Estudio de la deformabilidad a temperatura ambiente de aceros de alto silicio (≥ 4 wt % Si) mediante test de compresión

J. Barros*, T. Ros-Yáñez*, R. Colás** y Y. Houbaert*

Resumen

Cuatro aleaciones Fe-Si en el rango de concentraciones 3,3-6,3 wt. % Si se fabricaron para estudiar su deformabilidad en frío. A partir del material colado se prepararon probetas cilíndricas que fueron ensayadas por compresión en una máquina servo-hidráulica diseñada para mantener constante la velocidad de deformación durante el test. Los resultados proporcionaron información sobre el endurecimiento del material y confirmaron que la deformabilidad disminuye al aumentar el contenido en silicio. A partir de las curvas esfuerzo-deformación se dedujeron ecuaciones constitutivas, cuyos parámetros resultaron ser función de la concentración de silicio. El material deformado presentó un fuerte maclaje, mayor para las aleaciones más ricas en silicio.

Palabras clave

Propiedades mecánicas. Maclaje. Microestructura.

Study of the workability and room temperature straining behaviour of high silicon steel (4 wt% Si) by means of compression tests

Abstract

Series of silicon alloys (from 3.3 to 6.3% wt Si) were produced to study their workability at room temperature. Cast samples, machined into cylinders, were compressed with a servo-hydraulic computer driven machine at a constant strain rate. The results supplied information about the strengthening, phenomena and confirmed that the workability decreases with the higher silicon content. In addition constitutive equations were fitted from the stress-strain data. Metallographic examination showed twins which density increased with the percentage of Si.

Keywords

Mechanical properties. Twinning. Microstructure.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones Fe-Si son uno de los principales materiales magnéticos blandos, siendo ampliamente utilizados para la fabricación de aparatos eléctricos como transformadores, motores y generadores.

Las propiedades magnéticas de las aleaciones Fe-Si varían con la proporción de silicio, siendo la concentración óptima 6,5 wt. % Si debido a que la magnetoestricción es casi nula y la resistividad eléctrica es alta, lo que conlleva una reducción de pérdidas eléctricas debidas a las corrientes de Eddy^[1].

El inconveniente de estos materiales es que su ductibilidad se ve reducida al incrementar el contenido en silicio, siendo extremadamente difíciles de laminar en frío aleaciones que superen el 4,0 wt. % Si^[2 y 3].

En el presente artículo se recogen los primeros pasos en el estudio de la deformabilidad en frío de aleaciones con alto contenido en silicio.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los experimentos se realizaron sobre cuatro aleaciones producidas, a escala de laboratorio, en horno de inducción al aire. La carga utilizada fue acero de ultra bajo contenido en carbono (ULC) y ferrosilicio (75 wt. % Si). A partir de los lingotes se mecanizaron probetas cilíndricas de 15 mm de largo y 10 mm de diámetro, manteniéndose el eje de las probetas paralelo a la dirección de colada del lingote.

(*) Dept. of Metallurgy and Materials Science, Ghent University, Technologiepark 903, B-9052 Gent, Belgium.

(**) Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, A.P. 149-F, 66451 San Nicolás de los Garza, N.L., México.

Las probetas se ensayaron en tests de compresión axisimétrica empleando una máquina servohidráulica controlada por ordenador y diseñada para mantener la velocidad de deformación constante durante el test^[4].

Los ensayos se llevaron a cabo a una velocidad de deformación de $0,5 \text{ s}^{-1}$ aplicando deformaciones de 0,2, 0,4, 0,60 y 0,8; además se realizó una serie de ensayos con dos deformaciones sucesivas, la primera de 0,33 y la segunda de 0,47, siendo el tiempo entre deformaciones 0 y 24 h. Algunas probetas fueron taladradas en su centro para introducir un termopar tipo K con el que se registró la variación de temperatura durante el test. En todos los experimentos se utilizó cinta de politetrafluoroetileno (PTFE), 0,1 mm de espesor, como lubricante para reducir la fricción entre la muestra y la máquina. Los datos obtenidos del ensayo, como carga en función del desplazamiento, se transformaron en las curvas esfuerzo-deformación.

Tabla I. Composición química y tamaño de grano
(error 10 %)

Table I. Chemical composition and grain size (error 10 %) for the studied alloys

Aleación	C	Si	Al	Mn	S	P	Tamaño de grano (μm)
				(wt. %)			
A	0,003	3,32	0,004	0,047	0,006	0,013	1,227
B	0,009	4,20	0,003	0,093	0,006	0,004	0,609
C	0,002	5,00	0,006	0,059	0,007	0,013	0,820
D	0,006	6,30	0,002	0,092	0,009	0,005	1,043

3. RESULTADOS

La tabla I contiene la composición química de las cuatro aleaciones junto con los valores del tamaño de grano calculado con la técnica de interceptación lineal media. La figura 1 contiene micrografías del material deformado hasta valores de 0,8.

Figura 1. Micrografías ópticas de las cuatro aleaciones tras ser deformadas hasta un valor de 0,8.

Figure 1. Optical micrographs of the alloys after 0.8 deformation.

La figura 2 recoge las curvas esfuerzo-deformación para cada uno de los materiales. Las curvas experimentales se dibujan mediante líneas continuas mientras que las líneas a trazos representan las curvas esfuerzo-deformación (*stress-strain*) calculadas suponiendo que el comportamiento de las aleaciones obedece la ecuación constitutiva dada por Voce^[5]:

$$\sigma = \sigma_0 + (\sigma_s - \sigma_0) \exp(-C\varepsilon) \quad (1)$$

donde σ_s representa el esfuerzo de saturación, σ_0 el límite elástico y C es un coeficiente. Estos parámetros se dedujeron desde los datos experimentales, representando el grado de endurecimiento por deformación en frío ($d\sigma/d\varepsilon$) en función del esfuerzo (Fig. 3).

La figura 4 recoge las curvas esfuerzo-deformación para muestras deformadas dos veces, con un mínimo tiempo entre las deformaciones y tras 24 h respectivamente.

4. DISCUSIÓN

En la figura 3 se puede observar que el grado de endurecimiento por deformación en frío ($d\sigma/d\varepsilon$) está linealmente relacionado con el esfuerzo de deformación. Este comportamiento se mantiene desde el límite elástico, σ_0 , hasta el esfuerzo de saturación, σ_s . Pero, a medida que la deformación prosigue tras haberse alcanzado el esfuerzo de saturación, se observa que la resistencia del material disminuye, se produce un ablandamiento respecto a σ_s . El valor del ablandamiento aumenta con el contenido en silicio, siendo claramente visible al comparar las curvas teóricas con las experimentales de la figura 2 y en la figura 4. Este fenómeno se explica por el calentamiento adiabático que se

Figura 2. Curva esfuerzo-deformación (*stress-strain*) para cada una de las aleaciones.

Figure 2. *Stress-strain curves for the four different alloys.*

Figura 3. Grado de endurecimiento por deformación en función del esfuerzo (*stress*) para las curvas de la figura 2.

Figure 3. *Hardening rate per deformation as a function of the stress for tests shown in figure 2.*

Figura 4. Curvas esfuerzo-deformación para las cuatro aleaciones deformadas 2 veces, mínimo tiempo entre golpes o tras 24 h.

Figure 4. *Stress-strain curves after double deformation after a short interval or 24 h.*

produce en las muestras durante la deformación; este calentamiento es mayor para las muestras más ricas en silicio ya que este elemento reduce la conductividad térmica del material^[2 y 3].

La figura 5 muestra como el endurecimiento debido al silicio aumenta con la deformación, pero decrece al incrementarse el contenido de silicio.

Figura 5. Endurecimiento del material en función del wt % Si y de la deformación. El plano sombreado^[7] corresponde a 83 MPa/% wt. Si ^[3].

Figure 5. Hardening as function of the wt % Si and strain. The shaded plane^[7] corresponds to the value of 83 MPa/% wt. Si ^[3].

Este efecto se hace más evidente para las aleaciones con mayor contenido en silicio, en las cuales se espera la presencia de fases ordenadas^[6]. Es importante señalar que el valor de endurecimiento por solución sólida de silicio, 83 MPa por cada 1 % de silicio^[7], es sólo válido para los valores de deformación por debajo de (0,05).

Las micrografías ópticas de los materiales deformados (Fig. 1) muestran que la extensión del maclaje aumenta al aumentar la deformación y al aumentar la concentración de silicio.

En la figura 4 se dibujan las curvas esfuerzo-deformación, con doble deformación, para las cuatro aleaciones. En ellas, se puede apreciar la existencia de un endurecimiento que tiene un valor medio de unos 35 MPa. El endurecimiento es mayor para las muestra con mayor diferencia de tiempo entre las sucesivas deformaciones (Fig. 6), pero la diferencia es pequeña o casi ninguna en el caso de la aleación B. No se aprecia una relación evidente entre el contenido en silicio de la aleación y el valor del endurecimiento. Este endurecimiento puede ser atribuido a dos fenómenos^[8]: a la difusión de átomos de carbono y nitrógeno hacia las dislocaciones durante el tiempo entre compresiones; estos átomos fijan las dislocaciones dificultando su movimiento. La otra posible causa puede ser la formación de estructuras ordenadas que puede dar origen a límites de antifase (*Anti Phase Boundaries*).

5. CONCLUSIONES

La deformación plástica a temperatura ambiente de aleaciones hierro-silicio, en el rango de compo-

Figura 6. Endurecimiento (hardening) relativo tras doble deformación.

Figure 6. Relative hardening for each alloy after double deformation.

sición 3,3-6,3 wt. %, puede ser descrita por las correspondientes ecuaciones constitutivas cuyos parámetros dependen de la cantidad de silicio. Los parámetros de las ecuaciones constitutivas se pueden deducir dibujando la velocidad de endurecimiento por deformación en frío en función del esfuerzo. Para las muestras con mayor contenido en silicio se observan desviaciones respecto al comportamiento esperado, probablemente debidas al mayor ablandamiento por calentamiento adiabático producido durante la compresión. El endurecimiento de estas aleaciones varía con el esfuerzo y la concentración de silicio, pero solamente para los valores más bajos de deformación se encontró correspondencia con los valores recogidos en la literatura para el endurecimiento por solución sólida debido a silicio, esto indica que hay otros mecanismos contribuyendo al endurecimiento.

Es evidente la existencia de un endurecimiento entre los pasos sucesivos cuando la muestras son doblemente deformadas, aunque no ha sido posible establecer una relación con la concentración de silicio o el tiempo transcurrido entre las deformaciones.

El fenómeno de maclaje aparece como mecanismo contribuyente a la deformación y su incidencia es mayor al aumentar la deformación o la concentración de silicio.

REFERENCIAS

- [1] J.K. STALEY, *Electrical and Magnetical Properties of Metals*, Am. Soc. Met., Metals Park, 1963, 215.

- [2] R.M. BOZORTH, *Ferromagnetism*, Van Nostrand Co., Princeton, 1951.
- [3] T. ROS-YÁÑEZ, J. BARROS, R. COLÁS AND Y. HOUBAERT, *ISIJ Int.* 43 (2003) 447-453.
- [4] A. AIROD, H. VANDEKINDEREN, J. BARROS, R. COLÁS AND Y. HOUBAERT, *J. Mat. Proc. Techn.* 134 (2003) 398-404.
- [5] E. VOCE, *J. Inst. Met.* 74 (1948) 537.
- [6] O. KUBASCHEWSKI, *Iron Binary Phase Diagrams*, Springer-Verlag, Berlin, 1982.
- [7] F.B. PICKERING, *Physical Metallurgy and the Design of Steels*, Appl. Sc. Pub., London, 1983.
- [8] G.E. DIETER, *Mechanical Metallurgy*, SI Metric Edition, McGraw-Hill Book Company, 1988.