

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
15 juin 2023 (15.06.2023)

(10) Numéro de publication internationale
WO 2023/105137 A2

(51) Classification internationale des brevets :
B23H 1/04 (2006.01) *B23H 9/00* (2006.01)
B23H 1/06 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2022/052183

(22) Date de dépôt international :
28 novembre 2022 (28.11.2022)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
FR2113156 08 décembre 2021 (08.12.2021) FR

(71) Déposant : **SAFRAN AIRCRAFT ENGINES** [FR/FR] ;
2 boulevard du Général Martial Valin, 75015 PARIS (FR).

(72) Inventeurs : **LECOMTE, Janvier François** ; SAFRAN
c/o Centre d'Excellence Propriété Intellectuelle Rond-point
René Ravaud-Réau, 77550 MOISSY-CRAMAYEL (FR).
BOESCH, Aurélie ; SAFRAN c/o Centre d'Excellence
Propriété Intellectuelle Rond-point René Ravaud-Réau,
77550 MOISSY-CRAMAYEL (FR). **GUILBAUD, Fred-
dy Guy** ; SAFRAN c/o Centre d'Excellence Propriété Intel-
lectuelle Rond-point René Ravaud-Réau, 77550 MOISSY-
CRAMAYEL (FR).

(74) Mandataire : **BREVALEX** ; 95 rue d'Amsterdam, 75378
Paris cedex 8 (FR).

(81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,

CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA,
MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO,
NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,
SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

Publiée:

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès
réception de ce rapport (règle 48.2(g))*

(54) Title: TOOL-ELECTRODE CAPABLE OF PRODUCING SEALING SLOTS IN A CMC MATERIAL BY MEANS OF EDM

(54) Titre : ELECTRODE-OUTIL APTE À LA RÉALISATION PAR EDM DE FENTES D'ÉTANCHÉITÉ SUR UN MATÉRIAU CMC

(57) Abstract: The invention relates to a tool-electrode for machining a recess in a conductive part by spark machining of the die-sinking type. Said tool-electrode comprises a conductive body having opposing lower and upper surfaces, two opposing main side surfaces, lower and upper regions that are stacked in a die-sinking direction of the tool-electrode, the lower region comprising the lower surface and part of the main side surfaces, the upper region comprising the upper surface and the other part of the main side surfaces. The body is provided, at least in the lower region, with a plurality of openings chosen from channels or slots; a channel is an opening that opens onto at least one of the upper and lower surfaces; a slot is an opening that opens onto the lower surface and onto the two main side surfaces; the diameter of each channel and the distance between two side walls of each slot is \leq twice the die-sinking machining gap; each slot has a height, in the die-sinking direction, that is \geq three times the depth of the recess to be made.

(57) Abrégé : L'invention concerne une électrode-outil pour usinage, dans une pièce conductrice, d'une empreinte par électroérosion de type enfonçage. Elle comporte un corps conducteur ayant des faces opposées inférieure et supérieure, deux faces latérales principales opposées, des zones inférieure et supérieure superposées selon une direction d'enfonçage de l'électrode-outil, la zone inférieure comprenant la face inférieure et une partie des faces latérales principales, la zone supérieure comprenant la face supérieure et l'autre partie des faces latérales principales. Le corps est muni, au moins dans la zone inférieure, d'une pluralité d'ouvertures choisies parmi des canaux ou des fentes; un canal est une ouverture débouchant sur au moins l'une des faces supérieure et inférieure; une fente est une ouverture débouchant sur la face inférieure et sur les deux faces latérales principales; le diamètre de chaque canal et la distance entre deux parois latérales de chaque fente est \leq deux fois le gap d'usinage en enfonçage; chaque fente a une hauteur, dans la direction d'enfonçage, \geq trois fois la profondeur de l'empreinte à réaliser.



WO 2023/105137 A2

Description

Titre : électrode-outil apte à la réalisation par EDM de fentes d'étanchéité sur un matériau CMC

DOMAINE TECHNIQUE

Le domaine de l'invention est celui de l'usinage d'une empreinte dans un matériau électriquement conducteur par la technique de l'électroérosion (ou EDM, acronyme de
5 l'anglais « Electro Discharge Machining »). L'invention concerne en particulier la réalisation par EDM de fentes d'étanchéité dans des anneaux de turbine haute pression (HP) pour aéronef, réalisés en matériau composite à matrice céramique (CMC).

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Dans le cadre de la réalisation des premiers anneaux HP en matériau CMC de type
10 SiC/SiC, une étude a été menée afin de déterminer s'il était possible de réaliser, dans ces anneaux CMC, des fentes d'étanchéité par usinage en utilisant la technique de l'électroérosion.

Ces anneaux en SiC/SiC sont réalisés à partir d'un renfort fibreux sous forme de trames tissées en trois dimensions à partir de fibres SiC (carbure de silicium) gainées de
15 BN (nitrure de bore). Le renfort est ensuite densifié afin que les fibres soient noyées dans une matrice majoritairement en SiC. La densification est obtenue par plusieurs étapes successives et le matériau SiC/SiC ainsi obtenu possède des propriétés physico-chimiques spécifiques telles que sa dureté élevée, qui le rendent difficilement usinable à l'outil coupant.

20 De plus, les formes et les largeurs des fentes d'étanchéité inférieures à 1 mm imposent d'utiliser des outils de faibles dimensions pour les usiner, ce qui réduit aussi sensiblement le taux d'usinabilité.

Enfin, classiquement, les fentes d'étanchéité sont réalisées par EDM pour les pièces aéronautiques métalliques.

C'est pour toutes ces raisons qu'il a été décidé de réaliser les fentes des anneaux CMC par la technique EDM, en ayant vérifié au préalable que le matériau était suffisamment électriquement conducteur.

Pour rappel et comme illustré dans la figure 1, l'usinage par électroérosion ou EDM a pour principe général l'enlèvement de matière par érosion thermique générée par une succession de décharges électriques entre une électrode-outil 1 et la pièce à usiner 2, toutes deux étant immergées dans un liquide d'usinage électriquement isolant, appelé diélectrique 4. La pièce à usiner doit nécessairement être électriquement conductrice (conductivité supérieure à 10^{-2} S/cm) et est généralement reliée au pôle négatif d'une source de courant, tandis que l'électrode-outil est reliée au pôle positif de la source de courant.

Dans le cadre de la présente invention, on s'intéresse à l'électroérosion par enfonçage, dans laquelle une électrode-outil 1 de forme complémentaire à la forme à usiner s'enfonce dans la pièce à usiner. La forme inverse de l'outil est ainsi reproduite dans la pièce et forme ce qu'on appelle l'empreinte 3 (figure 1).

Le diélectrique a comme fonctions de réduire la température de la zone d'usinage, cette zone pouvant parfois atteindre une température située entre 8 000°C et 12 000°C, d'évacuer les particules résiduelles (scories) produites au cours de l'électroérosion et de permettre la création de l'étincelle.

L'application d'une tension génère un champ électrique entre l'électrode-outil et la pièce. La tension de claquage est la tension électrique minimale qui rend électriquement conductrice une portion d'un isolant électrique et qui permet l'ignition de l'étincelle dans le diélectrique ; cette tension de claquage dépend :

- de la tension d'amorçage ;
- du temps d'impulsion ;
- du courant de crête (courant maximum en consigne) ;
- de la distance entre la pièce à usiner et l'électrode-outil (cette distance étant appelée « gap » ou « gap d'usinage ») ;
- du pouvoir isolant du diélectrique ;
- des conditions d'arrosage du diélectrique.

Des essais ont été menés par les inventeurs sur des échantillons afin de trouver la meilleure technique pour usiner des fentes d'étanchéité sur un anneau de turbine en SiC/SiC.

Les exigences dimensionnelles et géométriques visées pour les fentes d'étanchéité sont les suivantes :

- profondeur de 2 à 5 mm ;

- largeur de 0,5 à 1mm ;

- rayon de 0,3 mm au maximum pour les arrondis (par exemple au niveau des arêtes) ;

- rayon de 0,3 mm au maximum sur tous les congés (au fond des fentes d'étanchéité).

Par ailleurs, l'exigence d'état de surface visé est une rugosité (Ra) inférieure ou égale à 5 μm .

Dans un premier temps, les inventeurs ont repris les technologies et les stratégies couramment utilisées sur les matériaux métalliques pour l'usinage EDM des fentes d'étanchéité sur le matériau composite CMC SiC/SiC. Ils ont donc utilisé, comme électrodes-outils, des lames usinées en pleine matière, en graphite ou en alliage de cuivre.

Du fait de la faible conductivité électrique du matériau composite CMC SiC/SiC (comprise entre 0,1 et 1 $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), les électrodes en alliages de cuivre se sont avérées plus adaptées pour l'usinage EDM de ce matériau, car elles ont une meilleure conductivité que les graphites.

Les premières électrodes utilisées sont des électrodes en cuivre de type Cu-a1 (norme AFNOR (ou Cu-ETP (norme ISO)) de 0,5 mm d'épaisseur pour une largeur visée de fente d'étanchéité de 0,8 mm.

La stratégie d'usinage utilisée consiste à effectuer deux descentes de l'électrode-outil (ébauche et finition) dans la pièce immergée dans un diélectrique hydrocarbure, la seconde descente ayant lieu après réaffutage en bout de l'électrode-outil pour se dédouaner de l'usure et s'approcher au mieux des exigences géométriques.

Pour le régime d'ébauche, un enfonçage vertical selon l'axe Z est réalisé jusqu'à la côte programmée en profondeur. En revanche pour le régime de finition, un déplacement planétaire en X et en Y avec un rayon d'excentration (également appelé vecteur d'excentration) de 0,15 mm environ est réalisé pour s'approcher au mieux des côtes géométriques des fentes d'étanchéité de 0,8 mm de largeur souhaitée.

Par ailleurs, les inventeurs ont choisi d'usiner les premiers échantillons avec des paramètres faiblement énergétiques.

Suite à ces premiers essais d'usinage, plusieurs enseignements ont été relevés :

- le taux d'enlèvement de matière (en mm^3/min) est significativement plus faible sur le matériau CMC que sur un matériau métallique (rapport $< 1/3$) ;

- on observe une diminution exponentielle de la vitesse d'avance d'usinage au fur et à mesure qu'on s'enfonce en pleine matière ;

- malgré les faibles régimes énergétiques utilisés en finition pour obtenir la rugosité visée (R_a), les rugosités mesurées sur les surfaces des flancs des fentes d'étanchéité sont situées entre 10 et 12 μm ; cette rugosité obtenue est essentiellement liée au régime d'ébauche (enfonçage direct) avec un gap d'usinage de 0,15 mm environ et donc, avec une électrode-outil de 0,5 mm d'épaisseur, la côte de 0,8 mm est déjà atteinte en ébauche et, par conséquent, les surfaces usinées sont très peu reprises avec le déplacement planétaire de l'électrode-outil en régime de finition ;

- l'étincelage pendant le régime d'ébauche n'est pas constant (c'est-à-dire stable et répétable) ; en effet, des coups d'arc sont détectés qui provoquent des fracturations dans la céramique SiC/SiC et génèrent de grosses particules de matière, difficiles à évacuer par rapport au gap d'usinage ; on observe également des fissures en surface et sub-surface, du faïençage, ainsi que la formation de cratères épars sur les surfaces usinées ;

- les performances sont très étroitement liées au renouvellement du diélectrique et à l'évacuation des particules érodées et des gaz produits ; en effet, la matière arrachée aux électrodes se présente sous la forme de petites sphérules dont les dimensions vont de quelques micromètres en régime de finition à quelques centaines de micromètres en régime d'ébauche ; ces particules s'accumulent dans le gap d'usinage et finissent

rapidement par créer des ponts conducteurs entre l'électrode-outil et la pièce à usiner ; ces phénomènes ont déjà été constatés pour l'usinage des matériaux métalliques, mais ils sont amplifiés lorsqu'on usine en EDM des céramiques « réfractaires » ; en effet, l'enlèvement de matière issu de l'érosion thermique des céramiques « réfractaires » est
5 généré essentiellement par la fracturation et très peu par la fusion du matériau, d'où la formation de plus gros débris à évacuer ; c'est pourquoi la circulation du diélectrique entre l'électrode-outil et la pièce est primordiale pour l'usinage EDM des matériaux CMC ;

- le nombre et la taille des irrégularités de surfaces observés sont liés aussi au matériau hétérogène et aux variations de porosités présentes lors de son élaboration.

10 Au vu de ces constatations, les inventeurs ont cherché à concevoir une électrode-outil apte à être utilisée pour usiner un matériau CMC par érosion EDM, en particulier pour la réalisation de fentes d'étanchéité dans un matériau SiC/SiC, tout en augmentant sensiblement la performance du procédé EDM actuel et en améliorant les états de surfaces obtenus.

15 **EXPOSÉ DE L'INVENTION**

Pour ce faire, l'invention a pour objet une électrode-outil pour usinage, dans une pièce en matériau électriquement conducteur, d'une empreinte par électroérosion de type enfonçage, l'électrode-outil comportant un corps en un matériau électriquement conducteur ayant une face inférieure et une face supérieure, opposées l'une à l'autre, et
20 deux faces latérales principales, opposées l'une à l'autre, le corps ayant une zone inférieure et une zone supérieure, qui sont superposées selon une direction d'enfonçage de l'électrode-outil, la zone inférieure comprenant la face inférieure et une partie des faces latérales principales et la zone supérieure comprenant la face supérieure et l'autre partie des faces latérales principales,

25 l'électrode-outil étant caractérisée en ce que le corps est muni, au moins dans la zone inférieure, d'une pluralité d'ouvertures choisies parmi des canaux ou des fentes, un canal étant une ouverture qui débouche sur au moins l'une des faces supérieure et inférieure,

une fente étant une ouverture qui débouche sur la face inférieure et sur les deux faces latérales principales,

chaque canal ayant un diamètre inférieur ou égal à deux fois le gap d'usinage en enfonçage et

5 chaque fente ayant une largeur, définie par une distance entre deux parois latérales de la fente, inférieure ou égale à deux fois le gap d'usinage en enfonçage, et une hauteur, dans la direction d'enfonçage, supérieure ou égale à trois fois la profondeur de l'empreinte à réaliser.

Le gap d'usinage en enfonçage est par exemple compris entre 0,02 mm et 0,3 mm.

10 Selon une première variante, l'électrode-outil comporte des canaux dans la zone inférieure et ces canaux se prolongent dans la zone supérieure, chaque canal débouchant à la fois sur la face inférieure et sur la face supérieure du corps.

Avantageusement, dans cette première variante, la distance entre deux canaux adjacents est supérieure ou égale à deux fois le gap d'usinage en enfonçage.

15 Selon une deuxième variante, l'électrode-outil comporte des ouvertures uniquement dans la zone inférieure, ces ouvertures étant des fentes. Dans cette deuxième variante, la zone supérieure est donc exempte d'ouvertures.

Avantageusement, dans cette deuxième variante, la distance entre deux fentes adjacentes est supérieure ou égale à deux fois le gap d'usinage en enfonçage.

20 Selon une troisième variante, l'électrode-outil comporte des fentes dans la zone inférieure et des canaux dans la zone supérieure, chaque canal de la zone supérieure débouchant sur une fente de la zone inférieure. En d'autres termes, chaque canal est superposé à une fente selon la direction d'enfonçage. La combinaison des canaux et des fentes permet une meilleure distribution du diélectrique au plus près de l'étincelage afin
25 d'obtenir une meilleure stabilité de l'usinage et d'optimiser l'évacuation des scories et donc de gagner en performance.

Avantageusement, le corps de l'électrode-outil est en un alliage de cuivre CuCrZr, de préférence en $\text{CuCr}_1\text{Zr}_{0,1}$.

Avantageusement, la hauteur de la zone inférieure selon la direction d'enfonçage est au moins deux fois supérieure à la hauteur de la zone supérieure selon la direction d'enfonçage.

De préférence, l'empreinte à usiner devant avoir une profondeur, une longueur et une largeur données, le corps de l'électrode a une épaisseur qui est inférieure à une valeur correspondant à la largeur de l'empreinte, à laquelle on retranche deux fois le gap d'usinage en enfonçage (c'est-à-dire $e < l - (2 \times G)$).

L'invention concerne également un dispositif d'usinage pour usiner une empreinte par électroérosion de type enfonçage, le dispositif comprenant une électrode-outil telle que décrite ci-dessus et des moyens coopérant avec les ouvertures de l'électrode-outil pour créer une circulation de liquide d'usinage dans le fond de l'empreinte en formation, ces moyens étant choisis parmi des moyens d'injection de liquide d'usinage sous pression dans la pluralité d'ouvertures de l'électrode-outil, lorsque les ouvertures sont des canaux, et des moyens d'injection de liquide d'usinage autour de l'électrode, lorsque les ouvertures sont des fentes.

L'invention concerne également un procédé de formation d'une empreinte dans une pièce en matériau électriquement conducteur par usinage par électroérosion, mettant en œuvre un dispositif d'usinage tel que décrit ci-dessus, et comprenant les étapes de :

- immersion de la pièce dans un liquide d'usinage ;
- formation d'une ébauche de l'empreinte, par enfonçage de l'électrode-outil selon la direction d'enfonçage et injection concomitante de liquide d'usinage dans la pluralité d'ouvertures de l'électrode-outil pour créer une circulation de liquide d'usinage dans le fond de l'ébauche ;
- finition de l'empreinte par placement de l'électrode-outil au centre de l'ébauche et excentration (également appelée planage) de l'électrode-outil dans un plan perpendiculaire à la direction d'enfonçage, le rayon d'excentration étant supérieur ou égal au gap d'usinage en enfonçage.

On rappelle que, de manière connue, le procédé comporte un usinage d'ébauche, suivi d'un usinage de finition. Dans le cadre de l'invention, en régime d'ébauche, le gap

d'usinage peut être compris entre 0,10 mm et 0,3 mm ; en régime de finition, le gap d'usinage peut être compris entre 0,02 mm et 0,10 mm.

De préférence, l'étape d'injection de liquide d'usinage dans la pluralité d'ouvertures de l'électrode-outil est concomitante à l'étape de finition de l'empreinte et à l'étape de finition de l'empreinte.

Avantageusement, l'empreinte à usiner est une fente d'étanchéité et la pièce est en matériau composite SiC/SiC. De préférence, l'empreinte à usiner est une fente d'étanchéité pour anneau de turbine.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée suivante de formes de réalisation préférées de celle-ci, donnée à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés parmi lesquels :

- la figure 1 est une représentation schématique en coupe et selon une vue de face montrant le principe général de l'électroérosion par enfonçage selon l'axe Z ;

- la figure 2 est une représentation schématique selon une vue de face en perspective de l'électrode-outil selon un premier mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 3 est une vue en coupe selon le plan A de l'électrode-outil de la figure 2, l'électrode-outil étant représentée dans l'empreinte de la pièce à usiner ;

- la figure 4 est une représentation schématique en coupe et selon une vue de dessus montrant l'excentration de l'électrode-outil de la figure 3 dans l'empreinte selon le plan X-Y ;

- la figure 5 est une vue en coupe selon une vue de face de l'électrode-outil de la figure 3, l'électrode-outil étant représentée dans l'empreinte de la pièce et montrant la circulation du liquide d'usinage ;

- la figure 6a est une représentation schématique selon une vue de face de l'électrode-outil selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 6b est une vue en coupe selon la ligne B-B de l'électrode-outil de la figure 6a ;

- la figure 7a est une représentation schématique selon une vue de face de l'électrode-outil selon un troisième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 7b est une vue en coupe selon la ligne C-C de l'électrode-outil de la figure 7a.

5 On précise que les différents éléments ne sont pas représentés à l'échelle.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

Dans le cas d'une électrode-outil de l'art antérieur, malgré l'immersion de la pièce à usiner dans le diélectrique et un arrosage externe autour de l'électrode-outil, les débris de matériau situés en fond de la cavité d'usinage n'arrivent pas à s'évacuer et pénalisent
10 fortement l'avance de l'usinage en fonction de la profondeur usinée. L'électrode-outil selon l'invention permet d'améliorer la distribution du diélectrique dans la cavité d'usinage.

Les figures 2 à 7b montrent des modes de réalisation préférés d'électrodes-outils selon l'invention, à savoir une configuration à canaux traversants (figure 2), une
15 configuration en forme de peigne (figure 6a) et une configuration comprenant à la fois des canaux traversants en partie haute et une forme de peigne en partie basse (figure 7a).

La pluralité d'ouvertures dans l'électrode-outil selon l'invention, que ce soit des canaux 8, des fentes 9 ou une combinaison des deux, permet de créer une circulation
20 forcée de liquide d'usinage dans le gap d'usinage G, ce qui a pour effet, d'une part, de favoriser le renouvellement du diélectrique dans le gap d'usinage et qui permet, d'autre part, d'évacuer de la zone d'usinage le diélectrique dégradé, ainsi que les résidus résultant de l'enlèvement de matière.

Par exemple, dans le cas d'ouvertures de type canaux, la circulation forcée de
25 liquide d'usinage dans le gap d'usinage peut être créée en injectant le liquide d'usinage dans les canaux à leur extrémité proche du porte-électrode.

Dans la figure 2 est illustrée l'électrode-outil selon un premier mode de réalisation ; ici, l'électrode-outil 1 est un bloc de matière parallélépipédique dans lequel

sont réalisées des canaux traversants 8 ayant chacun un diamètre « d » inférieur ou égal à deux fois la valeur du gap d'usinage en enfonçage (c'est-à-dire en régime d'ébauche).

Pour rappel, dans notre exemple de réalisation, on souhaite réaliser des fentes d'étanchéité de 0,8 mm de large et d'une profondeur de quelques millimètres (2 à 5 mm).

5 Pour réaliser l'électrode-outil, on peut donc utiliser un bloc de matière ayant une hauteur « H » de 15 mm environ et une épaisseur « e » de 0,4 mm. Pour l'épaisseur de l'électrode-outil, on fait en sorte de respecter la formule $e < l - 2 \times G$, « l » étant la largeur de fente d'étanchéité que l'on souhaite obtenir. La longueur « L » de l'électrode-outil peut être de quelques millimètres ou centimètres.

10 Dans ce bloc de matière, on réalise une multitude de canaux 8 traversants ayant par exemple un diamètre « d » de 0,3 mm, qui sont disposés parallèles les uns aux autres selon la direction d'enfonçage Z (dans le sens de la hauteur) et selon une seule rangée. Dans cet exemple, les canaux sont espacés les uns des autres d'une valeur « c » égale à 2 fois le gap d'usinage en régime d'ébauche G.

15 Dans la figure 3, on a une vue en coupe de la figure 2 selon le plan A, l'électrode-outil 1 étant représentée à l'intérieur de la cavité d'usinage de la pièce 2 pendant le régime d'ébauche.

Dans la figure 4, l'électrode-outil est représentée à l'intérieur de la cavité d'usinage pendant le régime de finition ; le déplacement de l'électrode-outil dans le plan X-Y en régime de finition (après enfonçage de celle-ci au fond de la cavité d'usinage selon la direction Z) est schématisé par des flèches en traits gras. R représente le rayon d'excentration en régime de finition et est supérieur au gap d'usinage en régime d'ébauche G.

20

L'injection du diélectrique propre se fait sous pression dans les canaux 8, par exemple entre 2 et 50 bars. Cette injection sous pression permet un arrosage suffisant par l'intérieur de l'électrode-outil et une évacuation par les côtés de celle-ci. La figure 5 est une vue en coupe montrant l'électrode-outil de la figure 2 dans la cavité d'usinage, les grandes flèches noires descendantes représentant le diélectrique propre circulant dans les canaux, les petites flèches noires horizontales représentant le diélectrique propre à la

25

sortie des canaux et les grandes flèches blanches montantes représentant le diélectrique « sale » qui est évacué par les côtés de l'électrode-outil.

On précise que les canaux 8 ne doivent pas avoir un diamètre supérieur à 2 fois le gap d'usinage en régime d'ébauche, sinon il y a un risque de générer des « carottes » de matière à l'intérieur de ceux-ci en régime d'ébauche (enfonçage direct de l'électrode-outil selon un axe vertical Z). Les éventuelles irrégularités de surface en fond de cavité d'usinage liées aux canaux d'injection seront arasées par le déplacement planétaire de l'électrode-outil en régime de finition.

Les canaux d'injection vont permettre d'améliorer l'évacuation des scories créées pendant l'enfonçage de l'électrode-outil et, par conséquence, d'augmenter sa vitesse d'avance.

En régime de finition, on utilise la même stratégie d'usinage en réalisant un déplacement planétaire en X et en Y avec un rayon d'excentration R supérieur ou égal au gap d'usinage en régime d'ébauche G (le rayon d'excentration en finition est $R=0,2$ mm dans notre exemple). Autrement dit, on déplace l'électrode, de part et d'autre de sa position centrale, d'au moins 0,2 mm en X, et d'au moins 0,2 mm en Y pour obtenir une fente d'étanchéité de 0,8 mm de largeur en utilisant une électrode-outil de 0,4 mm de largeur. Le gap de finition est défini à 0,05 mm. En fin d'opération de finition, une usure des flancs de l'électrode est estimée à 0,05 mm. L'épaisseur de l'électrode usée en fin d'opération de finition est ainsi de 0,3 mm environ. L'opération de finition permet d'assurer une reprise des surfaces de l'empreinte et de réduire la rugosité des surfaces obtenues en ébauche.

Là encore, le mouvement planétaire de l'électrode-outil selon les axes X et Y, associé à l'injection dans l'électrode-outil, améliore la circulation du diélectrique et l'évacuation rapide des débris situés en fond de cavité d'usinage. En outre, il optimise et stabilise l'étincelage en améliorant le recyclage du diélectrique entre l'électrode-outil et la pièce à usiner.

Selon un deuxième mode de réalisation illustré dans la figure 6a, l'électrode-outil a une configuration en forme de peigne, obtenue en pratiquant une série de fentes 9 dans la partie basse (i.e. la zone inférieure) du corps de l'électrode-outil, l'espace entre

deux fentes adjacentes formant une dent du peigne. Chaque fente a une largeur « a » qui est inférieure ou égale à $2 \times G$ et une hauteur « h » qui est supérieure ou égale à $3 \times P$, P étant la profondeur de la fente d'étanchéité à usiner. La profondeur « P » souhaitée étant de quelques millimètres (2 à 5 mm), on a choisi $h=10$ mm. La largeur d'espacement « b »
5 entre deux fentes adjacentes (i.e. la largeur d'une dent) est ici choisie égale à $2 \times R$. « H » est la hauteur totale de l'électrode-outil. Dans notre exemple, les inventeurs ont choisi $H=15$ mm pour assurer une surface de contact suffisante dans le porte-électrode.

Une vue en coupe selon la ligne B-B de la figure 6a est illustrée dans la figure 6b.

Cette configuration en forme de peigne va, lors de l'enfonçage de celle-ci,
10 permettre la formation d'espaces entre les dents (i.e. dans les fentes), ce qui va améliorer la distribution du diélectrique en fond de cavité (par immersion de la pièce et par un arrosage externe autour de l'électrode-outil provoquant une circulation du liquide d'usinage entre les fentes).

La largeur « a » des fentes ne doit pas être supérieure à 2 fois la valeur du gap
15 d'usinage en régime d'ébauche G, de façon à pouvoir usiner le matériau CMC se trouvant au niveau des fentes. Il est possible qu'avec cette configuration des irrégularités de surface en forme de dômes soient créées en fond de cavité d'usinage à l'aplomb des fentes, mais ces irrégularités seront aisément supprimées avec le déplacement de l'électrode-outil en X et Y en régime de finition.

Un troisième mode de réalisation est illustré dans la figure 7a et est une
20 combinaison des première et deuxième configurations. On a ainsi des canaux 8 dans la partie haute (i.e. la zone supérieure du corps) de l'électrode-outil, ces canaux débouchant sur des fentes 9 pratiquées dans la partie basse (i.e. la zone inférieure du corps) de l'électrode-outil, comme on peut le voir dans la figure 7b. La combinaison des canaux et
25 des fentes permet une meilleure distribution du diélectrique au plus près de l'étincelage afin d'obtenir une meilleure stabilité de l'usinage et d'optimiser l'évacuation des scories et donc de gagner en performance.

Pour réaliser les ouvertures de type canal ou fente des différentes configurations décrites ci-dessus, les inventeurs ont choisi de les usiner dans des plaques épaisses de

type CuCrZr (norme AFNOR), par exemple en alliage $\text{CuCr}_1\text{Zr}_{0,1}$. Ils ont sélectionné plusieurs procédés d'usinage suivant les formes des ouvertures à réaliser.

5 Pour réaliser les canaux d'injection de 0,3 mm de diamètre traversants sur toute la hauteur de l'électrode, on peut utiliser un perçage rapide EDM en prenant de l'eau comme liquide d'usinage et des électrodes tubulaires en laiton d'un diamètre extérieur de 0,25 mm. Une autre alternative possible est l'utilisation de l'EDM classique avec des électrodes pleines en cupro-tungstène, mais le temps de cycle est plus long.

10 Pour réaliser les fentes (et ainsi former les dents du peigne), on peut utiliser une découpe EDM à fil avec un fil de diamètre 0,15 mm au lieu du fil de diamètre 0,25 mm utilisé en EDM à fil standard. Une autre alternative possible est l'utilisation d'un laser de découpe de type fibré, dont la longueur d'onde est de l'IR proche (≈ 1060 nanomètres).

15 Pour obtenir l'épaisseur de 0,4 mm de l'électrode-outil, on peut réaliser une ébauche en découpe EDM à fil, et réaliser une reprise des faces en rectification (finition) pour assurer les exigences géométriques telles que la précision des côtes et la planéité des faces de référence.

Ces formes d'électrodes peuvent aussi être élaborées en fabrication additive ou construites en 3D par lit de poudre fusionné par faisceau laser.

20 L'électrode-outil selon l'invention avec ses différentes configurations possibles est relativement facile à obtenir par les différents procédés d'usinage décrits ci-dessus. Le coût de fabrication supplémentaire après une optimisation est largement amorti par l'apport d'un gain significatif lors de la réalisation des empreintes avec des temps de cycles réduits et une meilleure qualité obtenue.

25 L'électrode est de préférence en un alliage de type CuCrZr, de préférence en $\text{CuCr}_1\text{Zr}_{0,1}$ qui présente une meilleure rigidité et résiste mieux à l'usure à l'érosion par rapport à une électrode en Cu-a1 (norme AFNOR (ou Cu-ETP (norme ISO))). Mais d'autres matériaux peuvent être utilisés, comme notamment, tous les alliages à base de cuivre, les graphites, le laiton, le carbure de tungstène ou le cupro-tungstène.

30 On rappelle que l'électrode-outil selon l'invention a été conçue pour résoudre une problématique d'usinage EDM de fentes d'étanchéité dans un matériau composite à matrice céramique SiC/SiC, mais elle peut être utilisée pour la réalisation d'autres types

d'empreintes par EDM sur d'autres types de matériaux CMC et d'autres matériaux électriquement conducteurs, notamment des matériaux métalliques.

Lorsque l'électrode-outil comporte des canaux, la distribution du diélectrique dans les canaux de l'électrode-outil se fait sous pression, de préférence entre 2 et 50 bars ; on obtient ainsi un arrosage par l'intérieur de l'électrode-outil.

Pour l'usinage d'une empreinte (par exemple une fente d'étanchéité) avec l'électrode-outil ayant une configuration en forme de peigne, un arrosage externe à faible pression (par exemple comprise entre 0,1 et 2 bars) autour de celle-ci est utilisé pour favoriser la circulation du diélectrique entre les dents du peigne.

L'amélioration de la circulation du diélectrique dans les formes usinées à l'aide de l'électrode-outil selon l'invention, par les canaux à l'intérieur de l'électrode-outil et/ou par les dents du peigne, à iso paramètres d'usinage, permet d'évacuer plus rapidement les résidus issus de l'érosion. Le fait de ne pas ré-usiner sur les débris conduit à améliorer la vitesse d'avance de l'enfonçage et donc le rendement d'usinage. L'utilisation de l'électrode-outil selon l'invention dans un procédé EDM permet d'optimiser le procédé, et peut donc être appliquée à une production industrielle pour les pièces en série.

Ces configurations qui facilitent la circulation et le renouvellement du diélectrique propre permettent également de mieux maîtriser l'étincelage et donc la qualité de surface en régime de finition, associé au déplacement planétaire de l'électrode-outil.

Revendications

1. Électrode-outil (1) pour usinage, dans une pièce (2) en matériau électriquement conducteur, d'une empreinte (3) par électroérosion de type enfonçage, l'électrode-outil comportant un corps en un matériau électriquement conducteur ayant une face inférieure (5) et une face supérieure (6), opposées l'une à l'autre, et deux faces latérales principales (7), opposées l'une à l'autre, le corps ayant une zone inférieure et une zone supérieure, qui sont superposées selon une direction d'enfonçage (Z) de l'électrode-outil, la zone inférieure comprenant la face inférieure (5) et une partie des faces latérales principales (7) et la zone supérieure comprenant la face supérieure (6) et l'autre partie des faces latérales principales (7),

l'électrode-outil étant caractérisée en ce que le corps est muni, au moins dans la zone inférieure, d'une pluralité d'ouvertures choisies parmi des canaux (8) ou des fentes (9),

un canal (8) étant une ouverture qui débouche sur au moins l'une des faces supérieure (6) et inférieure (5),

une fente (9) étant une ouverture qui débouche sur la face inférieure (5) et sur les deux faces latérales principales (7),

chaque canal ayant un diamètre inférieur ou égal à deux fois le gap d'usinage (G) en enfonçage et

chaque fente ayant une largeur, définie par une distance entre deux parois latérales de la fente, inférieure ou égale à deux fois le gap d'usinage (G) en enfonçage, et une hauteur, dans la direction d'enfonçage, supérieure ou égale à trois fois la profondeur de l'empreinte (3) à réaliser,

le gap d'usinage en enfonçage étant compris entre 0,02 mm et 0,3 mm.

25

2. Électrode-outil selon la revendication 1, comportant des canaux dans la zone inférieure et qui se prolongent dans la zone supérieure, chaque canal débouchant à la fois sur la face inférieure (5) et sur la face supérieure (6) du corps.

3. Électrode-outil selon la revendication 2, dans laquelle la distance entre deux canaux adjacents est supérieure ou égale à deux fois le gap d'usinage en enfonçage.

5 4. Électrode-outil selon la revendication 1, comportant des ouvertures uniquement dans la zone inférieure, ces ouvertures étant des fentes.

5. Électrode-outil selon la revendication 4, dans laquelle la distance entre deux fentes adjacentes est supérieure ou égale à deux fois le gap d'usinage en enfonçage.

10 6. Électrode-outil selon la revendication 1, comportant des fentes dans la zone inférieure et des canaux dans la zone supérieure, chaque canal de la zone supérieure débouchant sur une fente de la zone inférieure.

15 7. Électrode-outil selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans laquelle le corps est en un alliage de cuivre CuCrZr, de préférence en $\text{CuCr}_{1}\text{Zr}_{0,1}$.

20 8. Électrode-outil selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans laquelle l'empreinte à usiner devant avoir une profondeur, une longueur et une largeur données, le corps de l'électrode a une épaisseur qui est inférieure à une valeur correspondant à la largeur de l'empreinte, à laquelle on retranche deux fois le gap d'usinage en enfonçage.

25 9. Dispositif d'usinage pour usiner une empreinte par électroérosion de type enfonçage, comprenant une électrode-outil selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 et des moyens coopérant avec les ouvertures de l'électrode-outil pour créer une circulation de liquide d'usinage dans le fond de l'empreinte en formation, ces moyens étant choisis parmi des moyens d'injection de liquide d'usinage sous pression dans la pluralité d'ouvertures de l'électrode-outil, lorsque les ouvertures sont des canaux, et des moyens d'injection de liquide d'usinage autour de l'électrode, lorsque les ouvertures sont des fentes.

10. Procédé de formation d'une empreinte dans une pièce en matériau électriquement conducteur par usinage par électroérosion, mettant en œuvre un dispositif d'usinage selon la revendication 9, et comprenant les étapes de :

- immersion de la pièce dans un liquide d'usinage ;

5 - formation d'une ébauche de l'empreinte, par enfonçage de l'électrode-outil selon la direction d'enfonçage et injection concomitante de liquide d'usinage dans la pluralité d'ouvertures de l'électrode-outil pour créer une circulation de liquide d'usinage dans le fond de l'ébauche ;

10 - finition de l'empreinte par placement de l'électrode-outil au centre de l'ébauche et excentration de l'électrode-outil dans un plan perpendiculaire à la direction d'enfonçage, le rayon d'excentration étant supérieur ou égal au gap d'usinage en enfonçage.

15 **11.** Procédé selon la revendication 10, dans lequel l'empreinte à usiner est une fente d'étanchéité et la pièce est en matériau composite SiC/SiC.

[Fig. 1]

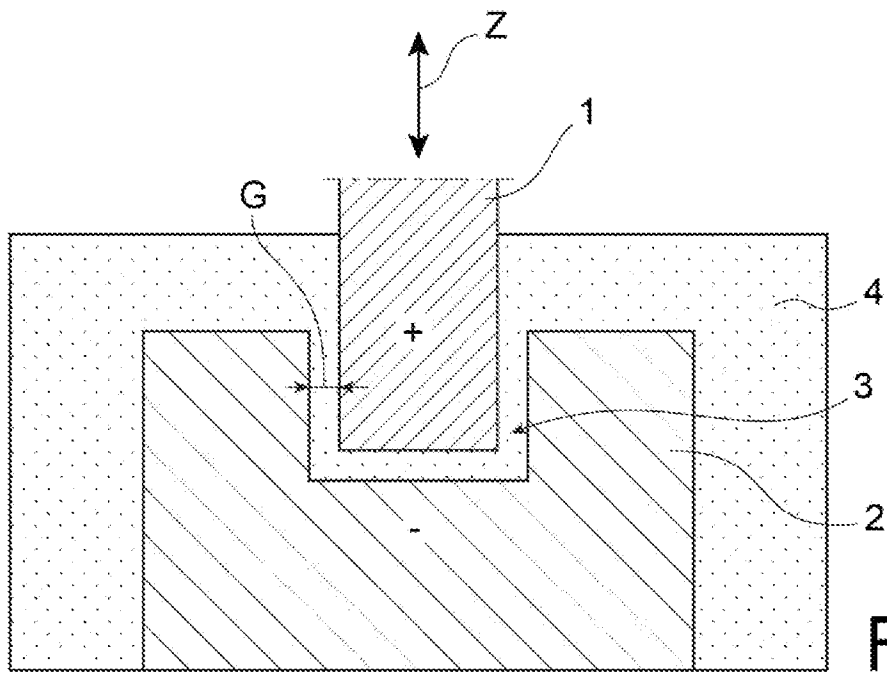


FIG. 1

[Fig. 2]

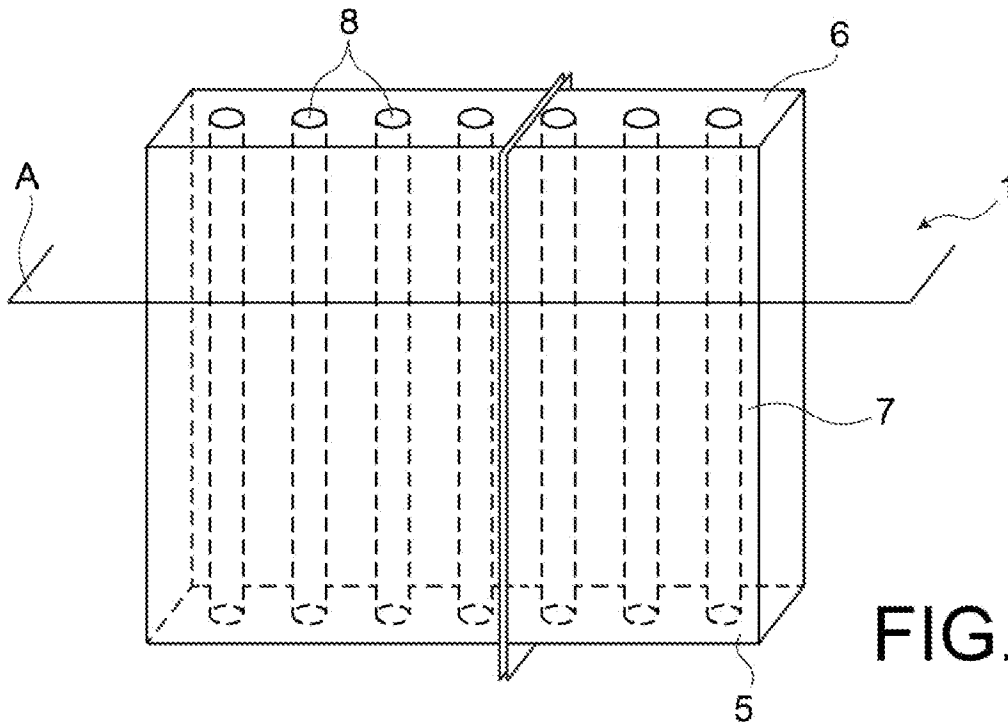


FIG. 2

[Fig. 3]

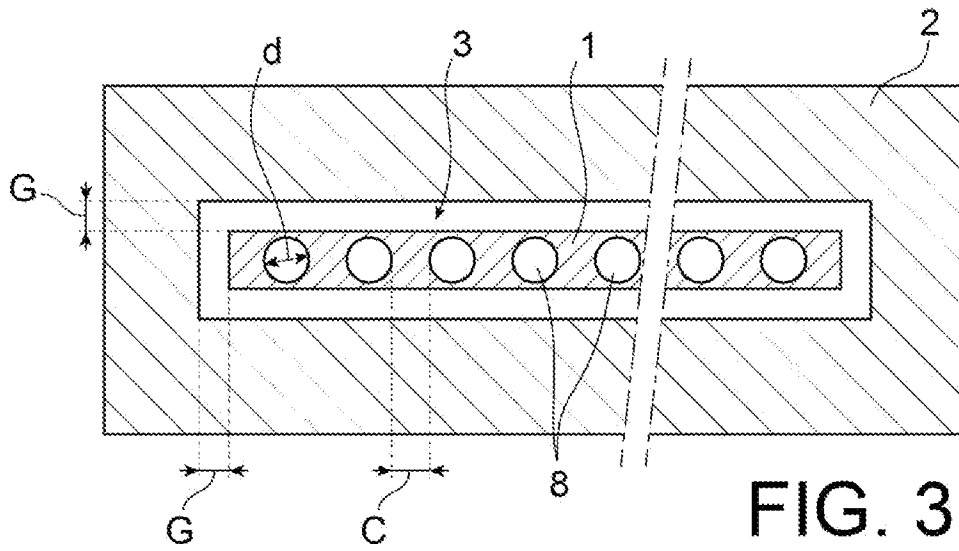


FIG. 3

[Fig. 4]

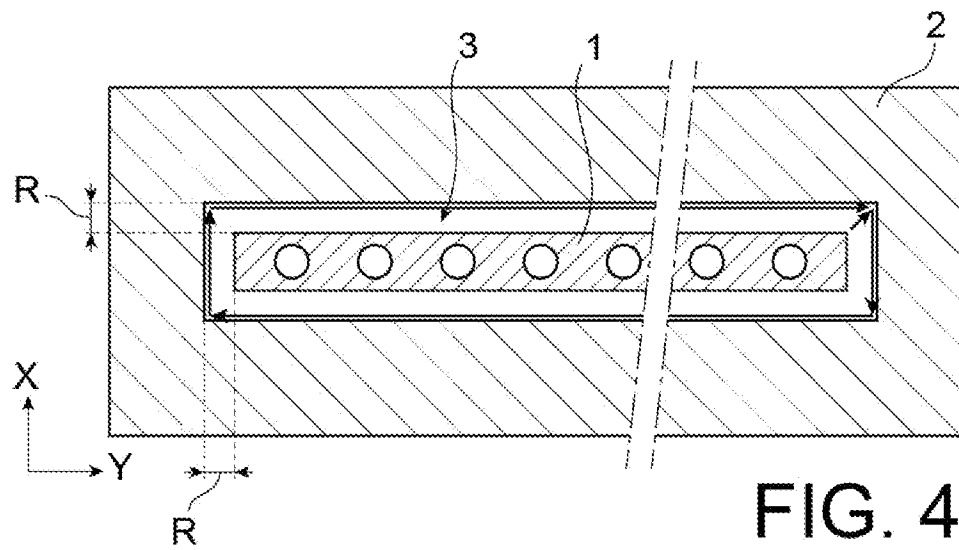


FIG. 4

[Fig. 5]

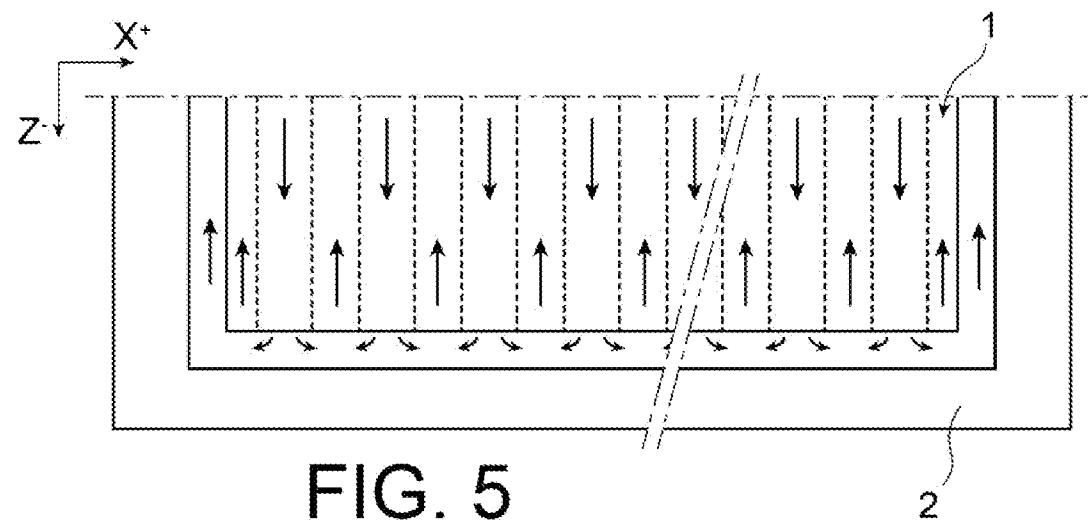
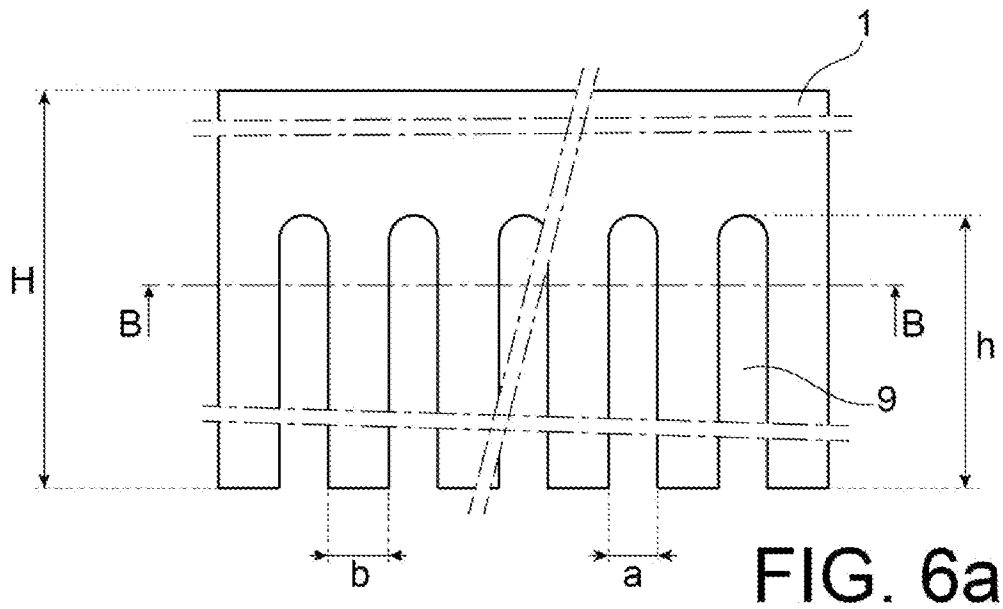
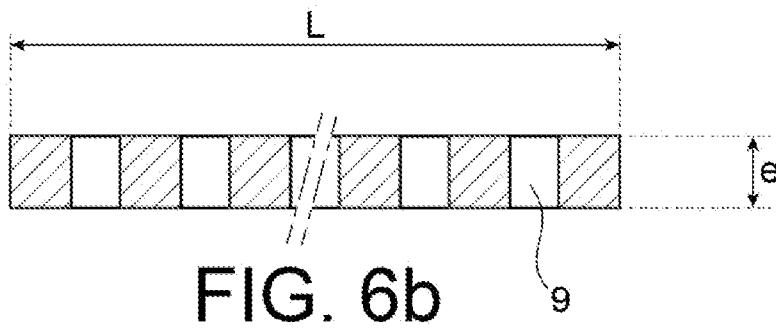


FIG. 5

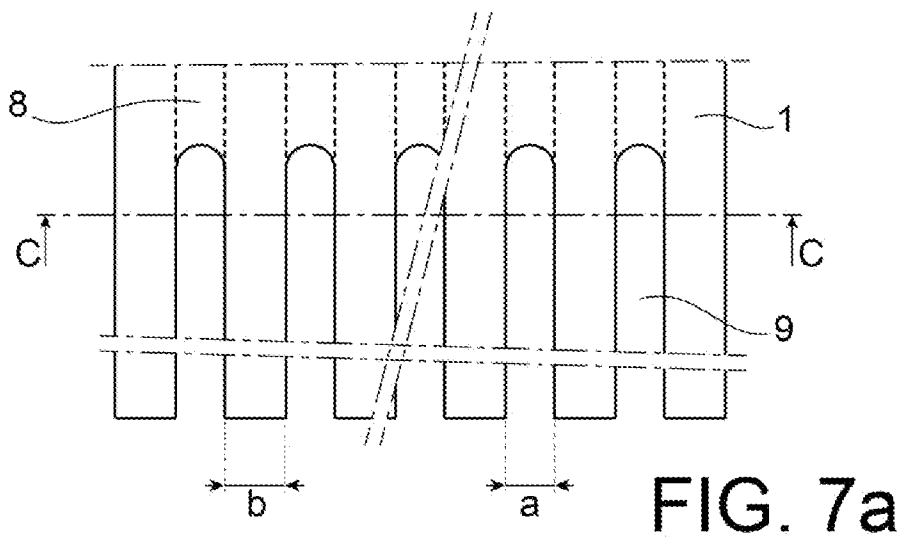
[Fig. 6a]



[Fig. 6b]



[Fig. 7a]



[Fig. 7b]

