

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 80 19937

(54) Procédé pour produire une tôle électrique d'acier à basse teneur en carbone et tôle ainsi obtenue.

(51) Classification internationale (Int. Cl.³). C 21 D 8/12, 3/04.

(22) Date de dépôt..... 16 septembre 1980.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée : EUA, 17 septembre 1979, n° 075,785.

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 12 du 20-3-1981.

(71) Déposant : Société dite : USS ENGINEERS AND CONSULTANTS, INC., résidant aux EUA.

(72) Invention de : Arthur Richard Henricks.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Cabinet Beau de Loménie,
55, rue d'Amsterdam, 75008 Paris.

La présente invention concerne une tôle électrique d'acier à basse teneur en carbone. En raison de leurs bonnes caractéristiques magnétiques, les tôles d'acier au silicium sont largement utilisées dans la fabrication de circuits ou noyaux magnétiques d'appareils électriques tels que moteurs, génératrices, transformateurs et analogues. Ces caractéristiques magnétiques favorables, à savoir une grande perméabilité magnétique, une résistivité électrique élevée et de faibles pertes par hystérésis, réduisent la conversion en pure perte d'énergie électrique en chaleur et permettent donc de fabriquer du matériel électrique de puissance et de rendement plus élevés. Cependant, pour leur conférer les propriétés magnétiques désirées et pour optimiser celles-ci, les tôles au silicium doivent être produites sous des conditions établies et maintenues avec soin et précision. Cela explique pourquoi ces tôles sont nettement plus coûteuses que d'autres produits plats laminés plus conventionnels.

Dans la fabrication en masse de petit matériel électrique pour articles de grande consommation, jouets et ainsi de suite, le coût par pièce est le plus souvent le facteur déterminant, dépassant de beaucoup l'importance de considérations de rendement et de puissance de l'équipement. C'est pourquoi, pour ces applications, les fabricants de matériel électrique utilisent fréquemment les tôles d'acier à bas carbone plus conventionnelles et moins chères pour les circuits magnétiques. Il existe donc un marché considérable pour des tôles d'acier à bas carbone ayant des caractéristiques magnétiques acceptables pour des applications à la fabrication de circuits magnétiques.

Dans la production de tôles à bas carbone pour applications magnétiques, des considérations économiques ont jusqu'à présent exclu généralement des traitements coûteux et ont même limité au minimum les traitements non coûteux. C'est pourquoi, bien que des processus sophistiqués aient été mis au point pour produire des tôles d'acier à bas carbone ayant des propriétés magnétiques exceptionnelles, ces processus n'ont pas été adoptés industriellement parce qu'ils augmenteraient notablement le coût du produit, sans pour autant élever les caractéristiques magnétiques de la tôle obtenue au niveau des caractéristiques de tôles au silicium ayant un coût de production comparable. Pour qu'il ait une quelconque valeur sur le plan industriel, tout pro-

céde nouveau visant à améliorer les caractéristiques de tôles à faible teneur en carbone doit donc être un procédé qui n'augmente pas le coût de production de l'acier de manière sensible. Les tôles à bas carbone pour applications magnétiques sont par conséquent produites industriellement, jusqu'à maintenant, de bords d'acier à bas carbone conventionnels, renfermant moins de 0,1% de carbone et les éléments résiduels habituels en quantités normales pour produits laminés à froid. Les processus de laminage sont semblables à ceux utilisés pour d'autres laminés à froid. Plus précisément, les opérations de production se limitent habituellement à laminer à chaud un lingot d'acier à bas carbone en bords, laminer à chaud la bords en feuillard, découper le feuillard laminé à chaud, laminer à froid le feuillard découpé avec une réduction de 40 à 80% et recuire le feuillard en caisse pour provoquer une recristallisation. Un dressage final par laminage ou étirage de 0,5 à 8% est parfois effectué pour atténuer les pertes dans le noyau et/ou pour planer le feuillard obtenu afin qu'il se prête mieux aux opérations finales de refendage et de découpage des lames de tôles à empiler pour former les circuits ou noyaux magnétiques feuilletés.

Les tôles d'acier à bas carbone produites industriellement pour applications magnétiques avec une épaisseur de 0,47 mm (18,5 mils) et ayant subi un recuit à l'état de lames possèdent typiquement des perméabilités magnétiques dans la direction de laminage de 5000 à 6000 à 10 kG, avec des pertes dans le noyau allant de 2,9 à 3,5 W/kg (1,3 à 1,6 W/lb). Pour la même épaisseur, à 15 kG, les perméabilités dans la direction de laminage vont typiquement de 2000 à 4000, avec des pertes dans le noyau de 6,6 à 8 W/kg (3 à 4 W/lb). Des tôles laminées à 0,64 mm (25 mils) ont typiquement des perméabilités dans la direction de laminage de 4200 à 4800, avec des pertes dans le noyau de 4 à 4,4 W/kg (1,8 à 2 W/lb) à 10 kG et des perméabilités dans la direction de laminage allant de 2000 à 3000, avec des pertes dans le noyau de 9,3 à 10,6 W/kg (4,2 à 4,8 W/lb) à 15 kG.

Ces grandes variations dans les caractéristiques magnétiques reflètent la tendance de l'industrie de ne pas attacher une grande importance aux propriétés magnétiques de la tôle d'acier à bas carbone et de mettre plutôt l'accent sur le faible coût de production. Néanmoins, les clients ont récemment commencé à demander des pro-

priétés magnétiques meilleures, particulièrement à 15 kG, sans que cela entraîne une augmentation notable du coût. Il ressort de ce qui précède que les producteurs ont été poussés sérieusement à améliorer les caractéristiques magnétiques de tels aciers sans augmenter
5 sensiblement les coûts de production.

L'une des opérations relativement coûteuses dans la production de tôles électriques d'acier à bas carbone est le recuit en caisse, qui est une opération assez longue et laborieuse. De plus, le
10 feuillard de bobines recuites en caisse présente habituellement une déformation venant de l'enroulement en bobine, ce qui demande des opérations de dressage consécutives. Des efforts ont donc été faits pour utiliser un recuit continu à la place du recuit en caisse plus conventionnel. Cette solution est bien entendu nettement moins coûteuse que le traitement de recuit en caisse et de dressage par lami-
15 nage et/ou étirage et elle peut supprimer le besoin d'une opération de dressage. Toutefois, le traitement de recuit continu ne confère pas d'aussi bonnes propriétés magnétiques que le traitement de recuit en caisse et de dressage par laminage ou étirage ; cela explique pourquoi peu de tentatives dans cette direction ont été faites indus-
20 triellement sans nécessiter des traitements supplémentaires pour améliorer les caractéristiques magnétiques.

Selon l'invention, un procédé pour produire une tôle électrique d'acier à bas carbone, selon lequel une brame d'acier à bas carbone est transformée par laminage à chaud et laminage à froid
25 en un feuillard laminé à froid d'une épaisseur de 0,41 à 0,91 mm (0,016 à 0,036") et le feuillard laminé à froid est ensuite recuit, est essentiellement caractérisé en ce qu'il comprend un recuit continu en deux phases, au cours duquel le feuillard est tout d'abord chauffé à 732 à 816°C (1350 à 1500°F) dans une atmosphère décarburante, où il
30 est maintenu pendant une durée suffisante pour la décarburation de la surface de l'acier mais insuffisante pour la décarburation de sa partie médiane, puis chauffé à 843 à 954°C (1550 à 1750°F) dans une atmosphère non décarburante et non oxydante pour transformer la micro-structure de l'acier en austénite, ce chauffage étant suivi d'un
35 refroidissement rapide pour produire un ferrite à grain fin et à carbures finement dispersés dans la partie médiane de l'acier et un ferrite à gros grain sans précipitations notables à la surface de l'acier.

L'invention apporte également une tôle électrique d'acier à bas carbone ayant d'excellentes propriétés magnétiques et une meilleure aptitude au découpage, qui est caractérisée par une microstructure duplex (biphasée) comprenant une partie médiane de ferrite à grain fin avec des carbures précipités finement dispersés, ainsi qu'une couche superficielle de ferrite à gros grain sans précipitations notables.

La figure unique du dessin annexé est une photomicrographie d'une coupe d'une tôle électrique d'acier à bas carbone produite selon l'invention, sur laquelle la microstructure duplex est clairement visible. La tôle a une épaisseur de 0,46 mm (0,018") et le grossissement est de 100.

Dans le mode de mise en oeuvre préféré du procédé de l'invention, l'acier est laminé à froid à la suite d'opérations conventionnelles dans l'art. Ces opérations sont typiquement celles effectuées pour la production d'un acier à bas carbone contenant normalement tout au plus 0,06% de carbone, 0,2 à 0,8% de manganèse, tout au plus 0,015% de silicium, tout au plus 0,025% de soufre et des impuretés résiduelles normales. Pour obtenir des propriétés magnétiques optimales, il est préférable que l'acier soit rephosphorisé à 0,12 à 0,18% de phosphore et 0,3 à 0,5% de manganèse. Le bain d'acier, avec ou sans les ajustements des teneurs en phosphore et en manganèse, est coulé en continu sous forme d'une barre (brame) ou coulé en lingots, lesquels sont ensuite transformés en brames par laminage à chaud. Les brames sont ensuite laminées à chaud en un feuillard à chaud d'une épaisseur de 1,78 à 3,30 mm (0,070 à 0,130"), avec une température finale habituellement comprise entre 843 et 871°C (1550 à 1600°F) et les feuillards sont ensuite enroulés en bobines à une température inférieure à 621°C (1150°F). Ceci demande bien entendu un certain refroidissement par arrosage avec de l'eau sur la table de sortie faisant suite à la dernière cage avant l'enroulement du feuillard. Le feuillard est ensuite décapé en bobine dans des solutions de décapage conventionnelles, d'acide chlorhydrique ou sulfurique par exemple, pour enlever la calamine de laminage, avant d'être laminé à froid jusqu'à l'épaisseur nominale finale désirée, habituellement comprise entre 0,41 et 0,91 mm (0,016 à 0,036"). Après ce laminage à froid,

l'acier est habituellement recuit en caisse entre 593 et 704°C (1100 et 1300°F) pendant une durée suffisante pour assurer que toutes les portions de la bobine aient la température prescrite pendant l'hafin que la recristallisation de l'acier soit complète, le feuillard étant
5 ensuite dressé par laminage et/ou étirage en vue de son planage et/ou pour lui conférer une tension critique.

Dans le procédé de l'invention, les opérations décrites plus haut de recuit en caisse et de dressage par laminage et/ou étirage sont éliminées ; au lieu de cela, le feuillard laminé à froid est
10 recuit en continu selon des paramètres observés avec soin, comme décrit dans ce qui va suivre.

Pour le recuit continu, il faut utiliser un four à rouleaux ou tout autre four capable de maintenir trois environnements répondant à des conditions bien définies. Un four qui a été utilisé
15 pour la mise en oeuvre de l'invention est un four à rouleaux qu'on peut se procurer dans le commerce et qui comporte des dérouleurs de bobine, un appareil à souder les feuillards les uns aux autres, un équipement pour former une boucle horizontale dans le feuillard et des dispositifs de nettoyage électrolytique, de lavage et de séchage.
20 La section d'entrée est raccordée à une section horizontale contiguë de traitement thermique qui comprend une zone de chauffage chauffée au gaz d'une longueur de 23 m (74 ft), une zone de maintien chauffée électriquement d'une longueur de 183 m (600 ft), une zone de refroidissement contrôlé d'une longueur de 61 m (200 ft) et une zone de
25 refroidissement au jet d'une longueur de 27 m (90 ft). La section de sortie comprend un boucleur horizontal et un enrouleur/tendeur. Le feuillard est supporté dans les zones de traitement thermique du four par des rouleaux commandés individuellement et mutuellement espacés, de sorte que le feuillard fléchit entre eux. Il est à noter que cette
30 description d'un four ayant été utilisé avec succès pour la mise en oeuvre de l'invention n'est aucunement limitative ; des fours avec d'autres dimensions et d'autres conceptions peuvent convenir aussi.

Le feuillard d'acier laminé à froid est soumis à un recuit continu en deux phases, au cours duquel le feuillard est tout
35 d'abord chauffé à une température de recuit inférieure dans la première zone de traitement thermique, où il est chauffé entre 732 et

816°C (1350 et 1500°F) dans une atmosphère décarburante, avant d'être soumis à un réchauffement à une température plus élevée, entre 843 et 954°C (1550 et 1750°F) dans une atmosphère neutre, dans la seconde zone de traitement thermique, afin d'austéniser la micro-
5 structure, et d'être refroidi finalement à grande vitesse. L'atmosphère décarburante utilisée dans la première zone de traitement thermique est de préférence conforme à celle décrite dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique 3 958 918, qui contient au moins 20% d'hydrogène et dont le rapport hydrogène/vapeur d'eau est compris entre 5:1 et
10 8:1. La vitesse d'avance du feuillard et la longueur de la zone de décarburation sont ajustées de telle manière que le feuillard n'est pas décarbure autant que possible, comme cela est habituellement le cas dans l'art antérieur. Le but du traitement thermique initial est de décarburer la surface du feuillard d'acier sans décarburer le
15 coeur. Le produit désiré doit donc avoir un coeur qui présente à peu près la teneur en carbone d'origine d'environ 0,02 à 0,04% et une couche d'acier superficielle contenant moins de 0,005% de carbone. Pour obtenir ce résultat, la demanderesse a découvert qu'il faut décarburer le feuillard suffisamment pour obtenir une couche super-
20 ficielle décarburee à gros grain d'une épaisseur d'au moins 0,051 mm (0,002") pour des qualités de tôles conventionnelles, c'est-à-dire pour celles qui seront recuites à l'état de lames, donc après le découpage, et une épaisseur minimale de 0,089 mm (0,0035") pour les qualités traitées entièrement, c'est-à-dire pour les tôles utilisées sans
25 recuit après le découpage. Une décarburation plus poussée peut bien entendu être réalisée, ce qui apporte une certaine diminution des pertes dans le noyau, mais réduit d'autant l'épaisseur du coeur à grain fin et à plus forte teneur en carbone, ce qui se traduit par une diminution de la dureté et de l'aptitude au découpage globales.
30 Le taux total de décarburation à produire doit donc être un compromis entre les propriétés magnétiques et l'aptitude au découpage désirées et les besoins du client. La profondeur de décarburation sera naturellement fonction de l'atmosphère décarburante utilisée, de la température de l'acier, de la vitesse d'avance du feuillard et de l'équipe-
35 ment utilisé, notamment de la longueur de la zone de décarburation. La profondeur de décarburation peut facilement être accrue ou diminuée par le changement de la vitesse d'avance du feuillard sans changer les autres paramètres.

Après la décarburation partielle décrite ci-dessus dans la première zone de traitement thermique, l'acier est chauffé à une température légèrement plus élevée, c'est-à-dire à 843-954°C (1550-1750°F) dans la seconde zone de traitement thermique. Ce traitement thermique sert à austéniser le feuillard davantage afin que, lors du traitement de refroidissement contrôlé consécutif, la partie médiane non décarburée du feuillard soit transformée en ferrite avec un carbure précipité finement dispersé qui confère un degré élevé de rigidité au produit. Ce traitement thermique secondaire ou traitement de rechauffage à 843-954°C (1550-1750°F) est effectué dans une atmosphère non décarburante et non oxydante, par exemple dans une atmosphère à 50% d'hydrogène avec un point de rosée de tout au plus 1,7°C (35°F), reste azote, qui est maintenue pendant environ 30 s.

A la suite du traitement thermique d'austénisation dans la seconde zone de traitement thermique, l'acier est rapidement refroidi dans une atmosphère sèche d'hydrogène et d'azote dans la troisième et dernière zone. La vitesse de refroidissement est aussi élevée que possible pour réduire au maximum la diffusion de carbone du coeur de l'acier dans la surface décarburée. Comme dans des opérations de recuit continu conventionnelles typiques, l'acier sort du four à une température inférieure à environ 93°C (200°F). Ensuite, les rives du feuillard peuvent être coupées et le feuillard peut être refendu et/ou pourvu d'un revêtement selon des pratiques conventionnelles et conformément aux spécifications du client.

Le produit ainsi obtenu est caractérisé par une microstructure duplex inhabituelle dans laquelle la partie médiane du feuillard, dans le sens de son épaisseur, est en ferrite à grain fin présentant des précipitations de carbure finement dispersées, tandis que les couches superficielles sont en un ferrite à gros grain qui est pratiquement exempt de précipitations. La photomicrographie annexée montre clairement cette microstructure duplex. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué à ce produit en feuille, une grande partie du flux magnétique passe par la peau décarburée où, sous des inductions élevées de l'ordre de 15 kG, le flux magnétique se concentre normalement. Par conséquent, la partie médiane à grain fin contenant les carbures précipités n'a qu'un effet limité sur le pouvoir de con-

duction de flux magnétique de la feuille. Cependant, d'un autre côté, la nature de la partie médiane représente un avantage considérable puisqu'elle confère de la rigidité au produit et améliore ainsi son aptitude au découpage, ce qui réduit l'usure des outils de découpage

5 chez le client. De plus, l'étirage par tirage (tension) pendant le processus de recuit continu donne un produit de planéité exceptionnelle, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer ensuite une opération quelconque de dressage, par laminage par exemple. En plus de ces avantages, le produit, en raison de sa meilleure aptitude au décou-

10 page, possède un bon niveau de pertes dans le noyau à l'état cisailé, de sorte qu'il convient mieux à la fabrication de circuits magnétiques feuilletés pour machines tournantes sans qu'il soit nécessaire de soumettre les lames découpées à un recuit. Néanmoins, la tôle selon l'invention répond mieux à un recuit à l'état de lames puisqu'il se

15 forme des grains de ferrite primaire aux interfaces des différentes couches de la tôle, lesquels croissent vers l'intérieur pendant le recuit des lames, produisant ainsi une texture globale finale se prêtant mieux au passage du flux magnétique aux interfaces, ce qui diminue les pertes dans le noyau et améliore la perméabilité.

20 Exemple.

Pour illustrer les avantages apportés par l'invention, les tableaux I et II ci-après indiquent les caractéristiques magnétiques et mécaniques de tôles produites selon l'invention à partir d'un bain d'acier de production.

25 Pour cet essai, un bain d'acier contenant 0,02% de carbone, 0,54% de manganèse, 0,017% de soufre, 0,07% de silicium et rephosphoré à 0,13% de phosphore a été produit et transformé selon des pratiques conventionnelles en feuillard laminé à froid. Ce feuillard, en bobines, était laminé à froid à trois épaisseurs différentes :

30 0,46 mm (0,018"), 0,58 mm (0,022") et 0,64 mm (0,025") et soumis à un recuit en continu comme décrit dans ce qui précède, comprenant une décarburation à 788°C (1450°F) dans une atmosphère d'hydrogène, azote et vapeur d'eau et un rapport hydrogène/eau de 6:1. Le traitement thermique secondaire était effectué à 871°C (1600°F). Il n'y avait

35 pas d'opérations de dressage par laminage ou étirage. Les tôles de toutes les bobines étaient testées à l'état cisailé et à la suite

d'un recuit à l'état de lames à 788°C (1450°F) pour améliorer les caractéristiques magnétiques. Après ce recuit, tous les résultats d'essai étaient dans les limites prescrites pour les produits du type 2-S par la norme ASTM A-726. L'épaisseur de la peau décarburée à gros grain était en moyenne de 0,089 mm (0,0035").

T A B L E A U I.
Caractéristiques magnétiques à 15 kG, 60 Hz

Bobine n°	Epaisseur mm	A l'état cisailé		Recuit à l'état similé de lames à 788°C pendant 1 h	
		Pertes dans le noyau W/kg	Perméabilité	Pertes dans le noyau W/kg	Perméabilité
1	0,46	9,28	1645	7,54	2222
2	0,46	9,33	1616	7,54	2160
3	0,46	9,35	1640	7,32	2363
4	0,46	9,19	1648	7,58	2162
5	0,56	10,91	1452	8,73	2405
6	0,56	10,96	1421	8,69	2427
7	0,56	10,08	1532	8,27	2165
8	0,58	12,28	1366	9,52	2410
9	0,58	11,84	1366	9,22	2268
10	0,58	11,90	1399	9,13	2358
11	0,64	13,36	1259	10,76	2045
12	0,64	12,52	1295	9,92	2123
13	0,64	12,79	1300	10,23	2088
14	0,64	12,83	1313	10,25	2287
15	0,64	13,51	1261	10,80	2389

T A B L E A U I I
Caractéristiques mécaniques

Bobine n°	Dureté Rockwell B	Direction d'essai (longitudinale ou transversale)	Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% kg/mm ²	Résistance à la traction kg/mm ²	Allongement %
1	64	L T	33,1 33,8	43,6 44,2	29,0 28,5
2	59-64	L T	31,6 32,1	42,5 42,9	27,0 33,0
3	58-61	L T	33,1 33,6	43,5 44,4	29,5 31,5
4	63-64	L T	32,9 32,5	43,5 43,4	26,0 30,0
5	58-64	L T	32,1 32,6	43,0 43,7	28,0 31,0
6	63-64	L T	33,2 34,4	43,7 44,4	29,0 29,0
7	58-59	L T	33,2 33,0	43,4 44,2	29,0 29,0
8	65-67	L T	33,3 32,6	43,3 43,7	30,5 32,0
9	64-68	L T	33,3 33,9	44,2 44,8	29,0 30,5

T A B L E A U I I (suite)

Bobine n°	Dureté Rockwell B	Direction d'essai (longitudinale ou transversale)	Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% kg/mm ²	Résistance à la traction kg/mm ²	Allongement %
10	64-66	L T	33,9 34,2	44,2 44,6	30,0 32,0
11	67-70	L T	34,0 34,9	44,9 45,3	32,0 33,5
12	67-70	L T	34,4 34,2	43,9 44,4	30,5 33,0
13	68-69	L T	33,5 34,4	44,6 44,8	31,0 32,0
14	67-68	L T	34,3 33,8	44,3 44,7	31,0 32,5
15	66-72	L T	34,2 34,2	43,9 45,1	30,0 31,0

R E V E N D I C A T I O N S

1. Procédé pour produire une tôle électrique d'acier à bas carbone, selon lequel une brame d'acier à bas carbone est transformée par laminage à chaud et laminage à froid en un feuillard laminé à froid d'une épaisseur de 0,41 à 0,91 mm (0,016 à 0,036") et le feuillard laminé à froid est ensuite recuit, caractérisé en ce qu'il comprend un recuit continu en deux phases, au cours duquel le feuillard est tout d'abord chauffé à 732 à 816°C (1350 à 1500°F) dans une atmosphère décarburante, où il est maintenu pendant une durée suffisante pour la décarburation de la surface de l'acier mais insuffisante pour la décarburation de sa partie médiane, puis chauffé à 843 à 954°C (1550 à 1750°F) dans une atmosphère non décarburante et non oxydante pour transformer la microstructure de l'acier en austénite, ce chauffage étant suivi d'un refroidissement rapide pour produire un ferrite à grain fin et à carbures finement dispersés dans la partie médiane de l'acier et un ferrite à gros grain sans précipitations notables à la surface de l'acier.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'atmosphère décarburante est de l'air contenant au moins 20% d'hydrogène et ayant un rapport hydrogène/vapeur d'eau de 5:1 à 8:1.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la décarburation de la surface de l'acier est effectuée jusqu'à une profondeur d'au moins 0,051 mm (0,002"), de préférence d'au moins 0,089 mm (0,0035").
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'acier à bas carbone a une teneur initiale en carbone de 0,02 à 0,04% et en ce que la surface de l'acier est décarburée à moins de 0,005% de carbone.
5. Tôle électrique d'acier à bas carbone, caractérisée par une microstructure duplex formée par une partie médiane, dans le sens de l'épaisseur de la tôle, de ferrite à grain fin contenant du carbure précipité finement dispersé, et par une couche superficielle de ferrite à gros grain sans précipitations notables.

6. Tôle selon la revendication 5, caractérisée en ce que la couche superficielle de ferrite à gros grain contient moins de 0,005% de carbone.
7. Tôle selon la revendication 5 ou 6, caractérisée en ce
- 5 que la couche superficielle possède une épaisseur d'au moins 0,051 mm (0,002"), de préférence d'au moins 0,089 mm (0,0035").
8. Tôle électrique d'acier à bas carbone entièrement traitée, ayant une excellente aptitude au découpage et d'excellentes caractéristiques magnétiques sans un recuit final à l'état de lames découpées,
- 10 caractérisée par une microstructure duplex formée par une partie médiane, dans le sens de l'épaisseur de la tôle, de ferrite à grain fin contenant du carbure précipité finement dispersé et par une couche superficielle d'une épaisseur d'au moins 0,089 mm (0,0035") de ferrite à gros grain sans précipitations notables.

