

## Influencia del tamaño de grano en el ruido magnético de Barkhausen en los aceros aisi/sae 1005-1070

Carlos Torres Pupo<sup>a</sup> y Jose Alberto Perez Benítez<sup>b</sup>

a) Facultad # 9, Departamento de Ciencia básicas, Universidad de Las Ciencias Informáticas; carlostp@uci.cu

b) Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Oriente.

Recibido el 15/07/2008. Aprobado en versión final el 17/04/2009.

**Sumario.** En este trabajo se estudia la dependencia del Ruido Magnético de Barkhausen (RMB) con los diferentes parámetros micro-estructurales de los aceros AISI/SAE 1005, 1020, 1045, 1070; Determinando la dependencia de varios parámetros de la señal de RMB como son: la densidad espectral, la amplitud del pico máximo, la envolvente del ruido y la forma de los picos del ruido, con el tamaño de grano. Además se emplea un modelo para explicar la dependencia de los mencionados parámetros del RMB con el tamaño del grano.

**Abstract.** In this paper we study the dependence of magnetic Barkhausen noise (RMB) with the various microstructural parameters of the steel AISI / SAE 1005, 1020, 1045, 1070; Determining the dependence of various parameters of the signal RMB as are the power spectral density, the amplitude of the peak, the noise envelope and shape of the peaks of noise, with the size grain. Besides using a model to explain the dependence of the above parameters RMB with the grain size.

**Palabras clave.** Barkhausen effect, 75.60.Ej; crystal microstructure, 61.72.-y

### 1 Introducción

Cuando los materiales ferromagnéticos se someten a campos magnéticos variables, el aumento en la inducción se presenta de manera discontinua, como respuesta al movimiento de las paredes de dominio magnético<sup>1</sup>. Estos aumentos bruscos de inducción se conocen como Ruido Magnético de Barkhausen (RMB). La señal se detecta como un pulso de voltaje eléctrico cuando una bobina se coloca sobre la superficie de la muestra mientras está ocurriendo el movimiento de las paredes de dominio. El RMB es sensible a la microestructura del material. En este trabajo se presenta los estudios realizados a varios tipos de aceros comerciales, desde el AISI/SAE 1005 al 1070 (1005, 1020, 1045, 1070).

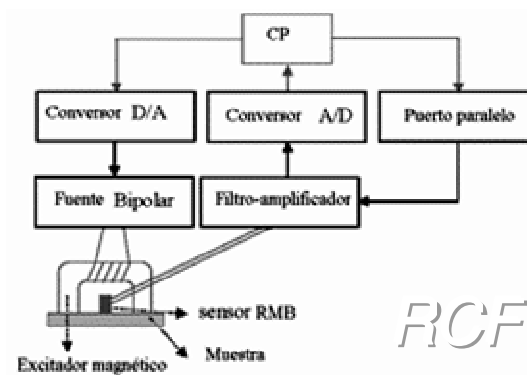


Figura 1 Esquema del sistema de medición empleado para adquirir la señal de RMB.

Para ello se realiza un análisis de la densidad espectral (contribución de las diferentes frecuencias de la señal a la energía de la señal de RMB, DE), la dependencia del número de saltos de RMB con el área de estos saltos, la variación de la envolvente de RMB, curva que pasa por los picos de la señal, con el tamaño de grano, y las formas de los saltos de RMB correspondientes a las paredes de 180° y a las de 90°.

## 2 Material y método

Las muestras fueron obtenidas de planchas de acero al carbono: 1005, 1020, 1045 y 1070, con forma de paralelepípedos (200mm x 15mm x 2 mm).

Se realizó un tratamiento térmico de altas temperaturas con el objetivo de obtener diferentes tamaños de grano. Las muestras fueron pulidas usando pastas de diamante, luego fueron expuestas a una solución de Nital al 2% para revelar la microestructura, que se observó con un microscopio Olympus BX60M.

|        | 1005 | 1020 | 1045 | 1070 |
|--------|------|------|------|------|
| Fino   | 22   | 26   | 20   | 18   |
| Médio  | 32   | 35   | 30   | 31   |
| Grueso | 45   | 40   | 42   | 39   |

Para la determinación del tamaño de grano se utilizó el software profesional correspondiente al Microscopio Olympus BX60M: Olympus Imaging Software BX6-SW versión 1.02

En la figura 1 se muestra un esquema del sistema de medición empleado para adquirir la señal de RMB. Una computadora personal con ayuda del conversor digital/analógico (D/A) proporciona una onda sinusoidal de 1 Hz que es aplicada a la bobina del yugo magnético generando un campo magnético variable hasta 25 kA/m, suficiente para excitar la señal de RMB. En la superficie de la muestra, un sensor tipo bobina capta los pulsos electromagnéticos, correspondientes a la señal de Barkhausen. Estos pulsos son amplificados, filtrados y después digitalizados por medio de una placa de adquisición de datos analógica/digital. El programa que permite enviar la señal de excitación y permite la adquisición de la señal se realizó en MATLAB 6.5, así como todo el procesamiento de la señal.

**2.1 Magnitudes fundamentales del RMB.** La figura 2 muestra los parámetros básicos de un salto de RMB. Para definir estas magnitudes se denota la señal del RMB por  $F(t)$  como una función del tiempo  $t$ .

1. La duración del salto de RMB,  $T$ , está dada por el intervalo de tiempo entre el primer instante de tiempo  $t_1$ , en el cual la señal alcanza determinado nivel (nivel base) y, el instante de tiempo cuando la señal vuelve a

tomar este valor,  $t_2$ . La duración se da en unidades de  $\tau = 1/f_s$ , donde  $f_s = 200$  kHz es la frecuencia de muestreo.

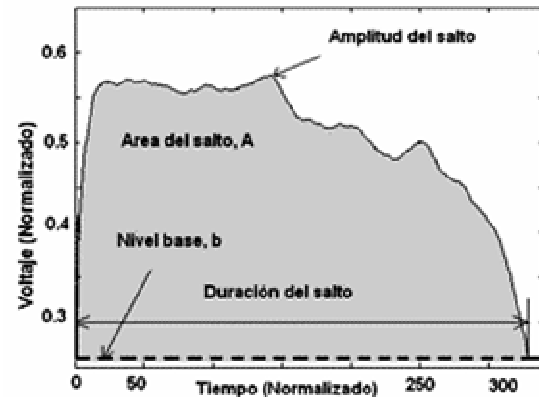


Figura 2 Parámetros básicos de un salto de RMB

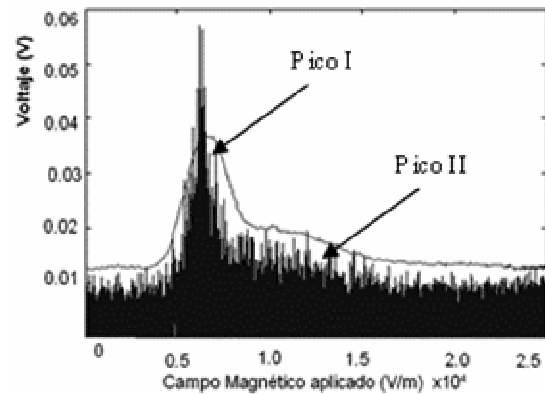


Figura 3. Ejemplo de la parte positiva de una señal de RMB del acero 1005 y envolvente correspondiente a esta señal.

2. El área del salto es el área definida entre la señal y el nivel base  $b$  (generalmente se toma el nivel de ruido de fondo), entonces el área puede ser escrita como:

$$\int [F(t) - b] dt$$

Físicamente el área del salto es proporcional al cambio de la magnetización ocurrido en la muestra durante un salto de RMB.

3. La energía del salto  $E$  es proporcional a la integral:

$$E \propto \int [F(t) - b]^2 dt$$

4. La raíz cuadrada media de la señal y la amplitud máxima de la señal también conocida como el máximo voltaje de pico ( $V_{rms}$  y  $MVP$  respectivamente). Éstas se definen de la siguiente forma:

$$V_{rms} = \sqrt{\left( \frac{\sum V_i^2}{n} \right)}, \quad MVP = \max |V_i|$$

donde  $V_i$  es el máximo de cada salto de la señal y  $n$  es la cantidad de saltos de RMB. El  $V_{rms}$  caracteriza lo que se suele denominar como “actividad de Barkhausen”. Si el  $V_{rms}$  es alto, entonces, la actividad de Barkhausen es alta.

Otra magnitud que se usa para estudiar la contribución de las diferentes frecuencias de la señal a la energía de la señal de RMB es la densidad espectral, DE, la cual se da por la expresión

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-j\pi f\tau} d\tau$$

donde  $R(\tau)$  es la función de autocorrelación temporal de la señal de RMB.

La señal de RMB no sólo está compuesta por saltos elementales debido al movimiento de una sola pared, sino que, también existen secuencias coordinadas de saltos provocados por un efecto “dominó”. A estos saltos se les llaman avalanchas.

El análisis de la envolvente de la señal de RMB, es otro aspecto que aporta mucha información sobre el comportamiento temporal del RMB. La figura 3 muestra la parte positiva de una señal de RMB del acero 1005 y la envolvente correspondiente. En ésta se puede apreciar la presencia de doble pico en la envolvente.

En el caso de estas dos últimas magnitudes (la densidad espectral y la envolvente), muchos softwares profesionales contienen funciones que permiten obtener las mismas de manera rápida. En el presente trabajo se usaron las funciones PWELCH y HILBERT ambas del MATLAB 6.5 para calcular la densidad espectral y la envolvente respectivamente.

### 3 Estudio de la densidad espectral

En la figura 4 se muestra la curva de la dependencia de la DE con la frecuencia para diferentes tamaños de grano en el acero AISI/SAE 1005. No aparece la grafica para los aceros AISI/SAE 1020, 1045 y 1070 pues la relación observada es la misma.

En la gráfica se puede apreciar que la DE decrece con el incremento del tamaño de grano. Esta dependencia se mantiene prácticamente para todas las frecuencias. Este resultado tiene dos implicaciones fundamentales:

La DE para las bajas frecuencias está relacionado con saltos de muy larga duración<sup>2,3</sup>. Como se ve del gráfico, las diferencias entre las DE de los diferentes tamaños de grano es mayor para bajas frecuencias. Es decir, con la disminución del tamaño de grano crece notablemente la energía de las avalanchas y, por tanto, el número de paredes de dominio que participan en ella<sup>4</sup>.

Como la dependencia se mantiene para casi todo el espectro de frecuencias, significa que este proceso se mantiene tanto en la superficie como en el interior de las láminas de acero. Esto se puede atribuir a que el tamaño de grano se mantenga relativamente uniforme en todo el espesor de las muestras.

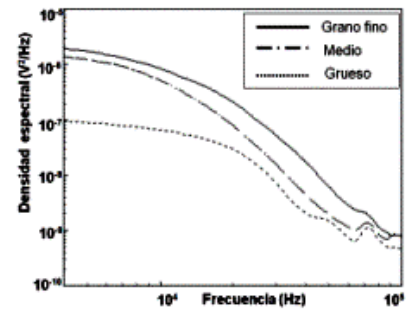
### 4 Dependencia del número de saltos de RMB con el área de estos saltos

La figura 5 muestra la dependencia del número de saltos de RMB con el área de estos saltos para el acero 1005,

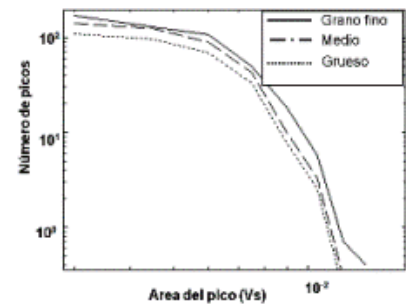
sólo se representa este ya que el comportamiento de los otros tres es análogo.

Esta figura muestra que, con el incremento del tamaño de grano, además de disminuir la energía de las avalanchas, también disminuye la cantidad de saltos de RMB de todas las dimensiones, o sea, tanto saltos pequeños como avalanchas.

**Figura 4.** Dependencia de las DE con la frecuencia para diferentes tamaños de grano en el acero 1005.



**Figura 5.** Distribución de las áreas de los saltos RMB para el acero 1005.



RCF

### 5 Variación de la envolvente

Por otro lado, la figura 6 muestra la variación de la envolvente de RMB con el tamaño de grano para los aceros 1005 y 1045. Se presentan sólo los resultados para estos aceros, pues uno presenta el caso típico de doble pico y el otro de simple pico, y los demás presentan un comportamiento intermedio.

Como se puede apreciar de esta figura el incremento del tamaño de grano tiene tres efectos fundamentales sobre la envolvente:

- Disminuye la amplitud máxima de la envolvente.
- En el caso de una envolvente con doble pico (figura 6 a)), con el incremento del tamaño de grano tiende a una de un solo pico.
- En el caso de la envolvente con un solo pico (figura.6 b), con el incremento del tamaño de grano disminuye el ancho del pico de la envolvente y hay un ligero desplazamiento hacia  $H=0$ .

En el caso de la envolvente de un solo pico, estudios realizados en hierro puro<sup>5,6</sup> mostraron un comportamiento similar. Esto se atribuye a que el incremento del tamaño de grano produce una disminución del campo coercitivo<sup>7</sup>, por lo que se requiere menos intensidad de campo para que se produzcan eventos de RMB. Esto trae consigo un desplazamiento de la envolvente hacia

H=0. Los resultados a) y b) han sido reportados en la literatura por Gatelier-Rothea<sup>6</sup> para muestras de hierro de alta pureza.

## 6 Modelo

Para explicar estos procesos, partimos del modelo propuesto por J.A. Pérez Benitez, J. Capó Sánchez, J. Anglada Rivera, L.R. Padovese<sup>8</sup> y teniendo en cuenta que para el caso de los dominios de 90° grados Jiles<sup>9</sup> dedujo otra expresión para el campo coercitivo que actúa sobre las paredes de estos dominios, la cual toma en cuenta la influencia que tienen las tensiones residuales que se generan en los bordes de grano producto de la magnetostricción, la cual esta dada por:

$$h_R = \frac{\pi \bar{T}}{\mu_0 I_s d_g}$$

donde  $\bar{T}$  es el valor medio de tensiones residuales presentes en el material,  $d_g$  es el diámetro del grano,  $I_s$  la magnetización de saturación.

Además, Chikazumi<sup>10</sup> tomando en cuenta la influencia de la magnetostricción dedujo otra expresión para el ancho de los dominios de 90° dada por

$$D = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\gamma d_g}{\lambda_{100} c_{11}}}$$

donde  $\gamma$  es la energía por unidad de área de la pared,  $C_{11}$  es el módulo de elasticidad y  $\lambda_{100}$  es la magnetostricción en la dirección  $\langle 100 \rangle$ , en la cual se orientan los dominios en los monocristales de hierro; Se obtiene una ecuación que representa el voltaje RMB producido, en función del campo aplicado H, cuando las paredes de dominio se liberan de los sitios de anclaje debido a los bordes de grano y a las partículas de segunda fase

$$V(H) = R \sqrt{1/c_{11} \lambda_{100}} (1/\bar{d}_g^2) F\left(\frac{1}{H}, \bar{d}_g, \sigma_R^2\right) H^{1/2} + P \alpha^{5/3} (1/\bar{d}_g^{3/2}) \cdot (1/\bar{d}_p^3) F\left(\frac{1}{H}, \bar{d}_p, \sigma_p^2\right) H$$

donde:  $R, P$  son constantes que dependen del material,  $\alpha$  es la fracción de contenido carbono.

$$F\left(\frac{1}{H}, \bar{d}_p, \sigma_p^2\right)$$

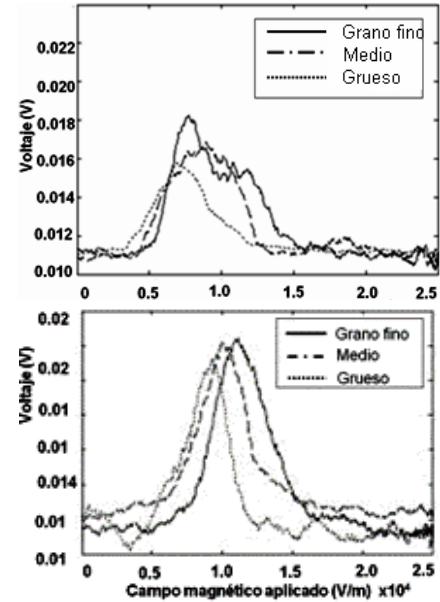
función de distribución, normal, de probabilidades de encontrar una partícula de segunda fase con diámetro  $d_p$  por unidad de área,  $\bar{d}_p$  el diámetro medio y  $\sigma_p$  su dispersión.

$$F\left(\frac{1}{H}, \bar{d}_g, \sigma_R^2\right)$$

función de distribución, normal, de probabilidades de encontrar un grano con diámetro  $d_g$  por unidad de área,  $\bar{d}_g$  el diámetro medio y  $\sigma_R$  su dispersión, en este caso dada por

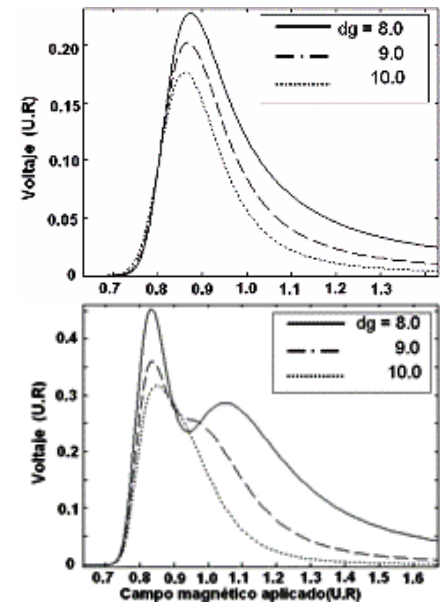
$$\sigma_R = \frac{\pi \bar{T}}{\mu_0 I_s} \sigma_g$$

La figura 7 a) muestra la evolución de una envolvente de un solo pico y la figura 7 b) la envolvente de dos picos con el tamaño de grano, obtenidos usando el modelo propuesto. El diámetro de los granos,  $d_g$ , está en U.R, porque no se ha realizado la identificación experimental de los parámetros.



**Figura 6.** Envolvente de la señal de RMB para diferentes tamaños de grano. Aceros 1005 (arr.) y 1045 (ab).

RCF



**Figura 7.** Simulaciones de la influencia del tamaño de grano sobre la envolvente RMB. a: (arr.); b: (ab).

La envolvente de un solo pico aparece cuando las dos contribuciones (debido a las paredes de 180° y a las paredes de 90°) están superpuestas. En este caso se puede apreciar que, con el incremento del tamaño de grano, la amplitud de la envolvente decrece y se desplaza muy ligeramente hacia H=0. Esto corrobora los resultados experimentales mostrados en la figura 6.

Puede verse que la disminución de la amplitud con el

incremento del tamaño de grano se debe a los términos:  $1/\bar{d}_g^2$  y  $1/\bar{d}_g^{3/2}$  en las amplitudes de ambas distribuciones, y el desplazamiento hacia  $H=0$  se debe a que la posición del máximo debido a la contribución de las paredes de  $90^\circ$  es  $1/\bar{d}_g$  y, por tanto, con el incremento del tamaño de grano la posición del máximo disminuye desplazándose la curva hacia el origen de coordenadas.

Se puede apreciar de figura 7 b) que con el incremento del tamaño de grano, la envolvente tiende a transformarse en una curva con un solo pico. Esto se debe a que el segundo pico es debido fundamentalmente al desplazamiento discontinuo de las paredes de  $90^\circ$ <sup>6,11</sup>, el cual representa en el modelo al primer término de la ecuación 1. La amplitud de este pico tiende a disminuir con el tamaño de grano según  $1/\bar{d}_g^2$ , o sea, más rápidamente que  $1/\bar{d}_g^{3/2}$  correspondiente al otro pico. Además, este segundo pico tiende a desplazarse hacia  $H=0$  en dirección hacia el primer pico debido a que  $1/\bar{d}_g$  disminuye (valor medio de la distribución). Estos dos efectos provocan el solapamiento de ambos picos.

En la figura 8 se muestran las curvas experimentales y el ajuste de las envolventes experimentales para el caso del acero 1005. Los parámetros de ajuste son  $\bar{d}_g, \bar{\sigma}_R, \bar{d}_p, \bar{\sigma}_p$  y  $\alpha$ .

Como se puede apreciar, la ecuación del modelo se ajusta bien a los datos experimentales. Estos resultados coinciden con el modelo de Sakamoto y colaboradores<sup>7</sup>, donde se predice una disminución del  $V_{rms}$  con el tamaño de grano  $RMS = C_g \bar{d}_g^{-1/2}$ . La diferencia entre los exponentes del modelo propuesto y el de Sakamoto y colaboradores puede ser debido a que este considera que todos saltos de la señal de RMB presentan igual amplitud y duración.

La figura 9 a) muestra las formas de los saltos de RMB correspondientes a las paredes de  $180^\circ$  y a las paredes de  $90^\circ$  figura 9 b). Estos saltos promedios se obtienen aplicando el procedimiento de promediación de Spasojevic y colaboradores<sup>4</sup>, descrito en detalle por J.A. Benítez y colaboradores<sup>12</sup>, a los saltos pertenecientes al primer y segundo pico de la señal de RMB respectivamente. O sea los saltos de la figura 9 a) corresponden al promedio de los saltos pertenecientes al primer pico de la señal de RMB, y los saltos de la figura 9 b) son el promedio de los saltos del segundo pico de la señal de RMB.

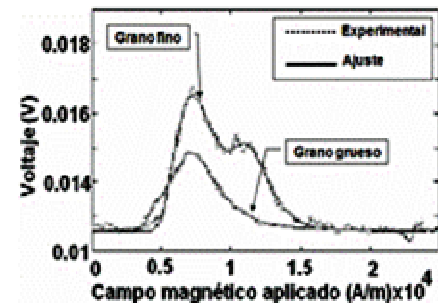
Como se puede apreciar de la figura 9, las formas de los saltos correspondientes a los saltos de las paredes de  $180^\circ$  difieren de la forma de los saltos de las paredes de  $90^\circ$ . Esto es debido a la naturaleza de los defectos que impiden el movimiento de las paredes en cada caso<sup>7,9,11</sup>, y según simulaciones hechas sobre la forma de los saltos<sup>6</sup>. En el primer caso los defectos que actúan sobre las paredes de  $180^\circ$  son partículas de segunda fase, perlita o cementita. Se ha demostrado que las paredes de  $180^\circ$

efectúan un movimiento rápido frenando su movimiento brevemente al hacer contacto con estos defectos<sup>13</sup> y produciéndose avalanchas por el movimiento de varias paredes simultáneamente. Lo cual justifica la forma aguda del salto de figura 9 a). En el segundo los saltos correspondientes a de las paredes de  $90^\circ$  son casi “cuadrados”. Esta forma es debido a que la pared interactúa con un defecto lineal (el borde del grano en este caso)<sup>13</sup>.

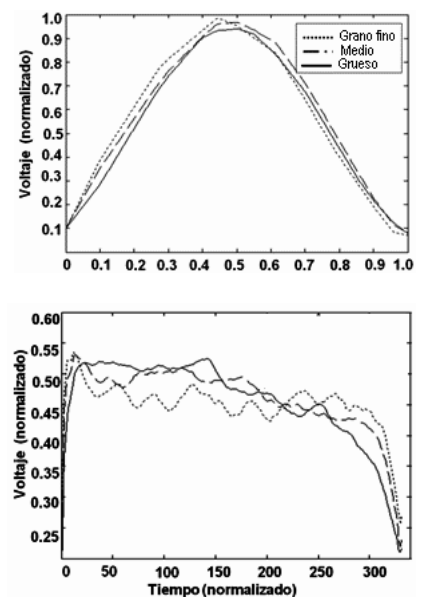
## 7 Conclusiones

Se observa una disminución de la cantidad de saltos de RMB con el aumento del tamaño de grano. La amplitud de la envolvente de RMB decrece y el máximo de ésta se desplaza hacia  $H=0$  con el crecimiento del tamaño de grano en el caso de la envolvente de un solo pico. En el caso de la envolvente de doble pico, la envolvente tiende a transformarse en una de un solo pico con el incremento del tamaño de grano. La forma de los saltos debido a las paredes de  $180^\circ$  se diferencian de la forma de los saltos de las paredes de  $90^\circ$ .

**Figura 8** Curva experimental y ajuste de la envolvente del RMB para grano fino y grano grueso en el acero 1005.



**Figura 9.** Dependencia de la forma de los saltos elementales de RMB con el tamaño de grano; (arr.) saltos paredes de  $180^\circ$  grados; (ab.) saltos paredes de  $90^\circ$ .



## Referencias

1. Barkhausen H, “Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen”, Zeitschrift für Physik **20**, 401-407

(1919).

2. P. Sethna, K. Dahmen, S. Korta, J. A. Krumhansl and J. D. Shore, "Hysteresis and hierarchies: Dynamics of disorder-driven first-order phase transformations", *Phys. Rev. Lett.* 70, 3347-3350 (1993).
3. R. Petta, M. B. Weissman, and K. P. O'Brien, "Multiple magnetization paths in Barkhausen noise", *Phys. Rev. E* 54, 1029-1031 (1996).
4. D. Spasojevic, S. Bukvic, S. Milosevic and H. E. Stanley, "Barkhausen noise: Elementary signals, power laws, and scaling relations", *Phys. Rev. E* 54 2531-2546 (1996).
5. D. H. L. Ng, K. Cheng, K. S. Cho, Z. Y. Ren, X. Y. Ma. and S. L. I. Chan." Nondestructive evaluation of carbon contents and microstructures in plain carbon steel bars by Barkhausen emission ", *IEEE Trans. Magn.* 37 4, 2734-2736 (2001).
6. C. Gatelier-Rothea, J. Chiocio, R. Fougères, P. Fleischnan," Characterization of pure iron and (130 p.p.m.) carbon-iron binary alloy by Barkhausen noise measurements: study of the influence of stress and microstructure ", *Acta Mater.* 46, 4873-4882 (1998).
7. H. Sakamoto, M. Okada, M. Homma, "Theoretical analysis of Barkhausen noise in carbon steels", *IEEE Trans. Magn.* 5, 2236-2238 (1987).
8. J.A. Pérez Benitez, J. Capó Sánchez, J. Anglada Rivera, L.R. Padovese. "A model for the influence of microstructural defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels", *J. Magn. Magn. Mater.* 288, 433-442 (2005).
9. D. C. Jiles, "Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect," *Czechoslovak Journal of Physics* 50, 893-988 (2000)
10. S. Chikazumi, *Physics of Magnetism* (John Wiley and Sons, New York, 1964).
11. V. A. Yardley, "Magnetic Detection of Microstructural Change in Power Plant Steels". Ph.D. Thesis, University of Cambridge (2003).
12. J. A. Pérez-Benitez, L. R. Padovese, J. Capó-Sánchez and J. Anglada-Rivera, "Investigation of the magnetic Barkhausen noise using elementary signals parameters in 1000 commercial steel", *J. of Magn. and Magn. Mater.* 263 (1-2) 72-77 (2003).
13. Maru, Marcia Marie .P. Linilson Rodrigues, Perez Benitez, José Alberto; Capo Sánchez, J. "Evaluating plastic deformation by the magnetic Barkhausen noise." In: *EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING*. Berlin, 2006.  
<http://www.ndt.net/ecndt2006/doc/Tu.1.6.4.pdf>