(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) EP 0 706 308 A1

(12) DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
10.04.1996 Bulletin 1996/15

(51) Int Cl.[6]: **H05H 1/34**

(21) Numéro de dépôt: **95402218.2**

(22) Date de dépôt: **04.10.1995**

(84) Etats contractants désignés:
CH DE GB IT LI

(30) Priorité: **06.10.1994 FR 9411949**

(71) Demandeurs:
- **COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE**
  F-75015 Paris (FR)
- **CENTRE NATIONAL DE**
  LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)
  F-75794 Paris Cédex 16 (FR)

(72) Inventeurs:
- **Boncoeur, Marcel**
  F-75012 Paris (FR)
- **Fauchais, Pierre**
  F-87000 Limoges (FR)
- **Grimaud, Alain**
  F-87520 Veyrac (FR)
- **Schnedecker, Guy**
  F-75015 Paris (FR)

(74) Mandataire: **Dubois-Chabert, Guy et al**
c/o BREVATOME
25, rue de Ponthieu
F-75008 Paris (FR)

(54) Torche à plasma d'arc à stabilisation par gainage gazeux

(57) Cette torche à plasma d'arc comprenant :

- une cathode (20) refroidie, de diamètre D, dont l'extrémité est une pointe conique d'angle au sommet α,

- une anode (22) refroidie comportant une paroi intérieure en forme de tronc de cône, dont la section définit l'entrée (28) d'une tuyère (24) de forme cylindrique,
se caractérise en ce que la paroi intérieure de l'anode (22) est, dans sa partie conique, parallèle à l'extrémité conique de la cathode (20), à une distance d de celle-ci et sur une longueur l_g, et en ce que l'angle α, le diamètre D, la distance d et la longueur l_g sont tels qu'un gaz plasmagène injecté dans la torche est accéléré entre les deux parois coniques, de façon suffisante pour créer un gainage gazeux de la colonne d'arc dès que cette dernière se développe à la pointe de la cathode et est capable de la gainer jusque dans la tuyère (24).

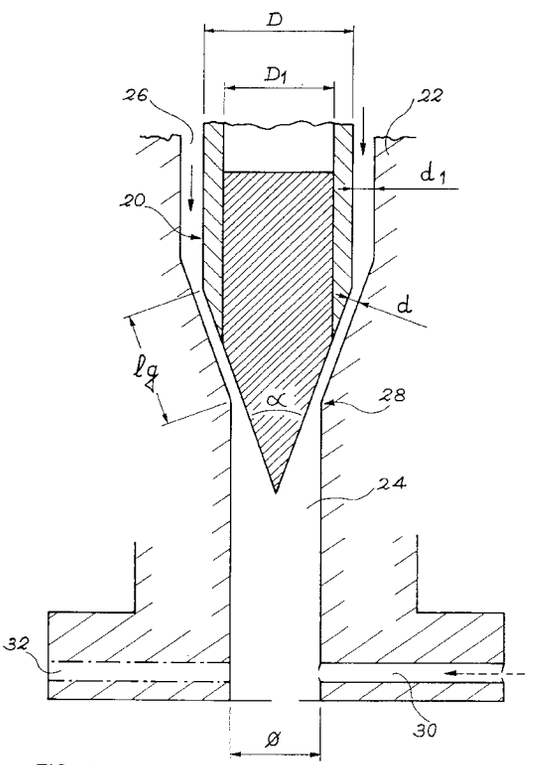


FIG. 4

EP 0 706 308 A1

Description

Domaine technique et art antérieur

La présente invention concerne le domaine de la projection par plasma d'arc et, plus précisément, une torche à plasma d'arc.

La projection par plasma d'arc est maintenant développée dans l'industrie depuis plus de 25 ans.

Le schéma général des torches développées jusqu'à ce jour est représenté sur la figure 1. La torche comporte une cathode 2 en tungstène thorié, de forme conique. Elle présente également une anode 4 qui sert de tuyère 3 et qui est généralement en cuivre et a une forme délimitant un ou deux troncs de cône dans sa partie centrale, un canal cylindrique dans sa partie inférieure, un alésage cylindrique dans sa partie supérieure. Ce dernier est destiné à recevoir la cathode 2, et définit avec elle un espace annulaire 6. L'anode est refroidie par une circulation d'eau sous pression, de façon à ce que la surface du canal cylindrique soit maintenue, en cours de fonctionnement, à une température d'environ 20 à 30°C.

Le principe de fonctionnement de la torche est le suivant. Une tension de l'ordre de 50-100 V est établie entre les deux électrodes. Un gaz plasmagène 1 est injecté par exemple axialement, autour de la cathode au début de la chambre d'arc constituée par l'espace annulaire 6. L'ordre de grandeur du débit de ce gaz est typiquement de quelques dizaines de Nl/mn (le normolitre Nl représentant un litre du gaz dans des conditions normales de température et de pression). Le gaz plasmagène est habituellement constitué d'argon, d'hélium, d'hydrogène ou d'azote ou de leurs mélanges.

Selon des variantes, le gaz 1 peut être injecté radialement (comme illustré sur la figure 2a), en vortex (comme illustré sur la figure 2b) ou via un étranglement 9 (comme illustré sur la figure 2c).

Le gaz peut éventuellement subir une accélération lors de son passage dans la partie constrictée entre l'anode et la cathode (référence 9 sur la figure 2c).

Si l'on revient à la figure 1, le gaz s'engage ensuite dans la tuyère 4 constituée par l'anode.

Le plasma est créé à partir de l'émission thermoionique à la pointe de la cathode suivant la loi de Richardson-Dushman :

$$j_s = AT^2 \exp(-\varnothing_o/kT)$$

où j_s est le courant électronique de saturation, A une constante, $\varnothing_o$ le potentiel d'extraction des électrons de la cathode (ce potentiel est abaissé par rapport à celui d'une cathode en tungstène pur, du fait du dopage en thorium), k la constante de Boltzmann et T la température absolue de la pointe de la cathode.

Du fait de l'écoulement du gaz dans la tuyère, une colonne d'arc se développe entre l'extrémité de la cathode et les parois refroidies de l'anode.

Pour qu'il y ait conduction électrique, la température des gaz plasmagènes classiques (Ar, H_2, N_2) et de leur mélange doit être supérieure à environ 7000K. Pour l'hélium pur, elle doit atteindre 13000 K, mais pour les mélanges Ar-He utilisés (moins de 70% en volume d'hélium) elle est d'environ 7000K. La dimension de la colonne de plasma dépend alors essentiellement des échanges thermiques entre la paroi refroidie de l'anode et la colonne de plasma, c'est-à-dire du diamètre du canal cylindrique de la tuyère et de la conductivité thermique moyenne intégrée des gaz plasmagènes.

Du point de vue de l'écoulement du gaz, on peut distinguer entre plusieurs zones (repérées par les références 7, 8, 10, 11, 12 sur la figure 1). D'abord, au voisinage de l'extrémité de la cathode (zone 7) suivant les débits de gaz plasmagène, leur nature, le diamètre de l'anode et la taille de la chambre d'arc, se produisent des mouvements tourbillonnaires entraînant les couches les plus externes de la colonne, couches qui sont les plus froides, vers l'intérieur de la colonne, chassant ainsi les couches les plus "chaudes" vers l'extérieur.

Puis, du fait de la création de la colonne de plasma à partir de la pointe de la cathode, de la forte vitesse des gaz plasmagènes dans la colonne, cette dernière subit une expansion plus ou moins importante en fonction du refroidissement de sa périphérie par l'écoulement de gaz plasmagène froid et par les parois de la tuyère (zone 8 sur la figure 1). Dès que la colonne a pénétré dans le canal cylindrique de la tuyère, elle se stabilise du fait de l'existence de la couche limite froide 3 (en abrégé :CLF) au voisinage de la paroi de la tuyère (zone 10 de la figure 1). Mais, lorsque la couche limite froide au voisinage de cette paroi a été suffisamment chauffée par la couche limite chaude 5 (CLC) entourant la colonne de plasma, la stabilisation de la colonne diminue et de petites instabilités se créent en périphérie jusqu'à ce que l'une d'elles soit suffisamment proche de la paroi de l'anode pour qu'il y ait disruption et que l'arc vienne s'accrocher à l'anode. La colonne d'arc 13 permettant l'accrochage de l'arc à l'anode 4 se déplace alors vers l'aval du fait de la force de traînée F_t du gaz relativement froid passant en périphérie 15 de la colonne d'arc (au voisinage de la paroi anodique) et des forces magnétohydrodynamiques. En fait, le pied d'arc à l'anode reste accroché et c'est le terminus de l'arc (repéré par la référence 21 sur la figure 1) (raccordement colonne d'accrochage, colonne d'arc) qui se déplace.

Du fait des instabilités de la colonne d'arc et de l'augmentation de la tension dans la colonne d'accrochage de l'arc de par son allongement, une disruption se produit alors entre la colonne d'arc 13 et l'anode 4 (l'arc "cherche" l'énergie minimale dissipée pour se maintenir) et un nouveau point d'accrochage 19 se produit à l'anode. La fréquence de dé-

placement du pied d'arc à l'anode varie de 1kHz à 8kHz environ suivant la nature des gaz plasmagènes, le diamètre de l'anode et le courant d'arc. Ce sont ces disruptions permanentes qui permettent à l'anode de "survivre" aux flux thermiques imposés au pied d'arc (de 10^{10} à 10^{12}W/m^2). Après la zone d'accrochage 11 de l'arc, un plasma en extinction 12 subsiste pour former le jet à la sortie de la tuyère grâce aux recombinaisons ions-électrons et atomes-atomes exothermiques (refroidissement du plasma). Du fait des fluctuations du pied d'arc, correspondant à des fluctuations de puissance dissipée, le jet ainsi produit fluctue à la même fréquence que le pied d'arc en longueur et diamètre.

Pour effectuer un dépôt par projection sur un substrat S, disposé de 80 à 120 mm de la sortie de tuyère, le matériau à déposer est injecté sous forme de poudre dans le jet de plasma (en aval du pied d'arc) afin d'y être accéléré et fondu. L'injection se fait par le bas de la tuyère, par un orifice 14 (figure 1).

Les propriétés des dépôts réalisés dépendent notamment de la température et de la vitesse des particules à l'impact sur le substrat. Les particules doivent en effet s'écraser sur le substrat dans un état fondu ou semi-fondu. Si la vitesse des particules est trop élevée, leur temps de séjour dans le jet est trop faible pour que le coeur des particules puisse atteindre un état de fusion suffisant. Par contre, si la vitesse diminue de façon trop sensible, l'étalement des particules sur le substrat n'est pas de bonne qualité.

Les torches connues selon l'art antérieur privilégient les procédés de projection avec vitesse élevée des particules, ce qui nécessite l'utilisation de granulométries faibles (<44µm) pour assurer la fusion.

De plus, avec les torches de l'art antérieur, les possibilités de réglage des paramètres importants de fonctionnement sont limitées. Par exemple, pour le mélange plasmagène Ar-H_2 (20-25% en vol.), qui est le plus utilisé, le courant d'arc peut varier entre 400 et 700 A et le débit de gaz plasmagène entre 40 et 70 Nl/mn pour une tuyère de 6 mm de diamètre, 50 à 80 Nl/mn pour une tuyère de 7 mm et 60 à 100 Nl/mn pour une tuyère de 8 mm.

La puissance de ces torches est généralement comprise, suivant les gaz plasmagènes utilisés, entre 25 et 50 kW. Des puissances supérieures, 60 à 80 kW peuvent également être atteintes, au prix d'un accroissement du diamètre de la tuyère et du débit de gaz plasmagène (par exemple 100 à 125 Nl/mn avec un mélange Ar-H_2 25% en volume et une tuyère de 8 mm de diamètre). De telles puissances accroissent notablement la vitesse du jet de plasma et réduisent le temps de séjour des particules.

En outre, les différents paramètres des torches classiques ne peuvent varier indépendamment. Ainsi, si on veut passer, par exemple, d'une tuyère de 6 mm de diamètre dans laquelle le débit des gaz est d'environ 40 Nl/mn à une tuyère de 8 mm de diamètre pour réduire la vitesse, il faudra, de par la conception des torches actuelles, augmenter le débit de gaz à 60-70 Nl/mn, ce qui revient pratiquement à ne pas changer la vitesse des particules. Des débits inférieurs pour la tuyère de 8 mm sont possibles mais pour des durées relativement brèves incompatibles avec une durée de vie des électrodes normales dans des conditions de projection industrielle.

De plus, un accroissement du diamètre conduit à des instabilités de l'arc et du plasma.

Par conséquent, les limites de fonctionnement d'une tuyère classique de diamètre donné sont d'une part trop étroites et d'autre part trop rigides pour pouvoir contrôler indépendamment la vitesse des particules et leur état de fusion.

Les limites de fonctionnement décrites ci-dessus se retrouvent dans le cas des torches à arc transféré. Une telle torche est illustrée sur la figure 3 et comprend une cathode 16 de forme conique. Une partie 18 est destinée à recevoir la cathode 16 et présente en général une partie dont la paroi intérieure délimite un canal cylindrique dans la partie inférieure. Entre les deux est défini un espace annulaire 17 dans lequel est injecté le gaz plasmagène. Dans ce type de torche, c'est la pièce P sur laquelle le dépôt est à réaliser qui sert d'anode, le jet de plasma étant parcouru par le courant et le circuit électrique se refermant sur la pièce à traiter.

Avec ce second type de torche se posent les mêmes problèmes en termes de limite de fonctionnement. La striction du jet est assurée par l'écoulement gazeux plasmagène et, avec une injection parallèle à l'axe de la cathode, dès que le débit de gaz plasmagène est augmenté les recirculations au voisinage de la partie conique de cathode deviennent importantes et limitent la vitesse des gaz dans la colonne d'arc. Il devient alors difficile de faire varier la longueur de l'arc pour avoir un accrochage de type diffus à l'anode, cette longueur étant déterminée par la vitesse des gaz dans la colonne d'arc.

Exposé de l'invention

La présente invention a justement pour but de répondre à ces problèmes.

Plus précisément, elle vise à proposer une torche à plasma d'arc permettant un fonctionnement stable du plasma pour de forts diamètres de tuyère (tout en gardant de faibles débits de gaz et une forte intensité) et permettant un contrôle indépendant de la vitesse des particules et de leur état de fusion.

Le demandeur a découvert de façon surprenante que ces problèmes peuvent être résolus en accroissant l'accélération du gaz plasmagène au voisinage de la pointe de cathode lors de son passage entre la paroi conique de la cathode et la paroi conique de l'anode alors prolongée presque jusqu'à l'extrémité de la cathode, de façon à supprimer les turbulences, au voisinage de l'extrémité de la cathode. Il existe alors toujours une couche limite froide, au voisinage de la paroi refroidie de l'anode, mais il n'y a plus de recirculation, c'est-à-dire de mouvement permettant à une couche

froide de revenir vers l'amont de la pointe de la cathode.

Ceci a pour conséquence une meilleure stabilisation de la colonne de plasma dans la tuyère, et l'accrochage se fait de façon plus homogène sur toute la périphérie de la tuyère.

L'effet d'accroissement de l'accélération du gaz est obtenu par la structure géométrique de l'anode et de la cathode dans leur partie conique respective. Cette géométrie doit être telle que le gaz froid est accéléré avec une forte composante parallèle à la pente de la pointe de cathode entre les deux parois coniques et vient "gainer" le jet cathodique dès son départ de la pointe de cathode et jusqu'à son entrée dans la tuyère. Ce gainage est pratiquement indépendant du diamètre de la tuyère, ce qui explique le découplage des différents paramètres par rapport à ce diamètre.

De façon plus précise, l'invention a donc pour objet une torche à plasma d'arc comprenant :

- une cathode refroidie à extrémité conique, d'angle au sommet α, de diamètre D à la base,
- une anode refroidie comportant une paroi intérieure en forme d'un tronc de cône dont la section définit l'entrée d'une tuyère de forme cylindrique,

caractérisé en ce que la paroi intérieure de l'anode est, dans sa partie conique, parallèle à l'extrémité conique de la cathode, à une distance d de celle-ci et sur une longueur l_g et en ce que l'angle α, le diamètre D, la distance d et la longueur l_g sont tels qu'un gaz plasmagène injecté dans la torche est accéléré entre les deux parois coniques de façon suffisante pour créer un gainage gazeux de la colonne d'arc dès que cette dernière est formée à la pointe de la cathode.

Avec un tel dispositif, il a été possible, notamment, d'obtenir des vitesses de particules d'alumine fondue broyée (diamètre compris entre 45 μm et 22 μm) comprises entre 300 m/s (tuyère de 6 mm de diamètre interne) et 80 m/s (tuyère de 11 mm de diamètre interne) avec un gaz plasmagène Ar-H_2 (25% vol. H_2).

Une telle torche peut être utilisée en combinaison avec un prolongateur de tuyère.

Avec un tel prolongateur, la vitesse des particules est certes accrue jusqu'à 20% mais en partant d'une vitesse beaucoup plus faible qu'avec une torche classique, ce qui permet d'éviter un trop fort écrasement entraînant des particules déchiquetées, voire explosées, réduisant la qualité des dépôts.

Selon une autre forme de l'invention, la torche peut fonctionner en mode transféré, sans tuyère, avec une très bonne stabilité de l'arc. Le jet de plasma est alors entièrement parcouru par le courant, le circuit électrique se refermant sur la pièce à traiter, qui joue le rôle d'anode extérieure.

Selon cet autre mode, la torche à plasma d'arc comprend :

- une cathode refroidie à extrémité conique d'angle au sommet α' et de diamètre D' à la base,
- une pièce destinée à recevoir la cathode et comportant une paroi intérieure en forme de tronc de cône,

caractérisée en ce que la paroi intérieure de la pièce est, dans sa partie conique, parallèle à l'extrémité conique de la cathode, à une distance d' de celle-ci et sur une longueur l'_g, et en ce que l'angle α', le diamètre D', la distance d' et la longueur l'_g sont tels qu'un gaz plasmagène injecté dans la torche est accéléré entre les deux parois coniques de façon suffisante pour créer un gainage gazeux de toute la colonne de plasma située entre l'extrémité de la cathode et une surface à traiter (prise comme anode).

Avec une telle géométrie, on peut atteindre un allongement de l'arc avec un accrochage de type diffus à l'anode en lui gardant une bonne stabilité même à faible débit de gaz.

L'angle au sommet de l'extrémité conique de la cathode peut être compris entre 20° et 60°, le diamètre D' entre 8mm et 14mm, d' étant inférieure à 1,2 mm.

De préférence, d' est supérieure à 0,75 mm.

D'autres modes de réalisation apparaissent dans les revendications dépendantes.

Brève description des figures

De toute façon, les caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront mieux à la lumière de la description qui va suivre. Cette description porte sur les exemples de réalisation, donnés à titre explicatif et non limitatif, en se référant à des dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1, déjà décrite, représente schématiquement une torche à plasma selon l'art antérieur, avec différentes chambres d'arc,
- les figures 2a à 2c, déjà décrites, illustrent différentes formes possibles pour la chambre d'arc,
- la figure 3 représente une coupe schématique d'une torche à plasma à arc transféré selon l'art antérieur,
- la figure 4 représente une torche à plasma selon l'invention, vue en coupe,
- les figures 5a et 5b représentent une tuyère d'une torche plasma équipée d'un prolongateur,
- la figure 6 représente une torche à plasma à arc transféré selon l'invention,

- les figures 7a et 7b représentent l'évolution radiale de la température pour une torche classique avec une tuyère de 7mm de diamètre et une torche SGG avec une tuyère de 10mm de diamètre selon l'invention, à 2mm (figure 7a) et à 30 mm (figure 7b) de la sortie de la tuyère,
- les figures 8a et 8b représentent la distribution normalisée radiale de la vitesse 2 mm après la sortie de tuyère, pour une torche classique avec une tuyère de 7mm de diamètre (figure 8a) et une torche selon l'invention avec une tuyère de 10mm de diamètre (figure 8b),
- les figures 9a et 9b représentent les distributions radiales de vitesse et de température de surface de particules d'alumine injectées dans une torche classique de diamètre de tuyère 7mm et dans une torche SGG de diamètre de tuyère 10mm,
- les figures 10a et 10b représentent des lamelles écrasées obtenues avec des particules d'alumine pour une torche SGG de diamètre de tuyère de 10mm (figure 10a) et une torche classique de diamètre de tuyère 7mm (figure 10b).

Description détaillée de modes de réalisation de l'invention

La figure 4 est un schéma représentant la section d'une torche à plasma selon l'invention.

Sur cette figure, la référence 20 désigne une cathode de diamètre D dont l'extrémité est une pointe, par exemple en tungstène thorié en forme de cône d'angle au sommet α et de diamètre D_1. Une anode 22 sert de tuyère, est de préférence constituée de cuivre électrolytique et a une forme délimitant sans sa partie centrale un tronc de cône, et dans sa partie inférieure un canal cylindrique 24 de diamètre Ø. En fait, la partie inférieure 28 du tronc de cône de l'anode définit l'entrée de la tuyère. La partie supérieure de l'anode présente un alésage cylindrique destiné à recevoir la cathode 20, et définit avec cette dernière un espace annulaire 26 dans lequel est injecté le gaz plasmagène.

Les parois coniques de la cathode et de l'anode sont parallèles entre elles, à une distance d l'une de l'autre. De même, dans sa partie supérieure, l'anode et la cathode seront disposées, de façon préférée, parallèlement entre elles, à une distance d_1 l'une de l'autre.

La longueur l_g sur laquelle les deux parois coniques sont parallèles définit la longueur de guidage du gaz plasmagène, c'est-à-dire la longueur sur laquelle ce gaz va être accéléré entre les deux parois. Des considérations géométriques simples permettent de voir que l_g dépend de α, de D et de Ø.

Ainsi, à α et Ø fixés, un diamètre D large permet d'accroître la longueur de guidage du gaz. Accessoirement, un fort diamètre D permet le bon centrage de la cathode 20 par rapport à l'anode 22 ainsi que la possibilité d'utiliser des courants d'arc jusqu'à 1000 A en Ar-He et 850 A en Ar-H_2.

Les paramètres essentiels déterminant l'accélération étant l'angle au sommet α, le diamètre D et la distance d entre les deux parois coniques, on les choisit de telle façon que l'accélération radiale du gaz entre les parois des parties coniques respectives de l'anode et de la cathode soit suffisante pour que, dès l'arrivée à l'entrée de la tuyère, le gaz froid vienne gainer le jet cathodique. Ceci a pour conséquence que les turbulence sont supprimées dans la zone supérieure de la tuyère, et évite ainsi toute recirculation du gaz au voisinage de la pointe de la cathode, au contraire de ce qui se passe dans les torches classiques.

Ce phénomène de gainage est indépendant du diamètre Ø de la tuyère. Bien sûr, celui-ci doit pouvoir permettre une longueur l_g d'accélération suffisante, et ne devra pas excéder 10 mm. Mais, sur toute la plage de valeurs 3 mm-10 mm, le phénomène de gainage se produit. De ce fait, on atteint le découplage des différents paramètres de fonctionnement de la torche par rapport au diamètre Ø.

Notons qu'avec ce type de torche il est préférable d'injecter les gaz axialement le long de la partie cylindrique 26 de la cathode.

Avec la géométrie définie ci-dessus, on peut modifier le diamètre des tuyères, de 3 à 10 mm, indépendamment du gaz plasmagène. Ceci revient à faire varier la vitesse moyenne de l'écoulement dans une proportion de pratiquement 1 à 4 pour un même débit et une même composition de gaz plasmagène et une même intensité de l'arc.

La torche peut alors fonctionner avec une tuyère de grand diamètre pour des débits de gaz faibles. La vitesse du gaz plasma est donc beaucoup plus faible que dans les torches classiques. Pour l'utilisation en projection, la vitesse des poudres est beaucoup plus faible et le temps de séjour plus grand. Ceci permet, avec des gaz moins conducteurs du point de vue thermique, d'atteindre le chauffage au coeur du grain avec moins de vaporisation superficielle, notamment lorsque ce dernier a une faible conductivité thermique.

En particulier, on peut choisir l'angle α entre 30° et 60° (par exemple : 35°, 45°, 55°) et le diamètre D entre 8mm et 16mm (par exemple : 10mm, 12mm, 14mm). La distance d sera de préférence inférieure à 1,2 mm et de préférence supérieure à 0,75mm (par exemple 0,8mm ; 0,9mm ; 1mm ; 1,1mm). Des problèmes technologiques de centrage compliquent la torche aux plus faibles distances et, aux plus fortes distances, le gainage de l'arc n'est pas suffisant.

Les valeurs de α et de D dépendent du courant d'arc utilisé. La valeur de α doit être de préférence adaptée au maintien d'une petite tache en fusion à l'extrémité de la pointe de la cathode. Si le courant d'arc augmente, l'angle au sommet doit être de préférence augmenté afin d'éviter la surchauffe de l'extrémité de la cathode. Il est également raisonnable d'accroître D.

Ainsi, il a été réalisé une torche ayant les paramètres suivants :

- D = 14 mm et D_1=10 mm. Ces diamètres permettent d'assurer une longueur de guidage suffisante du gaz, et un fonctionnement jusqu'à 800 A en Ar-He et 650 A en Ar-H_2,
- α = 40° et D_1 = 10 mm, aux conditions usuelles de projection (courant de 400 à 600 A et mélange Ar-H_2), ces valeurs de D1 et α permettent d'assurer un équilibre thermique convenable de la pointe de la cathode, c'est-à-dire d'y maintenir une petite tache en fusion de quelques dixièmes de mm^2,
- d_1 = 2 mm,
- 0,75 mm ≤ d ≤ 1,2 mm,
- 3 mm ≤ Ø ≤ 10 mm.

D'autres variantes peuvent être obtenues pour des valeurs différentes de certains paramètres. Le problème est alors de savoir si le jeu de paramètres proposés permet d'atteindre le régime avec stabilisation par gainage gazeux (ou encore, régime "SGG" en abrégé). Les exemples comparatifs donnés à la fin de cette description montrent qu'on peut, par de simples essais, contrôler si on est en présence de ce régime SGG, ou pas.

A la base de la tuyère, du côté opposé à la cathode, se trouve une arrivée d'injection 30 d'un gaz porteur des poudres à déposer.

La tuyère peut également comporter, en face de l'arrivée 30 une autre arrivée 32 de même diamètre que l'arrivée 30 pour un gaz de compensation de même débit et de même nature que le gaz porteur. Cette injection de gaz de compensation, simultanée à l'injection du gaz porteur, permet de ne pas déstabiliser l'arc en sortie de tuyère et d'équilibrer l'influence du gaz porteur. Cette injection symétrique de gaz favorise également une trajectoire des poudres injectées plus proche de l'axe de la tuyère.

On peut prolonger la tuyère par un prolongateur 34, ainsi qu'illustré sur les figures 5a et 5b.

Le prolongateur est constitué d'un cône ayant un profil droit (ou une forme plus complexe) en cuivre refroidi par eau sous pression (1 à 2 MPa) placé dans le prolongement de la tuyère 22. Un cône différent s'adapte à chaque diamètre de tuyère.

L'angle du sommet du cône est compris entre 6 et 12° suivant le diamètre de la tuyère, le débit et la nature du gaz plasmagène, la puissance dissipée. La longueur du prolongateur peut varier de 20 à 50 mm.

L'injection de poudre par l'arrivée 30 peut alors être réalisée soit dans la tuyère 22 (figure 5a) soit dans le prolongateur 34 (voir figure 5b).

De même, si une injection de gaz de compensation a lieu, elle se fera soit dans la tuyère, soit dans le prolongateur.

Comme nous l'avons déjà signalé, le prolongateur évite en grande partie les inconvénients liés à la présence de l'air ambiant autour du jet de plasma, soit :

- un refroidissement (et raccourcissement) du plasma par suite du pompage puis de la dissociation de l'oxygène de l'air,
- une oxydation importante malgré un temps de séjour faible, dans le cas de métaux notamment.

Le principal avantage qu'il y a d'utiliser un prolongateur avec la torche SGG est que la vitesse initiale des particules pouvant être beaucoup plus faible qu'avec une torche classique, l'accélération des particules dans le prolongateur n'a pas les conséquences néfastes qu'elle a avec les torches classiques.

L'utilisation d'un prolongateur permet en outre de réduire considérablement le pompage de l'atmosphère ambiante, d'augmenter corrélativement la longueur du jet de plasma et donc d'accroître le temps de séjour des particules, sous réserve de l'utilisation d'une torche à vitesse lente (ce qui est le cas de la présente invention).

Ainsi, avec la torche selon l'invention, suivie d'un prolongateur, on peut améliorer notablement le transfert thermique tout en utilisant des gaz à plus faible conductivité thermique permettant un chauffage plus uniforme de particules mauvaises conductrices de la chaleur et une diminution de l'évaporation de surface, ce qui entraîne généralement une augmentation du rendement pondéral.

L'invention concerne également les torches à plasma à arc transféré.

Une telle torche est illustrée sur la figure 6, où les références 40, 42, 46 désignent respectivement :

- une cathode 40 de diamètre D', dont la pointe (par exemple en tungstène thorié) est de forme conique avec un angle α' au sommet et de diamètre D'_1,
- une pièce 42, constituée par exemple de cuivre, et destinée à recevoir la cathode 40, et qui comporte une paroi intérieure en forme de cône dans sa partie inférieure, parallèle à la paroi conique de la cathode 40, et située à une distance d' de celle-ci,
- un espace annulaire 46 défini par la paroi de la cathode 40 d'une part et la paroi d'un alésage cylindrique pratiqué dans la pièce 42. C'est dans cet espace qu'est injecté le gaz plasmagène 48 (généralement axialement, c'est-à-dire

parallèlement à l'axe de la cathode).

La longueur l'_g définit la longueur d'accélération du gaz plasmagène. l'_g dépend de α', D' et Ø' (Ø' est le diamètre de la section du tronc de cône qui définit la paroi intérieure de la pièce 42. Il peut être compris entre 6 et 10mm).

Les mêmes considérations que celles développées pour la torche à tuyère guideront le choix des valeurs numériques des différents paramètres.

En particulier, on peut choisir l'angle α' entre 20° et 60°, le diamètre D' entre 8 et 14mm, la distance d' entre 0,75mm et 1,2mm.

Signalons de plus que plus le courant d'arc augmente, plus α' et D' doivent être importants.

Ainsi, il a été réalisé une torche à arc transféré avec :

- D' = 8mm,
- D'_1 = 6mm,
- α' = 30°,
- d'_1 = 2mm,
- d' = 0,75mm,
- l'_g = 5mm,
- Ø' = 7mm.

Cette torche fonctionne jusqu'à 300 A, avec un mélange Ar-H_2 (25% vol.).

Pour des intensités de courant supérieures, le diamètre D'_1 de la cathode peut être augmenté, par exemple jusqu'à 10 mm pour des intensités de 600A et plus.

Avec ce type de torche à plasma à arc transféré, le jet cathodique est stabilisé et protégé de l'air ambiant par le gaz. Il peut donc rester stable pour une distance anode-cathode de 2 à 30 mm dans l'air.

Deux torches à plasma fonctionnant avec un débit de 45 Nl/mm d'argon et 15 Nl/mm d'hydrogène ont été comparées :

- l'une de structure classique, c'est-à-dire sans gainage gazeux avec un diamètre de tuyère de 7 mm, un courant d'arc de 622 A, une tension de 62 V et un rendement thermique de 58%,
- l'autre étant une torche selon l'invention, c'est-à-dire à gainage gazeux, de diamètre de tuyère égal à 10 mm, de courant d'arc égal à 632 A pour une tension de 61 V et un rendement thermique de 53%.

Les figures 7a et 7b représentent respectivement l'évolution radiale des températures stationnaires (mesurées par spectroscopie d'émission à partir de la raie 727,2 nm d'ArI) à 2 et à 30 mm de la sortie des deux tuyères.

Au voisinage de la tuyère la distribution radiale de température est plus large de près de 2 mm avec la tuyère SGG de diamètre 10 mm alors que les maximum de température sont quasi-identiques. 30 mm en aval de la sortie de tuyère le jet de la tuyère de diamètre 7 mm est plus évasé, probablement du fait de sa plus grande vitesse induisant un pompage plus grand. Avec la tuyère de 10 mm à gainage gazeux, la zone à haute température (T>10000 K) est plus large, ce qui améliore le transfert thermique vers les particules passant en périphérie du jet.

Les figures 8a et 8b montrent les distributions radiales de vitesse à 2 mm de la sortie de tuyère. Comme pour les températures, la distribution radiale de vitesse est beaucoup plus large avec la torche selon l'invention (tuyère de 10 mm et gainage gazeux, figure 8b), qu'avec la torche classique à tuyère de 7 mm de diamètre (figure 8a).

De plus, et ceci est capital, la vitesse maximale avec la tuyère selon l'invention n'est que de 770 m/s contre 2166 m/s avec la tuyère classique. Enfin, comme pour la distribution de température, le profil de vitesse est plus plat avec la tuyère de 10 mm, ce qui induit un traitement plus uniforme des particules.

L'effet de la torche selon l'invention, par rapport aux torches selon l'art antérieur, sur la vitesse et la température de surface des particules est illustré sur les figures 9a et 9b. Les particules considérées sont des particules d'alumine fondues broyées de taille comprise entre 22 µm et 45 µm.

Les mesures sont effectuées à 100 mm en aval de la sortie de tuyère. Dans les deux cas, le débit de gaz porteur d'argon m_{gp} (pour un injecteur de 1,8 mm de diamètre, sans injecteur à 180° avec contre débit) est ajusté pour obtenir une trajectoire moyenne identique (exemple pour Al_2O_3 fondu broyé : m_{gp}=5,5Nl/mn avec une tuyère classique de 7 mm, et m_{gp}=3,5 Nl/mn avec une tuyère de 10 mm selon l'invention).

On peut constater que :

- la vitesse maximale des particules est réduite de 100 m/s (soit 40%) avec la torche selon l'invention,
- le profil de vitesse obtenu est plus plat et plus large avec la torche selon l'invention,
- les températures de surface des particules sont pratiquement identiques, ce qui vraisemblablement correspond pour la torche de 10 mm à gainage gazeux à une propagation de chaleur plus faible.

On peut également étudier l'aspect des dépôts obtenus avec l'une et l'autre torches.

D'une façon générale, les lamelles écrasées sur des lames de verre ont des morphologies très différentes. Ainsi, elles peuvent avoir la forme :

(a) - de disque plans,
(b) - de disques avec bourrelet torique en périphérie,
(c) - de disques à profils hémisphériques ou granulaires,
(d) - de disques avec la périphérie déchiquetée,
(e) - de disques avec partie centrale hémisphérique et périphérie identique,
(f) - de lamelles en forme d'étoile avec ou sans discontinuité centrale.

Toutes ces formes dépendent de la vitesse et de la température d'impact des particules, mais aussi de la température et de la nature du substrat.

Pour des particules d'alumine de diamètre compris entre 45 et 22 µm, avec la tuyère classique de 7 mm, les lamelles sont principalement de type (d), (e) et (f) plus de très petites gouttelettes résultant de particules explosées. Par contre, la tuyère de diamètre 10 mm à gainage gazeux selon l'invention, en dépit de l'existence de lamelles de type (d) et (e), plus de 50% d'entre elles sont de type (a), (b) ou (c).

Par contre, avec les particules de diamètre compris entre 90 et 45 µm où la vitesse maximale ne dépasse pas 100 m/s avec la tuyère de diamètre 10 mm à gainage gazeux selon l'invention, la morphologie des lamelles est essentiellement de type (a, b, c) comme illustré sur la figure 10a ; elle est de type (d), (e), (f) pour les particules projetées avec la tuyère de 7 mm, comme illustré sur la figure 10b. Il faut également souligner qu'avec la tuyère de 7 mm ces grosses particules ne sont que partiellement fondues en dépit de la fragmentation en périphérie des lamelles.

Enfin, on peut comparer, dans les deux cas (tuyère classique de 7 mm, tuyère à gainage gazeux de 10 mm) les rendements massiques et la dureté Vickers des dépôts.

Le tableau I résume les résultats obtenus pour des particules de taille comprise entre 90 et 45 µm d'une part et par des particules de taille comprise entre 45 et 22 µm d'autre part.

TABLEAU I

Taille des particules (µm)	-90 + 45			
Diamètre tuyère (mm)	7		10	
Débit de gaz plasma Ar-H_2 (Nl/mn)	35/12	45/15	35/12	45/15
Rendement de dépôt (%)	44	37	67	60
Dureté Vickers HV_5	1125±60			1200±70
Taille des particules (µm)	-45 + 22			
Diamètre tuyère (mm)	7		10	
Débits gaz plasma Ar-H_2 (Nl/mn)	35/12	45/15	35/12	45/15
Rendement de dépôt (%)	62	65	71	74
Dureté Vickers HV_5		1040±90		1100±75

On peut constater qu'avec la tuyère de 10 mm selon l'invention, le rendement massique de dépôt est particulièrement amélioré, en particulier pour les poudres -90+45 µm. Lorsque le débit de gaz est réduit (vitesse d'écoulement plus lente) le rendement de dépôt est également amélioré et, dans les deux gammes granulométriques, la dureté Vickers des dépôts est également améliorée avec la tuyère de 10 mm, ce qui traduit une meilleure cohésion des dépôts.

On voit, comme il a été indiqué plus haut, que divers tests peuvent être proposés, qui permettent de décider si le jeu de paramètres géométriques choisis pour la torche permet ou non d'atteindre l'effet recherché, c'est-à-dire la stabilisation par gainage gazeux. On peut, par exemple, étudier l'aspect des dépôts obtenus, ou bien encore la distribution radiale des vitesses en sortie de tuyère.

Les torches SGG décrites ci-dessous peuvent avantageusement être utilisées dans les domaines suivants :

- projection de particules plus grosses qu'avec les torches classiques (par exemple de taille comprise entre 90µm et 45µm contre une gamme de tailles de 45µm à 22µm pour des particules d'alumine),
- projection de particules réfractaires en utilisant moins d'hydrogène, c'est-à-dire réduisant le phénomène de propagation de la chaleur, ce qui est particulièrement intéressant pour l'utilisation de poudres agglomérées,

- densification de poudres agglomérées,
- utilisation de prolongateur de tuyère pour limiter l'oxydation des métaux, des alliages métalliques et des cermets (avec pour ces derniers moins de rebond des particules de céramiques qui ne doivent pas être fondues lors de la projection de tels matériaux,
- fusion-refusion superficielle pour durcissement des surfaces,
- rechargement notamment à forte puissance (jusqu'à 60 à 80kW), le faible débit de gaz plasmagène nécessaire limitant considérablement l'effet de soufflage de la zone en fusion.

Revendications

1. Torche à plasma d'arc comprenant :

- une cathode (20) refroidie, de diamètre D, dont l'extrémité est une pointe conique d'angle au sommet α,
- une anode (22) refroidie comportant une paroi intérieure en forme de tronc de cône, dont la section définit l'entrée (28) d'une tuyère (24) de forme cylindrique,

caractérisée en ce que la paroi intérieure de l'anode (22) est, dans sa partie conique, parallèle à l'extrémité conique de la cathode (20), à une distance d de celle-ci et sur une longueur l_g, et en ce que l'angle α, le diamètre D, la distance d et la longueur l_g sont tels qu'un gaz plasmagène injecté dans la torche est accéléré entre les deux parois coniques, de façon suffisante pour créer un gainage gazeux de la colonne d'arc dès que cette dernière est formée à la pointe de la cathode.

2. Torche à plasma selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'angle α est compris entre 30° et 60°, le diamètre D entre 8mm et 14mm, la distance d étant inférieure à 1,2 mm.

3. Torche selon la revendication 2, caractérisée en ce que la distance d est supérieure à 0,75mm.

4. Torche selon la revendication 3, caractérisée en ce que α vaut environ 40° et D vaut environ 14 mm.

5. Torche selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que le diamètre de la tuyère est compris entre 3 et 10 mm.

6. Torche selon l'une des revendications précédentes, caractérisée en ce que la torche est équipée d'un prolongateur (34).

7. Torche à plasma d'arc comprenant :

- une cathode (40) refroidie de diamètre D', dont l'extrémité est une pointe conique d'angle au sommet α',
- une pièce (42) destinée à recevoir la cathode et comportant une paroi intérieure en forme de tronc de cône,

caractérisée en ce que la paroi intérieure de la pièce (42) est, dans sa partie conique, parallèle à l'extrémité conique de la cathode, à une distance d' de celle-ci et sur une longueur l'_g, et en ce que l'angle α', le diamètre D', la distance d' et la longueur l'_g sont tels qu'un gaz plasmagène injecté dans la torche est accéléré entre les deux parois coniques de façon suffisante pour créer un gainage gazeux de toute la colonne de plasma située entre l'extrémité de la cathode et une surface à traiter.

8. Torche à plasma d'arc selon la revendication 7, caractérisée en ce que l'angle α' est compris entre 20° et 60°, le diamètre D' entre 8mm et 14mm, la distance d' étant inférieure à 1,2 mm.

9. Torche à plasma selon la revendication 8, caractérisée en ce que d' est supérieur à 0,75mm.

10. Torche à plasma d'arc selon la revendication 8 ou 9, caractérisée en ce que α' vaut environ 30° et D' vaut environ 8 mm.

11. Torche à plasma d'arc selon l'une des revendications 7 à 10, caractérisée en ce que le diamètre Ø' de la section de la partie tronconique de la pièce (42) destinée à recevoir la cathode est compris entre 6 et 10 mm.

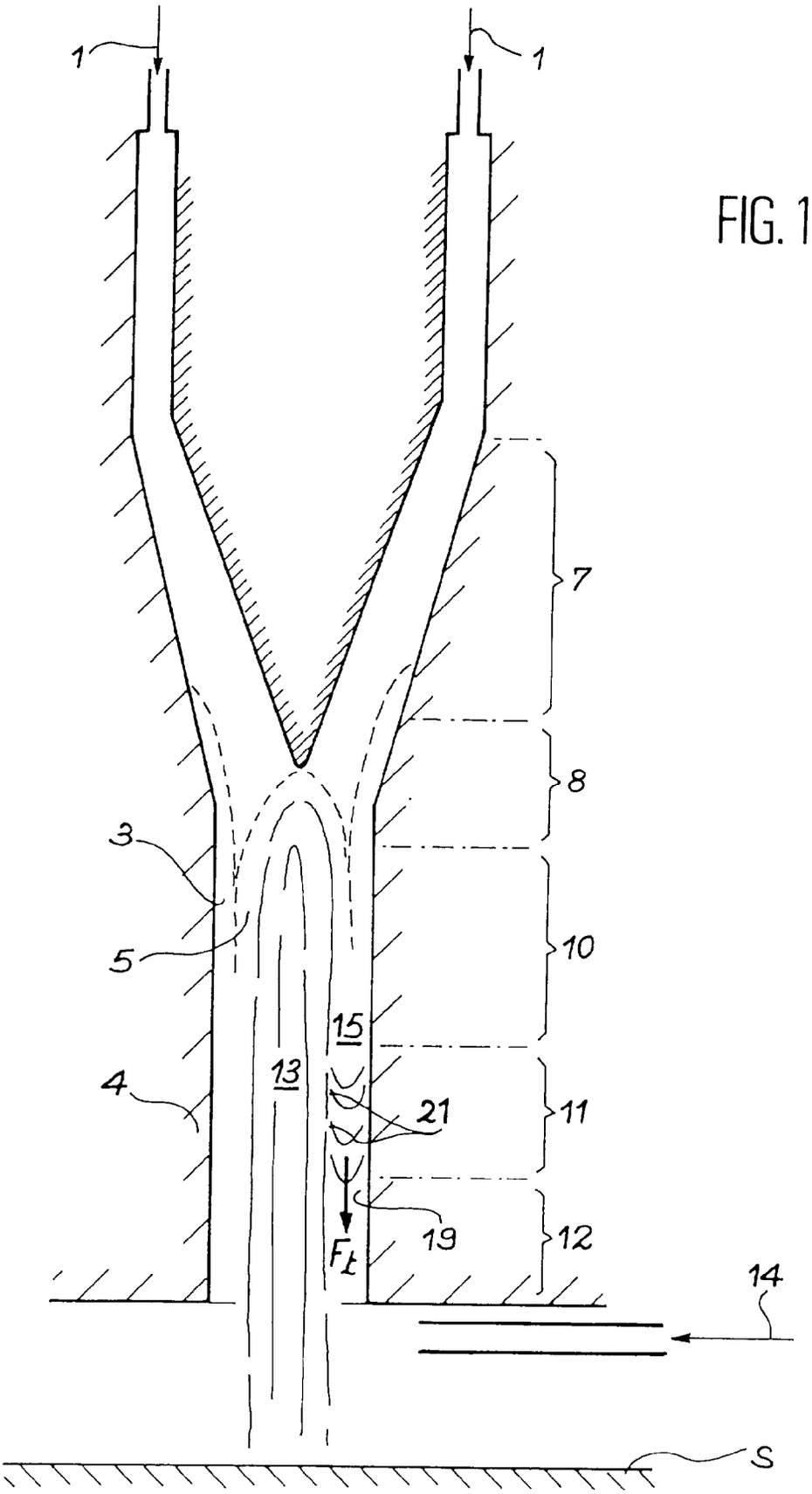


FIG. 1

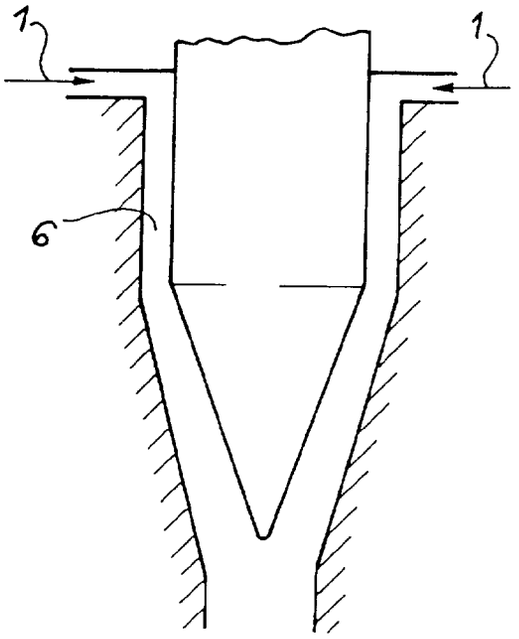


FIG. 2a

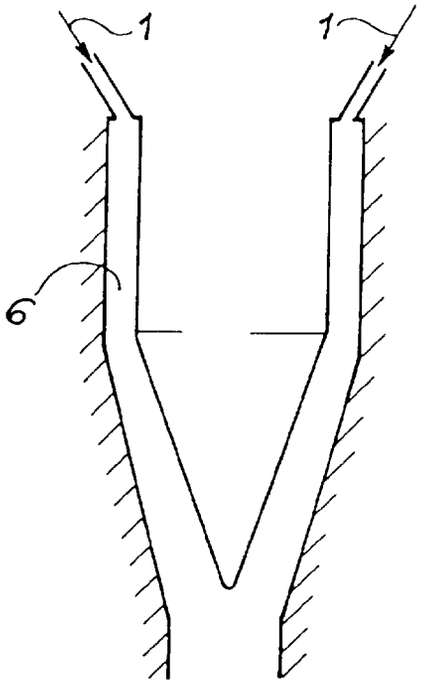


FIG. 2b

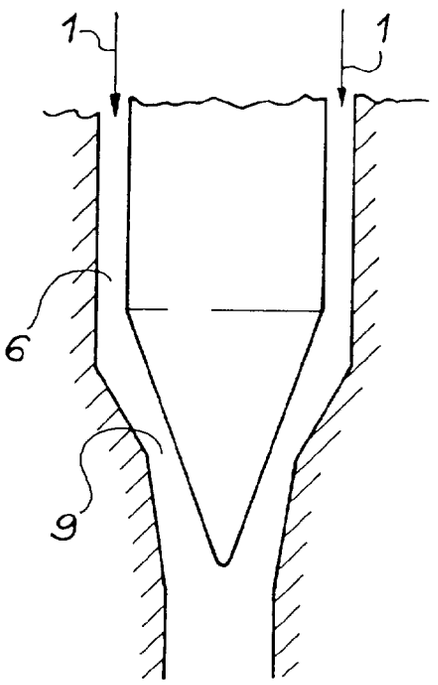


FIG. 2c

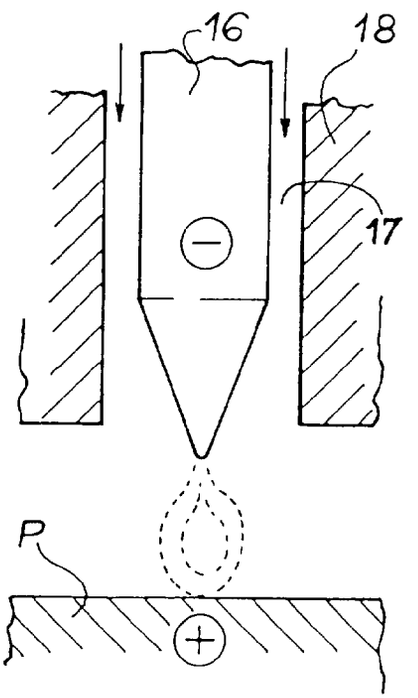


FIG. 3

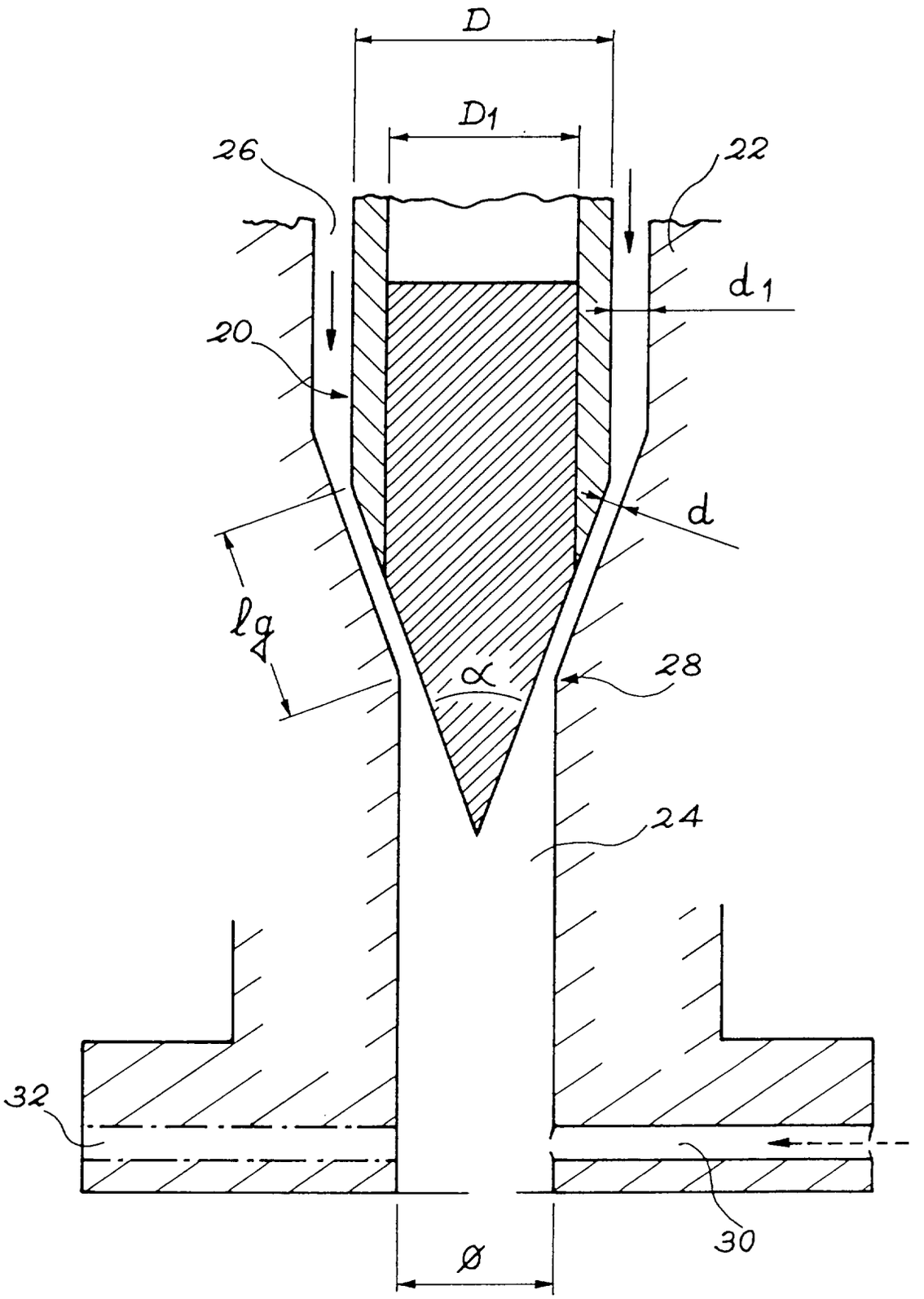


FIG. 4

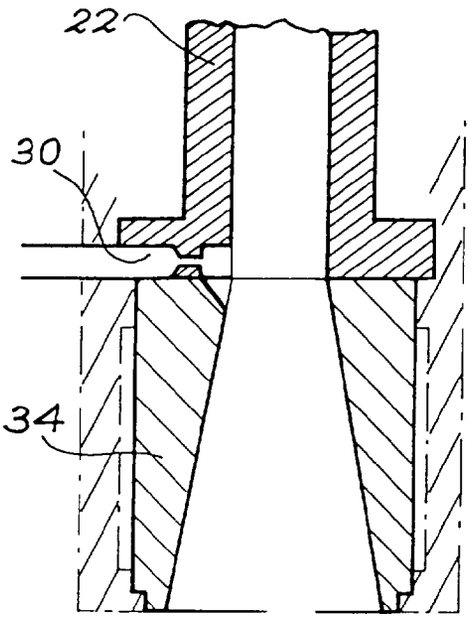


FIG. 5a

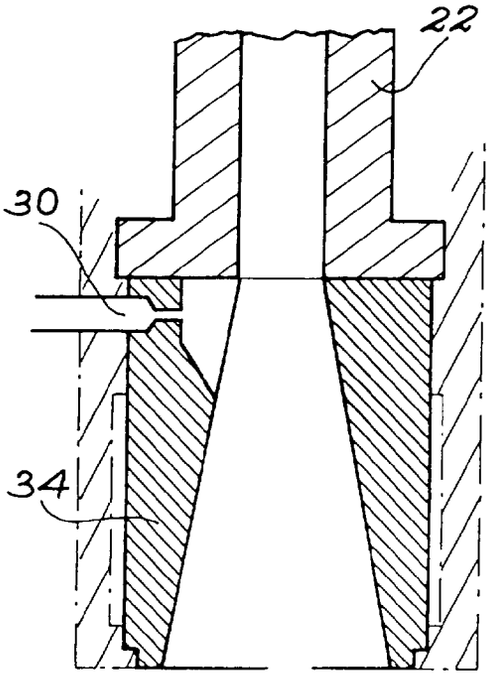


FIG. 5b

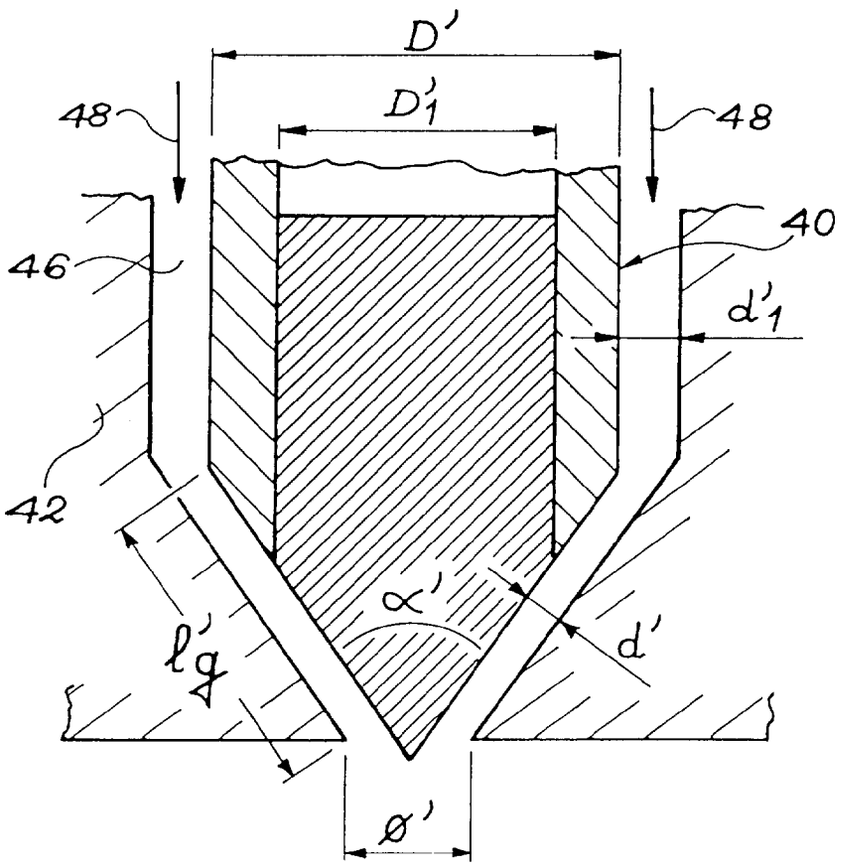


FIG. 6

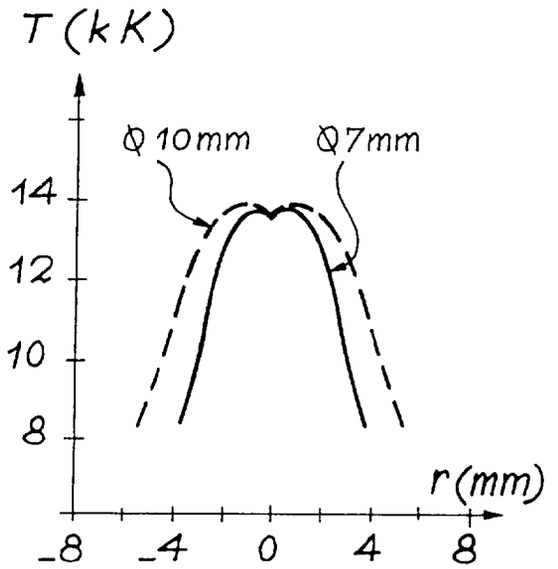


FIG. 7a

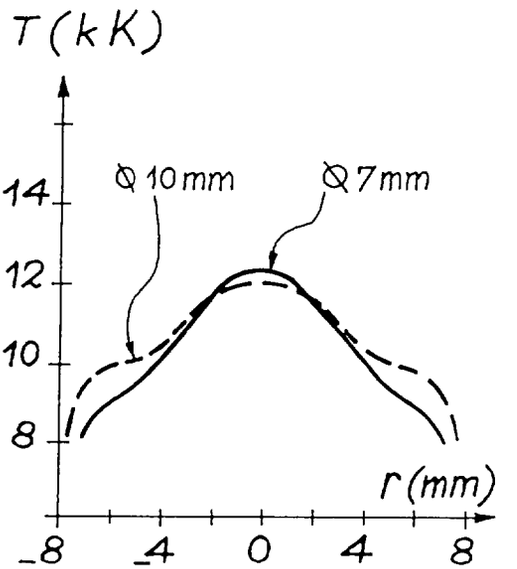


FIG. 7b

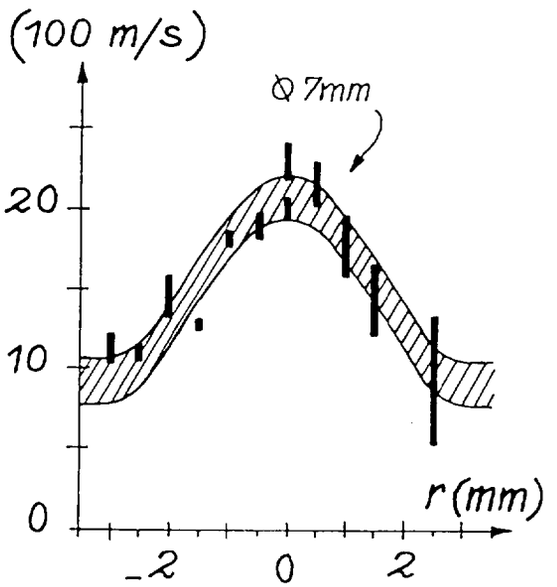


FIG. 8a

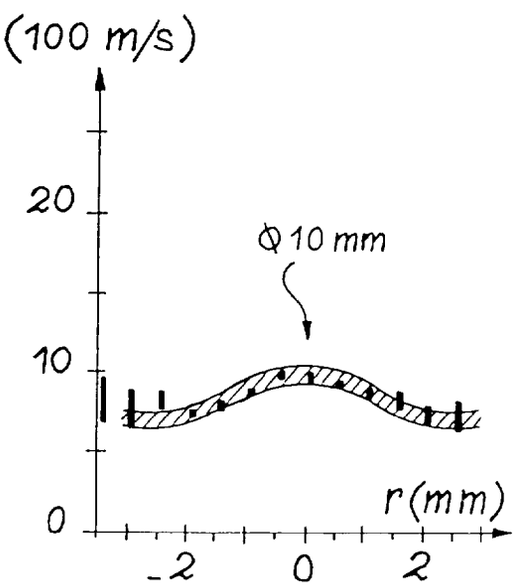


FIG. 8b

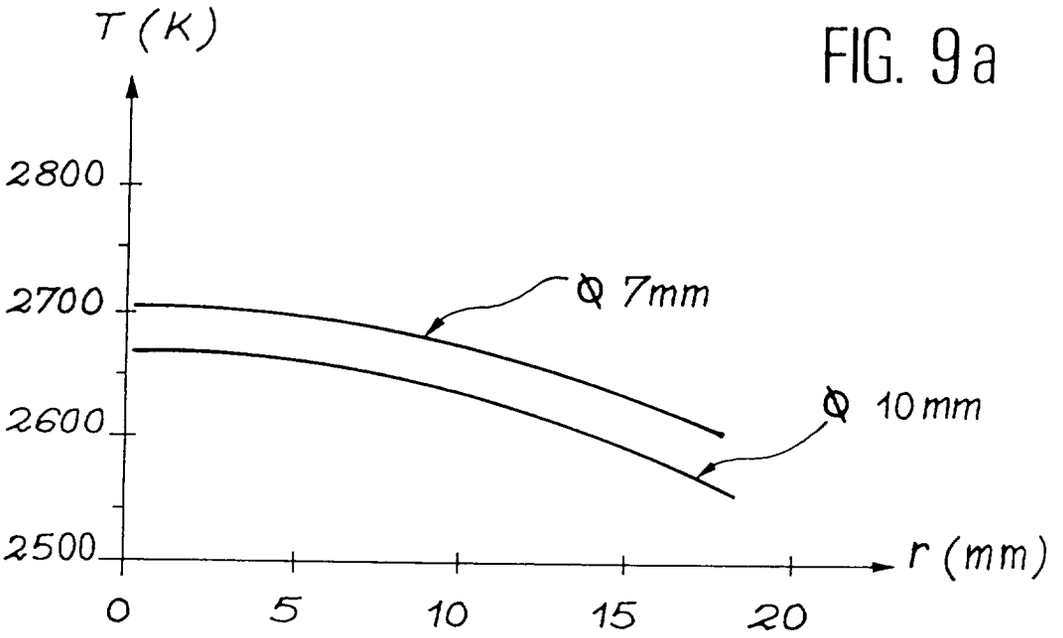

T (K)
2800
2700
2600
2500
Ø 7mm
Ø 10mm
r (mm)
0
5
10
15
20

FIG. 9a

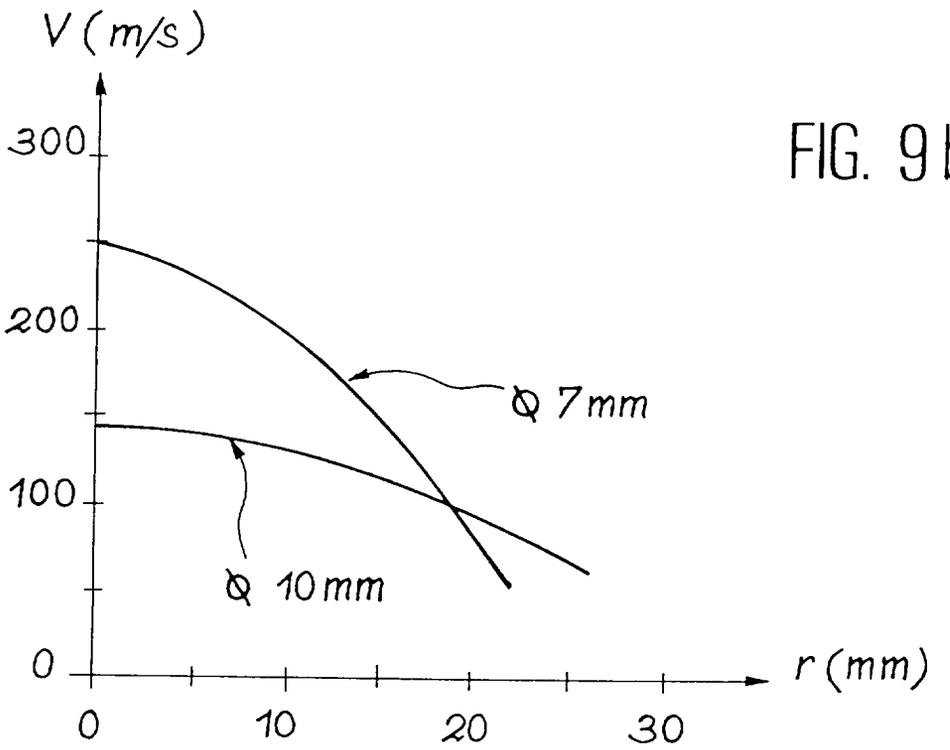

V (m/s)
300
200
100
0
Ø 7mm
Ø 10mm
r (mm)
0
10
20
30

FIG. 9b

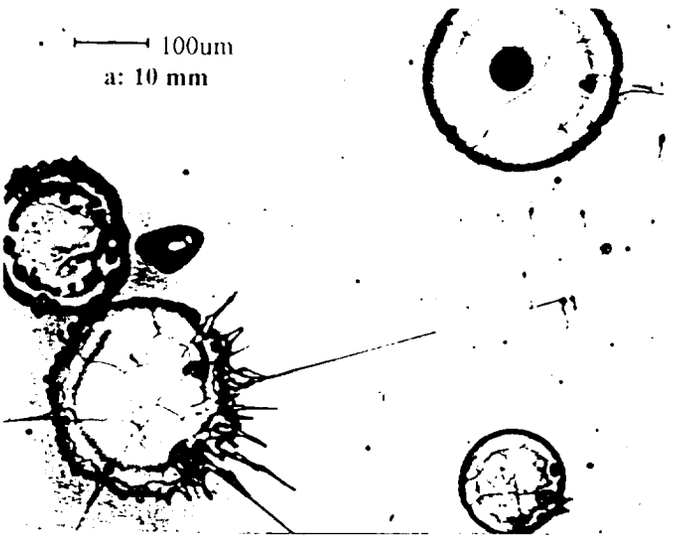


FIG. 10a

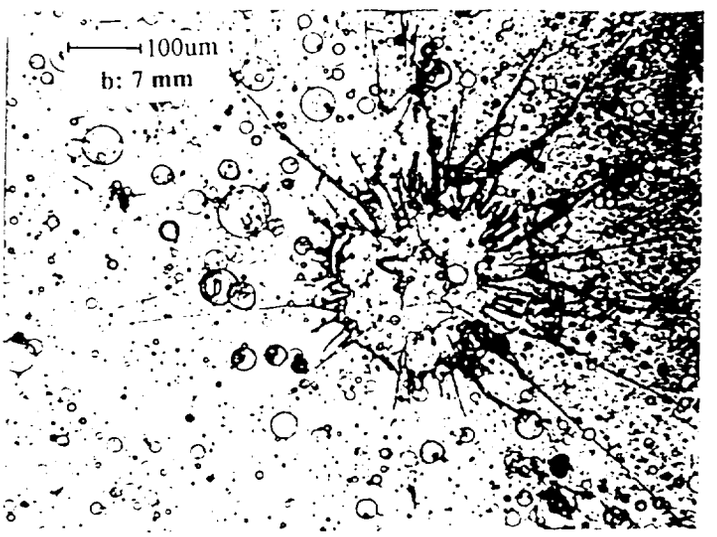


FIG. 10b

Office européen des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numero de la demande
EP 95 40 2218

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.Cl.6)
A	EP-A-0 134 961 (KRUPP GMBH) 27 Mars 1985 * page 5, ligne 13 - ligne 20 * * page 6, ligne 18 - ligne 24 * * page 7, ligne 28 - page 8, ligne 28 * * figure 1 * ---	1,2,4,8	H05H1/34
A	EP-A-0 106 091 (METCO INC) 25 Avril 1984 * page 9, ligne 32 - page 10, ligne 1 * * figure 1 * ---	2,3,8,9, 11	
A	US-A-3 591 759 (STAND MILLE) 6 Juillet 1971 * colonne 1, ligne 27 - ligne 37 * * colonne 2, ligne 36 - ligne 54 * * colonne 2, ligne 69 - colonne 3, ligne 11; figure 1 * ---	1,6	
A	DE-A-26 02 812 (VILLAMOS IPARI KUTATO INTEZET) 29 Juillet 1976 * page 7, alinéa 1; figure * ---	1,2,4,7, 10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.Cl.6)
A	GB-A-2 078 586 (N P K ZA KONTROLNO ZAVARACHNI) 13 Janvier 1982 * figure * -----	1	H05H

Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications

Lieu de la recherche	Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
LA HAYE	10 Janvier 1996	Capostagno, E

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

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)