



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

(11) Numéro de publication :

0 056 915
B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPÉEN

(45) Date de publication du fascicule du brevet :
25.07.84

(51) Int. Cl.³ : **H 05 B 6/22**

(21) Numéro de dépôt : **81401845.3**

(22) Date de dépôt : **20.11.81**

(54) **Dispositif de fusion par induction directe en cage froide avec confinement électromagnétique supplémentaire de la charge.**

(30) Priorité : **23.12.80 FR 8027320**

(43) Date de publication de la demande :
04.08.82 Bulletin 82/31

(45) Mention de la délivrance du brevet :
25.07.84 Bulletin 84/30

(84) Etats contractants désignés :
BE DE FR GB

(56) Documents cités :
DE-B- 1 147 714
FR-A- 1 508 992
FR-A- 2 397 251
GB-A- 1 221 909
US-A- 1 801 791
US-A- 4 215 738

(73) Titulaire : **SOCIETE D'APPLICATIONS DE LA PHYSIQUE MODERNE ET DE L'ELECTRONIQUE SAPHYMO-STEL 29, avenue Carnot F-91301 Massy (FR)**

(72) Inventeur : **Reboux, Jean THOMSON-CSF SCPI 173, bld Haussmann F-75360 Paris Cedex 08 (FR)**

(74) Mandataire : **Schmolka, Robert et al THOMSON-CSF SCPI 173, Bld Haussmann F-75379 Paris Cedex 08 (FR)**

EP 0 056 915 B1

Il est rappelé que : Dans un délai de neuf mois à compter de la date de publication de la mention de la délivrance du brevet européen toute personne peut faire opposition au brevet européen délivré, auprès de l'Office européen des brevets. L'opposition doit être formée par écrit et motivée. Elle n'est réputée formée qu'après paiement de la taxe d'opposition (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

L'invention concerne un dispositif de fusion par induction directe en cage froide, dite « autocreuset », avec confinement électromagnétique supplémentaire de la charge, afin de l'écartier de la paroi latérale intérieure de cette cage.

Des procédés et dispositifs de fusion ou fours par induction directe dans une cage froide ayant une paroi latérale constituée par un assemblage de tronçons tubulaires en matériau conducteur, isolés l'un de l'autre et, par conséquent, sensiblement transparente au champ magnétique alternatif engendré par un inducteur qui l'entoure sur au moins une partie de sa hauteur, sont bien connus et décrits, par exemple, dans les publications FR-A-1 492 063 (ou DE-B-1 615 195, GB-A-1 130 070 ou US-A-3 461 215 correspondantes), où le procédé est appliqué notamment à la fusion d'oxydes réfractaires ou de leurs mélanges qui ne sont pas conducteurs à froid, FR-A-2 036 418, où le procédé est appliqué notamment à l'élaboration de certains métaux à partir de leurs halogénures par calciothermie, par exemple, et FR-A-2 052 082, où le procédé est appliqué notamment à l'élaboration de certains métaux à partir de l'un de leurs oxydes par réduction directe au moyen d'un métal réducteur alcalin ou alcalino-terreux (tel que le calcium) et de son fluorure utilisé comme solvant, ainsi que dans la publication GB-A-1 221 909 qui en décrit une réalisation différente à l'aide d'un assemblage de tubes de section circulaire, utilisable pour faire fondre des charges conductrices à froid.

La charge à fondre est généralement introduite dans la cage froide dont le fond est obturé au moyen d'une plaque isolante réfractaire ou métallique creuse et refroidie, par le haut sous une forme pulvérulente ou granuleuse. Lorsqu'elle est constituée par un mélange de matériaux dont l'un au moins est isolant à froid, ce dernier s'agglomère, lors de la fusion, au voisinage de la paroi intérieure de la cage froide de façon à former une mince gaine ou pellicule électriquement isolante qui la recouvre. Par contre, lorsque la charge est métallique (c'est-à-dire en métal ou en alliages de métaux) et conductrice à froid, cette gaine formée au contact de la paroi froide est également conductrice et met les éléments isolés (segments en tube de cuivre) de la cage en court-circuit. Dans les deux cas précités, une partie assez notable de la chaleur engendrée par induction est transmise par conduction à la cage froide et évacuée en réchauffant le fluide qui y circule et dans le dernier cas, une partie importante du courant induit passe par la face interne de la paroi latérale de la cage froide mise en court-circuit par la charge conductrice.

Ces inconvénients pourraient être réduits par un confinement électromagnétique de la charge fondu qui est électriquement conductrice dans tous les cas, à l'aide d'un champ magnétique alternatif.

Le confinement électromagnétique d'une coulée de métal liquide au moyen d'un champ magnétique alternatif axial est connu en soi, par exemple, des publications GB-A 893 445, FR-A-1 509 962, 2 106 545, 2 160 281, 2 316 026 et 2 396 612. Dans ces dispositifs de confinement connus, le champ magnétique axial de confinement est engendré à l'aide d'un inducteur alimenté en courant alternatif, entourant coaxialement le creuset ou la buse véhiculant la coulée, sensiblement au niveau de son orifice inférieur.

Il a été également constaté (voir GB-A-1 221 909) que les courants induits dans les segments de la cage froide au niveau de l'inducteur, qui suivent la circonférence des éléments conducteurs isolés de la cage froide, exercent sur la partie fondue de la charge un effet de striction ou de confinement, grâce auquel elle décolle de la paroi intérieure de la cage froide. Un tel effet de répulsion se limite sensiblement à la zone entourée de l'inducteur de chauffage et consomme une bonne partie de l'énergie qui lui est fournie et qui est évacuée par le fluide de refroidissement parcourant la cage. L'adjonction d'un inducteur de confinement coaxial avec l'inducteur de chauffage présenterait des problèmes de couplage mutuel et d'un couplage insuffisant à la périphérie de la charge, dû au fait de la présence de la paroi latérale de la cage froide entre celle-ci et les inducteurs.

L'expérience a montré que, lorsque le matériau électrofondu a été retiré de la cage froide en forme de lingots obtenus par le déplacement axial (vers le bas) de la « sole » obturant son fond, (voir par exemple, FR-A-2 303 774), le lingot présente des irrégularités superficielles en forme de crêtes longitudinales, aux endroits des séparations entre les segments de la cage, où l'effet de refroidissement est moins efficace.

Un autre procédé de confinement électromagnétique a été décrit dans la publication DE-B-1 147 714, où l'on utilise pour le transfert ou le maintien en lévitation de corps en matériaux conducteurs liquides (coulée) ou solides, un ensemble de conducteurs parallèles qui les entourent à la manière d'une gaine tubulaire et qui sont parcourus de courants alternatifs de telle sorte que les courants dans les conducteurs voisins s'écoulent respectivement dans des sens opposés. Un procédé de confinement analogue a été décrit dans la publication FR-A-2 397 251.

Un four horizontal par induction directe avec lévitation électromagnétique de la charge en matériau conducteur solide a été décrit dans la publication FR-A-1 508 992, où un inducteur à trois brins longitudinaux (parallèles à l'axe horizontal) dont deux sont connectés en parallèle et dont l'un (l'inférieur) est connecté en série avec les autres pour former un berceau de lévitation, est entouré d'un inducteur monospire cylindrique ou solénoïdal qui assure le chauffage du corps métallique et concourt à son maintien en lévita-

tion, notamment lorsqu'il est en fusion. Un tel four horizontal sans creuset n'est pas utilisable avec des charges divisées (pulvérulentes ou granuleuses) et ne permet ni la coulée en continu, ni l'étirage des lingots ou des cristaux. En outre, sa charge maximale est limitée à quelques kilogrammes du fait de la force nécessaire à la lévitation qui s'oppose à la gravitation.

Un procédé et un dispositif de coulée dite « électromagnétique » de métaux et d'alliages fondus a été décrit dans la publication US-A-4 215 738, où la forme du lingot est déterminée à l'aide d'un inducteur monospire de confinement qui l'entoure de manière coaxiale et qui est parcouru d'un courant alternatif (voir publications FR-A-1 509 962 et 2 106 545 précitées, par exemple) et où des inducteurs de confinement supplémentaire en forme de serpentin, dits « anti-parallèles », sont disposés entre l'inducteur monospire principal et certaines parois du lingot pour assurer une meilleure régularité des formes de celles-ci. Plus précisément ces inducteurs « anti-parallèles » sont formés à l'aide de plusieurs brins conducteurs, parallèles à l'axe vertical du lingot et reliés en série de telle sorte que les courants qui parcourent les brins voisins sont respectivement de sens opposés, afin d'exercer sur la partie supérieure fondu de la charge des forces électromagnétiques de répulsion (confinement) qui s'ajoutent à celles engendrées par l'inducteur principal et qui sont analogues à celles de la publication DE-B-1 147 714 précitée.

La présente invention a pour objet un dispositif de fusion par induction directe dans une cage dont la paroi latérale cylindrique est formée par un ou plusieurs inducteurs « antiparallèles » qui sert en même temps de gaine froide et de dispositif de confinement supplémentaire, permettant de recevoir notamment des charges pulvérulentes ou granuleuses (divisées en particules) en matériaux diverses qui peuvent être isolants ou conducteurs à froid ou constitués par des mélanges de tels matériaux. Ce dispositif de fusion est orienté verticalement pour permettre la coulée du matériau fondu ou l'étirage de lingots (connus en soi) et, de ce fait, le champ magnétique de confinement supplémentaire n'a pas à vaincre la gravitation et peut agir sur la partie fondu de la charge, lorsqu'elle est isolante à froid, pour faciliter la formation de la carapace ou gangue agglomérée qui se substitue au creuset et dont l'épaisseur accrue assure un meilleur isolement thermique de la partie en fusion. Lorsque la charge est conductrice à froid, le champ magnétique engendré par les courants parcourant les tronçons de la cage peut également agir sur la partie supérieure non fondu de la charge, si leur intensité dépasse un certain seuil.

Suivant l'invention, la paroi latérale froide de la cage est agencée de telle sorte qu'elle constitue en même temps un inducteur de confinement de type connu en soi, qui est alimenté par un second générateur de puissance d'une seconde haute ou moyenne fréquence et qui comporte, outre les tronçons tubulaires juxtaposés, des moyens de

liaison électrique reliant ensemble les extrémités adjacentes de deux tronçons tubulaires voisins, afin que ceux-ci soient respectivement parcourus par un même courant alternatif dans des sens opposés, engendrant dans la partie conductrice de la périphérie de la charge des forces de confinement supplémentaire.

Ces moyens de liaison électrique peuvent être constitués par des plaques conductrices ou des tronçons de tube transversaux qui réunissent ensemble, par exemple, par l'une de leur extrémités adjacentes respectives, deux tronçons tubulaires voisins de façon à former des segments en forme d'épingles à cheveux qui sont alors juxtaposés de manière électriquement isolée pour former la paroi latérale de la cage froide.

Dans différents modes de réalisation de la cage froide qui est en même temps un inducteur de confinement, les segments en épingle à cheveux formant la paroi latérale sont respectivement électriquement connectés en parallèle, en série ou en diverses combinaisons série-parallèle, afin qu'un ensemble d'éléments inducteurs ainsi reliés puisse présenter une impédance adaptée à la fréquence du second générateur.

La puissance de confinement supplémentaire fournie par le second générateur est une fonction du diamètre et de la hauteur de la cage froide et, par conséquent, du volume de la charge. Elle est généralement comprise entre un dizième et un cinquième de la puissance fournie par le premier générateur à l'inducteur principal entourant la cage.

Dans un procédé d'utilisation du dispositif de fusion avec confinement supplémentaire suivant l'invention, on ajoute à la charge à fondre, lorsque tous ses composants sont métalliques (conductrices à froid), une faible proportion d'une substance isolante à froid et ayant un point de fusion inférieur à celui du métal ou de l'alliage, pour former un laitier. Ce laitier, de préférence en fluorine (ou fluorure de calcium) ou en silice, éventuellement mélangée à des adjuvants tels que des borates, présente à l'état fondu une tension superficielle notablement inférieure à celui du métal auquel elle est mélangée à l'état pulvérulent et il est, de ce fait, expulsé du métal en fusion brassé vers la périphérie de la charge, où sous l'effet de la cage froide il se solidifie en redevenant isolant. Les forces de confinement n'ayant plus prise sur le laitier isolant, il est alors propulsé par le bain vers les faces internes de la cage en y formant une carapace isolante (non inductible). On en utilise, de préférence, une proportion pondérale de 0,5 à 1,5 pour cent en relation au poids total de la charge.

L'invention sera mieux comprise et d'autres de ses caractéristiques et avantages ressortiront de la description qui suit et des dessins annexés, donnés à titre d'exemple, sur lesquels :

la figure 1 est une vue schématique en perspective d'un dispositif de fusion par induction directe en cage froide de l'état de la technique antérieure ; et

la figure 2 est une vue schématique en pers-

pective d'un mode de réalisation du dispositif de fusion par induction directe avec confinement électromagnétique supplémentaire de la charge, dans lequel pour la simplicité du dessin, les segments en épingle à cheveux sont connectés en parallèle.

Le dispositif de fusion classique de la figure 1 comporte un inducteur de chauffage 1 de forme hélicoïdale, réalisé en tube de cuivre et comprenant plusieurs spires qui couvrent une hauteur pré-déterminée. Les deux extrémités 3, 4 de cet inducteur 1 sont respectivement réunies ici à deux bornes de sortie (basse impédance, par exemple) d'un premier générateur de puissance 2 pouvant engendrer un courant alternatif I_1 , de hautes (30kHz-10MHz) ou de moyennes (1-30 kHz) fréquences (industrielles) qui sont destinées respectivement à la fusion de matériaux réfractaires isolants à froid, tels que des oxydes ou des silicates par exemple, ou semi-conducteurs, tels que le silicium, le germanium ou l'arsénure de gallium, par exemple, et à celle de matériaux conducteurs à froid, tels que des métaux ou des alliages de métaux.

La puissance fournie à l'inducteur 1 est fonction, notamment, de la nature (point de fusion, résistivité à froid et à chaud, perméabilité relative jusqu'au point de Curie etc.) du matériau, du volume de la charge à fondre (c'est-à-dire du diamètre de la cage froide et de la hauteur de l'inducteur 1) et du couplage entre la charge et l'inducteur (de l'épaisseur de la cage). Le générateur 2 doit, par conséquent, être dimensionné de façon à fournir une puissance comprise entre 50 et 250 kilowatts, par exemple.

La cage froide ou « auto-creuset » 5 comprend une paroi latérale cylindrique 6 à axe de symétrie verticale, composée d'un grand nombre de segments tubulaires 7 juxtaposés, qui sont de forme allongée et orientés parallèlement à l'axe géométrique ou à la génératrice du cylindre qu'ils forment ensemble. Ces segments 7 peuvent être réalisés en des tronçons de tube métallique de section rectangulaire, circulaire, trapézoïdale ou délimitée, comme sur la figure 1, par deux arcs de cercle concentriques dont le centre coïncide avec l'axe de la paroi 6 et par deux sections de droite radiales ayant une intersection sur cet axe (voir, par exemple, FR-A-1 492 063). Les parois (radiales) des segments 7 adjacents qui sont situées en regard, sont isolées l'une de l'autre au moyen d'un revêtement isolant 8 sous la forme d'une couche isolante électrique déposée, par exemple, en un matériau céramique (alumine ou autre) par « shoopage », ou au moyen de plaquettes de séparation rigides ou de rubans en feutre ou tissus d'un matériau isolant analogue, de préférence réfractaire, insérés entre ces parois.

Lorsqu'il s'agit de faire fondre par induction directe des matériaux qui sont conducteurs électriques à froid, tels que des métaux ou des alliages métalliques, il peut s'avérer avantageux de recouvrir d'une couche de matériau céramique isolant et réfractaire, également les parois 9 des segments 7 qui sont adjacentes à la charge et

qui forment ensemble la face interne de la paroi latérale 6 de la cage froide 5, ou de la munir d'une mince garniture isolante intérieure de forme cylindrique, en un tel matériau.

En vue d'assurer le refroidissement de cette paroi latérale, chacune des extrémités des tronçons tubulaires formant les segments 7 est obturée par une plaque transversale 10 et munie d'embouts tubulaires de raccordement 11, orientés en saillie radiale vers l'extérieur. La circulation du fluide de refroidissement (eau) est assurée au moyen d'un anneau collecteur d'admission 12 et d'un anneau collecteur d'évacuation 13 de diamètres supérieurs à celui extérieur de la paroi 6 ainsi qu'à celui de l'inducteur de chauffage 1. Ces anneaux collecteurs 12 et 13 sont respectivement munis d'embouts de raccordement 14 et 15, orientés en saillie radiale vers l'intérieur, qui sont hydrauliquement reliés à ceux 11 des segments 7 au moyen de joints tubulaires isolants 16, flexibles de préférence, de manière à conserver l'isolement électrique entre les segments 7. Ces anneaux collecteurs 12, 13 sont respectivement réunis à l'aide d'autres embouts tubulaires 17, 18 à un circuit du fluide réfrigérant (non représenté) dont la circulation s'effectue dans le sens des flèches W1.

Le fond de la cage froide 5 est obturé à l'aide d'une base ou sole 19 également refroidie, soit en forme de disque métallique creux raccordé par deux embouts 20, 21 à un autre circuit de fluide représenté par des flèches W2, soit en forme de disque en céramique (voir, par exemple, GB-A-1 130 070) dont la face inférieure peut être arrasée, par exemple. Cette sole 19 peut être réalisée à l'aide de secteurs isolés l'un de l'autre ou en forme d'anneau traversé par une buse d'évacuation chauffée de la charge fondu (voir FR-A-1 188 576 ou 2 054 464, par exemple).

Lorsque la sole 19 est en un matériau conducteur et la charge à fondre est conductrice à froid, il peut être avantageux de recouvrir entièrement sa face supérieure d'une couche ou d'une garniture de matériau isolant (céramique). La partie extérieure (annulaire) de la face supérieure de la sole 19, qui est au contact de l'extrémité inférieure de la paroi latérale 6, est, de préférence, isolée dans tous les cas de cette dernière, par exemple, au moyen d'une rondelle en feutre de céramique ou d'un lit de poudre d'un matériau réfractaire isolant (alumine, par exemple).

On remarquera ici que l'inducteur de chauffage 1 qui entoure la paroi latérale 6 de la cage 5 et qui assure la fusion par induction directe de la charge et le brassage du bain liquide, est également réalisé en tube et raccordé à un circuit de fluide de refroidissement symbolisé par les flèches W3. On notera également que l'on a observé dans la cage 5, un effet de striction produit par l'inducteur 1 sur la partie du bain liquide qui se trouve à son niveau.

La charge est introduite dans la cage 5 sous une forme pulvérulente ou granuleuse au moyen d'une trémie (non représentée) par le haut, dans le sens de la flèche C.

La figure 2 est une vue en perspective d'un mode de réalisation possible dispositif de fusion verticale avec confinement électromagnétique supplémentaire de la charge, suivant l'invention.

Sur la figure 2, les segments 70 formant la paroi latérale 60 de la cage froide 50 ont été réalisés au moyen d'éléments tubulaires en forme d'épingles à cheveux (ou « U ») à l'aide de deux tronçons de tube parallèles 71, 72, posés côte à côté isolés l'un de l'autre par une fente 73 qui peut être obturée par du feutre ou par une couche céramique, et dont l'une 71 a une extrémité hydrauliquement et électriquement reliée à celle, adjacente du tronçon voisin 72 au moyen d'un tronçon de jonction 74 transversal (circonférentiel), perpendiculaire aux deux tronçons parallèles 71, 72.

Ces segments 70 sont juxtaposés comme dans l'état de la technique, de façon à former la paroi latérale cylindrique 60 de la cage 50 dont le fond est obturé par une sole 19 classique (voir figure 1 et l'état de la technique mentionné précédemment).

A la différence de l'état de la technique en ce qui concerne la cage froide 50, les extrémités adjacentes libres (non reliées) des tronçons 71, 72 formant un même segment 70 sont respectivement hydrauliquement et électriquement reliées par des joints ou tronçons tubulaires métalliques 22, 23 conductrices, dont les uns (22) sont perpendiculaires à l'axe vertical de la gaine 50 et les autres (23) inclinés par rapport à cet axe, à deux anneaux collecteurs métalliques creux 120, 130 dont le premier (120) comporte l'embout d'admission 17 et le second (130) l'embout d'évacuation 18 du fluide de refroidissement de la cage 50, dont la circulation est indiquée par les flèches W1.

La liaison électrique respective entre les anneaux collecteurs 120, 130 et les extrémités respectives des segments 70 en épingle à cheveux, permet, en les reliant respectivement aux deux bornes de sortie d'un second générateur de puissance à courant alternatif 24, de faire passer dans les deux tronçons parallèles 71, 72 des courants électriques alternatifs respectivement dans des sens opposés.

Les champs magnétiques engendrés par les courants alternatifs qui parcourent les tronçons juxtaposés 71, 72 de la paroi latérale alternativement dans des sens opposés, induisent, à l'intérieur de la périphérie de la charge fondue conductrice, des courants sensiblement de même intensité et de phases opposées, par un effet de proximité.

Ces deux courants réagissent l'un sur l'autre de manière à engendrer, au niveau de la périphérie du bain liquide, des forces (de Laplace) centripètes, c'est-à-dire des forces de répulsion, sensiblement uniformément réparties à la périphérie du bain et orientées radialement en direction de son axe géométrique.

Ces forces de répulsion s'ajoutent aux forces de striction dues à l'inducteur de chauffage 1 alimenté par le premier générateur 2 et constituent ainsi des forces de confinement supplé-

mentaire agissant sur la charge. Lorsque la charge est principalement composée de substances isolantes à froid et conductrices à chaud et présentant des températures d'inductibilité et de fusion proches, ces forces de confinement supplémentaire permettent de former sur toute la hauteur du bain liquide (la charge fondu), entre la périphérie de celui-ci et la face intérieure de la cage 50, une pellicule d'air, de gaz ou de vide (lors d'une fusion sous vide) de quelques dizaines de millimètre, qui se remplit de parties froides ou refroidies, isolantes des substances sur une plus grande épaisseur que lors de l'utilisation du dispositif de la figure 1, assurant ainsi un meilleur isolement électrique et thermique entre la charge fondu et la paroi latérale intérieure de la cage froide 50. Un tel agencement permet ainsi de réduire notablement les pertes thermiques et électriques par conduction, les risques de fuite (coulée) du matériau fondu et la contamination de la charge en fusion par les matériaux dont la cage 50 est constituée.

Lorsque la charge est principalement composée de substances isolantes à froid et conductrices à chaud, mais dont la température d'inductibilité est très inférieure à celle de fusion (ce qui est le cas pour certains oxydes de métaux réfractaires), les forces de confinement engendrées par la cage 50 suivant l'invention, agissent également sur les parties de la charge solide mais ayant dépassé la température d'inductibilité, qui sont alors écartées de sa paroi intérieure et remplacées par des particules (grains) isolantes de la substance.

Il en est de même dans le cas de charges composées de substances conductrices à froid, telles que des métaux et leurs alliages, dont la périphérie est écartée de la paroi intérieure de la cage 50 sensiblement jusqu'aux tronçons transversaux 74 (c'est-à-dire jusqu'aux bouts de la fente 73 séparant les tronçons longitudinaux 71, 72 respectives des segments en épingle à cheveux 70), même en ce qui concerne sa partie pulvérulente, non encore fondue, dans une moindre mesure que celle de la partie fondu qui est dans le champ de l'inducteur de chauffage 1.

Le procédé d'utilisation préféré du dispositif de fusion par induction directe en cage froide, avec confinement électromagnétique supplémentaire de la charge, lorsque celle-ci est purement métallique, consiste à lui ajouter à l'état divisé (pulvérulent ou granuleux), une faible quantité d'une substance isolante à froid et présentant une température de fusion proche de sa température d'inductibilité et inférieure à celle du métal ou de l'alliage, pour former un laitier. Ce laitier devant présenter à l'état fondu une tension superficielle notamment inférieure à celle de la partie métallique de la charge, est précipité de la masse de métal en fusion vers sa périphérie, où en refroidissant sous l'effet de la cage froide 50, il remplit l'espace ménagé par les forces de confinement et redevient isolant et solide au contact de la paroi intérieure de cette dernière. Plus précisément, le laitier perd son inductibilité sous

l'effet de la cage 50 et remplit l'espace périphérique entre celle-ci et la charge, en y formant une carapace électriquement et thermiquement isolante. Le mélange constituant la charge comporte dans ce cas, une proportion pondérale comprise entre 0,5 et 1,5 pour cent de la substance formant laitier, qui est, de préférence, constitué par de la fluorine (ou fluorure de calcium-CaF₂) ou de la silice, éventuellement mélangée à des adjuvants tels que des borates permettant d'abaisser son point de fusion jusqu'aux alentours de 1 400 °C.

La cage 50 suivant l'invention, comporte donc des inducteurs en épingle à cheveux juxtaposés, formés par les segments 70 et connectés en parallèle au moyen des deux anneaux collecteurs 120, 130 qui sont respectivement reliés aux deux bornes de sortie basse-impédance constituées, par exemple, par les bornes d'un enroulement secondaire d'un transformateur d'adaptation (non représenté) dont l'enroulement primaire est relié aux bornes du second générateur 24. Ces inducteurs (en U 70) sont alimentés chacun par un courant I₂/N de quelques dizaines d'ampères efficace (où N est le nombre de segments 70 formant la cage 50), dont l'intensité exacte est alors déterminée expérimentalement en fonction des dimensions du bain et de l'effet de striction déjà fourni par l'inducteur de chauffage 1, pour qu'ils produisent un confinement électromagnétique supplémentaire adéquat de la charge. L'expérience a montré qu'une puissance notablement plus faible que celle consommée par l'inducteur 1 suffit pour alimenter les segments 70 de la cage 50 en parallèle et pour obtenir un confinement suffisant du bain.

Le second générateur 24 alimentant en parallèle les inducteurs de la cage 50 devra donc fournir, par exemple, une puissance qui est comprise entre un cinquième et un dizième de celle fournie par le premier générateur 2 à l'inducteur 1 (de 50 à 250 kW). Il en résulte qu'il suffit d'une puissance de l'ordre de quelques kilowatts à quelques dizaines de kilowatts (10 à 30 kW, par exemple) pour le confinement électromagnétique de charges en métal ou en alliages de métaux.

On utilisera pour la fusion-brassage et pour le confinement par la cage 50, de préférence, les mêmes gammes de fréquence, c'est-à-dire les hautes fréquences de 30 kHz à 10 MHz pour les oxydes réfractaires, les silicates et les semi-conducteurs et les moyennes fréquences de 1 à 20 kHz pour la fusion de métaux ou alliages conducteurs à froid et, éventuellement, réfractaires. Toutefois, on choisit, de préférence, des fréquences différentes pour effectuer les opérations de fusion et brassage par l'inducteur de chauffage 1 et l'opération de confinement électromagnétique par la cage 50, qui sont des fonctions distinctes et séparément contrôlables au moyen de deux générateurs. Il est également possible d'utiliser la gamme des hautes fréquences pour le chauffage et le brassage et celle de moyennes fréquences pour le confinement, ou vice versa.

En résumé, le principal avantage du confinement électromagnétique suivant l'invention par la cage 50 est que la périphérie de la partie conductrice de la charge, même composée d'un matériau conducteur à froid, est écartée de la face interne de la paroi latérale 60 de celle-ci, sur sensiblement toute sa hauteur et non seulement au niveau de l'inducteur principal 1, avec la réduction concomitante des pertes thermiques par conduction, et des risques de coulées à travers les fentes de la paroi latérale 60.

Il est à remarquer ici qu'au lieu de relier les deux extrémités libres de chaque inducteur en épingle à cheveux à deux anneaux collecteurs distincts 120, 130, il est possible de les relier électriquement et même hydrauliquement en série, c'est-à-dire de relier ensemble, par exemple, au moyen de tronçons de jonction transversaux, semblables à ceux désignés par le repère 74, les extrémités inférieures avoisinantes des différents segments 70. On obtient alors un inducteur serpentin, replié en cylindre, de haute impédance. Il est également possible de réaliser des combinaisons série-parallèle de ces inducteurs en épingles à cheveux en réunissant en série un certain nombre entre eux par groupes d'égale inductance et de réunir ces groupes en parallèle afin d'obtenir l'impédance que l'on désire en fonction des dimensions de la cage 50 et de la fréquence du second générateur 24, choisie en conséquence.

Les liaisons électriques entre les tronçons tubulaires longitudinaux 71, 72 ne sont pas obligatoirement réalisées à l'aide de tronçons transversaux 74 qui en assurent également la continuité hydraulique. Il est également possible d'assurer l'alimentation en fluide réfrigérant de la manière illustrée sur la figure 1, c'est-à-dire en utilisant des joints tubulaires isolants, et l'alimentation électrique en série au moyen de plaques conductrices métalliques transversales (en cuivre, par exemple) en forme d'arcs de cercle de longueur suffisante pour recouvrir au moins en partie les bouts (10, figure 1) de deux tronçons (7, figure 1) voisins pour former un segment 70 en épingle à cheveux. Ces plaques de liaison (non représentées) peuvent être rendues mécaniquement et électriquement solides des bouts de tronçons qu'elles recouvrent par soudure ou brasage. Elles peuvent même remplacer les plaques en bout (10, figure 1) obturant les extrémités des tronçons tubulaires (7, figure 1) qu'elles doivent alors recouvrir entièrement. En utilisant des plaques de liaison de mêmes dimensions, il est possible de réaliser des inducteurs en serpentins susmentionnés, où les tronçons sont connectés en série.

Pour réaliser les segments 70 on peut utiliser de manière connue des tubes métalliques de cuivre ou d'un alliage de cuivre (laitons, bronzes) ou d'un alliage de nickel avec d'autres métaux, tels que le cuivre ou le chrome. Pour la fusion des métaux ou d'alliages réfractaires, par exemple, il est avantageux d'utiliser un alliage de nickel, de chrome et de fer (0,78 Ni + 0,14 Cr + 0,07 Fe), tel

que celui qui est commercialisé sous la dénomination « INCONEL » (marque déposée par la société américaine International Nickel Co.) et qui est particulièrement adapté pour des températures élevées.

Revendications

1. Dispositif de fusion par induction directe d'une charge disposée à l'intérieur d'une cage froide (50) comprenant une paroi latérale (60) cylindrique et à axe vertical, composée de tronçons conducteurs tubulaires (71, 72) orientés parallèlement à cet axe, parcourus d'un fluide de refroidissement et disposés côté à côté de manière galvaniquement isolée l'un de l'autre, afin qu'elle soit sensiblement transparente au champ magnétique alternatif d'un inducteur solenoïdal (1) entourant coaxialement cette paroi latérale (60) et alimenté par un premier générateur de puissance (2) d'une première haute ou moyenne fréquence, ce champ magnétique engendant, outre des courants induits dans la charge, des premières forces de confinement agissant sur la périphérie de celle-ci au niveau de l'inducteur (1), caractérisé en ce que la paroi latérale (60) froide de la cage (50) est agencée de telle sorte qu'elle constitue en même temps un inducteur de confinement de type connu en soi, qui est alimenté par un second générateur de puissance (24) d'une seconde haute ou moyenne fréquence et qui comporte, outre les tronçons tubulaires juxtaposés (71, 72), des moyens de liaison électrique (74) reliant ensemble les extrémités adjacentes de deux tronçons tubulaires voisins, afin que ceux-ci soient parcourus respectivement par un même courant alternatif dans des sens opposés, engendant dans la partie conductrice de la périphérie de la charge des forces de confinement supplémentaire.

2. Dispositif de fusion suivant la revendication 1, caractérisé en ce que les moyens de liaison électriques (74) entre tronçons tubulaires juxtaposés (71, 72) sont agencés de telle sorte que chacun desdits moyens (74) relie une extrémité d'un premier tronçon (71) à l'extrémité adjacente d'un second tronçon (72) juxtaposé, de sorte que la paroi latérale (60) de la cage (50) est formée d'une succession de segments (70) constitués chacun par un inducteur en forme d'épingle à cheveux dont les extrémités opposées, libres, sont couplées au second générateur (24).

3. Dispositif de fusion suivant la revendication 2, caractérisé en ce que les segments (70) en épingle à cheveux sont électriquement réunis en parallèle.

4. Dispositif de fusion suivant la revendication 2, caractérisé en ce que les segments (70) en épingle à cheveux sont électriquement réunis en série à l'aide d'autres moyens de liaison électrique qui réunissent respectivement leurs extrémités libres à celles des tronçons adjacents des segments voisins, afin de former un dipôle unique.

5. Dispositif suivant la revendication 2, caractérisé en ce que des groupes comportant respectivement un nombre égal de segments (70) en épingle à cheveux, reliés en série à l'aide d'autres moyens de liaison électrique, sont reliées en parallèle pour en former une combinaison dite série-parallèle.

6. Dispositif suivant l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens de liaison électrique sont respectivement constitués par des tronçons tubulaires transversaux (74) assurant en même temps la continuité électrique et celle du circuit hydraulique de refroidissement.

7. Dispositif suivant l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la puissance fournie par le second générateur (24) à l'inducteur de confinement est comprise entre un dizième et un cinquième de celle fournie par le premier générateur (2) à l'inducteur (1) entourant la paroi latérale (60).

8. Procédé d'utilisation d'un dispositif de fusion par induction directe suivant l'une des revendications précédentes, pour une charge composée de substances métalliques, conductrices à froid, caractérisé en ce que l'on ajoute et mélange à cette charge métallique, une substance isolante à froid, présentant des températures d'inductibilité et de fusion voisines et inférieures au point de fusion du ou des métaux constituant la charge, afin que cette substance isolante constitue, après sa fusion, un laitier qui s'agglomère au voisinage de la paroi latérale froide (60) de la cage (50) et se répande dans l'espace que l'inducteur de confinement a ménagé entre celle-ci et la périphérie de la charge, en y formant après refroidissement, une pellicule isolante solide.

9. Procédé suivant la revendication 8, caractérisé en ce que la proportion pondérale de la substance isolante additive par rapport au poids total de la charge, est comprise entre 0,5 et 1,5 pour cent.

10. Procédé suivant l'une des revendications 8 et 9, caractérisé en ce que la substance isolante additive est constituée par un composé de calcium et de fluor, tel que le fluorure de calcium (CaF_2) ou fluorine.

11. Procédé suivant l'une des revendications 8 et 9, caractérisé en ce que la substance isolante additive est constituée par de la silice (SiO_2), avec des adjuvants éventuels tels que des borates.

Claims

55. 1. A device for direct induction melting of a load disposed inside a cold cage (50) which comprises a lateral cylindrical wall (60) and a vertical axis and is composed of tubular conducting sections (71, 72) oriented parallel to said axis, traversed by a cooling fluid and disposed side by side in a manner galvanically insulated one from the other, so that it is substantially transparent to the alternating magnetic field of a solenoid inductor (1) coaxially surrounding said lateral wall (60) and being supplied by a first power generator (2)

at a first high oder medium frequency, with this magnetic field creating not only induced currents in the load, but also first confinement forces acting on the periphery thereof on the level of the inductor (1), characterized in that the cold lateral wall (60) of the cage (50) is formed in such a way that it also constitutes an inductor of confinement known per se which is supplied by a second power generator (24) at a second high or medium frequency and which comprises not only the juxtaposed tubular sections (71, 72) but also electric connecting means (74) which join together the adjacent ends of two adjacent tubular sections so that the latter are traversed respectively by the same alternating current in opposite directions which creates in the conducting portions of the periphery of the load supplementary forces of confinement.

2. A melting device according to claim 1, characterized in that the electric connecting means (74) between adjacent tubular sections (71, 72) are formed in such a way that said means (74) connect one end of a first section (71) to the adjacent end of a second, adjacent section (72) so that the lateral wall (60) of the cage (50) is composed of a succession of segments (70) each constituted by an inductor in the shape of a hairpin whose opposite free ends are coupled to the second generator (24).

3. A melting device according to claim 2, characterized in that the segments (70) in the shape of hairpins are electrically connected in parallel.

4. A melting device according to claim 2, characterized in that the segments (70) in the shape of hairpins are electrically connected in series by further electric connecting means which join their free ends to free ends of the adjacent sections of adjoining segments, respectively, so that a single dipole is formed.

5. A device according to claim 2, characterized in that groups comprising, respectively, an equal number of segments (70) in the shape of hairpins, connected in series by further electric connecting means, are connected in parallel to form a combination called series-parallel.

6. A device according to any one of the preceding claims, characterized in that the electric connecting means are formed respectively by transverse tubular sections (74) which ensure at the same time electric continuity as well as continuity of the hydraulic cooling circuit.

7. A device according to any one of the preceding claims, characterized in that the power supplied by the second generator (24) to the inductor of confinement is comprised between one tenth and one fifth of that supplied by the first generator (2) to the inductor (1) surrounding the lateral wall (60).

8. A process of using a direct induction melting device according to one of the preceding claims, for a load composed of metallic substances, which are cold-conducting, characterized in that a cold-insulating substance is added and mixed to said metallic load, this substance having tem-

peratures of inductibility and of melting which are close to or lower than the melting point of the one or the several metals constituting the load, so that said insulating substance forms, after its melting, a slag which agglomerates near the cold lateral wall (60) of the cage (50) and spreads out in the space which the inductor of confinement has formed between the wall and the periphery of the load by forming there, after cooling, a solid insulating layer.

9. A process according to claim 8, characterized in that the proportion in weight of the added insulating substance relative to the total weight of the load is comprised between 0,5 and 1,5 %.

10. A process according to one of claims 8 or 9, characterized in that the added insulating substance is formed of a compound of calcium and fluor, such as calcium fluoride (CaF_2) or fluor.

11. A process according to one of claims 8 or 9, characterized in that the added insulating substances is formed of silica (SiO_2) with possible additions such as borates.

25

Ansprüche

1. Vorrichtung zum direkten Induktions-schmelzen einer im Inneren eines kalten Käfigs (50) befindlichen Last, wobei der Käfig eine zylindrische Seitenwand (60) und eine senkrechte Achse besitzt und aus leitenden rohrförmigen Abschnitten (71, 72) zusammengesetzt ist, die parallel zu dieser Achse verlaufen, von einem Kühlmittel durchflossen sind und galvanisch gegeneinander isoliert Seite an Seite liegen, so daß der Käfig im wesentlichen für das magnetische Wechselfeld einer die Seitenwand (60) koaxial umgebenden und von einem ersten Leistungsge-
30 nerator (2) mittlerer oder hoher Frequenz gespei-
sten Induktionsspule (1) durchlässig ist, wobei dieses Magnetfeld außer den Strömen, die in der Last induziert werden, erste Einschließungs-
35 kräfte erzeugt, die auf die Peripherie des Käfigs in Höhe des Induktors (1) einwirken, da-
durch gekennzeichnet, daß die kalte Seitenwand (60) des Käfigs (50) so ausgebildet ist, daß sie zugleich einen Einschließungsinduktor an sich bekannter Art bildet, der von einem zweiten Leistungsgenerator (24) einer zweiten mittleren oder hohen Frequenz gespeist wird und außer den aneinanderliegenden rohrförmigen Abschnitten (71, 72) elektrische Verbindungsmittel (74)
40 aufweist, die die nebeneinanderliegenden Enden zweier benachbarter rohrförmiger Abschnitte mit-
einander verbinden, so daß diese Abschnitte von einem und demselben Wechselstrom in entge-
45 gengesetzten Richtungen durchflossen werden und im leitenden Bereich der Peripherie der Last zusätzliche Einschließungskräfte erzeugt
50 werden.

2. Schmelzvorrichtung nach Anspruch 1, da-
durch gekennzeichnet, daß die elektrischen Mit-
tel zur Verbindung (74) der nebeneinanderlie-
60 genden rohrförmigen Abschnitte (71, 72) so aus-

gebildet sind, daß jedes dieser Mittel (74) ein Ende eines ersten Abschnitts (71) mit dem danebenliegenden Ende eines benachbarten zweiten Abschnitts (72) verbindet, so daß die Seitenwand (60) des Käfigs (50) aus einer Folge von Segmenten (70) gebildet ist, die je aus einem haarnadelförmigen Induktor bestehen und deren freie entgegengesetzte Enden an den zweiten Generator (24) angekoppelt sind.

3. Schmelzvorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die haarnadelförmigen Segmente (70) elektrisch parallelgeschaltet sind.

4. Schmelzvorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die haarnadelförmigen Segmente (70) elektrisch mithilfe weiterer elektrischer Verbindungsmittel in Reihe geschaltet sind, wobei diese weiteren Mittel die freien Segmentenden mit denen der benachbarten Abschnitte der danebenliegenden Segmente verbindet, wodurch sich ein gemeinsamer Dipol ergibt.

5. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß Gruppen, die je eine gleiche Anzahl von haarnadelförmigen Segmenten (70), die mithilfe weiterer elektrischer Verbindungsmittel in Reihe geschaltet sind, enthalten, parallelgeschaltet sind, um eine sogenannte Reihen/Parallelkombination zu ergeben.

6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die elektrischen Verbindungsmittel je aus transversalen Rohrabschnitten (74) gebildet sind, die sowohl die elektrische Kontinuität als auch die Kontinuität des hydraulischen Kühlkreises sicherstellen.

7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,

daß die Leistung, die vom zweiten Generator (24) an den Einschließungsinduktor geliefert wird, zwischen einem Zehntel und einem Fünftel der Leistung ist, die vom ersten Generator (2) an den die Seitenwand (60) umgebenden Induktor (1) geliefert wird.

8. Verfahren zur Verwendung einer Direktinduktions-Schmelzvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche für eine Last, die aus metallischen und bei Kälte leitenden Substanzen zusammengesetzt ist, dadurch gekennzeichnet, daß man der metallischen Last eine bei Kälte isolierende Substanz zufügt und beimengt, deren Grenztemperaturen, bei denen sie isolierend werden bzw. schmelzen, in der Nähe und unterhalb des Schmelzpunkts des oder der die Last bildenden Metalle liegen, so daß diese isolierende Substanz nach dem Schmelzen eine Schlacke bildet, die sich in der Nähe der kalten Seitenwand (60) des Käfigs (50) zusammenballt und sich in dem Raum ausbreitet, den der Einschließungsinduktor zwischen der Wand und der Peripherie der Last läßt, indem sich dort nach der Abkühlung eine feste Isolierschicht bildet.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Gewichtsanteil der zugegebenen isolierenden Substanz bezüglich des Gesamtgewichts der Last zwischen 0,5 und 1,5 % liegt.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 und 9, dadurch gekennzeichnet, daß die beigegebene isolierende Substanz eine Verbindung aus Kalzium und Fluor ist, z. B. Kalziumfluorid (CaF_2) oder Fluor.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 und 9, dadurch gekennzeichnet, daß die zugegebene isolierende Substanz Siliziumdioxid (SiO_2) ist, mit eventuellen Zusätzen von z. B. Boraten.

40

45

50

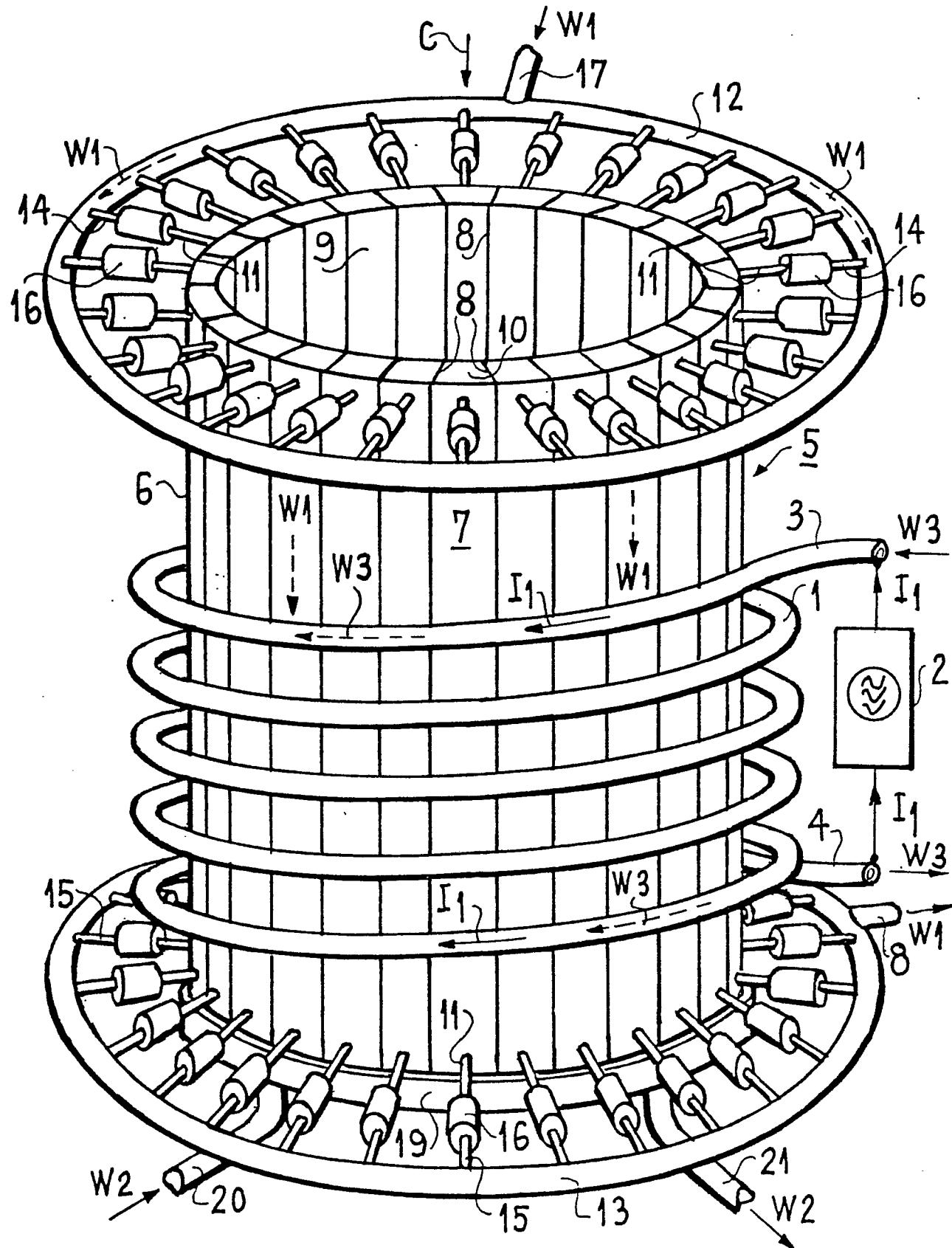
55

60

65

9

Fig-1



FIG_2

