

Revista de Metalurgia

PUBLICACION BIMESTRAL DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES METALURGICAS
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS

NOVIEMBRE-DICIEMBRE 1985

SUMARIO

- El ruido electroquímico (1/f) para el estudio de la eficacia de un inhibidor de corrosión. J. M.^a Bastidas y J. M. Malo.
- Influencia de los tratamientos térmicos de esferoidización sobre la dureza de las aleaciones del sistema Al-Si. F. A. Calvo, A. J. Criado, J. M.^a Gómez de Salazar y F. Molleda.
- Tenacidad de rotura del cinc reforzado con filamentos de acero inoxidable. A. Madroño.
- Ensayos metalúrgicos sobre minerales auríferos para su posible aprovechamiento mediante la técnica de lixiviación en montones. A. Bonilla, M. González y A. Ortega.
- Revisión: Estudio de los modernos procesos siderúrgicos empleados para la fabricación de chapa magnética de grano no orientado. Nuevas calidades obtenidas. I. Ibarrondo.

Estudio de los modernos procesos siderúrgicos empleados para la fabricación de chapa magnética de grano no orientado. Nuevas calidades obtenidas (*)

I. Ibarrondo (*)

C.D.U. 669.14.018.58-416 : 539.4.015.1 = 60

Resumen

En el presente trabajo se pasa revista a los modernos procesos siderúrgicos empleados en la fabricación de chapas de grano no orientado con destino a maquinaria eléctrica. En el mismo se incluyen, además de diversos trabajos previos del autor, los correspondientes a la chapa de acero dulce descaburizada para aplicaciones eléctricas, chapa magnética de grano no orientado con y sin textura y nuevos materiales, cristalinos y amorfos, de reciente obtención. Se detallan, asimismo, las propiedades y aplicaciones de todas estas calidades nuevas obtenidas.

Modern Manufacturing Processes for Non-Oriented Magnetic Sheet. New Grades Obtained

Abstract

In this work the most modern siderurgical processes used in the manufacture of non-oriented sheets for electrical machinery are reviewed. Previous work by the author is also included along with work that corresponds to decarburized mild steel sheet for electrical applications, non-oriented magnetic sheet with and without texture and to new crystalline and amorphous materials recently obtained. Properties and applications of all these new qualities obtained are detailed as well.

1. INTRODUCCION

Desde 1906, fecha del inicio de la producción industrial de la chapa magnética de grano no orientado como consecuencia de los trabajos de Barret, Brown y Hadfield (1-3), la evolución de los procesos siderúrgicos para la fabricación de estos materiales ha sido, hasta fechas relativamente recientes, bastante lenta (4-7), no habiéndose producido en las décadas anteriores a 1976, de conformidad a lo señalado por Taguchi (8), modificaciones básicas en los procesos de fabricación de estos materiales, así como tampoco nuevas calidades.

No obstante, el creciente incremento en los costes de la energía, especialmente desde 1974, ha hecho que el ahorro de la misma adquiriera un singular relieve.

De conformidad con ello, y teniendo en cuenta los factores que deben tomarse en consideración en la selección de la chapa magnética que ha de constituir un motor, cuales son:

- Costes derivados de la calidad seleccionada para la materia prima.
- Costes de transformación.
- Costes de explotación o funcionamiento.

Se hace evidente la necesidad de un cambio progresivo en los criterios de selección de la materia prima, ya que si bien con anterioridad a la crisis energética de 1974 el primero de dichos factores era fundamental, con posterioridad a dicha fecha, es notoria la mayor incidencia del tercer factor, haciéndose cada vez más evidente la necesidad de emplear máquinas eléctricas de mayor rendimiento (9) obtenido mediante la combinación del adecuado diseño tecnológico y el empleo de calidades superiores en la materia prima elegida.

Consecuencia de todo ello es la modificación de los procesos siderúrgicos convencionales y la introducción de nuevas técnicas, entre las que cabe citar, de manera preferente, las dirigidas a la obtención de chapa magnética de grano no orientado pero con textura, así como la obtención, a nivel de laboratorio, de nuevos materiales, tales como las bandas cristalinas con alto contenido de silicio y materiales amorfos. Todo lo cual ha hecho surgir expectativas completamente nuevas en el dominio de la chapa magnética no orientada.

En la tabla I se muestra una clasificación, según criterio del autor, de los diversos tipos de materiales y calidades que actualmente se engloban bajo la denominación genérica de chapas magnéticas de grano no orientado, cuyos procesos siderúrgicos de obtención, así como sus características magnéticas, se estudiarán seguidamente.

(*) Trabajo recibido el 12 de noviembre de 1985.

(*) Prof. de Física Aplicada en la Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de San Sebastián (Univ. del País Vasco).

TABLA I.—Clasificación de las diversas calidades y grados en chapa magnética de grano no orientado

Tipos de material	Condiciones de suministro	Contenido de Si, %	Grado A.I.S.I.	Características del material s/norma
Chapa eléctrica de acero dulce al carbono	Totalmente tratada	—	Tipos 1, 2	No se garantizan
	Semi-tratada	—		
Chapa eléctrica de acero dulce al carbono y descarburada	Totalmente tratada	—	Tipo 2S	A.S.T.M. A.726-78
	Semitratada	—		
Chapa magnética al silicio no orientada	Totalmente tratada	{ Bajo 0,35-1,00	M-47	A.S.T.M. A.677-77
			M-45	DIN 46.400 - I Parte
Chapa magnética al silicio no orientada	Totalmente tratada	{ Medio 1,00-2,25	M-43	A.S.T.M. A.677-77
			M-36	DIN 46.400 - I Parte
Chapa magnética al silicio no orientada	Totalmente tratada	{ Alto > 2,25	M-27 a	A.S.T.M. A.677-77
			M-5	DIN 46.400 - I Parte
Chapa magnética al silicio no orientada	Semi-tratada	{ Bajo 0,35-1,00	M-47	A.S.T.M. A.683-77
			M-45	DIN 46.400 - II Parte
Chapa magnética al silicio no orientada	Semi-tratada	{ Medio 1,00-2,25	M-43	A.S.T.M. A.683-77
			M-36	DIN 46.400 - II Parte
Chapa magnética al silicio no orientada con textura	Totalmente tratada	≈ 3,20		(*) Ver presente trabajo
Chapa magnética al silicio no orientada con textura	Semi-tratada	≈ 1,80		(*) Ver presente trabajo
Nuevos materiales				
— Banda ultrarrefrigerada de alto contenido en silicio		≈ 6-6,5		(*) En fase experimental
— Bandas de materiales en estado amorfo				(*) En fase experimental

2. CHAPA DE ACERO DULCE AL CARBONO DESCARBURADA PARA APLICACIONES ELECTRICAS

Este tipo de material, chapa de acero dulce al carbono descarburada para aplicaciones eléctricas, se utiliza actualmente en todo el mundo para la fabricación de núcleos de motores pequeños (1-50 h.p.) y fraccionarios (< 1 h.p.), pudiendo señalarse, a modo de ejemplo, que en el período 1976-1979 representó el 50 % del volumen total de chapa producida en los Estados Unidos con destino a aplicaciones eléctricas.

La explicación reside en el hecho de que en los motores fraccionarios y pequeños, el apartado correspondiente a los costes derivados de la calidad seleccionada para la materia prima adquiere un especial relieve debido a los bajos consumos de energía en funcionamiento.

Si a ello se añade el gran peso específico relativo de las pérdidas en el cobre del estator, como consecuencia de las altas corrientes de excitación requeridas, y su posible minimización mediante el aumento de la permeabilidad del material y mejora en el diseño del motor, se justifica en consecuencia la amplia utilización actual de este tipo de material en la fabricación de motores pequeños y fraccionarios.

Proceso siderúrgico

En la figura 1 se muestran los esquemas de los procesos siderúrgicos empleados en la fabricación de chapa de acero dulce descarburada para aplicaciones eléctricas.

En lo que se refiere al proceso en acería, éste se realiza mediante una práctica estándar en convertidor LD o en horno eléctrico; debe señalarse, de conformidad con los trabajos de Anan'evsky *et al.* (11), que la elaboración de este tipo de aceros mediante colada continua permite obtener un producto final con características magnéticas similares a las que se consiguen mediante el proceso convencional de colada en lingotera; en el mencionado trabajo se recogen los valores de dichas características, así como los parámetros de trabajo del proceso siderúrgico.

En lo que a la laminación en frío respecta, ésta se realiza actualmente en una única etapa que incluye porcentajes de reducción del 80 %, alcanzables mediante el empleo de emulsiones de alto índice de saponificación.

Especial mención merece, en el caso de los materiales semi-tratados, la etapa de reducción crítica, respecto a la cual cabe señalar, de conformidad con los estudios realizados por Knight *et al.* (12) y Bochkov *et al.* (13), que la optimización de las características magnéticas se logra para una estructura de grano equiaxial y homogénea con tamaño de grano comprendido en el intervalo 1-3 de la escala A.S.T.M., lo que corresponde a reducciones críticas, previas al recorrido final, comprendidas entre 5 y 10 %. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en trabajos similares llevados a cabo por el autor (14), donde se señalaban reducciones críticas del 10 % seguidas de un recocido final realizado a 780 ±10 °C.

Finalmente, en la etapa correspondiente al recocido descarburante, se producen de manera simultánea la recristalización y la descarburación del material hasta niveles inferiores a 0,005 %, empleándose

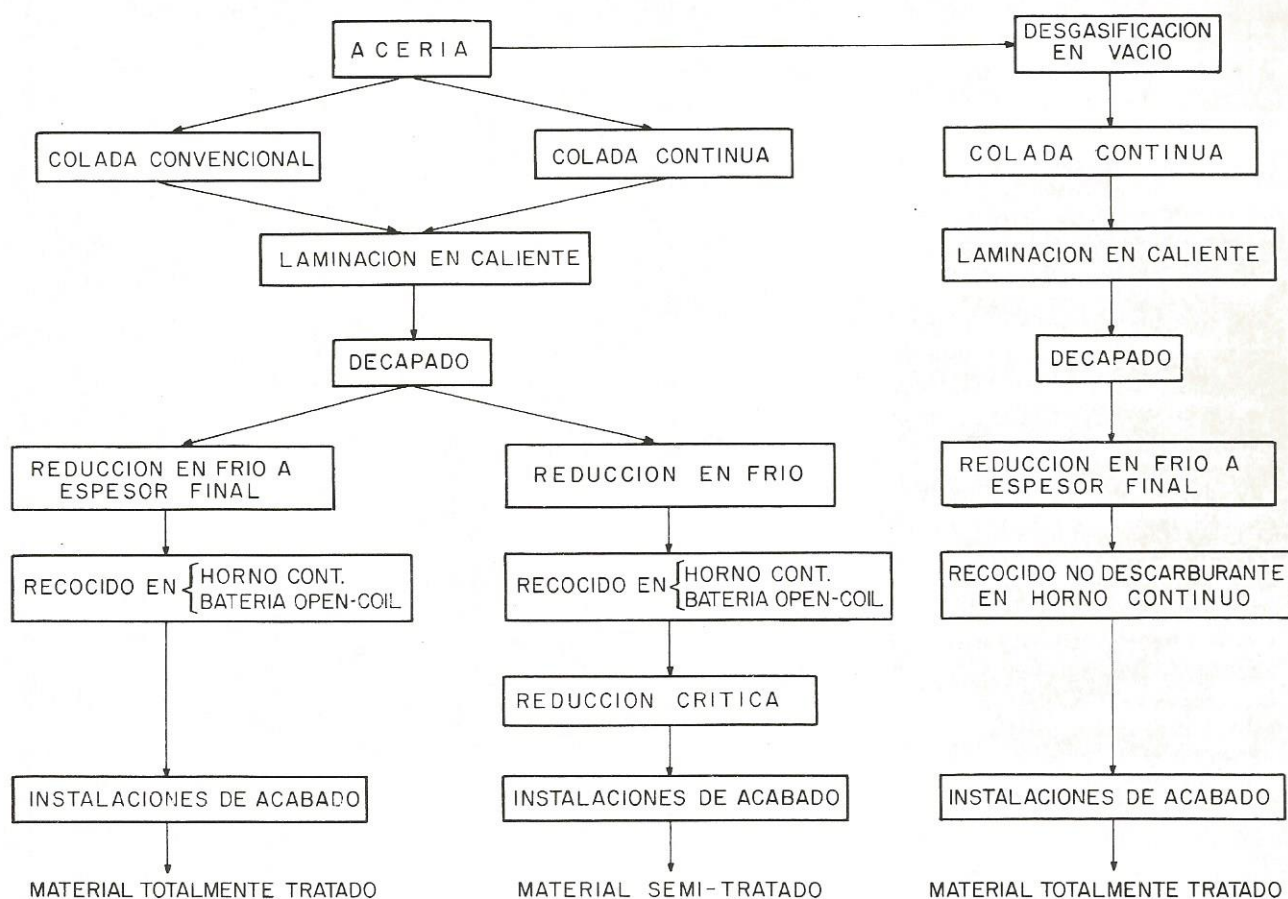


FIG 1.—Esquemas de los procesos siderúrgicos empleados en la fabricación de chapa de acero dulce descarburado para aplicaciones eléctricas.

a tal fin las instalaciones de recocido descarburentes en continuo o bien las de bobina abierta (recocido *open-coil*).

En el caso de los aceros dulces al carbono para aplicaciones eléctricas, al contrario de lo que sucede con la chapa magnética al silicio, especialmente en la de contenidos medio y alto, no es aconsejable el empleo del recocido descarburentes en continuo, ya que en este caso la descarbureción a temperaturas inferiores a A_1 conduce a velocidades de descarbureción lentas, y, por ende, a productividades bajas. Por otra parte, la descarbureción a temperaturas superiores a A_1 conduce a un proceso de difusión del carbono en un medio bifásico ($\alpha + \gamma$), con lo que disminuye el coeficiente de difusión del carbono y se produce simultáneamente una estructura columnar de grano (15 y 16) origen de malas características magnéticas.

Por ello lo más adecuado para la fabricación de estos materiales es el empleo del recocido descarburentes en bobina abierta.

En trabajos previos del autor (17 y 18) se ofrece una visión más completa de este tipo de instalaciones de recocido en bobina abierta, así como los fundamentos teóricos y factores que inciden sobre la cinética del proceso de descarbureción, especialmente en lo que a las atmósferas de recocido se refiere.

Asimismo es de hacer notar que muy recientemente se ha desarrollado un proceso siderúrgico (19) de bajo coste (Fig. 1) que incorpora la desgasifica-

ción en vacío en acería, y que permite alcanzar niveles de carbono comprendidos en el intervalo $0,002 < C < 0,02 \%$, con lo que es posible, en estas condiciones, someter al material a un recocido final no descarburentes en continuo ($760-815^\circ\text{C}$, 2 min, atmósfera H.N.X.) de alta productividad, ya que se evitan para el mismo los inconvenientes anteriormente señalados.

Características magnéticas y mecánicas

Los materiales así tratados presentan unas características magnéticas y mecánicas medias que se describen en la bibliografía relativa a este tipo de materiales (20 y 21), así como en trabajos previos del autor (22) que se resumen en la tabla II.

A la vista de los resultados aquí expuestos, se hacen evidentes las bajas características mecánicas del material totalmente tratado. Para obviar este inconveniente va tomando cada vez mayor importancia el suministro de estos materiales en la calidad semi-tratada.

No obstante actualmente y al objeto de mejorar la conformabilidad del material totalmente tratado se procede a:

- Incrementar los contenidos de fósforo y manganeso hasta niveles entre 0,10-0,15 % y entre 0,40 y 0,60 %, respectivamente.

TABLA II.—Características magnéticas y mecánicas de la chapa de acero dulce descarburada para aplicaciones eléctricas

Tipo de material	Espesor, mm	Características magnéticas			Características mecánicas		
		W_{5000}	W_{5000}	μ_{5000}	R	E	A, %
		W/kg		Gauss/Oe	kg/mm ²	kg/mm ²	ISO 80 × 20
Totalmente tratado (*)	0,5	3,2	6,9	2.900	29-31	18-20	35-36
Totalmente tratado (**)	0,5	3,7	8,7	2.700	30-33	18-24	32-37
Totalmente tratado (***)	0,5	4,7	10,1	1.800	42-47	40-45	6-9
Totalmente tratado (****) Desgasificado en vacío	0,65	—	10,4	1.560	—	—	—
Semi-tratado	0,5	2,8	6,4	3.300	A voluntad del comprador		

(*) Recocido final a 780 °C, Atm. H.N.X. (5-15 % H₂, 0,1-0,2 % CO, 0,1 % CO₂, Resto N₂), 12 h

(**) Recocido final a 580 °C, Atm. H.N.X. (5-15 % H₂, 0,1-0,2 % CO, 0,1 % CO₂, Resto N₂), 12 h

(***) Recocido de recrist. parcial 450 °C, Atm. H.N.X. (5-15 % H₂, 0,1-0,2 % CO, 0,1 % CO₂, Resto N₂), 12 h

(****) Recocido final en continuo no descarburado 760-815 °C, Atm. H.N.X. (5-15 % H₂, 0,1-0,2 % CO, 0,1 % CO₂, Resto N₂), 2 min.

— Someter al material a un recocido de recristalización parcial a baja temperatura (23), lo cual permite, mediante el control del grado de recristalización, obtener las características mecánicas deseadas previamente a la conformación.

3. CHAPA MAGNETICA AL SILICIO DE GRANO NO ORIENTADO

Aunque bajo este epígrafe general se incluye toda la gama de chapas magnéticas al silicio de grano no orientado, se hace necesario, en la actualidad, distinguir entre los grados correspondientes a un contenido bajo de silicio (0,35-1,00 %) y aquellos cuyo contenido es medio o alto, habida cuenta de las diferencias que se establecen en sus respectivos procesos de fabricación, así como en sus aplicaciones.

3.1. Chapa magnética de grano no orientado y bajo contenido de silicio

No obstante lo señalado en el párrafo anterior, referente a la amplia utilización en la actualidad de la chapa de acero dulce descarburada en la fabricación de motores fraccionarios y pequeños, se hace evidente que, como consecuencia del progresivo incremento en los costes de la energía, adquiere cada vez mayor incremento la sustitución progresiva de dicho material por los grados bajos de la chapa magnética al silicio de grano no orientado, apuntando en este sentido las recomendaciones del Ministerio de Industria y Comercio Exterior del Japón (Moonlight Project) (24) y del Departamento de Energía de los Estados Unidos (25) quienes recomiendan el empleo de los grados más bajos en silicio de la chapa magnética de grano no orientado en sustitución de la chapa de acero dulce descarburada para motores fraccionarios y pequeños, respectivamente.

Muestra de ello ha sido el comienzo, a partir de 1975, de la producción de motores de este tipo con

un mayor rendimiento, estimándose que en los Estados Unidos, en 1980, un 7 % de estos motores se fabricaban con este fin, cifra que se espera alcance el 75 % en 1990 (26).

Un estudio completo sobre el proceso siderúrgico de fabricación y características de la chapa magnética de grano no orientado, en el intervalo bajo de silicio (0,35-1,20 %), en su aplicación al caso de motores fraccionarios y pequeños puede verse en un trabajo previo del autor sobre este tipo de materiales (27).

3.2. Chapa magnética de grano no orientado de medio y alto contenido en silicio

Dentro de este intervalo de contenidos de silicio, y al objeto de mejorar tanto la calidad superficial como las propiedades magnéticas de estos aceros, se han desarrollado recientemente una serie de nuevas técnicas conducentes a:

- Rebajar los niveles de impurezas del material, mediante la introducción de las técnicas de desgasificación en vacío y desulfuración intensa del material. De este modo es posible eliminar la incidencia negativa, que tanto de forma directa, frenado del movimiento de la pared de Bloch, efectos de dilución magnéticas, etc., como indirecta, inhibición del crecimiento de grano, ejercen dichas impurezas.
- Inducir determinadas texturas, dando lugar a la chapa magnética de grano no orientado, pero con textura, de la que nos ocuparemos en el siguiente apartado.

Constituyendo ambas variables, impurezas presentes en el material y textura del mismo, las líneas actuales de trabajo e investigación para la mejora de las características electromagnéticas de la chapa magnética de grano no orientado.

Proceso siderúrgico

Todo lo anterior permite afirmar que tanto las

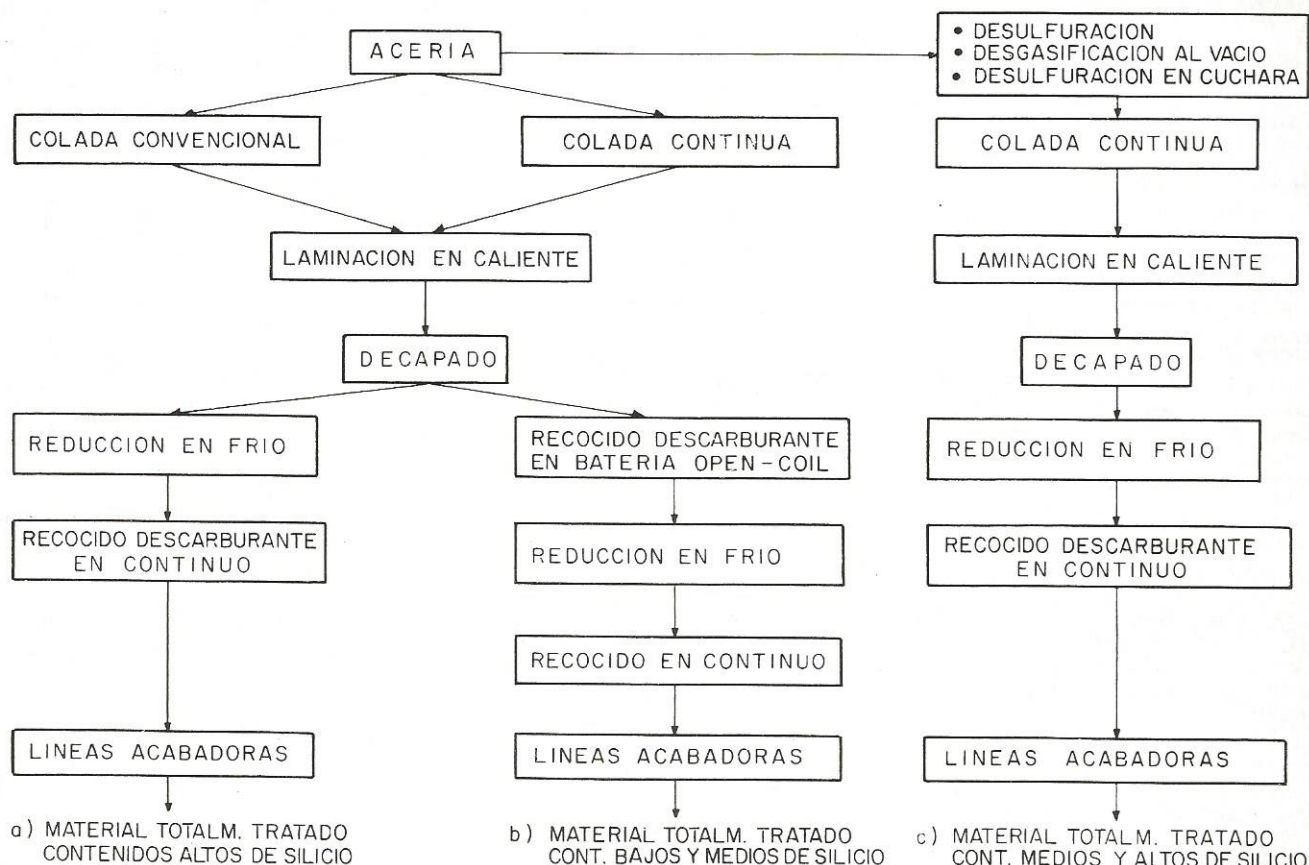


FIG 2.—Esquema de los procesos siderúrgicos empleados en la fabricación de chapa magnética de grano no orientado

técnicas de desulfuración mediante el empleo de escorias sintéticas (28), con lo que se consiguen contenidos finales de azufre comprendidos en el intervalo 0,010-0,015 %, como el empleo de reducciones críticas previas al recocido final, son procedimientos que, aun empleándose actualmente, tienden a ser sustituidos, debiendo ser considerados como procedimientos del pasado, cuya descripción general puede verse en el trabajo de Coombs (29).

En la figura 2a) y b) se muestran los esquemas modernos, aunque convencionales, para la obtención de chapa magnética de grano no orientado en los intervalos de contenido alto y medio-bajo de silicio, respectivamente.

El empleo del proceso siderúrgico a) está limitado exclusivamente al contenido alto de silicio ($\text{Si} > 2,25\%$ por razones similares a las expuestas en el apartado anterior, produciéndose como entonces, en el caso de los contenidos medios y bajos en silicio, una disminución de productividad de la línea de recocido en continuo y una estructura de grano columnar para contenidos de carbono comprendidos en el intervalo 0,03-0,04 %, siendo posible obviar este inconveniente sometiendo al material laminado en caliente a un recocido descarburante en la batería *open-coil* (proceso b), con lo que en este caso el recocido final se transforma en un recocido de recristalización no descarburante a alta velocidad ($v \approx 40-45 \text{ m/min}$).

En la figura 2c) se muestra el esquema del proceso siderúrgico más reciente para la fabricación de los

TABLA III.—Composición obtenida en acería después de los procesos de degasificación en vacío y desulfuración del material, %

C	: 0,01 - 0,02
Si	: 0,7 - 2,50
Al	: 0,4 - 0,7 (*)
S	$\leq 0,005$
O	: 0,001 - 0,003
N	< 0,003

(*) Sólo para los grados más altos.

grados medio y alto de la chapa magnética de grano no orientado, que incluye la eliminación de las impurezas en acería mediante las etapas de degasificación en vacío y desulfuración del material, incluida la desulfuración adicional en cuchara hasta niveles de azufre inferiores a 0,005 %, todo ello de conformidad a las modernas prácticas siderúrgicas (30 y 31) que permiten obtener composiciones químicas como las señaladas en la tabla III.

La eliminación de estas impurezas hasta los niveles señalados:

- Minimiza los efectos negativos que sobre las propiedades magnéticas, especialmente las pérdidas por histéresis, ejercen dichas impurezas.
- Evita el desarrollo, para contenidos medios de silicio, de una estructura de grano columnar durante el proceso de recocido en continuo.

- Mejora el control y rendimiento de las ferroleaciones en cuchara.
- Como consecuencia del menor grado de descarburation requerido durante el proceso descarburation en continuo, es posible eliminar parcialmente la subcapa de óxidos generada en la interfase gas-metal en el transcurso del mencionado proceso (32 y 33), dando como resultado una disminucion en la cifra de pérdidas por histéresis.

Se hace posible, asimismo, promover el adecuado crecimiento de grano (A.S.T.M. 3-5) mediante la anulacion del mecanismo que inhibe el crecimiento del mismo, estando ligado esto último a la presencia de precipitados de nitruro de aluminio y oxisulfuro de manganeso.

En los trabajos de Browne (34) y Goto *et al.* (35) puede verse un estudio completo sobre los factores que intervienen en el mecanismo de inhibicion anteriormente citado, señalándose en ellos, que el tamaño, morfología y distribucion de los precipitados de oxisulfuro de manganeso, producidos en el transcurso de la etapa de laminacion en caliente, está estrechamente relacionado con los contenidos de azufre, oxígeno y manganeso, así como con las temperaturas de recalentamiento del *slab*.

Asimismo, y como consecuencia de todo ello, se muestra la dependencia entre el tamaño de grano final y la cifra de pérdidas magnéticas como función de los mencionados factores, proponiéndose pequeñas adiciones de tierras raras (0,006-0,015 %) al objeto de rebajar la solubilidad de los precipitados, bloqueando de esta forma su efecto inhibitor y obteniéndose como consecuencia de ello las mejores características magnéticas dentro de la gama de chapa magnética de grano no orientado sin textura.

Características magnéticas y aplicaciones

Las características magnéticas mínimas requeridas para los diversos grados, en las calidades totalmente tratadas y semitratadas, se establecen de conformidad a las diversas normas y especificaciones (36-38).

En lo que a las aplicaciones respecta, cabe señalar que, dada la enorme diversidad de máquinas eléctricas operando en el campo de las potencias altas y medias, se hace muy difícil establecer una correlación unívoca entre las características requeridas en la máquina y el tipo de chapa magnética a emplear, pudiendo, no obstante, tomarse como referencia los trabajos de Vacari (39) y Stiebler *et al.* (40) en los que se estudian las correlaciones entre las características magnéticas de los materiales y las aplicaciones específicas a las que van destinados.

4. CHAPA MAGNETICA AL SILICIO DE GRANO NO ORIENTADO CON TEXTURA

Ya se ha señalado anteriormente que la reciente obtención a nivel industrial de la chapa magnética de grano no orientado con textura constituye una au-

téntica innovacion tecnológica dentro de esta gama de aceros.

El desarrollo de la misma está estrechamente relacionado con los trabajos realizados con anterioridad a 1970 conducentes a la obtención de chapa magnética doblemente orientada «Textura Cubo (100) [001]», cuyo proceso de fabricacion no llegó a desarrollarse a nivel industrial debido a su alto coste económico. Sin embargo, mediante la variante no orientada de dicha textura, denominada «Random Cube Texture {100} <u v w>», se obtuvieron cifras de pérdidas inferiores y valores de la permeabilidad superiores al mejor grado de la chapa magnética de grano no orientado, lo que se debe a la eliminacion de las direcciones de difícil imanación <111> del plano de la chapa, lo cual hace que este material sea idóneo para su aplicacion en máquinas rotativas.

Veamos seguidamente los distintos procedimientos que posibilitan la obtención de este tipo de texturas.

4.1. Inducción de textura en chapas de acero dulce al carbono mediante el empleo de la transformación $\gamma \rightarrow \alpha$

Krause y Popovic (41), tomando como base los trabajos previos de laboratorio de Aspden *et al.* (42 y 43), han señalado que la «Textura Cubo No Orientada {100} <u v w>» puede desarrollarse en chapas de acero dulce al carbono mediante un crecimiento selectivo de grano en el transcurso de la transformación $\gamma \rightarrow \alpha$, estando ello asociado a la energía superficial necesaria para generar este tipo de texturas, lo cual, a su vez, es función del tipo de atmósfera empleada y del contenido de azufre en la superficie de la chapa (44), bien sea proveniente de la atmósfera de recocido ($H_2 + SH_2$) o de la disolucion de los sulfuros de manganeso y subsiguiente proceso de difusion desde el metal base.

Por todo ello, en opinión del autor, en el desarrollo de estas texturas está presente un complejo proceso físico-químico, puesto que al crecimiento selectivo de grano durante la transformación $\gamma \rightarrow \alpha$, se unen simultáneamente los procesos de disolucion de los sulfuros de manganeso y de difusion de azufre hacia la interfase sólido-gas, así como los procesos de transporte en la capa límite, y fenómenos de adsorcion y desorcion de H_2 y SH_2 en la superficie. Si a todo ello se añade la cinética de las reacciones superficiales de purificación del metal, dependiente esta última de las etapas anteriores así como de la temperatura y composicion de la atmósfera, queda en evidencia la enorme complejidad del proceso en su conjunto.

En la figura 3 y tabla IV se muestran los esquemas del proceso siderúrgico empleado por Krause y Popovic para el desarrollo de esta textura así como los resultados obtenidos.

De su análisis se deduce que la optimización de las características magnéticas se logra para recocidos de 18 h a 1.150 °C en atmósferas de H_2 conteniendo 20 p.p.m. de SH_2 . No obstante, se hace posible desarrollar una pronunciada textura {100} <u v w>, juntamente con unas adecuadas características magnéticas, mediante un recocido más operativo a nivel in-

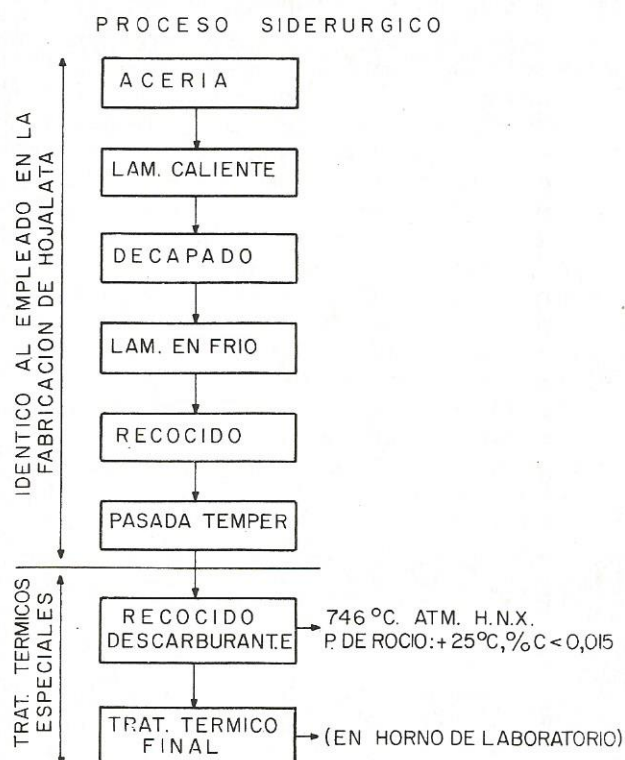


FIG 3.—Proceso siderúrgico empleado en la fabricación de chapa de acero dulce al carbono con textura para aplicaciones eléctricas.

la textura final desarrollada y, por ende, las características magnéticas en función de los parámetros del proceso siderúrgico entre los que cabe citar:

- Composición química: niveles de impurezas y contenidos de aluminio y silicio.
- Temperatura y textura desarrollada en el recocido intermedio.
- Grado de reducción en frío previo al proceso de recristalización.
- Variables del proceso de recristalización final.

En la figura 4 se muestra un esquema del proceso siderúrgico que posibilita el desarrollo de las texturas cubo orientadas al azar favorables $\{100\} \langle u_1 v_1 w_1 \rangle$ y $\{110\} \langle u_2 v_2 w_2 \rangle$, e impide parcialmente el desarrollo de las desfavorables $\{111\} \langle u_3 v_3 w_3 \rangle$, $\{211\} \langle u_4 v_4 w_4 \rangle$.

En la tabla V se exponen también las características magnéticas correspondientes a estos aceros, siendo las mismas superiores a las requeridas para los grados M.15 de la especificación norteamericana A.I.S.I. o S.09 de la japonesa J.I.S., lo cual le convierte en el acero de mejores características mundiales dentro de la chapa magnética de grano no orientado.

Por todo ello, se hace muy adecuado el empleo de este material en máquinas rotativas, especialmente en aquellas en las cuales se desee aumentar el rendimiento mediante una disminución en la cifra de pérdidas de energía.

TABLA IV.—Características magnéticas de la chapa de acero dulce al carbono con textura (41)

Composición química, %			Tratamiento térmico final			Espesor mm	$W_{60}^{15.000}$ W/kg	$\mu_{60}^{15.000}$ Gauss/Oe
C	S	Mn	Atmósfera	$- \theta, ^\circ\text{C}$	t, h			
< 0,015	0,021	0,28	$H_2 + SH_2$ (20 ppm)	1.150	18	0,15	2,64	3.390
< 0,015	0,021	0,28	H_2 (100 %)	925	0,5	0,15	4,22	2.040
< 0,015	0,032	0,39	$H_2 + SH_2$ (20 ppm)	1.150	18	0,15	2,75	2.500
< 0,015	0,032	0,39	H_2 (100 %)	925	1	0,15	3,63	3.830

dustrial consistente en un mantenimiento de 0,5-1 h en atmósfera de H_2 puro a 925 °C.

4.2. Inducción de textura en chapas magnéticas de grano no orientado y alto contenido de silicio. Calidad totalmente tratada

Muy recientemente se han desarrollado a nivel industrial chapas magnéticas de grano no orientado y alto contenido en silicio con textura, para cuya obtención, y de acuerdo con lo señalado en el apartado anterior, se hace necesario rebajar los contenidos de impurezas en aceria hasta niveles muy bajos, siendo posible de esta forma desarrollar una textura adecuada y alcanzar valores en las características magnéticas superiores a cualquiera de las calidades que existían hasta fechas recientes en el mercado (45 y 46).

Según estos trabajos, se hace posible correlacionar

Especial mención merece el caso de las grandes máquinas rotativas, como puede ser el caso de los turbogeneradores bipolares, en los cuales, teniendo en cuenta los tipos y distribuciones de flujos en las partes exterior e interior del estator, así como el peso específico de cada uno de ellos de conformidad a los trabajos de Moses y Radley (47), se llega a la conclusión de que esta nueva calidad de material puede sustituir ventajosamente a la chapa magnética de grano orientado que se viene empleando actualmente en la fabricación de este tipo de máquinas (48), evitándose, además, las vibraciones elípticas que se producen en este tipo de máquinas y, por ello, su sobredimensionamiento.

4.3. Inducción de textura en chapas magnéticas de grano no orientado y contenido medio de silicio. Calidad semitratada

Otro tipo de chapa magnética no orientada, muy

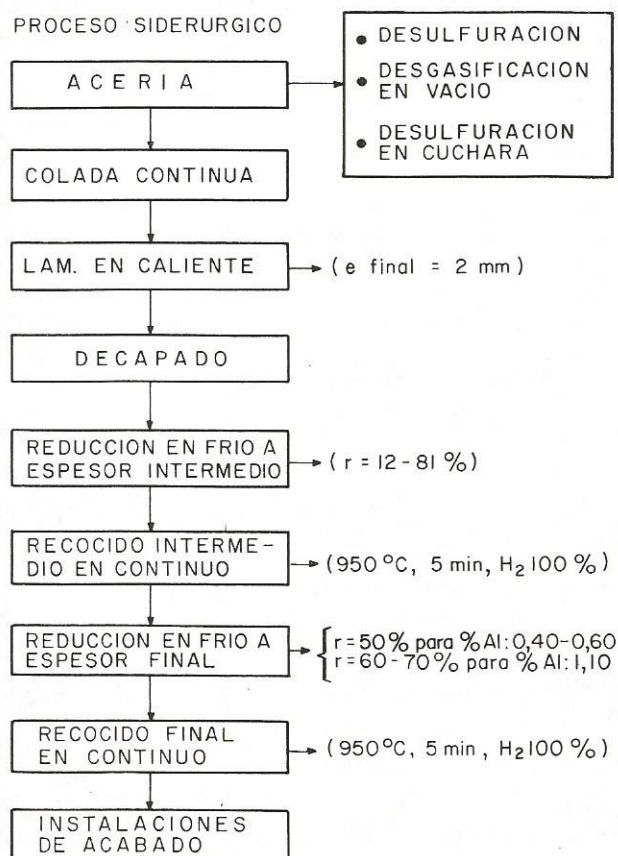


FIG 4.—Esquema del proceso siderúrgico empleado en la fabricación de chapa magnética de grano no orientado con textura y alto contenido en silicio totalmente tratada.

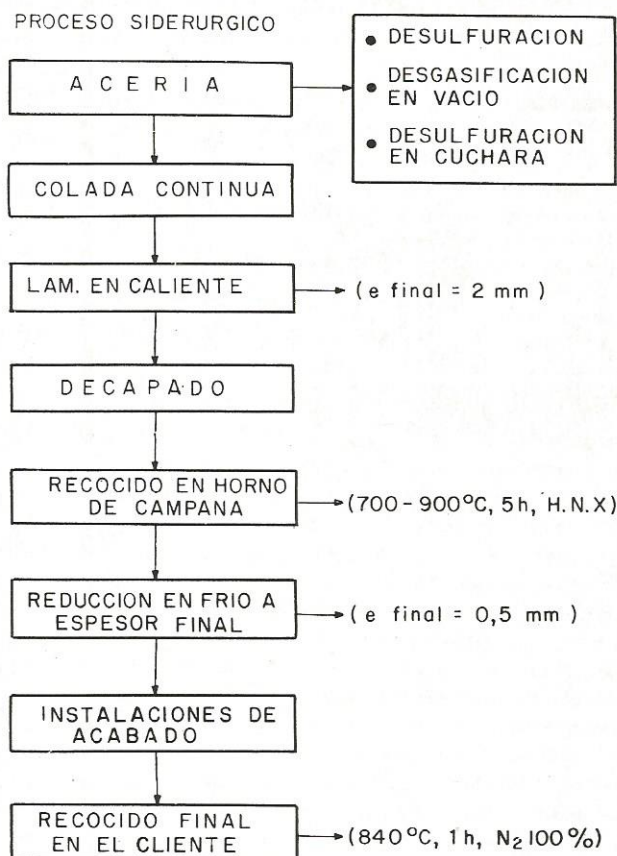


FIG 5.—Esquema del proceso siderúrgico empleado en la fabricación de chapa magnética de grano no orientado con textura y con contenido medio de silicio semitratada.

TABLA V.—Características magnéticas de la chapa magnética no orientada con textura. Alto contenido en silicio. Totalmente tratada (46)

Composición química en acería, %	Espesor mm	Pérdidas a 50 Hz, W/kg		Ind. Magnet., T			
		10.000	15.000	B ₁₀	B ₂₅	B ₅₀	B ₁₀₀
C ^(*) : 0,01-0,02	0,35	0,89	2,10	1,49	1,59	1,69	1,80
Si: 3,10-3,20							
Mn: 0,18-0,21	0,50	1,10	2,45	1,49	1,60	1,70	1,81
Al: 0,40-0,60 ó 1,10							
S: 0,002-0,003							
N: 0,0022-0,0025							
O: 0,0014-0,0017							

(*) El contenido de carbono final después de descarbonado es: 0,003-0,005 %

adecuada para uso en máquinas rotativas, es la obtenida en la calidad semi-tratada y con contenido medio de silicio mediante la inducción de la textura apropiada (46).

Es conocido que cuando una banda en caliente de este material es procesada en frío y recocida se produce la recrystalización del mismo, dando lugar al desarrollo de una componente final de textura {111}<211> muy acusada y origen de malas características magnéticas que se nuclea en las subjunetas de grano originarias de la laminación en caliente (49 y 50).

El desarrollo de esta textura no deseable puede

evitarse sometiendo al material laminado en caliente a un recocido en horno de campana antes de la laminación en frío; el efecto de eliminación de dicha textura se refuerza mediante la adición de pequeñas cantidades de Sb (0,04-0,08 %) (51), el cual, debido a su tendencia a segregarse de forma preferente en las juntas de grano, inhibe la nucleación de la textura anterior desarrollándose una textura del tipo {100}<u v w>. Para ello dicho recocido ha de verificarse en horno de campana, ya que las altas velocidades de enfriamiento del recocido en continuo impiden la segregación del antimonio anulando su efecto.

Por otra parte, y dado que las impurezas actúan

TABLA VI.—Características magnéticas de la chapa magnética no orientada con textura. Contenido medio en silicio. Semi-tratada (46)

Composición química en acería, %	Sb %	e mm	$W_{50}^{15.000}$ W/kg	B_{50} T	$\mu_{50}^{15.000}$ Gauss/Oe
C: 0,01-0,02 Si: 1,80-1,90 Mn: 0,20-0,23	0,01	0,5	3,00	1,72	2.740
Al: 0,29-0,32 S: 0,005-0,006 N < 0,0030	0,04	0,5	2,59	1,74	3.778
O < 0,0030	0,08	0,5	2,81	1,75	3.850

en el mismo sentido que las subjetas de grano, nucleando la textura $\{111\} \langle 211 \rangle$, es deseable obtener el material lo más exento posible de impurezas al objeto de optimizar la textura.

En la figura 5 y tabla VI se muestra el esquema del proceso siderúrgico desarrollado para la obtención de estos materiales así como sus características magnéticas en función del contenido de antimonio.

A la vista de estos resultados, es posible afirmar que este tipo de material presenta unas características magnéticas superiores al grado M.27 de la especificación norteamericana A.I.S.I. para la calidad semi-tratada. Mereciendo especial atención el alto valor de la permeabilidad a inducciones elevadas, lo que le convierte en un material muy adecuado para su empleo en la extensa gama de grandes motores (> 50 h.p.) con elevado rendimiento.

5. NUEVOS MATERIALES

El avance más destacable durante la pasada década, a nivel de laboratorio, ha sido la obtención y desarrollo de una serie de nuevos materiales obtenidos directamente desde el estado fundido mediante técnicas especiales.

Estos nuevos materiales se configuran en dos grupos: bandas cristalinas de alto contenido de silicio y materiales en estado amorfo.

5.1. Bandas cristalinas de alto contenido de silicio

Es conocido el hecho de que las aleaciones Fe-Si con alto contenido de silicio (6 % Si) presentan una alta fragilidad, siendo por ello difíciles de procesar

por los procedimientos siderúrgicos convencionales. Sin embargo, muy recientemente se ha desarrollado a nivel de laboratorio una nueva técnica (52), similar a la empleada para la obtención de materiales amorfos, que permite la fabricación de estos materiales mediante la proyección directa del metal fundido sobre un disco giratorio a altas revoluciones. De esta manera se obtienen cintas cuyo ancho oscila entre 5-50 mm y su espesor entre 20 y 300 μ m.

Posteriormente, y al objeto de mejorar las características magnéticas del material, se somete éste a un recocido en vacío a temperaturas comprendidas en el intervalo 1.100-1.200 °C. (0,5-5 h). Como resultado se logra una recristalización terciaria acompañada de un crecimiento en el tamaño de grano (1 mm) y desarrollo de la textura (100) [o u v], lo cual confiere al material una alta isotropía plana en lo que a características magnéticas se refiere.

En los diversos trabajos realizados sobre estos materiales (53-55) se estudia el tamaño de grano, textura final desarrollada y, por ende, las características magnéticas de estos nuevos materiales como función de parámetros tales como:

- Contenido de silicio.
- Espesor.
- Atmósfera de recocido (argón, vacío).
- Temperatura y duración del recocido.

En la tabla VII se muestran, en función de estos parámetros, las características magnéticas más representativas para un material de composición 6,5 % Si 93,5 % Fe tratado térmicamente con posterioridad a su obtención desde el estado fundido.

Del análisis de dichos resultados, se saca la conclusión de que el material recocido en vacío a altas temperaturas presenta unas características superiores al mejor grado de la chapa magnética no orientada, e incluso cifras de pérdidas inferiores a la calidad orientada (3 % Si), presentando la ventaja adicional de poseer estas propiedades de forma isotrópica en el plano de la chapa, lo cual convierte a este material en especialmente adecuado para su empleo en máquinas rotativas. Por ello están plenamente justificados los actuales esfuerzos en orden a la fabricación de este material en anchos adecuados a las aplicaciones a que van destinados.

5.2. Materiales amorfos

Estos materiales, obtenidos mediante un procedimiento similar al anterior (56) o por electrodeposición

TABLA VII.—Características magnéticas de la banda cristalina de alto contenido de silicio^(*) (53)

Tipo de material	Tratamiento térmico			Espesor mm	Pérdidas, W/kg		Hc m · Oe
	θ , °C	t, min	Atmósfera		$W_{50}^{10.000}$	$W_{50}^{15.000}$	
6,5 % Si, 93,5 % Fe	1.200	35	vacío	0,10	0,25	0,70	60
6,5 % Si, 93,5 % Fe	900	30	argón	0,30	0,5	1,3	—
Chapa magnética de grano orientado (3 % Si)				0,30	0,35	0,80	

(*) Las características mecánicas de este material son: R = 70 kg/mm²

E = 60 kg/mm²

ción, son aleaciones con estructura amorfa formadas por metales (Fe, Ni, Co, Cr) y elementos tales como (C, Si, P, B, ..).

Dicha estructura es consecuencia de su propio proceso de enfriamiento, no presentando ordenación a largo alcance y obteniéndose, como consecuencia de ello, características específicas entre las que cabe destacar las eléctricas y magnéticas.

Una revisión general relativa al desarrollo de estos materiales en lo que hace referencia a:

- Proceso de fabricación, con especial mención al proceso de colada en sección rectangular (57) para la fabricación de cintas amorfas con anchura superior a 5 cm.
- Tipos de aleaciones.
- Aplicaciones.

Puede verse en los trabajos de Davis *et al.* (58) y Luborsky *et al.* (59). En este último se recopilan los trabajos más importantes referentes a la estructura, propiedades y aplicaciones, así como la bibliografía más significativa (60) sobre este tipo de aleaciones.

En cuanto a sus aplicaciones, cabe señalar que, aunque se han desarrollado aleaciones amorfas para usos muy diversos entre las que pueden citarse las aleaciones de elevada resistencia mecánica y a la corrosión, etc., en la actualidad, las aplicaciones más interesantes de estos materiales se basan en sus peculiares propiedades eléctricas y magnéticas, consecuencia de su estado amorfo y alta isotropía.

En efecto, los materiales amorfos ferromagnéticos combinan el ser blandos, magnéticamente hablando, con la dureza y resistencia mecánica adecuada. Si a ello añadimos su alta resistividad, se convierten en materiales especialmente adecuados para su uso en aplicaciones magnéticas, con cifras de pérdidas inferiores a las obtenidas en chapa magnética de grano orientado.

A modo de ejemplo, la aleación $\text{Fe}_{82}\text{B}_{13}\text{Si}_4\text{C}$ (METGLASS 2605SC) tiene grandes posibilidades de aplicación como núcleo en motores y transformadores, ya que este material presenta unas pérdidas que oscilan entre el 33 al 50 % de las que se producen en el grado H.2 (J.I.S. C 2553) de la chapa magnética de grano orientado y el 12 % de las correspondientes al grado M.15 (A.I.S.I.) de la chapa magnética no orientada, de ahí el enorme interés suscitado por estos materiales.

No obstante, se hace preciso señalar algunos aspectos negativos, que juntamente con la dificultad de su obtención a gran escala, hacen que su uso a nivel industrial no sea previsible a corto plazo.

Tales aspectos son:

- Bajo valor de la inducción a saturación 1,6 T frente a 1,9 T correspondiente a la chapa magnética al silicio (3 % Si). Aspecto este último inherente a un material en cuya composición se integran aproximadamente un 20 % de átomos de material no ferromagnético.
- Bajo espesor, 20-50 μm , consecuencia de la necesidad de una transferencia de calor muy rápida en el transcurso de su proceso de solidificación y que conlleva una reducción en el factor de apilamiento.

Si a ello añadimos la gran sensibilidad de las propiedades magnéticas del material frente a las tensiones inducidas durante el proceso de fabricación, así como la fragilidad que se produce con posterioridad al recocido final en el caso de los transformadores, se hace evidente la necesidad de modificar los procesos convencionales de fabricación sustituyéndolos por técnicas más acordes a estos nuevos materiales.

A pesar de todo ello, es posible afirmar en la actualidad que estos tipos de nuevos materiales han superado la etapa en la cual eran considerados como una curiosidad de laboratorio, estando la actual investigación encaminada a resolver los problemas técnicos que conllevaría la fabricación y transformación a gran escala de estos materiales habida cuenta de las enormes posibilidades que presentan en lo que se refiere al ahorro energético.

REFERENCIAS

- (1) BARRET, W. F.; BROWN, W., y HADFIELD, R. A.: Conductivity and Permeability of Iron Alloys. *Sci. Proc. R. Dublin Soc.* 7, 1900: 67-126.
- (2) BARRET, W. F.; BROWN, W., y HADFIELD, R. A.: *Trans. R. Dublin Soc.* 8, 1902: 1-22.
- (3) HADFIELD, R. A.: Pat. EE.UU. 745.829 (1903).
- (4) BECHTOLD, J. H., y WIENER, G. W.: The History of Soft Magnetic Materials. The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy. C. S. Smith (Editor), Gordon and Breach. Nueva York, 1963, Cap. 32.
- (5) WALTER, J. L.: History of Silicon-iron. The Sorby Centennial on the History of Metallurgy. C. S. Smith (Editor). Gordon and Breach. Nueva York, 1963, Cap. 32.
- (6) THOMPSON, J. E.: *Br. J. Appl. Phys. Ser. 2.*, 2, 1969: 933-952.
- (7) MALAGARI, F. A.; MILLER, F. J., y AMES, S. L.: *Metall. Eng. Q.*, 13 (1), 1973: 14-18.
- (8) TAGUCHI, S.: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 17 (10), 1977: 604-615.
- (9) WERNER, F. E.: Electrical Steels 1970-1990. Energy Efficient Electrical Steels. Proceedings Fall Meeting Met. Soc. of A. I. M. E. Pittsburgh, Pennsylvania, 5-9 oct. 1980: 1-33.
- (10) *Met. Bull. Mon.*: enero 1981.
- (11) ANAN'EVSKY, M. A.; BOCHKOV, N. G., y PARFENOV, G. V.: *Steel USSR*, 2 (7), 1972: 567-568.
- (12) KNIGHT, D. J., y ADZEMA, P. J.: *Trans. Am. Soc. Met.*, 54, 1961: 351-361.
- (13) BOCHKOV, N. G., y PARFENOV, G. V.: *Steel USSR*, 5 (3), 1975: 166-168.
- (14) IBARRONDO, I.: *Rev. Metal. (Madrid)*, 19 (6), 1983: 343-348.
- (15) ADZEMA, P. J., y KNIGHT, D. J.: *Trans. Am. Soc. Met.* 56, 1963: 576-582.
- (16) GORMAN, K. M.: Formation of Columnar Grains by Decarburization. Inter-Office Correspondence of Bethlehem Steel. 19 enero 1981.
- (17) IBARRONDO, I.: Tesis Doctoral. E.T.S. Ing. Ind. de Bilbao. Univ. del País Vasco. Mayo 1980.
- (18) IBARRONDO, I.: V Asamblea General del CENIM. Tomo II (T-74). Oct. 1981. Madrid, *Dyna (Bilbao, España)*, 57 (11), 1982: 25-29.
- (19) CHATFIELD, D. A.; RZEPKA, J. F., y PREBLE, A. C.: *Off. Gaz.* 17 feb. 1981. Pat. EE.UU. 4251.294, 22 agosto 1978.
- (20) MISRA, S.; RAMASWAMY, V.; SINGH, K. N., y PATNAIK, B. B.: *Steel India*, 1 (2), 1978: 66-73.
- (21) NARULA, M. L., y SINGH, B.: *Steel India*, 6 (1), 1983: 17-21.
- (22) IBARRONDO, I.: *Rev. Metal. Madrid*, 19 (6), 1983: 343-348.
- (23) SMYTHE, T. W.: *Met. Aust.*, 7 (11), dic. 1975-enero 1976: 280-283.
- (24) SHIMANAKA, H.; ITO, Y.; MATSUMURA, K., y FUKUDA, B.: *J. Magn. Magn. Mater.*, 26 (1-3) 1982: 57-64, 59, 61.

- (25) U. S. Department of Energy. Energy Efficient and Electric Motors. Cap. IV.: Technical and Economics Evaluations. Abril 1978: 57-58.
- (26) WERNER, F. E.: Electrical Steels 1970-1990. Energy Efficient Electrical Steels. Proceedings Fall Meeting Met. Soc. of A.I.M.E. Pittsburgh, Pennsylvania, 5-9 oct. 1980: 17.
- (27) IBARRONDO, I.: Estudio del proceso siderúrgico de obtención de los grados bajos en silicio en chapa magnética de grano no orientado. Aplicación a motores fraccionarios pequeños y medianos. Trabajo presentado a la 27th Mechanical Working and Steel Processing Conference of A.I.M.E. Session I: Flat Rolled Products, 27-29 oct. 1985. Cleveland, Ohio (EE.UU.).
- (28) AFANAS'EV, S. G., et al.: *Stal Engl. (USSR)*. (3), 1969: 259-262.
- (29) COOMBS, A.: *Steel Times*, 198 (5), 1970: 311-321.
- (30) SMYTHE, T. W.: *B. H. P. Tech. Bull.*, 25 (2), 1981: 25-30.
- (31) PFLIPSEN, H. D., y WEBER, R. A.: *Stahl Eisen*, 98 (15), 1978: 747-753.
- (32) HUFFMAN, G. P., y STANLEY, E. B.: *J. Appl. Phys.*, 50 (3-11), 1979: 2363-2365.
- (33) GEIGER, A. L.: *J. Appl. Phys.*, 50 (3-11), 1979: 2365-2368.
- (34) BROWNE, K. M.: The Effect of Sulphur on the Magnetic Properties of Silicon Steel. Metals 77. The 30th Annual Conference of the Australasian Institute of Metals, 1977: 3A.7-3A.8.
- (35) GOTO, I.; SHIMANAKA, H.; IRIE, T.; MATSUMURA, K.; NAKAMURA, H., y SHONO, Y.: Development of Non-oriented Electrical Steel R.M.-8 with High Magnetic Induction and Low Core Loss. Paper presented at S M. M. 3, Bratislava, Checoslovaquia, Sept. 1977.
- (36) Normas A. S. T. M. A. 677-77, DIN 46.400 (I Parte), J.I.S. C 2.552 (1978).
- (37) Normas A. S. T. M. A. 683-77, DIN 46.400 (II Parte), J.I.S. C 2.552 (1978).
- (38) American Iron and Steel Institute. Steel Products Manual. Flat Rolled Electrical Steel (Sept. 1975). 1.000, 16th Street N. W., Washington D.C. 20.036.
- (39) VACARI, J. A.: *Mater. Eng.*, 80 (2), 1974: 20-26.
- (40) STIEBLER, M., et al.: *Stahl Eisen*, 97 (10), 1977: 495-504.
- (41) KRAUSE, R. F., y POPOVIC, B. A.: *J. Appl. Phys.*, 52 (3), 1981: 2419-2421.
- (42) ASPDEN, R. G.; BERGER, J. A., y TROUT, H. E.: *J. Appl. Phys.* 37 (3), 1966: 1195-1196.
- (43) ASPDEN, R. G.; BERGER, J. A., y TROUT, H. E.: *Acta Metall.*, 16, 1968: 1027-1035.
- (44) BARRET, C. S., y MASSALSKI, T. B.: Structure of Metals. Series in Materials Science and Engineering. 3.^a Ed. Mac. Graw-Hill. Nueva York 1966: 579.
- (45) IRIE, T.; MATSUMURA, K.; NAKAMURA, H., y SHONO, Y.: *Kawasaki Steel Tech. Rep.* 10 (1), 1978: 15-22.
- (46) SHIMANAKA, H.; ITO, Y.; IRIE, T.; MATSUMURA, K.; NAKAMURA, H., y SHONO, Y.: Non-Oriented Si-Steel Useful for Energy Efficient Electrical Apparatus. Proceedings Fall Meeting Met. Soc. of A. I. M. E. Pittsburgh, Pennsylvania, 5-9 oct. 1980: 193-204.
- (47) MOSES, A. J., y RADLEY, G. S.: *J. Magn. Magn. Mater.*, 19, 1980: 60-62.
- (48) SHIMANAKA, H.; ITO, Y.; MATSUMURA, K., y FUKUDA, B.: *J. Magn. Magn. Mater.*, 26 (1-3), 1982: 57-64, 57, 58.
- (49) HUGHES, I. F.: *Metall. Trans.*, 2 (4), 1971: 929-936.
- (50) HUGHES, I. F., y SHAPIRO, J. M.: *Metall. Trans.*, 2 (12), 1971: 3347-3354.
- (51) SHIMANAKA, H.; IRIE, T.; MATSUMURA, K., y NAKAMURA, H.: *J. Magn. Magn. Mater.*, 19, 1980: 63-64.
- (52) TSUYA, N., y ARAI, K. I.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 18 (1), 1979: 207-208.
- (53) TSUYA, N.; ARAI, K. I.; OHMORI, K.; SHIMANAKA, H., y KAN, T.: *I. E. E. E. Trans. Magn.* Vol. Mag-16, núm. 5, sept. 1980: 728-733.
- (54) ARAI, K. I.; TSUYA, N.; OHMORI, K.; SHIMANAKA, H., y MIYAZAKI, T.: *J. Magn. Magn. Mater.*, 15-18, 1980: 1425-1426.
- (55) KAN, T.; ITO, Y., y SHIMANAKA, H.: *J. Magn. Magn. Mater.*, 26, 1982: 127-129.
- (56) PECES, J. A., y GARCÍA ESCORIAL, A.: *Rev. Metal. (Madrid)*, 19 (5), 1983: 296-298.
- (57) NARASIHAM, M. C.: Pat. EE.UU., núm. 4.142.571, 6 marzo 1979.
- (58) DAVIES, L. A.; DECRISTOFARO, N., y SMITH, C. H.: Technology of Metallic Glasses. Proceedings of the Conf. on Metallic Glasses. Science and Technology, Budapest, Hungría 30 junio-4 julio 1980.
- (59) LUBORSKY, F. E., et al.: Amorphous Metallic Alloys. Butterworths Monographs in Materials. Londres.
- (60) LUBORSKY, F. E., et al.: Amorphous Metallic Alloys. Butterworths Monographs in Materials. Londres: 6, 7.