

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

(11) N° de publication :
(A n'utiliser que pour les
commandes de reproduction).

2 516 641

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 81 21238

(54) Dispositif de chauffage par induction magnétique de produits métalliques rectangulaires plats défilant dans le sens de leur longueur.

(51) Classification internationale (Int. Cl.³). F 27 D 11/06; F 27 B 9/06, 9/36; H 05 B 6/02
// B 21 B 1/40.

(22) Date de dépôt..... 13 novembre 1981.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 20 du 20-5-1983.

(71) Déposant : Société anonyme dite : CEM (Compagnie Electro-Mécanique). — FR.

(72) Invention de : Jean Maurice, Roger Travers et Jean-Paul Camus.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Office Blétry,
2, bd de Strasbourg, 75010 Paris.

La présente invention concerne un dispositif de chauffage par induction magnétique de produits métalliques rectangulaires plats défilant dans le sens de leur longueur, du type comprenant au moins un inducteur apte à produire un
5 champ magnétique d'intensité constante, mais réglable, orienté sensiblement perpendiculairement à une grande face du produit métallique à chauffer, ledit inducteur étant monté rotatif autour d'un axe perpendiculaire à ladite grande face du produit métallique et comportant au moins deux pôles magnétiques ayant des
10 surfaces polaires orientées vers ladite grande face sont parallèles à celles-ci, et balayant une zone annulaire quand l'inducteur tourne.

Il est connu depuis longtemps d'utiliser des inducteurs tournants produisant un champ magnétique d'intensité
15 constante, mais réglable, pour chauffer des produits métalliques destinés à être façonnés à chaud (voir par exemple les brevets français n° 916 287 et 1 387 653). Les pôles magnétiques peuvent être constitués par des aimants permanents, des électro-aimants ou une combinaison d'aimants permanents et d'électro-aimants. Le
20 ou les inducteurs peuvent être placés à l'extérieur d'un tunnel en matériau réfractaire et perméable au champ magnétique, à l'intérieur duquel défilent les produits métalliques à chauffer.

Toutefois, les dispositifs de chauffage par induction magnétique antérieurement connus ont été relativement peu
25 utilisés jusqu'à présent pour réchauffer des produits métalliques tels que des brames ou des ébauches, c'est-à-dire des brames ayant déjà subi plusieurs passes de laminage dans les cages dégrossisseuses d'un laminoir, mais n'étant pas encore passées à travers les cages finisseuses du laminoir. En effet, l'expérience a montré qu'avec les dispositifs de chauffage antérieurement
30 connus, il est difficile d'obtenir un profil de tempé-

rature régulier dans le sens transversal des produits métalliques à réchauffer. Ce problème se complique encore si l'on considère que les produits métalliques à chauffer peuvent avoir des largeurs variant dans une large gamme de valeurs.

La présente invention a donc pour but de résoudre ce problème en fournissant un dispositif perfectionné de chauffage par induction magnétique permettant d'améliorer l'homogénéité de chauffage dans le sens transversal des produits métalliques défilant dans le sens de leur longueur, et ceci quelle que soit la largeur des produits métalliques dans une gamme de largeur donnée.

A cet effet, le dispositif de chauffage par induction magnétique selon la présente invention est caractérisé en ce que la surface polaire de chaque pôle a la forme d'un triangle curviligne ayant un sommet dirigé vers l'axe de rotation de l'inducteur, deux côtés concaves qui sont symétriques par rapport à une droite passant par ledit sommet et perpendiculaire audit axe, et un côté convexe en arc de cercle centré sur ledit axe et dont le rayon de courbure est sensiblement égal au rayon extérieur de la zone annulaire balayée par les surfaces polaires des pôles.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre et qui est donnée en référence aux dessins annexés sur lesquels :

La figure 1 montre schématiquement, en coupe transversale, un dispositif conventionnel de chauffage par induction magnétique.

La figure 2 montre la zone annulaire d'action du dispositif de chauffage de la figure 1 sur le produit métallique à chauffer, ainsi que le profil de chauffage obtenu dans le sens transversal du produit métallique.

La figure 3 montre la forme des surfaces polaires des pôles magnétiques d'un dispositif de chauffage conforme à la présente invention.

La figure 4 est un diagramme montrant la loi idéale de variation de la puissance surfacique induite par le dispositif de chauffage dans le produit métallique à chauffer en fonction de la distance à l'axe de rotation du ou des inducteurs.

pour obtenir un chauffage homogène sur toute la largeur du produit métallique.

La figure 5 est un diagramme permettant d'expliquer comment on obtient la loi de la figure 4.

5 La figure 6 est un diagramme montrant comment varie au cours du temps le champ magnétique à une distance donnée de l'axe de rotation du ou des inducteurs du dispositif de chauffage.

Le dispositif conventionnel de chauffage par induction magnétique qui est représenté schématiquement sur la figure 1 et auquel peut être appliquée la présente invention comporte par exemple deux inducteurs 1 et 2 disposés respectivement au-dessus et au-dessous du produit métallique 3 à chauffer, par exemple une brique, en regard des grandes faces de la brique 3, celle-ci étant animée d'un mouvement continu dans une direction perpendiculaire au plan de la figure, c'est-à-dire dans le sens de sa longueur. Comme montré sur la figure 1, chacun des deux inducteurs comporte plusieurs pôles magnétiques, par exemple deux pôles magnétiques 4. Selon l'intensité de chauffage que l'on désire obtenir et selon la température ambiante au voisinage des inducteurs 1 et 2, les pôles 4 peuvent être constitués par des aimants permanents, par des pôles bobinés dont les enroulements sont alimentés en courant continu (électro-aimant), ou par des aimants permanents entourés de bobinages pouvant être alimentés en courant continu. Dans le cas où on utilise des électro-aimants ou des aimants permanents munis de bobinages, l'intensité du courant continu peut être réglée de façon connue afin de régler l'intensité du champ magnétique produit par les aimants et, par suite, l'intensité du chauffage produit par les courants de Foucault induits dans le produit métallique 3 à chauffer. Habituellement, les pôles 4 ont une section de forme circulaire (cette forme correspond à un flux magnétique maximal pour une longueur de conducteur donnée et donc pour des pertes Joule données dans le cas de pôles bobinés).

35 Au moins l'un des inducteurs 1 et 2 est entraîné en rotation autour de l'axe vertical z par des moyens connus non montrés sur la figure 1, l'autre inducteur pouvant être entraîné en rotation en synchronisme soit par les mêmes moyens d'entraînement, soit par le champ magnétique produit par le premier inducteur. La vitesse de rotation des inducteurs 1 et 2 est habituellement net-

tement plus grande que la vitesse d'avance du produit métallique. Au cours de ce mouvement de rotation, les surfaces polaires des pôles 4 qui sont situées en regard des grandes faces du produit métallique 3 balayent une zone annulaire 5 comme montré sur la figure 2.

5 Cette zone 5 correspond en gros à la zone d'action des inducteurs sur le produit métallique 3 à chauffer. Si ce produit était immobile, l'énergie calorifique qui lui est apportée par l'effet Joule des courants de Foucault induits dans sa masse serait relativement homogène dans la zone annulaire 5. Cependant,

10 dant, comme le produit métallique 3 se déplace, l'énergie calorifique apportée en un point quelconque P située à une distance d de l'axe médian longitudinal du produit 3 est proportionnelle à la durée de séjour du point P dans la zone annulaire d'action 5 des inducteurs, cette durée de séjour étant elle-même

15 proportionnelle à la longueur du segment AB montré dans la figure 2. Dans le bas de la figure 2, on a représenté le profil de chauffage C qui est obtenu avec un tel dispositif de chauffage dans le sens transversal du produit métallique 3. Comme on peut le voir d'après le profil de chauffage C montré sur la

20 figure 2, un dispositif de chauffage tel que celui représenté sur la figure 1 et ayant des dimensions telles que le diamètre extérieur de sa zone annulaire d'action 5 corresponde sensiblement à la largeur du produit métallique 3 à chauffer ne permet pas d'obtenir un chauffage homogène sur toute la largeur

25 produit 3 pendant que celui-ci avance. Dans la pratique, pour obtenir un chauffage à peu près homogène, on est conduit à utiliser un dispositif de chauffage dont les dimensions sont telles que le diamètre extérieur de sa zone annulaire d'action soit nettement plus grand que la largeur maximale des produits

30 métalliques 3 à chauffer, de façon à opérer dans la partie médiane du profil de chauffage C. On est donc conduit à utiliser des dispositifs de chauffage de grande dimension par rapport à la largeur des produits métalliques 3 à chauffer. Dans ces conditions, on notera que le flux magnétique produit par les

35 inducteurs n'est pas pleinement utilisé pour le chauffage, puisqu'il n'agit pas sur le produit métallique 3 à chauffer lorsque, au cours de leur rotation, les pôles magnétiques se trouvent au-delà des côtés longitudinaux du produit 3, d'où un rendement plus faible.

La présente invention permet de remédier à cela en fournissant un dispositif de chauffage ayant des dimensions telles que le diamètre de sa zone d'action ne soit que très légèrement supérieur à la largeur maximale des produits métalliques en mouvement à chauffer, et permettant de chauffer lesdits produits de manière sensiblement homogène sur toute leur largeur avec un bon rendement. Selon la présente invention, ce résultat peut être obtenu en utilisant un ou deux inducteurs disposés comme ceux de la figure 1, mais dont les pôles magnétiques, constitués par exemple par des électro-aimants, ont des surfaces polaires en forme de triangle curviligne. La figure 3 montre à titre d'exemple, en vue de face, un inducteur conforme à la présente invention comportant quatre pôles magnétiques 4 de formes identiques et de polarités alternées. Chaque pôle magnétique 4 peut comporter un noyau magnétique 6, par exemple de section transversale circulaire, autour duquel est disposé un enroulement d'excitation (non montré) alimenté en courant continu. Chaque noyau 6 est muni d'un épanouissement polaire ou pièce polaire 7 qui fait partie intégrante du noyau 6 ou qui est fixé à l'extrémité du noyau qui est adjacente au produit métallique à chauffer. Chaque épanouissement polaire 7 a une surface polaire plane et parallèle à l'une des grandes faces du produit métallique à chauffer. Comme montré dans la figure 3, la surface polaire de chaque épanouissement 7 a la forme d'un triangle curviligne qui comporte un sommet 8 dirigé vers l'axe de rotation z de l'inducteur, deux côtés concaves 9 et 10, qui sont symétriques par rapport à une droite passant par le sommet 8 et perpendiculaire à l'axe z , et un côté convexe 11 en arc de cercle centré sur l'axe z et dont le rayon de courbure est sensiblement égal au rayon extérieur R de la zone annulaire 5 balayée par les surfaces polaires.

Avec les surfaces polaires en forme de triangle curviligne qui ont été décrites ci-dessus, il est possible d'obtenir un profil de chauffage dans le sens transversal plus uniforme qu'avec les pôles magnétiques à surfaces polaires circulaires ou carrées qui étaient utilisés dans les dispositifs de chauffage antérieurement connus. Ceci peut être expliqué de la manière suivante. En première approximation, si on néglige les effets de longueur et de largeur finies, on peut

considérer que la puissance surfacique induite par l'inducteur tournant en un point quelconque P du produit métallique à chauffer n'est fonction que de la distance r dudit point à l'axe de rotation z de l'inducteur. Pour obtenir un chauffage homogène du produit métallique en mouvement, dont la demi-largeur peut être comprise entre 0 et R (R étant le rayon maximal d'action de l'inducteur, c'est-à-dire le rayon extérieur de la zone annulaire balayée par les pôles magnétiques 4) on peut démontrer qu'il faut que la puissance surfacique soit une fonction croissante (figure 4) de la distance r sus-mentionnée, cette fonction pouvant être exprimée par la relation suivante :

$$f(r) = \frac{k_1}{\sqrt{R^2 - r^2}} \quad (1)$$

dans laquelle k_1 est une constante.

En effet, en partant de l'hypothèse sus-mentionnée, l'énergie moyenne $E_m(d)$ induite au point P qui se déplace le long du segment AB à une distance d de l'axe Oy (figure 5) est proportionnelle à :

$$E_m(d) = \int_{y_B}^{y_A} f(r) dy \quad (2)$$

$$\text{avec : } r = \sqrt{d^2 + y^2} \quad (3)$$

$$y_A = \sqrt{R^2 - d^2} = -y_B \quad (4)$$

$$\text{soit : } E_m(d) = 2 \int_0^{\sqrt{R^2 - d^2}} f(\sqrt{d^2 + y^2}) dy \quad (5)$$

Pour obtenir un chauffage homogène en largeur, il faut que l'énergie moyenne E_m induite à la distance d ne dépende pas de cette distance d :

$$E_m(d) = \text{constante} \quad (6)$$

La solution des équations (5) et (6) est fournie par l'équation (1). En effet, en tenant compte des équations (1) et (3), l'équation (5) peut s'écrire :

$$E_m(d) = 2 k_1 \int_0^{\sqrt{R^2 - d^2}} \frac{dy}{\sqrt{R^2 - d^2 - y^2}} \quad (7)$$

d'où :

$$E_m(d) = 2 k_1 \left[\text{Arc sin} \frac{y}{\sqrt{R^2 - d^2}} \right]_0^{\sqrt{R^2 - d^2}} \quad (8)$$

d'où :

$$E_m(d) = 2 k_1 [\text{Arc sin } 1 - \text{Arc sin } 0] = C^{\text{ste}} \quad (9)$$

ce qui donne bien E_m indépendant de d .

Sur la figure 4 on a tracé la courbe représentative de la fonction $\underline{f}(r)$ définie par l'équation (1) pour $\underline{r}$ compris entre $-R$ et $+R$. D'après cette courbe on peut voir que pour obtenir un chauffage homogène sur toute la largeur d'un produit métallique ayant une largeur égale à $2R$, c'est-à-dire égale au diamètre de la zone annulaire d'action de l'inducteur, la puissance surfacique induite devrait théoriquement avoir une valeur infinie à la périphérie de ladite zone annulaire, ce qui est bien entendu impossible à réaliser en pratique. Dans la pratique, pour une largeur maximale donnée des produits métalliques à chauffer, il suffira de dimensionner l'inducteur de telle façon que son rayon d'action R soit légèrement plus grand que la moitié de ladite largeur maximale donnée et que la courbe représentative des variations de la puissance surfacique induite en fonction de la distance $\underline{r}$ ait une allure semblable à celle de la courbe de la figure 4, mais avec des valeurs finies de la puissance pour les valeurs de $\underline{r}$ voisines de R .

Si l'on suppose que le champ magnétique est uniforme sous chaque pôle 4 de l'inducteur, que le produit métallique à chauffer est limité à la zone d'action de l'inducteur et que la réaction d'induit est négligeable, la variation dans le temps du champ magnétique B vu par le point P , de coordonnées polaires r, α (figures 3 et 5) au cours de la rotation de l'induc-

teur peut être représentée par une succession de créneaux
alternativement positif et négatif comme montré sur la figure 6.
Chaque créneau correspond au passage d'un pôle 4 devant le
point P et a une largeur qui correspond à la longueur de l'arc
5 polaire θ (figure 3) de chaque pôle 4 à la distance r à laquelle
se trouve le point P. Cette forme d'onde du champ magnétique B
vue par le point P peut être décomposée en série de Fourier et
exprimée par la relation :

$$10 \quad B(t, \theta, \alpha) = B_0 \sum_{p=0}^{p=\infty} \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{2p+1} \cdot (-1)^p \cdot \sin(2p+1) \frac{\theta}{2} \cdot \sin(2p+1)(\omega t - \alpha) \quad (10)$$

Si on considère pour simplifier que la puissance
15 surfacique induite au point P est proportionnelle au carré de
l'amplitude de la composante fondamentale du champ magnétique,
ceci peut être exprimé par l'équation suivante :

$$20 \quad f(r) = \frac{k_1}{\sqrt{R^2 - r^2}} = k_2 A_0^2 \quad (11)$$

où k_2 est une constante de proportionnalité et A_0 est l'ampli-
tude de la composante fondamentale du champ. A_0 peut être tiré
de l'équation (10) en faisant $p = 0$, soit :

$$25 \quad B = \underbrace{\frac{4 B_0}{\pi} \cdot \sin \frac{\theta}{2}}_{A_0} \cdot \sin(\omega t - \alpha) \quad (12)$$

L'équation (11) devient alors :

$$30 \quad \sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{\pi^2}{16 B_0^2} \cdot \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{R^2 - r^2}} \quad (13)$$

ce qui peut encore s'écrire :

$$35 \quad \theta = 2 \text{ Arc sin } \sqrt{\frac{K}{R^2 - r^2}} \quad (14)$$

avec :
$$K = \frac{r}{4 B_0} \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \quad (15)$$

D'après l'équation (14), on voit par conséquent que la longueur de l'arc polaire θ de chaque pôle magnétique 4 à la distance r du centre O de l'inducteur est une fonction croissante de la distance r , d'où la forme concave des côtés 9 et 10 de chacune des surfaces polaires 7 (figure 3).

A l'aide des équations ci-dessus on peut déterminer, pour une largeur donnée des produits métalliques à chauffer et en négligeant les effets de bord, une forme théorique de la surface polaire permettant d'obtenir une homogénéité de chauffage sur toute la largeur des produits métalliques à chauffer. La prise en compte des effets de bord, qui dépendent de la vitesse de rotation de l'inducteur, du nombre et de la forme des pôles, des caractéristiques physiques du produit métallique à chauffer et de la valeur de l'entrefer est complexe. Les effets de bord peuvent être pris en compte en modifiant de manière itérative la forme théorique déterminée par le calcul pour une largeur donnée des produits métalliques. Pour des raisons de simplicité de fabrication, on peut adopter pour la surface polaire de chacun des épanouissements polaires 7 la forme d'un triangle curviligne dont les côtés concaves 9 et 10 sont des arcs de cercle ayant un profil qui se rapproche du profil idéal déterminé de la manière décrite plus haut, et dont le côté convexe 11 est un arc de cercle ayant un rayon de courbure sensiblement égal au rayon extérieur de la zone annulaire balayée par les pôles 4, ce rayon extérieur étant lui-même légèrement plus grand que la moitié de la largeur maximale des produits métalliques à chauffer. En outre, chaque surface polaire en forme de triangle curviligne est de préférence symétrique par rapport à la droite passant par son sommet 8 et par le centre O de l'inducteur tournant, afin d'obtenir un meilleur équilibrage des masses en rotation. En outre, comme montré dans la figure 3, le sommet 8 de chaque triangle curviligne est de préférence tronqué pour éviter les fuites de flux magnétique entre les pôles 4 de polarités opposées.

- REVENDICATIONS -

1.- Dispositif de chauffage par induction magnétique de produits métalliques rectangulaires plats (3) défilant dans le sens de leur longueur, comprenant au moins un inducteur (1,2) apte à produire un champ magnétique d'intensité constante mais réglable, orienté sensiblement perpendiculairement à une
5 grande face du produit métallique (3) à chauffer, ledit inducteur (1,2) étant monté rotatif autour d'un axe (z) perpendiculaire à ladite grande face du produit métallique et comportant au moins deux pôles magnétiques (4) ayant des surfaces polaires orientées vers ladite grande face et parallèles à celle-ci, et balayant une zone annulaire (5) quand l'inducteur tourne, caractérisé en ce que la surface polaire de chaque pôle (4) a la forme d'un triangle curviligne ayant un sommet (8) dirigé vers l'axe de rotation de l'inducteur (1,2), deux côtés concaves (9,10) qui sont symétriques par rapport à une droite passant par ledit sommet (8)
10 perpendiculaire audit axe (z), et un côté convexe (11) en arc de cercle centré sur ledit axe (z) et dont le rayon de courbure est sensiblement égal au rayon extérieur de la zone annulaire (5) balayée par les surfaces polaires des pôles (4).

20 2.- Dispositif de chauffage selon la revendication 1, caractérisé en ce que lesdits côtés concaves (9,10) ont une forme en arc de cercle.

3.- Dispositif de chauffage selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que ledit sommet (8) est tronqué.

4.- Dispositif de chauffage selon l'une quelconque
des revendications 1 à 3, dans lequel chaque pôle (4) comporte
un noyau (6) entouré d'une bobine et muni d'un épanouissement
polaire (7), caractérisé en ce que ladite surface polaire en
5 forme de triangle curviligne est la surface polaire de l'épanouis-
sment polaire (7) du pôle (4) considéré.

$\frac{1}{2}$

Fig. 1

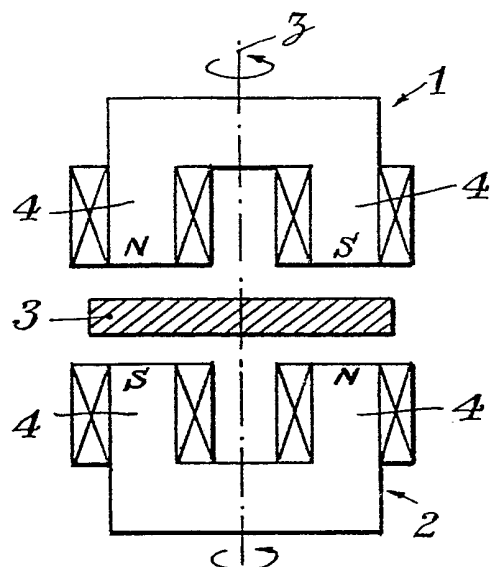


Fig. 2

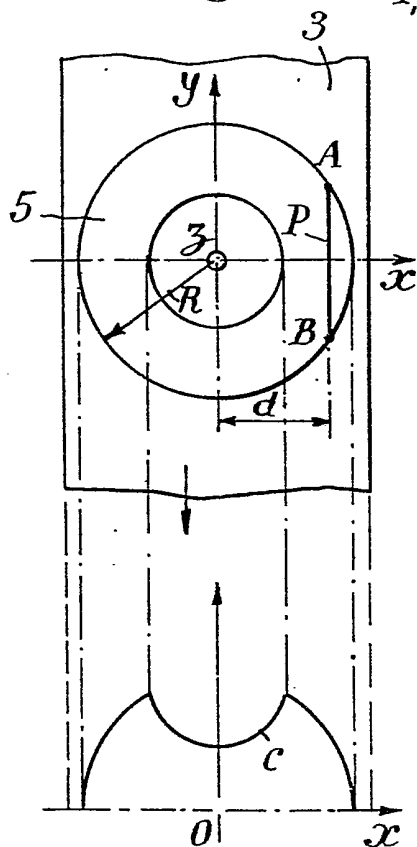


Fig.3

