[0083] La figure 16 représente une particule abrasive 176. La particule 176 est entièrement réalisée dans un matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique plus dur que le matériau à couper. Par « entièrement réalisée », on désigne le fait que le matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique représente plus de 90 % et, de préférence, plus de 95 ou 97 % de la masse de la particule abrasive. Dans ce mode de réalisation, il n'est pas nécessaire de recouvrir la particule abrasive d'un revêtement. Par exemple, le matériau ferromagnétique utilisé est le CrO_2 dont la dureté est supérieure à celle du silicium et qui conserve ses propriétés magnétiques jusqu'à une température de Curie d'environ 80°C.

[0084] La figure 17 représente une particule abrasive 180 formée d'un noyau magnétique 182 et revêtue d'un revêtement 184 formant une couche abrasive.

[0085] Enfin, la figure 18 représente une particule abrasive 190 formée de fragments 192 d'un matériau abrasif liés les uns aux autres par un matériau magnétique 194. Par exemple, les fragments sont des fragments

de diamant, tandis que le matériau liant ces différents fragments entre eux pour former la particule 190 est du cobalt.

[0086] Le fonctionnement de l'appareil 2 va maintenant être décrit en référence au procédé de la figure 19. Lors d'une étape 200, l'âme 4 est déroulée de la bobine 24 par le moteur 70. Par exemple, l'âme 4 est déroulée à une vitesse supérieure à 6 m/min et, de préférence, supérieure à 10, 30, 40 ou 60 m/min. Chaque section de l'âme 4 se déplace et subit alors successivement les étapes suivantes.

[0087] Éventuellement, lors d'une étape 202, l'âme centrale 4 est aimantée de façon permanente par le dispositif 26, 90 ou 104.

[0088] Ensuite, lors d'une étape 204, les particules abrasives et le liant 8 sont déposés sur l'âme 4. Dans ce mode de réalisation, les particules abrasives 6 et la première couche 10 de liant sont déposées en même temps par électrolyse dans le récipient 34. A cet effet, lors de l'étape 204, la source 28 applique une différence de potentiels entre l'électrode 40 et la portion immergée de l'âme 4. En même temps, le dispositif 132 propulse le bain 36, à l'intérieur du conduit 120, parallèlement à l'âme 4, de manière à créer un courant d'électrolyte le long de l'âme 4 qui se déplace à une vitesse V_2 non nulle égale à la vitesse V_1 à plus ou moins 5 m/min près. Le fonctionnement du dispositif 132 entraîne également la projection par les buses 140 du bain 36 sur l'âme 4.

[0089] Éventuellement, en parallèle, lors d'une étape 206, les particules 206 présentent dans le bain 36 sont soumises à un champ magnétique extérieur pour les attirer sur l'âme 4. Lors de cette étape, le champ magnétique extérieur peut être créé par le dispositif 44. Dans ce cas, le champ magnétique extérieur aimante également l'âme centrale 4 et les particules abrasives 6. Typiquement, le dispositif 44 est mis en oeuvre si l'étape 202 n'a pas été mise en oeuvre. A l'inverse, si l'étape 202 est mise en oeuvre, de préférence, le dispositif 44 n'est pas mis en oeuvre.

[0090] Lors de l'étape 206, le champ magnétique extérieur peut aussi être créé par le dispositif 114. Le dispositif 114 peut être utilisé en plus des dispositifs 26, 90, 104 ou 44 ou à la place de ces dispositifs.

[0091] Lors de l'étape 206, les particules abrasives sont attirées vers l'âme centrale et maintenues sur l'âme centrale par la force d'attraction magnétique.

[0092] Ainsi, la présence d'une induction magnétique pour attirer les particules abrasives vers l'âme 4 :

- permet un dépôt plus rapide des particules abrasives sur l'âme 4, et
- rend plus difficile le décollement des particules 6 de l'âme 4 par les turbulences hydrodynamiques liées au déplacement de l'âme 4 dans le bain 36.

[0093] Lors d'une étape 208, la deuxième couche 12 de liant est déposée par électrolyse dans le bain 52.

[0094] Enfin, lors d'une étape 210, le fil 3 ainsi fabriqué

est enroulé sur la bobine 68.

[0095] L'utilisation d'une induction magnétique pour attirer les particules abrasives 6 sur l'âme 4 laisse des traces caractéristiques sur le fil 3 ainsi fabriqué. En effet, l'utilisation de l'induction magnétique induit une organisation spécifique des particules abrasives sur l'âme centrale qui n'existe pas en cas d'absence d'utilisation de cette induction magnétique. Cette organisation spécifique dépend du dispositif d'aimantation utilisé. Par exemple, si certaines des particules abrasives sont oblongues et présentent leur plus grande longueur le long d'un grand axe, il a été constaté que lorsque l'âme centrale ou les particules abrasives sont aimantées par un dispositif tel que les dispositifs 26, 44 ou 104 et peut être 114, le grand axe des particules oblongues se rapproche de la normale de la surface de l'âme centrale. Typiquement, pour au moins 55% des particules oblongues et, généralement, pour plus de 80 ou 90% des particules oblongues, l'angle entre leur grand axe et la normale à la surface de l'âme centrale passant par cette particule est inférieur à 70° ou 45° ou 30°. En d'autre terme, une pointe des particules oblongues est dirigée vers l'âme tandis que la pointe opposée est dirigée vers l'extérieur du fil. Cela favorise l'érosion du matériau à découper car c'est la pointe des particules oblongue qui fait saillie sur la face extérieure du fil de découpe plutôt que ses flancs. Pour cette raison, dans certains modes de réalisation, au moins 10% et, généralement, au moins 30% ou 50% au 80%, des particules abrasives sont des particules oblongues. De préférence, le rapport de forme des particules oblongues est supérieur à 1,5 ou 2 ou 4. Le rapport de forme est ici défini comme étant la longueur de la particule abrasive oblongue le long de son plus grand axe divisé par sa largeur. La largeur de la la particule est mesurée le long d'un plus petit axe. Le plus petit axe est perpendiculaire au plus grand axe et coupe le plus grand axe à mi-distance entre les extrémités les plus éloignées de la particule situées sur ce grand axe. Parmi la multitude de petits axes possibles répartis sur une portion angulaire de 180°, celui utilisé pour mesurer la largeur est celui qui donne la plus petite valeur pour la largeur.

[0096] Si les particules abrasives sont attirées et maintenues par aimantation sur l'âme centrale avant d'être immergées dans le bain d'électrolyte, alors plus de 70 ou 85% des particules abrasives sont directement en contact mécanique avec l'âme centrale dans le fil de découpe ainsi fabriqué. Une telle organisation des particules abrasives ne se rencontre pas lorsque les particules abrasives sont déposées à l'aide du bain 36 sans application d'une induction magnétique. En effet, dans ce dernier cas, il existe une portion substantielle de particules abrasives qui se fixe tardivement sur l'âme centrale. Les particules fixées tardivement sont alors plus éloignées de l'âme centrale que les particules fixées en premier. Aujourd'hui, il ne semble pas qu'il existe d'autre moyen que l'application d'une induction magnétique pour fixer et retenir efficacement les particules abrasives sur l'âme centrale avant de les plonger dans le bain d'électrolyte.

Ainsi, la disposition précédemment décrite des particules abrasives est aussi caractéristique de l'utilisation d'une aimantation pour attirer les particules sur l'âme centrale avant le dépôt du liant. Si l'âme centrale est déjà revêtue d'une couche d'accroche avant que les particules abrasives soient attirées et maintenues par aimantation sur l'âme centrale, alors ce qui vient d'être dit précédemment reste vrai sauf que 70 à 85% des particules abrasives sont directement en contact avec cette couche d'accroche et non plus directement en contact mécanique avec l'âme centrale. Dans le cas où l'âme centrale présente un moment magnétique radial, la densité de particules abrasives peut être plus importante à proximité des pôles magnétiques créés sur l'âme 4.

[0097] De plus, si l'induction magnétique est appliquée pendant le dépôt électrolytique, cela peut aussi conduire à une organisation spécifique des molécules du liant 8 sur l'âme 4.

[0098] Enfin, si l'âme 4 ou les particules 6 sont aimantées de façon permanente pendant la fabrication du fil 3, le fil 3 ainsi fabriqué présente une aimantation permanente de l'âme ou des particules abrasives si le fil n'est pas volontairement désaimanté avant d'être commercialisé.

[0099] La figure 20 représente un autre mode de réalisation possible du procédé de fabrication du fil 3. Ce procédé est identique au procédé de la figure 19 sauf que l'étape 204 est omise et les étapes 202 et 206 sont remplacées par des étapes, respectivement 222 et 224.

[0100] Lors de l'étape 222, des particules abrasives aimantées sont déposées sur l'âme centrale en matériau magnétique. Les particules abrasives sont alors attirées vers l'âme centrale et maintenues sur l'âme centrale 4. L'étape 222 est réalisée avant que l'âme 4 soit immergée dans un bain d'électrolyte. L'étape 222, se poursuit directement par l'étape 208.

[0101] Lors de l'étape 224, un champ magnétique extérieur est appliqué pour maintenir les particules abrasives sur l'âme centrale. Ce champ magnétique extérieur est par exemple appliqué à l'aide du dispositif 44 mais sans nécessairement déplacer l'aimant 110. Cette étape 224 peut débuter en même temps que l'étape 222 ou juste à la fin de l'étape 222. Idéalement, l'étape de 224 se prolonge jusqu'à ce que les particules abrasives soient fixées sur l'âme 4 par le liant. Par exemple, l'étape 224 se prolonge jusqu'à la fin de l'étape 208. Cette façon de réaliser le fil 3 permet d'obtenir une répartition uniforme des particules sur la périphérie de l'âme 4.

[0102] De nombreux autres modes de réalisation sont possibles. Par exemple, l'âme 4 peut être formée de plusieurs brins entrelacés entre eux. De même, l'âme 4 peut être réalisée dans d'autres matériaux que des aciers. Par exemple, l'âme 4 peut aussi être réalisée dans un matériau diamagnétique ou paramagnétique.

[0103] Le revêtement 18 des particules abrasives n'est pas nécessairement un matériau conducteur.

[0104] Le grain 16 peut être réalisé dans de nombreux matériaux abrasifs différents. Par exemple, il peut être

réalisé en SiC, en SiO₂ en WC, en Si₃N₄, en nitrure de bore, en CrO₂ ou en oxyde d'aluminium.

[0105] Le liant 8 peut aussi être réalisé dans un matériau autre qu'un métal. Par exemple, en variante, le liant est une résine.

[0106] Les différents dispositifs d'aimantation décrits ici peuvent être combinés ensemble. En particulier, le dispositif 104 peut être combiné avec l'un quelconque des autres dispositifs d'aimantation décrits précédemment de manière à combiner une aimantation permanente axiale avec une aimantation radiale de l'âme centrale.

[0107] En variante, le dispositif 26 peut être omis. Dans ce cas, l'âme centrale n'est pas aimantée de façon permanente. L'attraction des particules abrasives vers l'âme centrale est alors provoquée soit par le dispositif 44 soit par un dispositif d'aimantation tel que le dispositif 114 soit encore par l'aimantation permanente des particules abrasives. En particulier, le dispositif d'aimantation 44 peut être utilisé seul.

[0108] Dans les dispositifs d'aimantation, tels que les dispositifs 26 et 90, les bobines peuvent être remplacées par des aimants permanents.

[0109] Dans une variante simplifiée, le dispositif 44 comporte une seule source de champ magnétique. Dans ce cas, cette source de champ magnétique crée uniquement un moment magnétique dans l'âme centrale dont la direction est toujours la même. L'actionneur 118 peut alors être omis. Dans ce dernier mode de réalisation, de préférence, l'âme centrale est alors entraînée en rotation sur elle-même pour uniformiser la répartition des particules abrasives sur sa périphérie.

[0110] En variante le dispositif 44 comporte plusieurs sources immobiles de champ magnétique disposées les une après les autres dans le sens F. Une première et une seconde de ces sources sont agencées pour créer dans l'âme 4 les moments magnétiques, respectivement, de directions M1 et M2. Ainsi, au fur et à mesure que l'âme 4 avance dans le bain 36, celle-ci présente d'abord le moment magnétique de direction M1 lorsqu'elle est dans les lignes de champ de la première source puis le moment magnétique de direction M2 lorsqu'elle est dans les lignes de champ de la seconde source.

[0111] L'aimant 112 peut être remplacé par une source de champ magnétique qui varie au cours du temps. En effet, une fois que les particules abrasives ont été accrochées sur l'âme centrale, le champ magnétique de la source peut être arrêté ou modifié. Par exemple, la source alterne régulièrement entre un état où elle génère le champ magnétique et un état où elle ne génère pas de champ magnétique.

[0112] Lorsque le dispositif d'aimantation est le dispositif 114, il n'est pas nécessaire que l'âme centrale soit réalisée dans un matériau magnétique. Par exemple, l'âme 4 est en tungstène. En effet, le dispositif 114 permet d'attirer les particules abrasives sur une âme centrale en matériau non magnétique lorsque cette âme centrale est immergée dans le bain 36.

[0113] Le courant généré par le dispositif 114 n'est pas

nécessairement continu. En variante, il varie au cours du temps. Par exemple, à intervalle régulier, le courant s'an-
nule.

[0114] Les différents dispositifs d'aimantation décrits précédemment peuvent être activés uniquement par inter-
mittence pour créer des sections de l'âme centrale aimantée de façon permanente alternées avec des sec-
tions de l'âme centrale dépourvue d'aimantation perma-
nente. Ceci permet d'obtenir une alternance de plusieurs
sections successives dans le sens de la longueur du fil,
où chaque section a une densité de particules abrasives
différente des sections qui la jouxtent immédiatement en
amont et en aval. Par exemple, cela permet d'alterner
des sections dont la densité en particules abrasives est
au moins dix fois supérieure à la densité de particules
des sections jouxtant celles-ci.

[0115] Le passage dans le second bain 52 d'électrolyte pour déposer une couche supplémentaire de liant peut être omis si la couche 10 de liant déposée dans le premier bain 36 est suffisamment épaisse pour maintenir de fa-
çon adéquate les particules abrasives sur l'âme centrale.

[0116] Dans une autre variante, les dépôts des couches 10 et 12 ne sont pas réalisés immédiatement l'un après l'autre. Par exemple, la couche 10 est d'abord dé-
posée sur toute la longueur de l'âme centrale, puis l'âme centrale ainsi revêtue uniquement de la couche 10 est enroulée sur une bobine puis transportée vers un autre bain d'électrolyte. Ensuite, la couche 12 est déposée sur toute la longueur de l'âme centrale par une autre machine. Ainsi, le dépôt des couches 10 et 12 peut être réalisé à des vitesses différentes.

[0117] Dans un autre mode de réalisation, les étapes de dépôts de particules abrasives et de liants sont réité-
rées chacune plusieurs fois de manière à obtenir un em-
pilement de couches concentriques autour de l'âme cen-
trale 4, chaque couche étant formée de particules abra-
sives et de liants. Le fil multicouches ainsi obtenu est plus résistant à l'usure.

[0118] Le dispositif pour faire circuler l'électrolyte dans le bain 36 peut être réalisé à l'aide d'une hélice compor-
tant des pales entraînées en rotation autour d'un axe. Ces pales ont typiquement chacune une surface supé-
rieure à 1 cm². De préférence, l'hélice est placée dans le ou les conduits de retour.

[0119] Dans un mode de réalisation simplifié, les buses 140 de projection sont omises. Dans ce cas, on conserve simplement une circulation du bain 36 à la même vitesse que l'âme centrale.

[0120] Dans un autre mode de réalisation, chaque bu-
se 140 est formée par un tube au moins deux fois plus long que large. Cela permet d'améliorer la directivité du jet de bain 36. Les buses peuvent être orientées de ma-
nière à ce que le jet présente aussi une composante de vitesse non nulle dans la direction X. Par exemple, les buses peuvent être inclinées par rapport à la direction de l'âme 4 d'un angle supérieur à 95° ou inférieur à 85°. Orienter les buses avec une composante dans la direc-
tion X permet d'éviter un gradient de la vitesse des par-

ticules juste au niveau des buses et de répartir les par-
ticules sur toute la longueur de la partie de l'âme 4 im-
mergée dans le bain.

[0121] Dans un mode de réalisation simplifié, le dispo-
sitif 132 pour faire circuler le bain 36 à la même vitesse que l'âme centrale 4 est omis.

[0122] Le dépôt du liant sur l'âme centrale peut être réalisé par d'autres moyens que par électrolyse. Par exemple, l'électrolyse est remplacée par un dépôt chimi-
que de liant sans électrolyse. Un tel dépôt est connu sur les termes français de « nickel chimique » et anglais de « electroless ». Par exemple, on emploie à cet effet une molécule réductrice telle que l'hypophosphite de sodium (Na (H₂PO₂)) .

[0123] Lorsque le liant est déposé par d'autres métho-
des que l'électrolyse, celui-ci peut être réalisé dans un matériau non conducteur tel qu'une résine isolante.

[0124] Le dépôt des particules abrasives peut être aus-
si réalisé en dehors du bain d'électrolyte. Par exemple, l'âme centrale est aimantée de façon permanente puis les particules abrasives sont pulvérisées sur l'âme cen-
trale avant que celle-ci ne soit immergée dans le bain d'électrolyte. Les particules abrasives sont alors rete-
nues par aimantation sur l'âme centrale. L'âme centrale ainsi revêtue est ensuite immergée dans un bain d'elec-
trolyte. Dans ce cas, le bain d'électrolyte ne contient pas nécessairement de particules abrasives.

[0125] Ce qui a été décrit précédemment s'applique également au cas où l'âme centrale ne se déplace pas lorsqu'elle est immergée dans le bain d'électrolyte. Par exemple, l'âme centrale peut être une boucle fermée. Dans ce cas, la totalité de la boucle est immergée dans le bain en une seule fois. L'âme centrale est alors immo-
bile dans ce bain d'électrolyte.

[0126] Enfin, plusieurs fils peuvent être fabriqués en parallèle. Dans ce cas, plusieurs âmes centrales sont simultanément immergées en parallèle dans les mêmes bains d'électrolyte précédemment décrits et chaque âme se déplace parallèlement aux autres. Ceci permet no-
tamment de réduire le nombre d'équipements nécessai-
res pour fabriquer le fil.

Revendications

1. Procédé de fabrication d'un fil de découpe formé de particules abrasives maintenues sur une âme cen-
trale par un liant, ce procédé comportant :

a) le déplacement (200, 204) de l'âme centrale, à l'intérieur d'un bain d'électrolyte contenant les particules abrasives et des ions du liant, à une vitesse V_1 dans la direction longitudinale de l'âme centrale,

b) l'application (204) d'une différence de poten-
tiels entre l'âme centrale en déplacement et une électrode de travail pour provoquer le dépôt par l'électrolyse du liant et des particules abrasives

sur l'âme centrale,

caractérisé en ce que le procédé comporte en même temps que les étapes a) et b), la création (204), à l'aide de pales ou d'une pompe, d'un courant d'électrolyte à l'intérieur du bain parallèlement à l'âme centrale et dans la direction de déplacement de l'âme de manière à entraîner la circulation de l'électrolyte le long de l'âme centrale à une vitesse V_2 non nulle égale à la vitesse V_1 à plus ou moins 5 m/min près.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la vitesse V_2 est égale à la vitesse V_1 à plus ou moins 1 m/min près.
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le bain d'électrolyte ou une partie du bain d'électrolyte est projeté à l'aide de buses contre l'âme centrale avec une vitesse V_3 , dans une direction perpendiculaire à la direction longitudinale de l'âme centrale, comprise entre 50% et 150% de la vitesse V_1 .
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la vitesse V_1 est supérieure ou égale à 6 m/min.
5. Appareil de fabrication d'un fil de découpe formé de particules abrasives maintenues sur une âme centrale par un liant, cet appareil comportant :
 - un bain (36) d'électrolyte contenant les particules abrasives (6) et des ions du liant,
 - un dispositif (68, 70) de déplacement de l'âme centrale, à l'intérieur du bain d'électrolyte, à une vitesse V_1 dans une direction longitudinale de l'âme centrale,
 - une électrode (40) de travail immergée dans le bain d'électrolyte, et
 - une source (28) de tension appliquant une différence de potentiels entre l'âme centrale en déplacement à l'intérieur du bain d'électrolyte et l'électrode de travail pour provoquer le dépôt par électrolyse du liant et des particules abrasives sur l'âme centrale,

caractérisé en ce que l'appareil comporte un dispositif (132) apte à créer, à l'aide de pales ou d'une pompe, un courant d'électrolyte à l'intérieur du bain d'électrolyte parallèlement à l'âme centrale et dans la direction de déplacement de l'âme centrale de manière à entraîner la circulation de l'électrolyte le long de l'âme centrale à une vitesse V_2 non nulle égale à la vitesse V_1 à plus ou moins 5 m/min près.

6. Appareil selon la revendication 5, dans lequel l'appareil comprend au moins une buse (140) de pro-

jection apte à projeter le bain (36) d'électrolyte contre l'âme centrale avec une vitesse non nulle dans une direction perpendiculaire à la direction longitudinale de l'âme centrale.

7. Appareil selon la revendication 6, dans lequel l'appareil comporte plusieurs buses (140) réparties uniformément le long de la périphérie extérieure de l'âme centrale.
8. Appareil selon l'une quelconque des revendications 6 à 7, dans lequel ladite au moins une buse (140) est montée déplaçable en rotation autour de l'âme centrale et, l'appareil comporte un actionneur (162) apte à entraîner ladite au moins une buse en rotation autour de l'âme centrale.

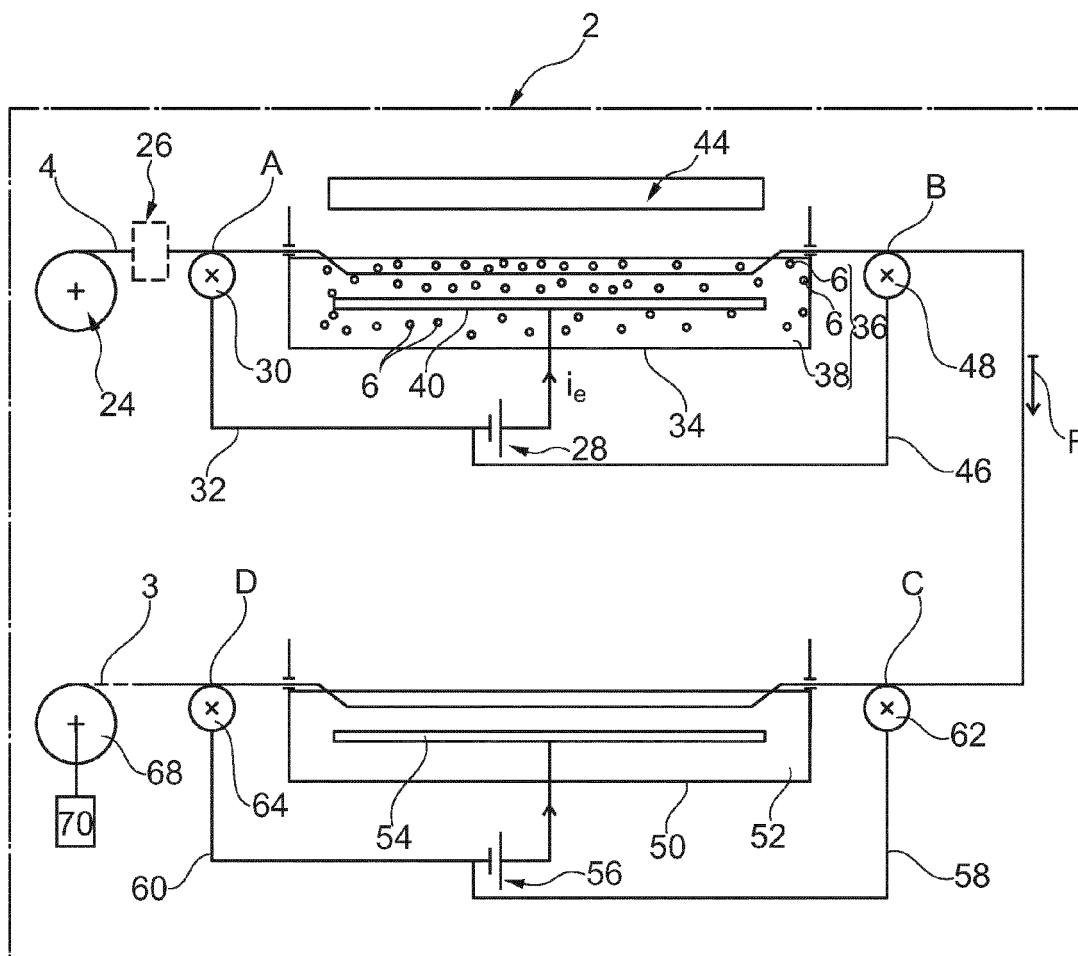


Fig. 1

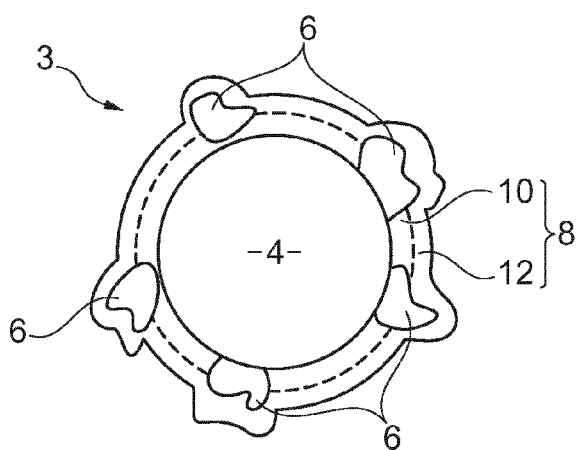


Fig. 2

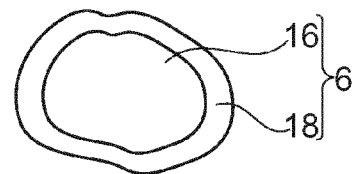


Fig. 3

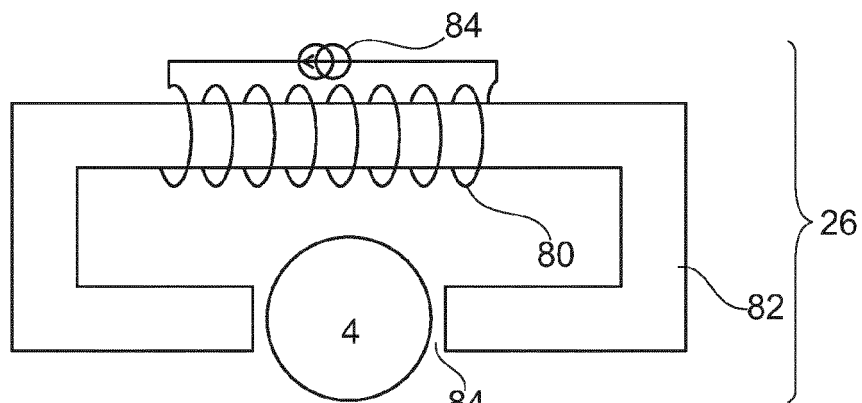


Fig. 4

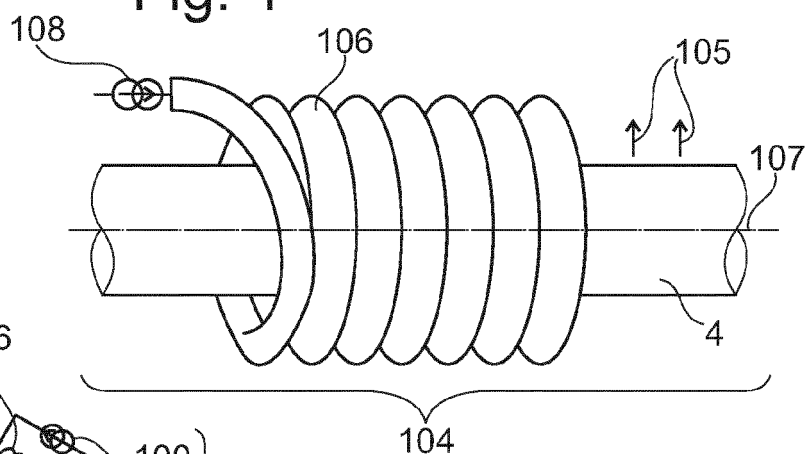


Fig. 7

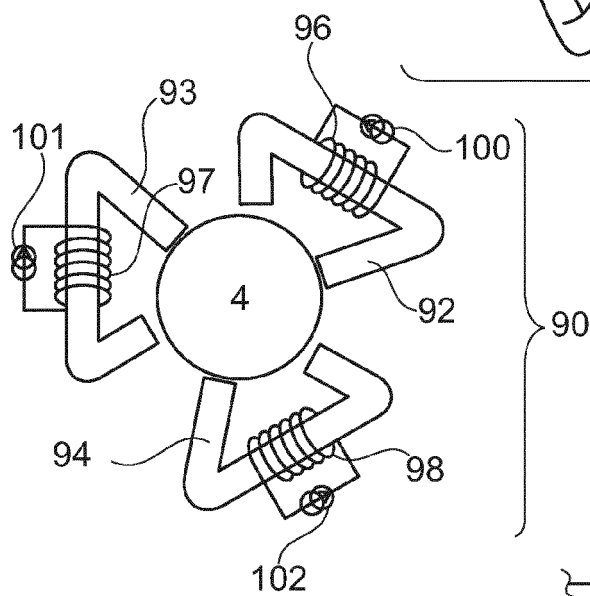


Fig. 5

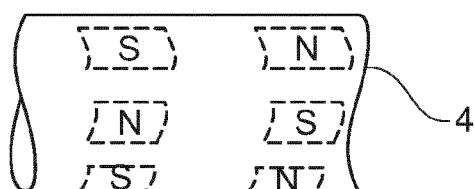


Fig. 6

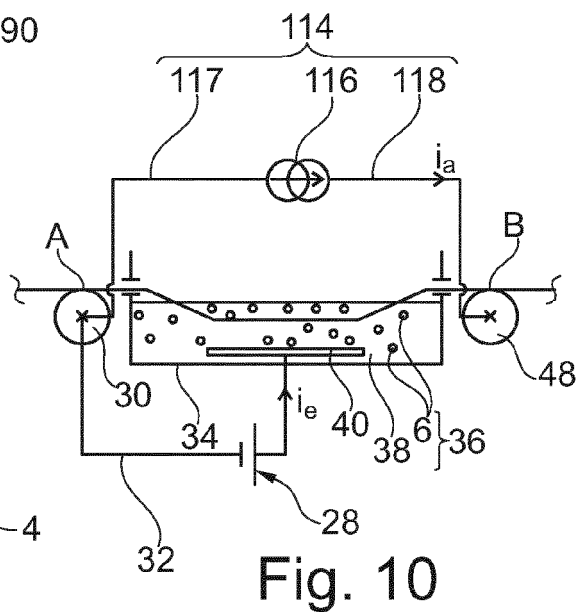


Fig. 10

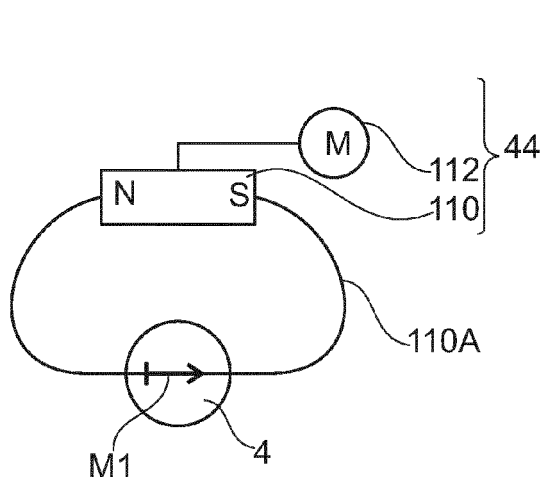


Fig. 8

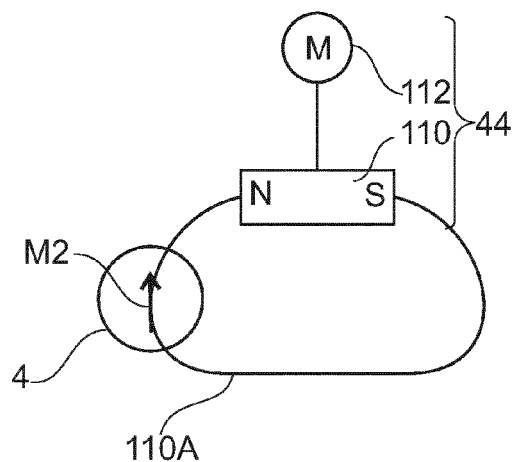


Fig. 9

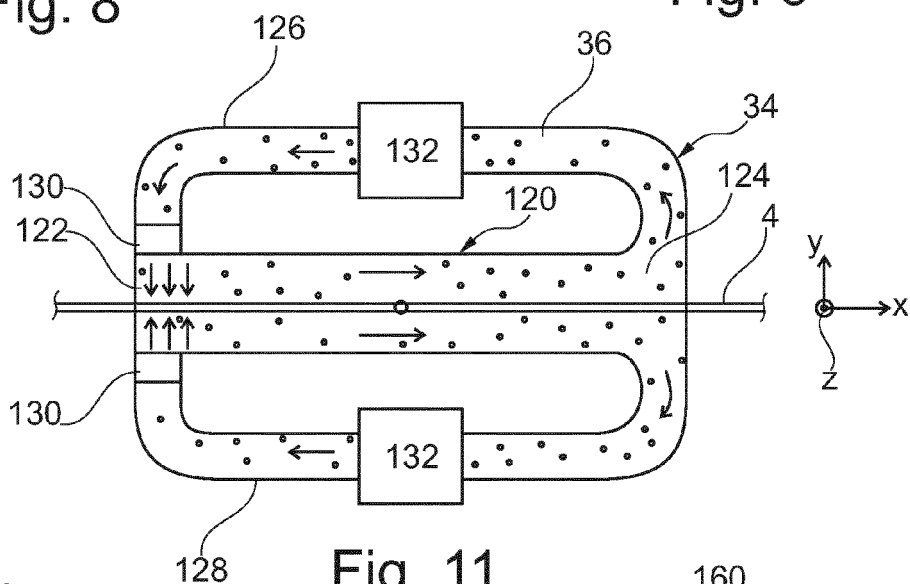


Fig. 11

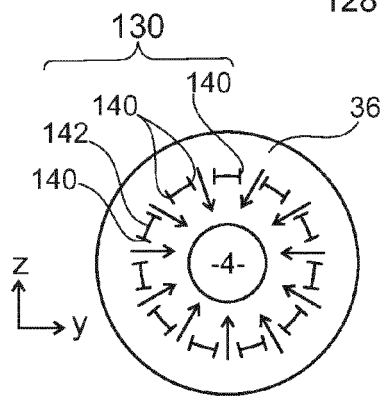


Fig. 12

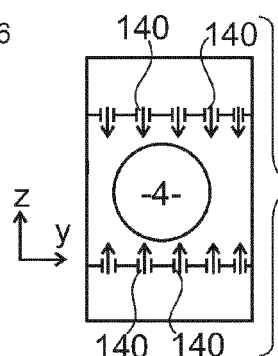


Fig. 13

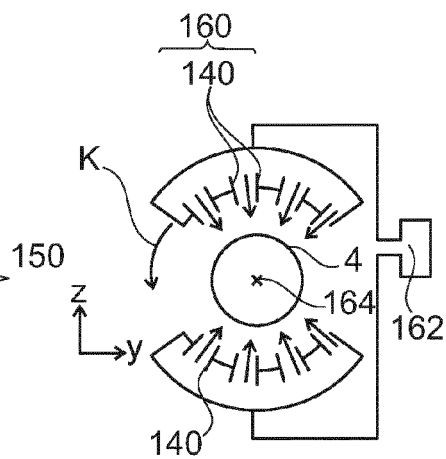


Fig. 14

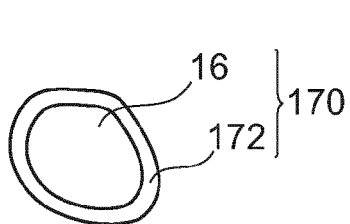


Fig. 15

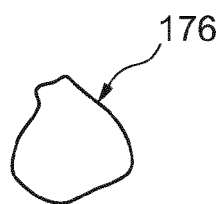


Fig. 16

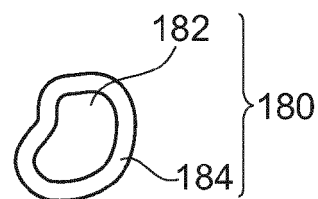


Fig. 17

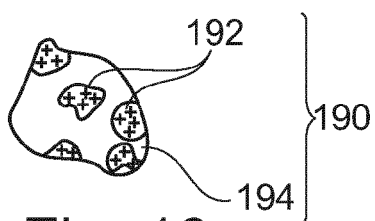


Fig. 18

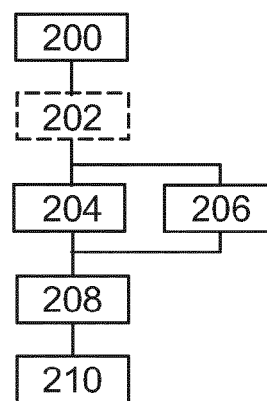


Fig. 19

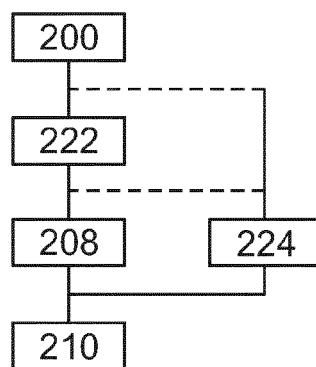


Fig. 20



RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande

EP 13 16 1835

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X	EP 2 277 660 A1 (ALMT CORP [JP]) 26 janvier 2011 (2011-01-26)	1,4,5,7	INV. C25D7/06 C25D7/10 B24B27/06 B24D11/00 B24D18/00 C25D15/02
Y	* abrégé * * alinéas [0001], [0037], [0079], [0087], [0088], [0117], [0129], [0139] *	3	
X	----- GB 1 279 623 A (ROLLS ROYCE) 28 juin 1972 (1972-06-28) * revendications 1-5 * * figure 1 *	5	
X	----- US 3 506 546 A (SEMIENKO PETER P ET AL) 14 avril 1970 (1970-04-14) * figure 1 *	5-8	
Y	* colonne 3, ligne 13 - colonne 6, ligne 45 *	3	
X	----- US 3 894 924 A (TOLEDO EMIL) 15 juillet 1975 (1975-07-15) * abrégé * * figure 5 * * colonne 2, ligne 50 - colonne 3, ligne 68 *	5-7	
Y		3	
A	----- EP 0 641 872 A1 (YAMAHA MOTOR CO LTD [JP]) 8 mars 1995 (1995-03-08) * abrégé * * page 5, ligne 14 - page 6, ligne 43 * * figure 3 *	1-8	
A	----- EP 0 297 982 A1 (SNECMA [FR]) 4 janvier 1989 (1989-01-04) * abrégé * * figure 1 *	1-8	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche Munich		Date d'achèvement de la recherche 17 mai 2013	Examineur Haering, Christian
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

1
EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 13 16 1835

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.

Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

17-05-2013

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)		Date de publication
EP 2277660	A1	26-01-2011	CN	101998894 A	30-03-2011
			CN	102267107 A	07-12-2011
			EP	2277660 A1	26-01-2011
			EP	2428317 A2	14-03-2012
			HK	1153428 A1	12-10-2012
			JP	4724779 B2	13-07-2011
			JP	4729648 B2	20-07-2011
			JP	2011056660 A	24-03-2011
			KR	20110005711 A	18-01-2011
			KR	20120091463 A	17-08-2012
			TW	200948565 A	01-12-2009
			TW	201233512 A	16-08-2012
			US	2011034113 A1	10-02-2011
			WO	2009125780 A1	15-10-2009

GB 1279623	A	28-06-1972	BE	735059 A	01-12-1969
			CA	920083 A1	30-01-1973
			CH	500399 A	15-12-1970
			DE	1932001 A1	22-01-1970
			FR	2013366 A1	03-04-1970
			GB	1279623 A	28-06-1972
			JP	S4838650 B1	19-11-1973

US 3506546	A	14-04-1970	AUCUN		

US 3894924	A	15-07-1975	AUCUN		

EP 0641872	A1	08-03-1995	DE	69411828 D1	27-08-1998
			DE	69411828 T2	03-12-1998
			EP	0641872 A1	08-03-1995
			JP	H07118889 A	09-05-1995
			US	5647967 A	15-07-1997

EP 0297982	A1	04-01-1989	CA	1319638 C	29-06-1993
			CN	1031118 A	15-02-1989
			DE	3876698 D1	28-01-1993
			DE	3876698 T2	27-05-1993
			EP	0297982 A1	04-01-1989
			ES	2036699 T3	01-06-1993
			FR	2617510 A1	06-01-1989
			IL	86957 A	25-05-1992
			JP	H0819557 B2	28-02-1996
			JP	S6436797 A	07-02-1989
			US	4886583 A	12-12-1989

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

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 2277660 A1 [0004]
- GB 1279623 A [0004]
- US 3506546 A [0004]
- US 3894924 A [0004]
- EP 0641872 A1 [0004]
- EP 0297982 A1 [0004]