

**MÉTODO DE PRODUCCIÓN DE HOJALATA CONTENIENDO UNA LAMINA DE
ACERO DE SILICIO DE GRANO NO ORIENTADO, LAMINA DE ACERO
OBTENIDA Y USO DE ESTA.**

La presente invención se refiere a un método de producción de láminas de acero eléctrico Fe-Si que presentan propiedades magnéticas. Tal material se utiliza, por ejemplo, en la fabricación de rotores y/o estatores para motores eléctricos para vehículos.

Impartir propiedades magnéticas al acero Fe-Si es la fuente más económica de inducción magnética. Desde el punto de vista de la composición química, la adición de silicio al hierro es una forma muy común de aumentar la resistividad eléctrica, mejorando así las propiedades magnéticas y reduciendo al mismo tiempo las pérdidas totales de potencia. Dos familias coexisten actualmente para la construcción de aceros para equipos eléctricos: aceros grano orientado y grano no orientado.

Los aceros de grano no orientado tienen la ventaja de poseer propiedades magnéticas que son casi equivalentes en todas las direcciones de magnetización. Como consecuencia, dicho material está más adaptado para aplicaciones que requieran movimientos rotativos tales como motores o generadores, por ejemplo.

Las siguientes propiedades se utilizan para evaluar la eficiencia de los aceros eléctricos cuando se trata de propiedades magnéticas:

- La inducción magnética, expresada en Tesla. Esta inducción se obtiene bajo un campo magnético específico expresado en A/m. Cuanto mayor sea la inducción, mejor.
- La pérdida de potencia del núcleo, expresada en W/kg, se mide a una polarización específica expresada en Tesla (T) usando una frecuencia expresada en Hertz. Cuanto más baja es la pérdida total, mejor.

Muchos parámetros metalúrgicos pueden influir en las propiedades antes mencionadas, siendo las más comunes: el contenido de aleación, la textura del material, el tamaño del grano ferrítico, el tamaño y la distribución de los precipitados y el grosor del material. Por lo tanto, el procesamiento termo-mecánico desde el

molde hasta el recocido final de acero laminado en frío es esencial para alcanzar las especificaciones buscadas.

El documento JP201301837 describe un método para producir una hojalata de acero electromagnética que comprenda 0,0030% o menos de C; 2,0-3,5% de Si; 0,20-2,5% de Al; 0,10-1,0% de Mn y 0,03-0,10% de Sn, donde $Si + Al + Sn \leq 4,5\%$. Este acero se somete a laminación en caliente, y después laminado en frío primario con una velocidad de laminado de 60-70% para producir una hojalata de acero con un espesor medio. A continuación, la hojalata de acero se somete a un recocido de proceso, después a una laminación en frío secundaria con una velocidad de laminación de 55-70%, y un ulterior recocido final a 950 °C o más, durante 20-90 segundos. Este método es muy consumidor de energía e implica una larga ruta de producción.

El documento JP2008127612 se refiere a una hojalata de acero electromagnético de grano no orientado, teniendo una composición química que comprende, en % en masa, 0,005% o menos de C; 2 a 4% de Si; 1% o menos de Mn; 0,2 a 2% de Al; 0,003 a 0,2% Sn y el balance en Fe con impurezas inevitables. La hojalata de acero electromagnética, de grano no orientado, con un espesor de 0,1 a 0,3 mm, se fabrica mediante las etapas de: laminar en frío la hojalata laminada en caliente antes y después de una etapa de recocido intermedio y una posterior recristalización y recocido de la lámina. Dicha ruta de proceso es, tal como para la primera aplicación, perjudicial para la productividad ya que implica una larga ruta de producción.

Parece que permanece una necesidad de un método de producción de tales aceros FeSi que podría ser simplificado y más robusto, mientras que no se compromete en pérdida de potencia y propiedades de inducción.

El acero de acuerdo con la invención sigue una ruta de producción simplificada para alcanzar buenos compromisos de pérdida de potencia e inducción. Además, el desgaste de herramienta es limitado con el acero según la invención.

La presente invención tiene por objeto proporcionar un método de producción de hojalata de acero Fe-Si de grano no orientado, laminado en frío y recocido, consistente en las sucesivas etapas siguientes:

- Fundir una composición de acero que contiene en porcentaje en peso:

$$C \leq 0,006$$

$$2,0 \leq Si \leq 5,0$$

$$0,1 \leq Al \leq 3,0$$

$$0,1 \leq Mn \leq 3,0$$

$$N \leq 0,006$$

$$0,04 \leq Sn \leq 0,2$$

$$S \leq 0,005$$

$$P \leq 0,2$$

$$Ti \leq 0,01$$

Siendo el resto Fe y otras impurezas inevitables;

- Moldear dicha masa fundida en una losa;
- Recalentar dicho losa en un temperatura entre 1050 °C y 1250 °C
- Laminar en caliente dicha losa con una temperatura de laminado de acabado en caliente entre 750 °C y 950 °C para obtener una banda de acero laminada en caliente;
- Bobinar dicha banda de acero laminada en caliente a una temperatura entre 500 °C y 750 °C para obtener una banda caliente;
- Opcionalmente, la banda de acero laminada en caliente se recuece a una temperatura entre 650 °C y 950 °C durante un tiempo entre 10 y 48 horas;
- Laminar en frío la banda de acero laminada en caliente para obtener una lámina de acero laminado en frío;
- Calentar la lámina de acero laminado en frío hasta una temperatura de remojo entre 850 °C y 1150 °C;
- Mantener la lámina de acero laminada en frío a la temperatura de remojo durante un tiempo entre 20 y 100 s.;
- Enfriar la lámina de acero laminado en frío hasta la temperatura ambiente para obtener una hoja de acero laminado en frío recocido.

En una forma de realización preferida, el método de producción de lámina de acero Fe-Si de grano no orientado, de acuerdo con la invención, tiene un contenido de silicio tal que: $2,0 \leq \text{Si} \leq 3,5$, aún más preferiblemente, $2,2 \leq \text{Si} \leq 3,3$.

En una forma de realización preferida, el método de producción de lámina de acero Fe-Si de grano no orientado de acuerdo con la invención tiene un contenido de aluminio tal que: $0,2 \leq \text{Al} \leq 1,5$, incluso más preferiblemente $0,25 \leq \text{Al} \leq 1,1$.

En una forma de realización preferida, el método de producción de lámina de acero de Fe-Si de grano no orientado según la invención tiene un contenido de manganeso tal que: $0,1 \leq \text{Mn} \leq 1,0$.

Preferentemente, el método de producción de lámina de acero Fe-Si de grano no orientado de acuerdo con la invención tiene un contenido de estaño tal que: $0,07 \leq \text{Sn} \leq 0,15$, incluso más preferiblemente $0,11 \leq \text{Sn} \leq 0,15$.

En otra forma de realización preferida, el método de producción de lámina de acero Fe-Si de grano no orientado de acuerdo con la invención, implica un recocido opcional de banda en caliente realizado usando una línea de recocido continuo.

En otra forma de realización preferida, el método de producción de una lámina de acero Fe-Si de grano no orientado, de acuerdo con la invención, implica un recocido opcional de banda en caliente realizado usando un recocido discontinuo.

En una forma de realización preferida, la temperatura de remojo está entre 900 y 1120 °C.

En otra forma de realización, se hace un recubrimiento de la lámina de acero recocido y laminado en frío, de grano no orientado, de acuerdo con la invención.

Otro objeto de la invención es el acero de grano no orientado obtenido usando el método de la invención.

También son objeto de la invención motores industriales de alta eficiencia, generadores para la producción de electricidad, motores para vehículos eléctricos que utilizan el acero de grano no orientado, producido de acuerdo con la invención, así como motores para vehículos híbridos que utilizan el acero de grano no orientado, producido según la invención.

Con el fin de alcanzar las propiedades deseadas, el acero de acuerdo con la invención incluye los siguientes elementos de composición química, en porcentaje en peso:

Carbono en una cantidad limitada a 0,006 incluido. Este elemento puede ser dañino porque puede provocar envejecimiento y/o precipitación del acero que deteriora las propiedades magnéticas. Por lo tanto, la concentración debe limitarse a menos de 60 ppm (0,006% en peso).

Contenido mínimo de Si es 2,0% mientras que su máximo se limita a 5,0%, ambos límites incluidos. El Si desempeña un papel importante en el aumento de la resistividad del acero y, por tanto, reducir las pérdidas de corriente de Foucault. Por debajo de 2,0% en peso de Si, los niveles de pérdida para grados de baja pérdida son difíciles de conseguir. Por encima de 5,0% en peso de Si, el acero se vuelve frágil y el procesamiento industrial subsiguiente se hace difícil. En consecuencia, el contenido de Si es tal que: $2,0\% \text{ en peso} \leq \text{Si} \leq 5,0\% \text{ en peso}$, en una forma de realización preferida $2,0\% \text{ en peso} \leq \text{Si} \leq 3,5\% \text{ en peso}$, aún más preferiblemente $2,2\% \text{ en peso} \leq \text{Si} \leq 3,3\% \text{ en peso}$.

El contenido de aluminio está entre 0,1 y 3,0%, ambos incluidos. Este elemento actúa de manera similar al silicio en términos de efecto de resistividad. Por debajo de 0,1% en peso de Al, no hay efecto real sobre la resistividad o las pérdidas. Por encima del 3,0% en peso de Al, el acero se vuelve frágil y el procesamiento industrial subsiguiente se hace difícil. En consecuencia, Al es tal que: $0,1\% \text{ en peso} \leq \text{Al} \leq 3,0\% \text{ en peso}$, en una forma de realización preferida, $0,2\% \text{ en peso} \leq \text{Al} \leq 1,5\% \text{ en peso}$, incluso más preferiblemente, $0,25\% \text{ en peso} \leq \text{Al} \leq 1,1\% \text{ en peso}$.

El contenido de manganeso está entre 0,1 y 3,0%, ambos incluidos. Este elemento actúa de manera similar al Si o Al, para la resistividad: aumenta la resistividad y, por lo tanto, disminuye las pérdidas de corrientes de Foucault. Además, el Mn ayuda a endurecer el acero y puede ser útil para grados que requieran mayores propiedades mecánicas. Por debajo de 0,1% en peso de Mn, no hay un efecto real sobre la resistividad, las pérdidas o sobre las propiedades mecánicas. Por encima de 3,0% en peso de Mn, se forman sulfuros tales como MnS y pueden ser perjudiciales para las pérdidas de núcleo. En consecuencia, Mn es tal que $0,1\% \text{ en peso} \leq \text{Mn} \leq 3,0\% \text{ en peso}$, en una forma de realización preferida, $0,1\% \text{ en peso} \leq \text{Mn} \leq 1,0\% \text{ en peso}$,

Así como el carbono, el nitrógeno puede ser perjudicial porque puede dar lugar a la precipitación de AlN o TiN, lo que puede deteriorar las propiedades

magnéticas. El nitrógeno libre también puede causar envejecimiento, lo que deteriora las propiedades magnéticas. Por lo tanto, la concentración de nitrógeno debe limitarse a 60 ppm (0,006% en peso).

El estaño es un elemento esencial del acero de esta invención. Su contenido debe estar entre 0,04 y 0,2%, ambos límites incluidos. Desempeña un papel beneficioso en las propiedades magnéticas, especialmente mejorando la textura. Ayuda a reducir el componente (111) en la textura final y, al hacerlo, ayuda a mejorar las propiedades magnéticas en general y la polarización/inducción en particular. Por debajo de 0,04% en peso de estaño, el efecto es insignificante y por encima de 0,2% en peso, la fragilidad del acero se convierte en un problema. Por consiguiente, el estaño es tal que: $0,04\% \text{ en peso} \leq \text{Sn} \leq 0,2\% \text{ en peso}$, en una forma de realización preferida, $0,07\% \text{ en peso} \leq \text{Sn} \leq 0,15\% \text{ en peso}$.

La concentración de azufre necesita estar por debajo de 0,005% en peso debido a que el S podría formar precipitados tales como MnS o TiS que deteriorarían las propiedades magnéticas.

El contenido de fósforo debe ser inferior al 0,2% en peso. El P aumenta la resistividad, lo que reduce las pérdidas y también puede mejorar la textura y las propiedades magnéticas debido al hecho de que es un elemento de segregación que podría desempeñar un papel en la recristalización y la textura. También puede aumentar las propiedades mecánicas. Si la concentración es superior al 0,2% en peso, el procesamiento industrial se vuelve difícil debido a la creciente fragilidad del acero. Por consiguiente, P es tal que $P \leq 0,2\% \text{ en peso}$, pero en una forma de realización preferida, para limitar problemas de segregación, $P \leq 0,05\% \text{ en peso}$.

El titanio es un elemento de formación de precipitado que pueden formar precipitados tales como: TiN, TiS, $\text{Ti}_4\text{C}_2\text{S}_2$, Ti(C,N), y TiC que son perjudiciales para las propiedades magnéticas. Su concentración debe ser inferior al 0,01% en peso.

El resto es hierro e impurezas inevitables tales como las que se enumeran a continuación con su máximo contenido permitido en el acero según la invención:

$\text{Nb} \leq 0,005\% \text{ en peso}$

$\text{V} \leq 0,005\%$

$\text{Cu} \leq 0,030\%$

$\text{Ni} \leq 0,030\% \text{ en peso}$

$\text{Cr} \leq 0,040\%$ en peso

$\text{B} \leq 0.0005$

Otras impurezas posibles son: As, Pb, Se, Zr, Ca, O, Co, Sb y Zn, que pueden estar presentes a nivel de trazas.

La fundición con la composición química de acuerdo con la invención se recalienta posteriormente, situándose la temperatura de recalentamiento de la losa (SRT) entre 1050 °C y 1250 °C hasta que la temperatura sea homogénea a través de toda la losa. Por debajo de 1050 °C, la laminación resulta difícil y las fuerzas sobre el molino son demasiado altas. Por encima de los 1250 °C, los altos grados de silicio se vuelven muy suaves y pueden mostrar cierta flacidez y, por lo tanto, resultan difíciles de manejar.

La temperatura de acabado del laminado en caliente juega un papel en la microestructura final, laminada en caliente, y tiene lugar entre 750 y 950 °C. Cuando la temperatura de laminado de acabado (FRT) es inferior a 750 °C, la recristalización es limitada y la microestructura es altamente deformada. Por encima de 950 °C, significa más impurezas en solución sólida y posible precipitación y deterioro de propiedades magnéticas.

La temperatura de bobinado (CT) de la banda laminada en caliente también juega un papel en el producto final y laminado en caliente; tiene lugar entre 500 °C y 750 °C. El bobinado a temperaturas por debajo de 500°C no permite que se produzca suficiente recuperación mientras que esta etapa metalúrgica es necesaria para las propiedades magnéticas. Por encima de 750 °C, aparece una capa de óxido grueso y provoca dificultades para etapas subsiguientes de proceso, tales como el laminado en frío y/o decapado.

La banda de acero laminada en caliente presenta una capa superficial con textura de Goss que tiene un componente de orientación como $\{110\} \langle 100 \rangle$, siendo dicha textura de Goss medida a un 15% de espesor de la banda de acero laminada en caliente. La textura de Goss proporciona a la banda una densidad de flujo magnético mejorada, con lo que disminuye la pérdida del núcleo que es evidente a partir de las Tablas 2, 4 y 6 proporcionadas a continuación. La nucleación de la textura de Goss es promovida durante la laminación en caliente manteniendo la temperatura de laminado de acabado por encima de 750 grados Celsius.

El grosor de la banda de banda caliente varía de 1,5 mm a 3 mm. Es difícil obtener un espesor inferior a 1,5 mm con los laminadores de laminación en caliente habituales. El laminado en frío a partir de una banda de más de 3 mm de espesor hasta el espesor laminado en frío deseado reduce fuertemente la productividad después de la etapa de bobinado y que también deteriora las propiedades magnéticas finales.

El recocido opcional de banda caliente (HBA) se puede realizar a temperaturas entre 650 °C y 950 °C, este paso es opcional. Puede ser un recocido continuo o un recocido por lotes. Por debajo de una temperatura de inmersión de 650 °C, la recristalización no es completa y la mejora de las propiedades magnéticas finales es limitada. Por encima de una temperatura de inmersión de 950 °C, los granos recristalizados se hacen demasiado grandes y el metal se vuelve quebradizo y difícil de manejar durante las etapas industriales subsiguientes. La duración de la inmersión depende de si se trata de un recocido continuo (entre 10 s y 60 s) o de un recocido por lotes (entre 24h y 48h). Posteriormente, la banda (recocida o no) es laminada en frío. En esta invención, la laminación en frío se realiza en una etapa, es decir, sin recocido intermedio.

El decapado puede hacerse antes o después del paso de recocido.

Finalmente, el acero laminado en frío se somete a un recocido final a una temperatura (FAT) comprendida entre 850 y 1150 °C, preferentemente entre 900 y 1120 °C, durante un tiempo comprendido entre 10 y 100 s, dependiendo de la temperatura utilizada y del tamaño de grano objetivo. Por debajo de 850 °C, la recristalización no es completa y las pérdidas no alcanzan su máximo potencial. Por encima de 1150 °C, el tamaño del grano es demasiado alto y la inducción se deteriora. En cuanto al tiempo de remojo, por debajo de 10 segundos, no se da tiempo suficiente para la recristalización, mientras que por encima de 100 s el tamaño del grano es demasiado grande y afecta negativamente a las propiedades magnéticas y finales, tales como el nivel de inducción.

El espesor final de la lámina (FST) está entre 0,14 mm y 0,67 mm.

La microestructura de la lámina final y producida de acuerdo con esta invención contiene ferrita con un tamaño de grano entre 30 μm y 200 μm . Por debajo

de 30 μm , las pérdidas son demasiado altas y por encima de 200 μm , el nivel de inducción es demasiado bajo.

En cuanto a las propiedades mecánicas, la resistencia elástica está entre 300 MPa y 480 MPa, mientras que la resistencia a la tracción máxima está entre 350 MPa y 600 MPa.

Los siguientes ejemplos son para propósitos de ilustración y no se pretende que se interpreten para limitar el alcance de la descripción acá:

Ejemplo 1

Se produjeron dos hornadas de laboratorio con las composiciones que se dan en la tabla 1 a continuación. Los valores subrayados no están de acuerdo con la invención. A continuación y sucesivamente: se realizó el laminado en caliente después del recalentamiento de losas a 1150 °C. La temperatura de acabado de laminación fue de 900 °C y los aceros fueron bobinados a 530 °C. Las bandas calientes se recocieron por lotes a 750 °C durante 48 h. Los aceros se laminaron en frío hasta 0,5 mm. No hubo recocido intermedio. El recocido final se realizó a una temperatura de remojo de 1000 °C y el tiempo de remojo fue de 40s.

Elemento (% en peso)	Hornada 1	Hornada 2
C	0,0024	0,0053
Si	2,305	2,310
Al	0,45	0,50
Mn	0,19	0,24
N	0,001	0,0021
Sn	<u>0,005</u>	0,12
S	0,0049	0,005
P	<0,05%	<0,05%
Ti	0,0049	0,0060

Tabla 1: composición química en% en peso de las hornadas 1 y 2

Se realizaron mediciones magnéticas en ambos de estas hornadas. Se midieron las pérdidas magnéticas totales a 1,5T y 50Hz, así como la inducción

B5000 y los resultados se muestran en la tabla siguiente. Se puede observar que la adición de Sn da como resultado una mejora significativa de las propiedades magnéticas usando esta ruta de proceso.

	Hornada 1	Hornada 2
Pérdidas a 1,5T/50Hz (W/Kg)	2,98	2,92
B5000 (T)	1,663	1,695

Tabla 2: Propiedades magnéticas de las hornadas 1 y 2

Ejemplo 2

Se produjeron dos hornadas con las composiciones que se dan en la tabla 3 a continuación. Los valores subrayados no están de acuerdo con la invención. El laminado en caliente se realizó después del recalentamiento de lasas a 1120 °C. La temperatura de laminado de acabado fue de 870 °C, la temperatura de embobinado fue de 635 °C. Las bandas calientes se recocieron por lotes a 750 °C durante 48 h. A continuación, el laminado en frío tuvo lugar hasta 0,35 mm. No se produjo ningún recocido intermedio. El recocido final se realizó a una temperatura de remojo de 950 °C y el tiempo de remojo fue de 60 s.

Elemento (% en peso)	Hornada 3	Hornada 4
C	0,0037	0,0030
Si	2,898	2,937
Al	0,386	0,415
Mn	0,168	0,135
N	0,0011	0,0038
Sn	<u>0,033</u>	0,123
S	0,0011	0,0012
P	0,0180	0,0165
Ti	0,0049	0,0041

Tabla 3: composición química en % en peso de hornadas 3 y 4

Se realizaron mediciones magnéticas en ambos ciclos. Se midieron las pérdidas magnéticas totales a 1,5T y 50Hz, así como la inducción B5000 y los

resultados se muestran en la tabla siguiente. Se puede observar que la adición de Sn da como resultado una mejora significativa de las propiedades magnéticas usando esta ruta de proceso.

	Hornada 3	Hornada 4
Pérdidas a 1,5T/50Hz (W/Kg)	2,40	2,34
B5000 (T)	1,666	1,688

Tabla 4: Propiedades magnéticas de las hornadas 3 y 4

Ejemplo 3

Se produjeron dos hornadas con las composiciones que se dan en la tabla 5 a continuación. Los valores subrayados no están de acuerdo con la invención. A continuación, sucesivamente: se realizó el laminado en caliente después del recalentamiento de losas a 1150 °C. La temperatura de laminado de acabado fue de 850 °C y los aceros fueron bobinados a 550 °C. Las bandas calientes se recocieron por lotes a 800 °C durante 48 h. Los aceros se laminaron en frío hasta 0,35 mm. No hubo recocido intermedio. El recocido final se realizó a una temperatura de remojo de 1040 °C y el tiempo de remojo fue de 60 s.

Elemento (% en peso)	Hornada 5	Hornada 6
C	0,002	0,0009
Si	3,30	3,10
Al	0,77	0,61
Mn	0,20	0,21
Ne	0,0004	0,0014
Sn	<u>0,006</u>	0,076
S	0,0004	0,0012
P	≤ 0,05	≤ 0,05
Ti	0,0015	0,0037
Resistividad (μΩcm)	55,54	53,07

Tabla 5: composición química en% en peso de hornadas 5 y 6

Se realizaron mediciones magnéticas en ambos ciclos. Se midieron pérdidas magnéticas totales a 1,5T y 50Hz, a 1T y 400 Hz, así como a la inducción B5000 y los resultados se muestran en la tabla siguiente. Se puede observar que 0,07% en peso de adición de Sn da como resultado una mejora de las propiedades magnéticas usando esta ruta de proceso.

	Hornada 5	Hornada 6
Pérdidas a 1.5T/50Hz (W/Kg)	2,17	2,12
B5000 (T)	1,673	1,682

Tabla 6: Propiedades magnéticas de las hornadas 5 y 6

Como puede verse, a partir de ambos ejemplos, Sn mejora las propiedades magnéticas usando la ruta metalúrgica de acuerdo con la invención con diferentes composiciones químicas.

El acero obtenido con el método de acuerdo con la invención puede utilizarse para motores de vehículos eléctricos o híbridos, para motores industriales de alta eficiencia así como para generadores para producción de electricidad.