

cenim

Separata
de
REVISTA DE
METALURGIA

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES METALURGICAS
M A D R I D

Estudio de la descarburación de chapa de calidad comercial laminada en frío para la obtención de nuevas calidades de chapa magnética (*)

I. Ibarrondo (*)

C. D. 621.784.019.4 : 669.018.58-122.2 = 6

Resumen

Mediante la aplicación a la chapa de calidad comercial laminada en frío de un recocido descarburante en bobina abierta, en sustitución de la técnica convencional del recocido en bobina cerrada, es posible obtener en esta chapa cifras de pérdidas magnéticas similares a las de las calidades M-3,6 y M-3 de la chapa magnética de grano no orientado. Se describe el procedimiento siderúrgico y sus aspectos físico-químicos, y se exponen los resultados obtenidos, así como las aplicaciones en las cuales el material magnético puede ser sustituido, en condiciones económicamente ventajosas, por este nuevo producto.

1. INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo mundial de las industrias eléctrica y electrónica ha impulsado paralelamente el desarrollo de las calidades de chapa necesarias para este tipo de industria, y como dato de este enorme desarrollo, señalaremos que el consumo de chapa para fines eléctricos ha pasado de $2,1 \times 10^6$ t en 1960 a $4,9 \times 10^6$ t en 1974.

Juntamente con este enorme desarrollo cuantitativo, el mercado mundial de chapa eléctrica se ha visto obligado, por razones tecnológicas, a llevar a cabo un completo cambio de sus métodos de producción para obtener productos de mayor calidad, razón por la cual la tecnología empleada en la fabricación de chapas magnéticas es cada vez más perfecta. Por esta causa, la tendencia que se observa durante los últimos años apunta hacia la potenciación de sistemas de producción que supongan avances tecnológicos de relieve.

Exceptuando el hierro Armco, que es un material ferromagnético ideal debido a su gran pureza, pero cuyo uso está muy limitado en el campo de las aplicaciones eléctricas, debido fundamentalmente a su elevado costo, todos los demás aceros empleados en aplicaciones eléctricas pueden incluirse dentro de la siguiente clasificación:

- Chapa magnética de grano no orientado.
- Chapa magnética de grano orientado, con orientación de «textura Goss» (110) [100].
- Chapa magnética de grano doblemente orientado según «textura Cubo» (010) [100].

Pues bien, mediante el empleo de la técnica de recocido descarburante en bobina abierta, más conocido como recocido *open coil*, se pretende crear una gama de aceros muy apropiados para un mercado como es el nacional.

Esta técnica consiste en recocer en atmósfera descarburante chapas de calidad comercial laminadas en frío, con lo que se obtiene una chapa que puede sustituir a los grados más bajos de la chapa magnética de grano no orientado. Su precio de coste es menor, tanto en lo que se refiere a la materia prima, ya que no lleva incorporada cantidad alguna de silicio, como al proceso de fabricación propiamente dicho.

Los ensayos y trabajos que se proponen en el presente trabajo, se han realizado por primera vez en nuestro país, constituyendo la aplicación de la técnica descarburante a la obtención de chapas eléctricas un ensayo de obtención de un nuevo producto metalúrgico del mayor interés industrial.

2. DESCRIPCION DE LA INSTALACION

El procedimiento convencional de recocido en horno de campana no es el más adecuado para introducir cambios en la composición química del acero, ya que, aunque se produzcan las reacciones gas-metal, éstas ocurren en muy pequeña extensión, debido a la poca superficie reactante entre el gas y el metal.

Por el contrario, en el procedimiento *open coil*, la superficie entera de la bobina reacciona con el gas. El aumento del área de contacto entre el gas y el metal puede estimarse en 400 : 1, si comparamos el procedimiento de bobina abierta con el de bobina cerrada. De esta forma, vigilando la composición de la atmósfera y su humedad, se dispondrá de un medio para controlar la cinética de las reacciones superficiales. En la figura 1, puede verse la diferencia entre una bobina cerrada y una bobina expandida.

En la figura 1a), se aprecia que la bobina está enrollada de forma tan tensa, que el calor para el recocido queda absorbido por la superficie lateral, superior e inferior. Por otra parte, la naturaleza de la tensión entre espiras excluye la posibilidad de que los gases penetren algo más que los bordes superior e inferior de la bobina.

(*) Trabajo recibido el 4-III-83

(*) Dr. Ing. Ind. Profesor de Física Teórica en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de San Sebastián.

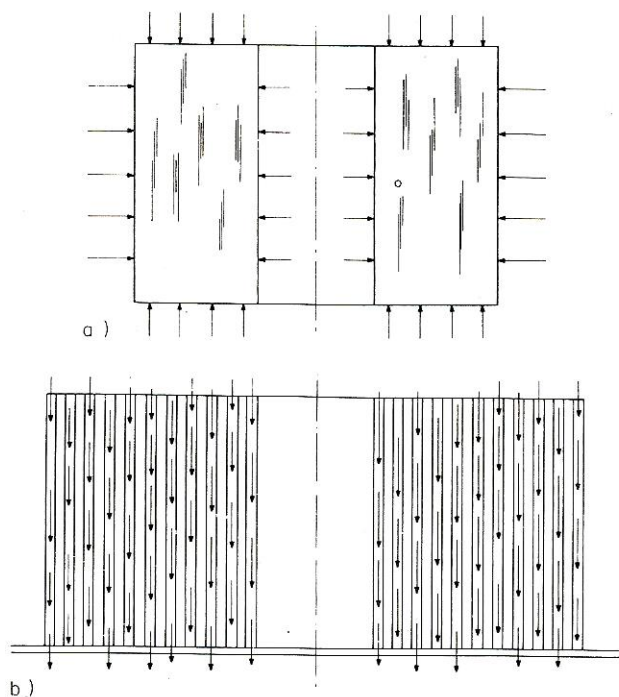


Fig. 1.—a) Bobina cerrada. b) Bobina abierta.

En la figura 1b), se muestra la bobina abierta y el íntimo contacto de los gases con la superficie de la bobina. Este íntimo contacto, no sólo significa que los gases cubren toda la superficie de la bobina, sino, además, que la diferencia de temperatura entre el acero y los gases de la atmósfera del horno se encuentra dentro de los márgenes señalados por nosotros, facilitándose de esta forma la marcha de la descarburación.

Una visión más completa de las instalaciones, así como de las posibles atmósferas a utilizar, puede verse en las referencias (1) a (5).

3. FUNDAMENTOS TEORICOS DEL PROCESO DE DESCARBURACION Y SU APLICACION A LA OBTENCION DE CHAPA DESCARBURADA PARA APLICACIONES ELECTRICAS

En lo referente a las distintas etapas que constituyen el proceso de descarburación y tomando como base trabajos anteriores (6, 7), señalaremos la siguiente secuencia para el mencionado proceso:

- 1.º Difusión del carbono desde el interior de la chapa hacia su superficie
- 2.º Aportación de vapor de agua a la atmósfera de la base
- 3.º Transferencia del vapor de agua de la fase gaseosa a la fase sólida a través de la interfase
- 4.º Reacción propiamente dicha que comprende las siguientes etapas:

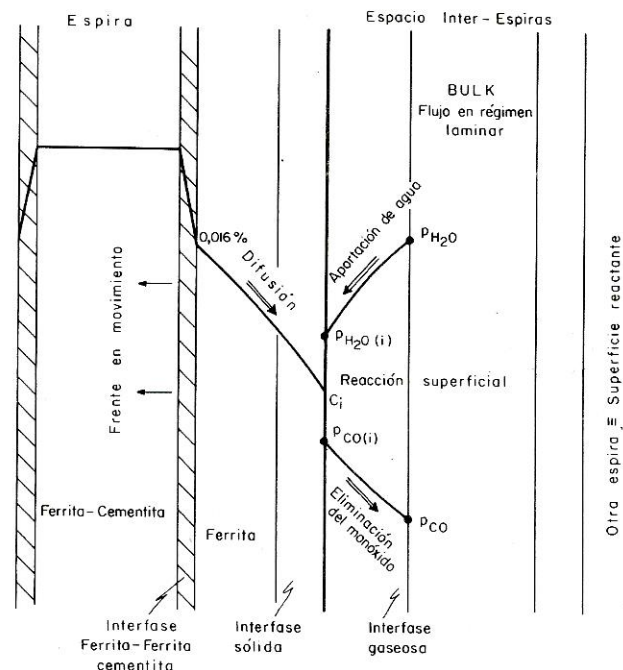
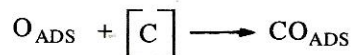


Fig. 2.—Representación gráfica de las etapas de la reacción $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$.

- a) Adsorción del vapor de agua en la superficie de la chapa



- b) Reacción en superficie



- c) Desorción del monóxido de carbono.

- 5.º Transferencia del monóxido de carbono de la fase sólida a la fase gaseosa a través de la interfase.

- 6.º Eliminación del monóxido de carbono mediante barrido de la atmósfera del horno

La figura 2 recoge la representación gráfica propuesta por el autor sobre la secuencia dada anteriormente, siendo posible, de acuerdo con los resultados experimentales basados en el modelo teórico, la descarburación de chapa de calidad comercial hasta niveles de contenido de carbono de 0,005%.

Queda, de esta forma, expuesto el fundamento teórico que abre la vía a la experimentación sobre estos materiales, ya que su bajo contenido de carbono permite pensar en:

- a) Una menor dificultad en el desplazamiento de las paredes interdominios, con la consiguiente reducción del área del ciclo de histéresis y la consecuente disminución de las pérdidas conocidas tradicionalmente como pérdidas estáticas o de histéresis.

b) En lo referente a las denominadas pérdidas dinámicas por corrientes de Foucault, las actuales teorías apuntan a que estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la velocidad media de las paredes de los

dominios magnéticos. Por lo tanto, la eliminación de los posibles anclajes o barreras que constituyen estas impurezas ha de mejorar sensiblemente la cifra de pérdidas debidas a este fenómeno.

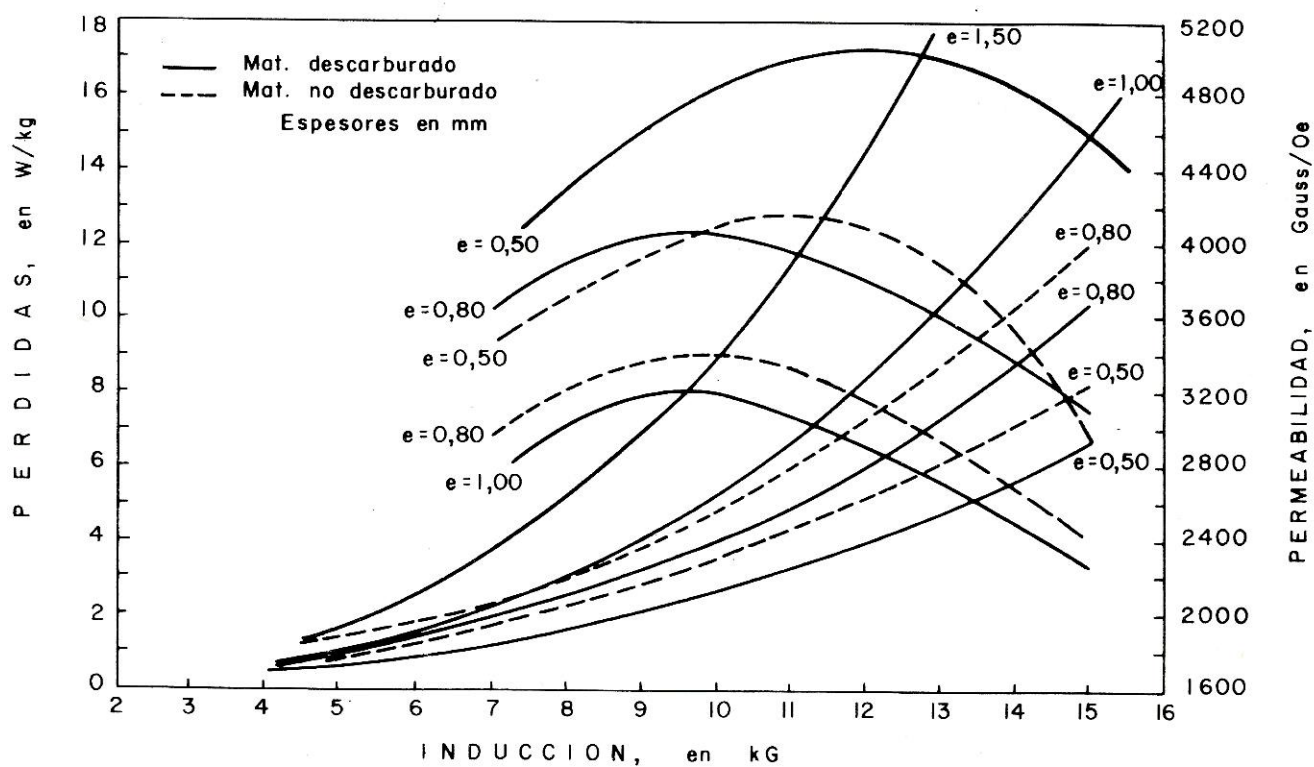


Fig. 3.—Material descarburado y no descarburado, relaminado en frío y recocido a 780 °C. Mantenimiento: 12 h.

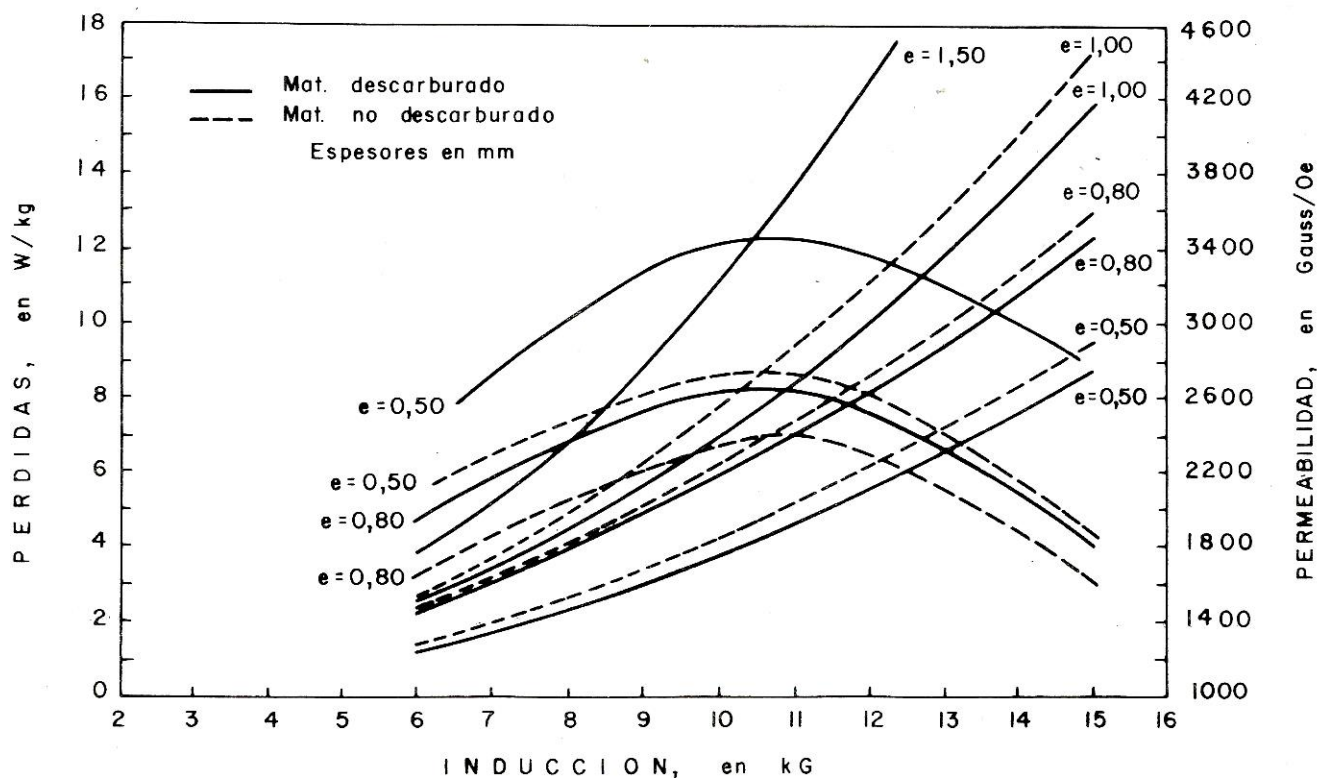


Fig. 4.—Material descarburado y no descarburado, relaminado en frío y recocido a 580 °C. Mantenimiento: 12 h.

4. TRABAJO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS OBTENIDOS

El plan experimental, realizado en primer lugar a nivel piloto y posteriormente a escala industrial, consistió en descarburar chapas de calidad comercial, sometidas más tarde a diferentes reducciones y, por fin, a recocidos a diversas temperaturas.

Paralelamente, se llevó a cabo un plan de ensayos complementario al anterior, consistente en efectuar los mismos ensayos sobre chapa comercial normal, es decir, no descarburada, para poder contrastar las ventajas que ofrecía el proceso de descarburación.

Dichos planes experimentales consistían en la crea-

La determinación de los contenidos de carbono se realizó, en todos los casos, mediante un analizador automático de carbono por combustión, Mod. LECO IR-12, sobre muestras patrón importadas con un contenido de carbono garantizado de $0,002 \pm 0,0002\%$. Por lo que respecta al análisis de los demás elementos, se efectuó con un espectrofotómetro de absorción Philips SP 1900. Los ensayos de pérdidas magnéticas se realizaron con ayuda de un cuadro Epstein.

Todos estos datos han sido recogidos como parámetros de trabajo y de control de proceso (8), corroborándolos posteriormente con una serie industrial de 450 t.

En lo que respecta a los resultados obtenidos, en la figura 3 se muestran, en función del espesor y de la in-

TABLA I

A. Material descarburado, relaminado en frío y recocido a 780 °C durante 12 h.

Espesor, mm	Pérdidas, W/kg		Permeabilidad, Gauss/Oe		Características mecánicas
	10.000 Gauss	15.000 Gauss	10.000 Gauss	15.000 Gauss	
0,50	2,7	6,6	4.860	4.580	Normalmente a voluntad del cliente ya que se suministra semitratado.
0,80	3,9	10,5	4.020	3.150	
1,50	5,3	15,1	3.200	2.300	
1,50	9,0	26,8	1.850	1.340	

B. Material no descarburado, relaminado en frío y recocido a 780 °C durante 12 h.

0,50	3,7	8,2	4.100	2.920	Idem
0,80	4,9	12,0	3.400	2.420	

TABLA II

A. Material descarburado, relaminado en frío y recocido a 580 °C durante 12 h.

Espesor, mm	Pérdidas, W/kg		Permeabilidad, Gauss/Oe		Características mecánicas medias		
	10.000 Gauss	15.000 Gauss	10.000 Gauss	15.000 Gauss	R kg/mm ²	E kg/mm ²	A %
0,50	3,7	8,7	3.400	2.770	30/33	18/24	32/37
0,60	4,3	9,7	3.150	2.110			
0,80	5,9	12,2	2.620	1.800			
1,00	6,8	15,8	2.180	1.540			
1,50	11,1	26,4	1.550	1.083			

B. Material no descarburado, relaminado en frío y recocido a 580 °C durante 12 h.

0,50	4,3	9,2	2.700	1.840	31/34	19/26	30/35
0,60	5,0	10,9	2.380	1.650			
0,80	6,0	13,0	2.330	1.590			
1,00	7,6	17,3	1.810	1.350			
1,50	12,1	28,0	1.510	1.040			

ción de una serie de órdenes de fabricación piloto, lo cual lleva consigo un especial cuidado en lo que se refiere a:

- Seguimiento del material en decapado y trenes.
- Tiempos de calentamiento, secado y enfriamiento.
- Vigilancia de la fase activa del proceso, mereciendo especial atención en lo que se refiere a las temperaturas y tiempos de inyección de vapor.
- Toma de muestras en cabeza y cola de la bobina antes y después del recocido. Los puntos de muestreo fueron los correspondientes a los bordes superior, medio e inferior de la bobina, con referencia a su posición en la máquina de expansión.

TABLA III.—Composición química de las chapas de calidad comercial empleadas en el proceso

Elemento	%	% máximo admisible
Carbono	0,03 / 0,09	0,12
Manganeso	0,25 / 0,30	0,45
Silicio	0,010 / 0,018	0,020
Aluminio	0,001 / 0,003	0,009
Fósforo	0,012 / 0,020	0,030
Azufre	0,010 / 0,020	0,030
Cobre	0,002 / 0,006	0,020
Níquel	0,010 / 0,015	0,015
Cromo	0,004 / 0,006	0,015
Molibdeno	—	0,015
Arsénico	—	0,010
Antimonio	—	0,010

ducción magnética, los valores de pérdidas y permeabilidad para chapa de calidad comercial descarburada y no descarburada, relaminada en frío y posteriormente recocida a 780 °C durante 12 h.

En la figura 4 se muestran las curvas correspondientes a ensayos similares para recocidos a 580 °C durante 12 h.

En las tablas I y II pueden verse los valores característicos de pérdidas y de permeabilidad magnética, así como las características mecánicas de estos materiales. En todos los casos, se verifica que la composición química de estos aceros era la correspondiente a chapa de calidad comercial, como puede verse en la tabla III.

De un análisis de estos resultados, pueden deducirse las siguientes conclusiones.

5. CONCLUSIONES

1) La temperatura del recocido final es fundamental en las características magnéticas obtenidas, ya que no sólo hace disminuir los valores de pérdidas magnéticas, que decrecen, para un espesor de 0,5 mm, desde 4,3

$W \cdot kg^{-1}$ a $3,7 W \cdot kg^{-1}$ (10.000 Gauss, 50 c.p.s.), cuando la temperatura del recocido final se eleva desde 580 a 780 °C, sino que esta diferencia es mucho más acusada cuando se trata de chapa descarburada.

2) A diferencia de lo que sucede en las calidades altas en silicio, especialmente en la chapa magnética de grano orientado, el grado de reducción no es importante. Sin embargo, esto es válido solamente cuando nos movemos en relaciones de reducción comprendidas entre un 40 y un 70%.

3) La experiencia de estos ensayos ha demostrado que rebajar el contenido de carbono por debajo de 0,005%, para este tipo de aplicaciones, es totalmente inútil y muy costoso, económicamente hablando.

4) Como era de suponer, no se aprecian prácticamente diferencias debidas a la descarburaación, en cuanto a características mecánicas se refiere.

5) Este tipo de material puede sustituir perfectamente a la chapa magnética de grano no orientado, en sus calidades M-3,6 ($3,6 W \cdot kg^{-1}$ a 10.000 Gauss y 50 c.p.s.) y M-3 ($3 W \cdot kg^{-1}$ a 10.000 Gauss y 50 c.p.s.), siempre

TABLA IV.—Material descarburado con pasada de dureza y revenido a 450 °C durante 12 h

Espesor mm	Reducción anterior al último revenido, %	Pérdidas, W/kg		Permeabilidad, Gauss/Oe		R	E	A
		10.000 Gauss	15.000 Gauss	10.000 Gauss	15.000 Gauss			
0,5	40	4,7	10,1	2.740	1.830	42/47	40/45	6/9
0,8	21,5	4,9	11,4	2.820	1.670	27/32	18/20	26/35
1,0	10	7,9	19,8	2.020	1.690	34/36	25/27	19/22

TABLA V.—Tabla comparativa de pérdidas y permeabilidades para diferentes grados de reducción y diferentes temperaturas

Espesor mm	Reducción anterior al último revenido, %	Pérdidas (10.000 Gauss)			Pérdidas (15.000 Gauss)			R	E	A
		780 °C	580 °C	450 °C	780 °C	580 °C	450 °C			
0,5	40	2,7	3,7	4,7	6,6	8,7	10,1	42/47	40/45	6/9
0,8	21,5	3,9	5,9	4,9	10,5	12,2	11,4	27/32	18/20	26/35
1,0	10	5,3	6,8	7,9	15,1	15,8	19,8	34/36	25/27	19/22
Espesor mm	Reducción anterior al último revenido, %	Permeabilidad (10.000 Gauss)			Permeabilidad (15.000 Gauss)			R	E	A
		780 °C	580 °C	450 °C	780 °C	580 °C	450 °C			
0,5	40	4.860	3.400	2.740	4.580	2.770	1.830			
0,8	21,5	4.020	2.620	2.820	3.150	1.800	1.670			
1,0	10	3.200	2.180	2.020	2.300	1.540	1.690			

TABLA VI.—Datos comparativos chapa comercial descarburada-chapa magnética de grano no orientado

Tipo de material	Características mecánicas				Características eléctricas	
	Espesor mm	Dureza HR _b	R kg/mm ²	E kg/mm ²	Pérdidas W/kg 10.000 Gauss	50 c.p.s. 15.000 Gauss
Chapa descarb. C ~ 0,005 %	0,5	26/29	28/29	16/19	2,7	6,6
M-3,6	0,5	62	36	22	3,6	8,6
M-3	0,5	a'/	40	25	3,0	7,2

que se suministre en estado semitratado, ya que, de lo contrario, sus características mecánicas serían pobres, frente a los 36-40 kg·mm⁻² de resistencia que presenta la chapa magnética al silicio de esas características.

6. VARIANTES DEL PROCEDIMIENTO

Para paliar en la medida de nuestras posibilidades este inconveniente de la baja resistencia de los materiales, procedimos a elaborar un plan de ensayos complementario del anterior, tratando de obtener cifras óptimas, tanto en lo que a pérdidas magnéticas como a características mecánicas se refiere.

Se trataba de modificar el proceso siderúrgico, centrándolo el material en las siguientes características mecánicas:

R	E	A
kg·mm ⁻²	kg·mm ⁻²	%
35-45	30-35	19-25

conservando, al mismo tiempo, las características magnéticas.

Para ello, se procedió a dar al material descarburado pasadas de reducción comprendidas entre un 8 y un 20%, seguidas de un revenido a 450 °C con un mantenimiento de 12 h, estando en la actualidad en estudio el reducir dicho período de mantenimiento de 12 h a 3 h. Las primeras pruebas se han realizado ya con pleno éxito.

Los resultados obtenidos en estas pruebas, se resumen en la tabla IV y su comparación con los hallados en los procedimientos anteriores se muestra en la tabla V.

De todo ello, deducimos que:

—Para las características mecánicas que deseamos, son interesantes reducciones de un 10%.

—Aun siendo prematuro dar conclusiones definitivas, de los resultados obtenidos hasta el momento, se desprende que reducciones de un 20%, seguidas de un revenido a 450 °C, son más eficaces que el método empleado anteriormente, que consiste en dar a la chapa una reducción comprendida entre un 40 y un 70%, seguida de un recocido a 580 °C.

Si a esto añadimos los ensayos para reducir de 12 h a 3 h los tiempos de mantenimiento para estos revenidos, se comprende la enorme importancia del estudio desde un punto de vista económico.

7. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CHAPA OBTENIDA MEDIANTE ESTE NUEVO PROCEDIMIENTO SIDERURGICO Y LA CHAPA MAGNETICA DE GRANO NO ORIENTADO. APLICACIONES INDUSTRIALES

En la tabla VI, se encuentran comparativamente expuestas las propiedades eléctricas y mecánicas de la chapa comercial descarburada, frente a las especificadas según DIN 46.400, para la chapa magnética de grano no orientado en sus calidades M-3,6 y M-3 (M-47 AISI, 64 F 575 ASTM).

De esta comparación, deducimos que la chapa obtenida mediante la aplicación de esta nueva técnica siderúrgica permite sustituir dichas calidades, siempre que se utilice dicha chapa después de un recocido a 780 °C y no sean de interés trascendental las características mecánicas obtenidas con posterioridad al mismo. En estas condiciones es perfectamente utilizable para pequeños motores de corriente continua o alterna, tales como los que se emplean en tocadiscos, motores de aparatos electrodomésticos, magnetos, etc.

REFERENCIAS

- (1) GIBBONS, V. J.: Open-Coil Annealing. *Sheet Metal Industr.* Mayo (1961) 341.
- (2) BAUCHER, J. A. y MAGOR, J. K.: Open-Coil Annealing: Commercial Applications and Current Development. ISI Special Report núm. 79 (1963) 34.
- (3) BAUCHER, J. A.: Use of Open-Coil Process to Change Composition and Improve Sheet Steel. *Iron Steel Engr.* Mayo (1961) 73.
- (4) ARNOLD, J.: Shows Way to Gas Alloying. *Iron Steel Engr.* Ago. (1960) 91.
- (5) MAINWARING, W. T.: Recent Developments in Hydrogen-Nitrogen Supply Systems for Furnace Atmosphere Control. *Iron Steel Engr.* Oct. (1967) 115.
- (6) IBARRONDO, I.: Contribuciones a la optimización del procedimiento *open-coil*. Tesis doctoral. ETSII de Bilbao (Universidad del País Vasco). Mayo (1980). Ponencia presentada a la V Asamblea General del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Tomo II (T-74). Madrid 6-9 oct. 1981.
- (7) IBARRONDO, I.: Contribuciones a la optimización del procedimiento *open-coil*. DYNA, núm. 11, nov. 1982, 25-29.
- (8) IBARRONDO, I.: Contribuciones a la optimización del procedimiento *open-coil*. Tesis doctoral. ETSII de Bilbao (Universidad del País Vasco). Mayo (1980). Anexo. Ensayos Experimentales, p. 1-40.