

Revista de Metalurgia

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

SEPTIEMBRE-OCTUBRE 1987

SUMARIO

- Programa de ordenador para el cálculo de parámetros, comportamiento y propiedades de aceros de baja aleación, P. Tarín, R. Servent y C. Cortina
- Estudio de las características magnéticas de cintas cristalinas Fe-Si con alto contenido de silicio (6,5 %), obtenidas por temple ultrarrápido y sometidas a recocido por corriente eléctrica, I. Ibarrondo y J. González
- Estudio del diagrama de fases Hg-Mg por análisis térmico diferencial, F.A. Calvo y M^a P. Hierro
- Revisión: Fotodeposición de metales sobre semiconductores en polvo. Aplicación a la recuperación de metales en disoluciones diluidas, J. Doménech
- Revisión: Inhibidores orgánicos de corrosión, J. de Damborenea

Estudio de las características magnéticas de cintas cristalinas Fe-Si con alto contenido de silicio (6,5 %), obtenidas por temple ultrarrápido y sometidas a recocido por corriente eléctrica^(*)

I. Ibarrondo(*) y J. González(*)

C.D.U. 669.15'782-418.018.5 = 60

Resumen

En el presente trabajo se estudia la evolución de las características magnéticas de cintas cristalinas Fe-Si con alto contenido de silicio (6,5% Si), obtenidas por temple ultrarrápido desde la temperatura de fusión, en el intervalo de temperaturas correspondiente al proceso de restauración mediante recocidos por paso de corriente eléctrica. Sobre la base de todo ello, es posible deducir la incidencia que sobre las propiedades magnéticas ejercen las tensiones generadas en el transcurso del proceso de fabricación, así como lo adecuado de sus características magnéticas finales para su aplicación al campo de los motores eléctricos.

Study of the Magnetic Characteristics of High Silicon Fe-Si Electric-Current Annealed Crystalline Ribbons Obtained by Ultra-Rapid Quenching

Abstract

In the present paper, the evolution of magnetic characteristics in crystalline silicon (6.5 Si, 93.5 Fe) ribbons directly obtained from the melted state by a roller quenching method is studied. This study was carried out in the temperature range corresponding to the recovery process by a current-annealing method. In base of all this, it is possible to conclude the incidence of internal stresses generated during the fabrication process in the evolution of magnetic characteristics.

1. INTRODUCCION

Los nuevos procesos para el temple de materiales directamente desde el estado fundido ocupan, en la actualidad, un lugar preeminente en la investigación, tanto en lo que concierne a dichos procesos en sí mismos como en lo que se refiere a la posibilidad de obtener nuevos materiales.

Estos nuevos procesos metalúrgicos completamente revolucionarios, incluso comparados con los procedimientos convencionales más modernos, permiten obtener, tanto a nivel de laboratorio como a escala industrial, una serie de nuevos productos destinados a una enorme variedad de aplicaciones, entre los que cabe destacar de manera preferente los destinados a aplicaciones eléctricas y magnéticas.

Los más destacados, dentro de este campo de aplicaciones, son:

- Materiales amorfos (vidrios metálicos).
- Aleaciones rápidamente solidificadas.

Respecto a los primeros, una breve comparación con los materiales magnéticos convencionales, así como las dificultades más importantes para su posterior procesamiento industrial, de conformidad con los esquemas de fabricación actualmente existentes, puede verse en un trabajo previo del autor (1).

Por el contrario, en el caso de las cintas de alto contenido en silicio, su empleo y procesamiento en la industria eléctrica se correspondería con un esquema convencional, una vez soslayados los problemas técnicos, comunes al caso anterior, que conlleva la obtención a gran escala de este tipo de materiales templados desde el

(*) Trabajo recibido el 16 de marzo de 1987.

(*) Dpto. de Física Aplicada, Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de San Sebastián, Universidad del País Vasco.

estado fundido. Ello hace pensar en el empleo de estos materiales en una etapa puente o simultáneamente a los citados materiales amorfos.

En el presente trabajo, se estudia la evolución de las características magnéticas de estos materiales en el intervalo de temperaturas correspondiente al proceso de restauración, al tiempo que se señalan, al final del mismo, y tomando como base trabajos previos de diversos autores, las características magnéticas alcanzables una vez concluido el proceso de recocido.

2. PROCESO DE FABRICACION

Es bien conocido que la adición de silicio modifica sustancialmente las propiedades magnéticas en el caso de los materiales magnéticos convencionales (2) (resistividad, permeabilidad, campo coercitivo, cifra de pérdidas, etc.). Ahora bien, la fragilidad de este tipo de aleaciones Fe-Si con alto contenido de silicio es elevada, siendo por esta causa difíciles de tratar utilizando los procedimientos convencionales. Sin embargo, recientemente se ha desarrollado, a nivel de laboratorio, una nueva técnica (3), similar a la empleada para la obtención de materiales amorfos, que permite la fabricación de estos materiales mediante la proyección directa de la aleación fundida sobre un disco que gira a altas revoluciones.

En la figura 1 se muestra el esquema del dispositivo empleado para la fabricación de estos materiales, consistente en un pequeño horno de inducción que calienta el tubo que contiene la aleación fundida. Esta se extrae, aún en estado de fusión, mediante gas a presión (argón) y se proyecta sobre el disco giratorio, habiéndose obtenido, para este estudio, cintas de chapa magnética de aleación Fe-Si de alto contenido en silicio (6,5% Si) de 0,7 x 0,03 mm de sección.

3. ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS. DISCUSION

Con objeto de estudiar la evolución de las características magnéticas en el transcurso de la etapa de restauración y, en especial, la influencia sobre dichas propiedades de las tensiones inducidas durante el proceso de fabricación, se procedió a someter al material a un recocido con corriente eléctrica en el intervalo de temperaturas comprendido entre la temperatura ambiente y la de Curie (685 °C), realizándose dichos ensayos en el equipo experimental (4) que se detalla en la figura 2.

Este recocido se lleva a cabo haciendo circular una corriente eléctrica por la muestra, lo que origina un calentamiento de la misma por efecto Joule. La temperatura de la muestra se estimó comparando la disminución de la imanación a saturación cuando circula la corriente eléctrica

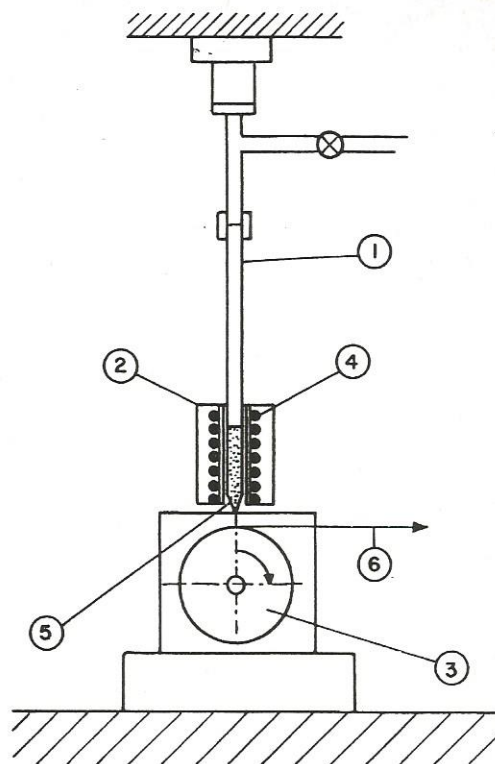


FIG. 1.— Equipo de temple ultrarrápido para la fabricación de los nuevos materiales. 1. Tubo del recipiente. 2. Horno de fusión. 3. Disco giratorio. 4. Aleación fundida. 5. Orificio de proyección. 6. Cinta solidificada.

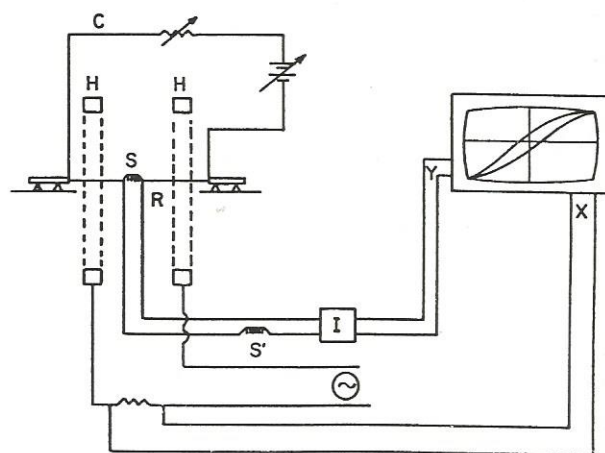


FIG. 2.— Representación esquemática del dispositivo experimental. H: Carretes de Helmholtz. S: Secundario. S': Bobina de compensación. I: Integrador. R: Cinta. C: Circuito de calentamiento por corriente eléctrica.

y la que se produce cuando las muestras se someten a calentamiento en horno.

Los ensayos realizados por este procedimiento posibilitan el estudio de la evolución de las características magnéticas con la temperatura, ya que la medición de las mismas se efectúa simultáneamente al paso de la corriente eléctrica, permitiéndonos de esta forma estudiar

la incidencia que sobre las propiedades magnéticas ejercen las tensiones inducidas en el material por este nuevo proceso de fabricación.

Todo lo cual pone de manifiesto lo siguiente:

3.1. Imanación de saturación

En la figura 3, se muestra la variación de la imanación a saturación ($\mu_0 M_s$) con la corriente de recocido ($I_{rec.}$) en el intervalo de temperaturas indicado. El valor obtenido para dicha imanación, ($\mu_0 M_s = 1,75$ Teslas), en el estado inicial de las muestras y a la temperatura ambiente, concuerda perfectamente con los obtenidos previamente para aleaciones de esta composición tratadas de forma convencional (5).

De los resultados expuestos en dicha figura se deduce que el estado de tensiones generado en el transcurso de este nuevo proceso de fabricación no afecta a la imanación a saturación, tal y como era de esperar, ya que se trata de una propiedad intrínseca del material (structure insensitive property), permaneciendo constante durante la primera fase del proceso de restauración y disminuyendo sensiblemente su valor por encima de los 450°C debido al aumento de temperatura en la muestra.

3.2. Campo coercitivo

La figura 4 representa la variación del campo coercitivo como función de la temperatura alcanzada en la muestra, debiendo significarse la disminución del campo coercitivo en un orden de magnitud aproximadamente ($H_c \approx 1.500$ mOe en el estado inicial frente a 150 mOe), como consecuencia de la elevación de la temperatura en dichas muestras hasta 230°C ($I_{rec} \approx 575$ mA).

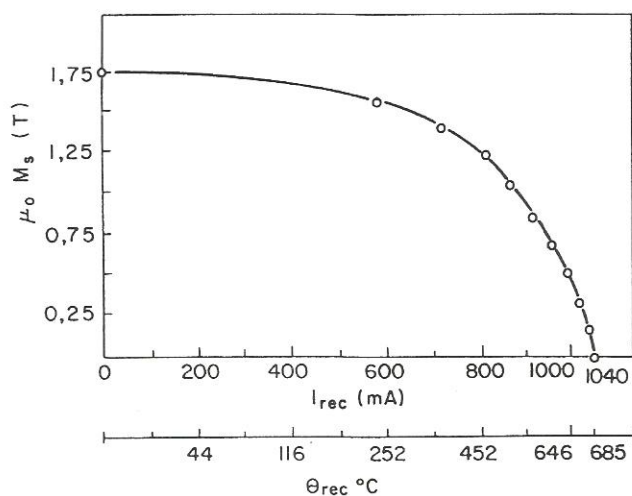


FIG. 3.— Variación de la imanación a saturación con la corriente ($I_{rec.}$) y temperatura de recocido ($\theta_{rec.}$).

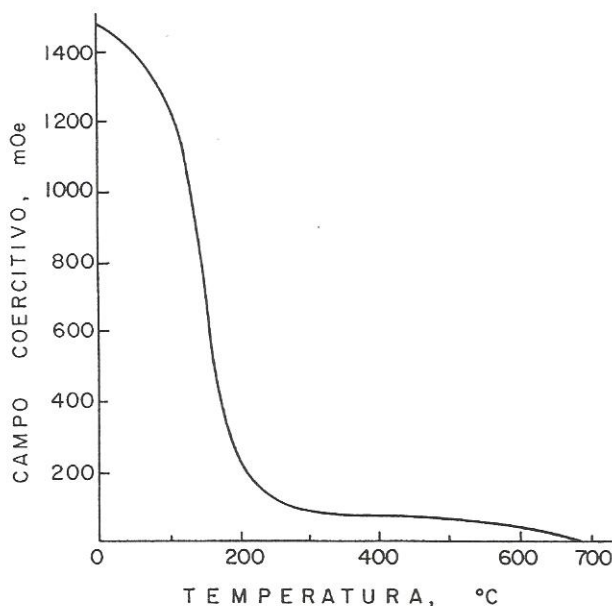


FIG. 4.— Variación del campo coercitivo con la temperatura alcanzada mediante el recocido por corriente eléctrica.

Este hecho puede interpretarse como un proceso de relajación de las tensiones internas, generadas en el transcurso de este nuevo proceso de fabricación, que facilita el movimiento de la pared de Bloch y disminuye, como consecuencia de ello, el valor del campo coercitivo.

Por otra parte cabe deducir que este proceso de relajación de tensiones y subsiguiente disminución en los valores del campo coercitivo se produce, de forma preferente, en la fase de restauración, siendo mucho más lenta su evolución posterior hasta la temperatura que se corresponde con el final de la etapa de revenido ($\approx 400^\circ\text{C}$).

3.3. Cifra de pérdidas

Asimismo, y como consecuencia del tratamiento térmico, se produce una disminución en la cifra de pérdidas, variando el trabajo de imanación total desde $1.800 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$, en el estado inicial, hasta $1.000 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ a 230°C , y siendo dicho valor de $885 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ a la temperatura de 400°C .

Al igual que en el caso anterior, este proceso de disminución en la cifra de pérdidas debe atribuirse a la mayor facilidad de conmutación del material, consecuencia del proceso de eliminación de las tensiones internas en el mismo.

Por otra parte es evidente que la optimización de las características magnéticas de estos materiales, en orden a su aplicación industrial, ha de obtenerse con posterioridad a un tratamiento completo de recocido. En este sentido diversos trabajos previos (6-8), realizados sobre cintas

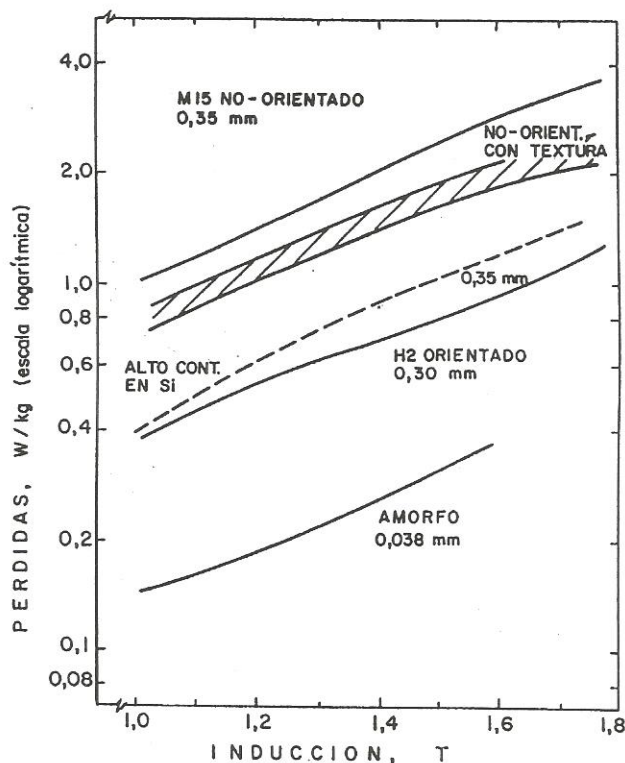


FIG. 5.— Pérdidas magnéticas en diferentes calidades (W/kg a 50 Hz) (7 y 9).

con 6,5 % de Si, señalan temperaturas de 1.100-1.200 °C y atmósferas de vacío como las más indicadas en orden a la optimización de dichas características.

Así, en la figura 5 se muestra la cifra de pérdidas, a distintas inducciones, para este material completamente procesado, en comparación

con diversos materiales entre los que se incluyen los materiales amorfos así como la chapa magnética con textura.

De todo lo cual cabe deducir que este material, en condiciones completamente procesadas, presenta cifras de pérdidas similares a las correspondientes al mejor grado convencional de chapa magnética de grano orientado, con la ventaja adicional de presentar estas propiedades de forma isotrópica, lo que le convierte en un material muy adecuado para su empleo en máquinas rotativas.

REFERENCIAS

- (1) I. IBARRONDO. *Rev. Metal. Madrid*, 21, (6), 1985: 366-376.
- (2) M.F. LITTMAN. *I.E.E.E. Trans. Magn.*, 7, (1), 1971: 43-60.
- (3) N. TSUYA, y K.I. ARAI. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 18, (1), 1979: 207-208.
- (4) M. VAZQUEZ, J. GONZALEZ, A. HERNANDO. *J. Magn. Magn. Mater.*, 53, 1986: 323-329.
- (5) R.M. BOZORTH, "Ferromagnetism", D. VAN NOSTRAND COMP. INC. Princenton, New Jersey, 1951: 77.
- (6) K.I. ARAI, N. TSUYA, K. OHMORI, H. SHIMANAKA, y T. MIZAYAKI. *J. Magn. Magn. Mater.*, 15-18, 1980: 1425-1426.
- (7) N. TSUYA, K.I. ARAI, K. OHMORI, H. SHIMANAKA, y T. KAN. *I.E.E.E. Trans. Magn.*, 16, (5), 1980: 728-733.
- (8) T. KAN, Y. ITO, y H. SHIMANAKA. *J. Magn. Magn. Mater.*, 26, 1982: 127-129.
- (9) F.E. WERNER, "Energy Efficient Electrical Steels". *Conf. Proc. of A.I.M.E.* Ed. por A.R. Marder E.T.: Stephenson, Warrendale, PA. 15086, 1981: 1-32.