

Caracterización del envejecimiento de tuberías de vapor de centrales térmicas empleando el efecto Barkhausen

Characterization of steam pipes ageing degree from power plants using magnetic Barkhausen noise

Frank de los Reyes-Rodríguez^I, Julio Capó-Sánchez^{II}, Eduardo Franco-Fidalgo^I, Gonzalo de Diego-Velasco^{III}

I Universidad de Oriente. Cátedra de Ciencia de los Materiales. Santiago de Cuba. Cuba.

Correo electrónico: frank@dmm.uo.edu.cu

II Universidad de Oriente. Facultad de Ciencias Naturales. Santiago de Cuba. Cuba

III Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas. CIEMAT. Madrid, España

Recibido: 10 de noviembre de 2011

Aceptado: 26 de abril de 2012

Resumen

En este trabajo se caracteriza el grado de envejecimiento del acero 12Cr1MoV con el ruido magnético de Barkhausen por dos métodos. Para ello se realiza un estudio de la evolución microestructural en condiciones de operación (15MPa, 550°C) desde 100000 h a 150000 h, utilizando técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido. En el primer método los experimentos revelan una disminución de la raíz cuadrada media del voltaje con el tiempo de explotación, lo cual se atribuye a la disminución del número de paredes de dominio por unidad de área con el aumento del tamaño de grano. En el segundo método se evalúa el nivel de esferoidización y el tamaño medio de los carburos a partir de la altura total del segundo pico de la envolvente de la señal Barkhausen, mostrando una disminución debido a un cambio en la forma acicular y en el tamaño medio de los carburos.

Palabras claves: grado de envejecimiento, ruido barkhausen, tuberías de vapor, carburos.

Abstract

In this paper, an ageing degree characterization of 12Cr1MoV steel using two method of magnetic Barkhausen noise is developed. A study of the microstructural evolution during ageing at operated conditions (15MPa, 550°C) from 100000 h up to 150000 h was carried out using optic and scanning electron microscopy techniques. In the first method the experiments reveal a decreasing of root mean square of voltage with the ageing time, which is attributed to the decreasing of domain walls number per area units with the grain size increasing. In the second method the spheroidization level/average size of carbides was analyzed too with the total second peak height, determining a decreasing due to the change of the shape, size and acicularity of carbides phase.

Key words: ageing degree, barkhausen noise, steam pipes, carbides.

Introducción

Los aceros bajo aleados al Cr-Mo-V son ampliamente empleados en disímiles aplicaciones industriales, muy en especial en plantas termoeléctricas en diferentes países [1], de forma general estos aceros contienen una estructura inicial de ferrita y perlita o ferrita y bainita en dependencia de la estructura en equilibrio que se forme luego del tratamiento térmico a temperaturas entre 550 y 700°C por varias horas, lo cual genera la precipitación de carburos aleados estables y compuestos intermetálicos que interfieren en el progreso de las dislocaciones [2]. Estos regímenes de calentamiento eventualmente determinan la estabilidad de las propiedades mecánicas de los aceros empleados en plantas termoeléctricas (por ejemplo: la resistencia a la deformación por termofluencia y otras propiedades), así como el tiempo de vida remanente. En las centrales térmicas estos aceros son empleados para transportar el vapor sobrecalentado a temperaturas entre 500 y 560 °C y a presiones entre 10 y 15 MPa. Una vez transcurrido elevados tiempos de explotación bajo regímenes de termofluencia, la microestructura del acero cambia, la perlita/bainita se descompone y comienza la precipitación, crecimiento y migración de carburos hacia el límite de los granos de ferrita [3]. Este cambio hacia una estructura termodinámicamente inestable, provoca la formación de cavidades y el surgimiento de daños internos, lo cual conduce a la falla del material debido a la estrecha relación que existe entre cambios microestructurales y deterioro de las propiedades mecánicas [4-7].

Los materiales de las líneas de vapor de las plantas térmicas están sometidos en la mayoría de los casos a mecanismos de falla de termofluencia y fatiga térmica [8-12], y muchas de estas a nivel mundial han concluido su tiempo de vida de diseño, por lo que muchas de ellas están siendo sobreexplotadas, por tanto, y con el propósito de garantizar una explotación segura bajo estos mecanismos de falla, diferentes investigadores en la temática desarrollan trabajos con los cuales se puedan obtener modelos de predicción de vida remanente en componentes de plantas termoeléctricas en los cuales se incluya la valoración del grado de envejecimiento del mismo [13].

Por tal razón, es necesario disponer de una técnica no destructiva para evaluar constantemente el estado de la microestructura, de forma tal que se pueda conocer la vida remanente bajo las condiciones de explotación anteriormente descritas. Una de las técnicas más confiables por su posibilidad de ser aplicada "in situ" y por la elevada sensibilidad ante variaciones microestructurales es el ruido magnético Barkhausen [14], este ha sido empleado para evaluar la microestructura y el nivel de tensiones residuales en aceros comerciales, muchos autores han evaluado dicho efecto en el comportamiento de estructuras cristalinas, la influencia en el tamaño de grano, dislocaciones, entre otros [14-16].

El ruido magnético Barkhausen tiene elevada sensibilidad en los materiales ferromagnéticos y puede ser empleado en la evaluación de propiedades mecánicas como dureza, resistencia, tensiones residuales y fatiga, por esta razón, esta técnica se encuentra en estudio con el objetivo de potenciar una herramienta no destructiva para la evaluación de parámetros microestructurales y propiedades mecánicas.

En este trabajo se evalúan dos parámetros de la señal Barkhausen, la raíz media cuadrada del voltaje y la altura total del segundo pico de la envolvente de la señal, los cuales serán relacionados con el grado de envejecimiento del acero 12Cr1MoV, ambas magnitudes se obtienen con el empleo de dos sensores con volúmenes de lectura macro y micrométrico respectivamente.

El principal objetivo de este estudio consiste en potenciar con el efecto Barkhausen, el desarrollo de un método no destructivo para establecer la dependencia entre el grado de envejecimiento del acero analizado y el mencionado efecto, a partir de la determinación del tamaño de grano y de la morfología de las fases de carburos, ambos han sido valorado por otros investigadores [14, 17-19], pero en nuestro trabajo se insertan las variaciones cuantitativas específicas para este acero y el segundo ha sido posible su estudio por las características específicas de diseño de la instalación y el sistema de lectura empleados, el cual se explica a través de las teorías de *Kersten* y de los dominios ferromagnéticos [20]

Materiales y Métodos

Las muestras estudiadas fueron tomadas de secciones de codos de una de las Líneas Principales de Vapor (LPV) de una Central Térmica (CTE), dichas muestras oscilan entre 100000 y 150000 horas de explotación y regímenes de explotación de 15Mpa de presión y 550 °C de temperatura, todas con forma geométrica de paralelepípedos de 32mm x 40mm x150mm. El acero estudiado tiene una composición química de carbono, silicio, manganeso, cromo, molibdeno y vanadio de 0.12, 0.23, 0.54, 1.1, 0.26 y 0.17 % respectivamente.

Para la observación preliminar de las microestructuras se empleó microscopía óptica. Las muestras fueron desbastadas utilizando papeles abrasivos de granulometría entre 150 y 1600, posteriormente pulidas con óxido de cromo y finalmente para revelar la microestructura fueron atacadas químicamente con una solución de nital al 2%.

Para el estudio de la correlación entre la morfología de los carburos y el RMB se realizó la disolución controlada de la matriz ferrítica, proceso consistente en extraer los precipitados del material analizado mediante disolución electrolítica. La matriz ferrítica se disuelve preferentemente al tener un potencial más bajo que los precipitados, los cuales actúan como núcleos más nobles.

Para ello se calculó el peso y toda el área superficial del volumen a disolver, se preparó una disolución con 135 ml de metanol, 15 ml de ácido clorhídrico y 2g de ácido tartárico, se calculó el área superficial del volumen a disolver para determinar los miliamperios necesarios para la disolución electrolítica atendiendo la relación: 0.1 A/cm^2 . La morfología de los carburos y tamaño de grano fueron analizados con la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), empleando un *Hitachi* 2500 con detector de energía dispersiva (EDX), el análisis fue llevado a cabo con un voltaje de aceleración y una distancia de trabajo de 20 mm.

Para analizar el tamaño promedio y el nivel de esferoidización de los carburos se empleó un software para el análisis de imágenes, el cual procesó las imágenes digitales SEM obtenidas, en este caso, el nivel de esferoidización de los carburos fue dado por una magnitud llamada a_e (ver tabla 1) que no es mas que la diferencia entre el área total del carburo y el área de la circunferencia inscrita dentro del carburo con diámetro igual a la distancia entre los puntos opuestos más cercanos, siendo los menos esféricos los de mayores valores de a_e y los más esféricos los de menor valor.

El tamaño de grano se determinó según ASTM E-112-96 "Standard test methods for determining average grain size" [21], aplicando el método de las intercepciones de *Heyn*.

Tabla 1. Parámetros microestructurales del acero 12Cr1MoV con diferentes tiempos de explotación

Tiempo de explotación (h)	Tamaño promedio de los carburos (μm)	Tamaño de grano (μm)	$1/a_e$ (μm^{-2})
103000	0.39	17.33	1.15
126000	0.53	19.93	1.69
138000	0.61	20.88	1.89
142000	0.62	21.01	2.13
150000	0.69	22.23	2.78

Instalación experimental

Las mediciones de los parámetros del ruido magnético Barkhausen se llevaron a cabo utilizando una instalación experimental como la mostrada en la figura 1. La misma emplea una computadora que proporciona ondas sinusoidales de 10 Hz, las cuales son amplificadas por una fuente bipolar que alimenta un circuito con un yoke magnético que magnetiza la muestra. Las emisiones magnéticas de Barkhausen son detectadas con dos sensores de volúmenes de lectura macro y micrométrico respectivamente, posteriormente se amplifican y filtran al orden de 1-150 KHz. Concluido este proceso se visualizan con ayuda de un osciloscopio digital y se capturan empleando una tarjeta de adquisición de datos con frecuencia de muestreo de 200 MHz.

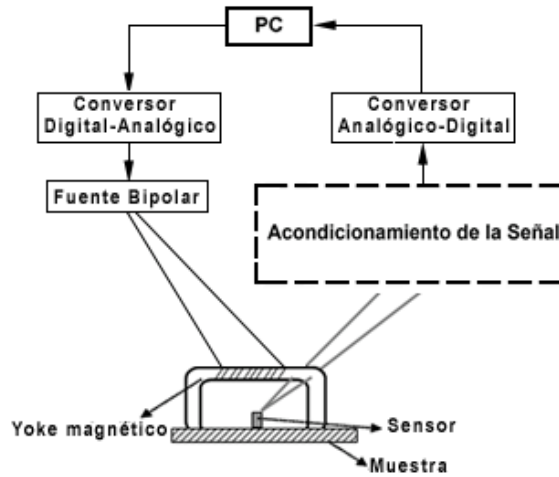


Fig.1. Esquema de la instalación utilizada

Resultados y discusión

Muchos investigadores [17, 22-25] muestran diferentes resultados en el comportamiento de la señal Barkhausen ante las variaciones que tienen lugar en los aceros como resultado del proceso de envejecimiento, antes de conocer los resultados obtenidos en este trabajo y para una mejor comprensión del mismo se resumen los principales cambios que tienen lugar en el acero estudiado con el incremento del tiempo de explotación: disminución de la perlita, incremento del tamaño de grano, incremento del tamaño de los carburos, esferoidización y coagulación de los carburos, migración de los carburos hacia el borde de los granos, entre otros. Sin embargo, en las muestras analizadas en este trabajo (100000 – 150000 horas de explotación) las colonias de perlita que a estadíos inferiores a 100000 h podían verse al microscopio electrónico han desaparecido y se encuentran finamente dispersas en toda la matriz, por otra parte el tamaño de grano no tiene un aumento significativo (tabla 1 y figuras 2 y 3), lo cual es característico de materiales que trabajan bajo la acción de termofluencia por elevados tiempo de explotación [26], por tanto los cambios fundamentales y más fiables a relacionar con el grado de envejecimiento son todos en los relacionados con las fases de carburos [2, 3], en las figuras 2 y 3 se muestran la microestructura del acero 12Cr1MoV con diferentes grados de envejecimiento, así como la magnitud a_e que caracteriza el nivel de esferoidización de los carburos.

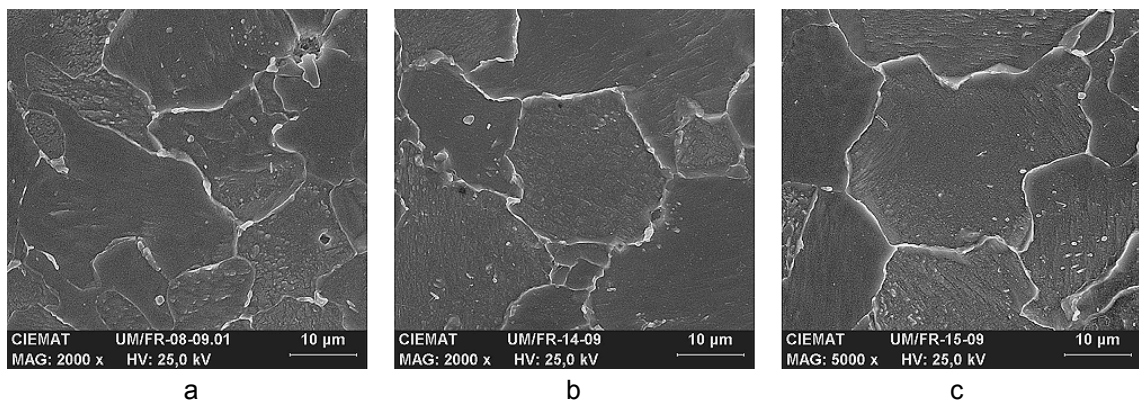


Fig. 2. Microestructura de las muestras utilizada, 12Cr1MoV para:
a) 103000 h, b) 138000 h, c) 150000h

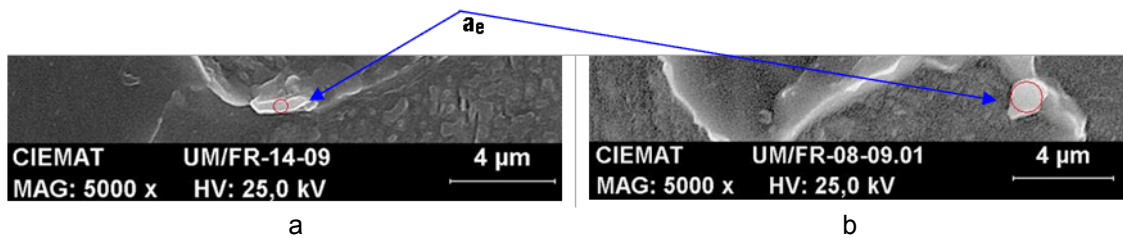


Fig. 3. Carburos con diferentes niveles de esferoidización en el acero 12Cr1MoV con distintos grados de envejecimiento. a) 103018 horas y b) 150037 horas.

La figura 4 muestra la dependencia entre el tamaño de grano y el tiempo de envejecimiento del acero 12Cr1MoV, esta curva fue ajustada con un modelo exponencial, con el cual se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.99.

$$Tg = \exp(2.39 + .0000043 Te) \quad (1)$$

Donde Tg es el tamaño de grano en (μm) y Te el tiempo de envejecimiento del acero analizado en (h).

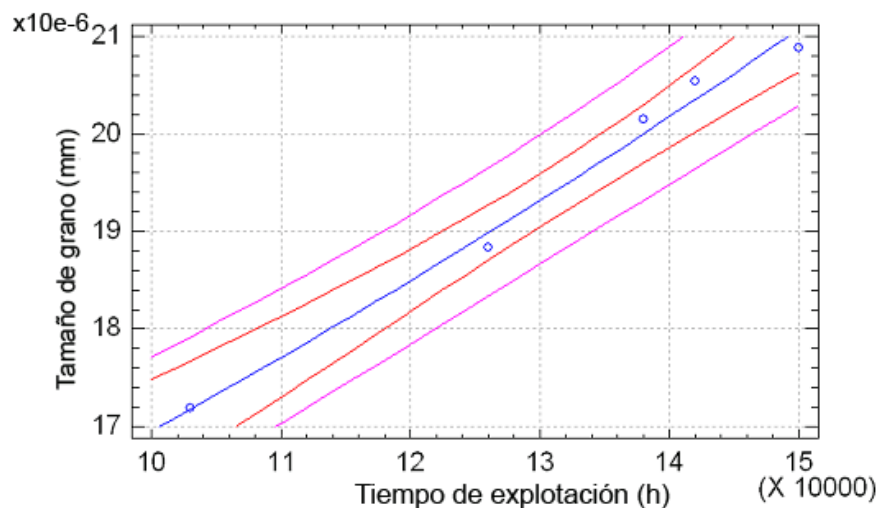


Fig. 4. Dependencia del tamaño del grano con el nivel de degradación del acero 12Cr1MoV

Por otra parte, la figura 5 muestra los patrones de la señal Barkhausen obtenidos para dos muestras envejecidas, las mismas muestran una aparente similitud, sin embargo, parámetros específicos como el V_{rms} , cambian en proporción tal que permiten emplear este método como no destructivo en la evaluación de la degradación del acero 12Cr1MoV.

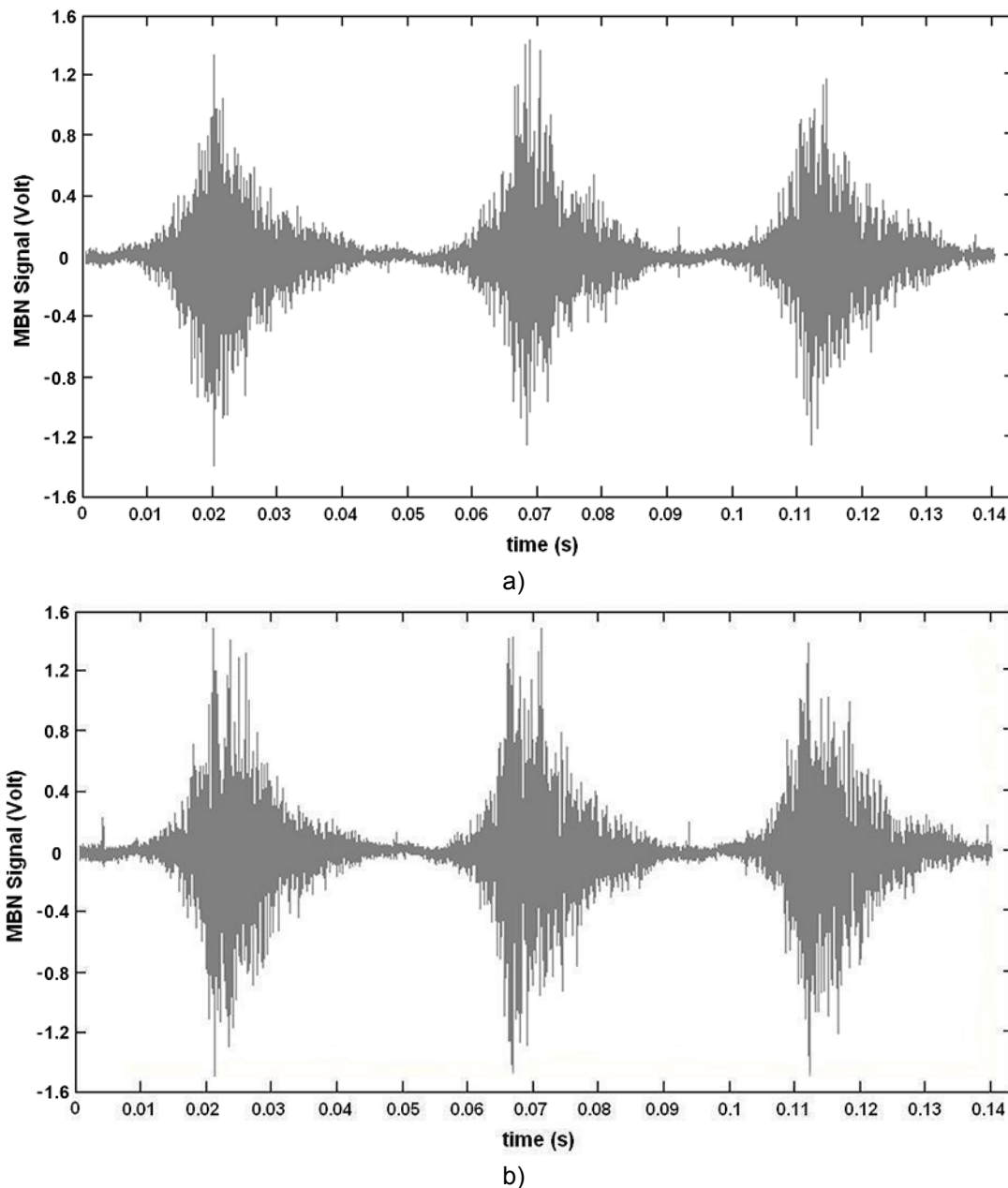


Fig. 5. Señal RMB obtenida para el acero 12Cr1MoV para tiempos de exposición de:
a) 138000 h, b) 150037 h

El V_{rms} de la señal disminuye debido a que el ancho de los dominios magnéticos es proporcional a la raíz cuadrada del diámetro de los granos. Por tanto, con el crecimiento del tamaño de los granos disminuye la cantidad de dominios por unidad de área. Con la disminución del número de paredes de dominio también disminuye el número de saltos del RMB, los cuales pueden ocurrir de manera individual o en forma de avalanchas. Luego la cantidad y amplitud de estos saltos influyen en la magnitud media y la amplitud máxima de la señal de RMB. Por tanto, al disminuir estos parámetros, disminuye también el V_{rms} . Este resultado coincide con reportes anteriores obtenidos por

Con los valores promedios de V_{rms} se desarrolló un modelo estadístico que incluye la variación de estos valores para cada grado de envejecimiento estudiado, el mismo se muestra en la figura 6, y la ecuación 2 responde a la correlación de ambas magnitudes, ajustada con un modelo lineal con coeficiente de correlación de -0.98.

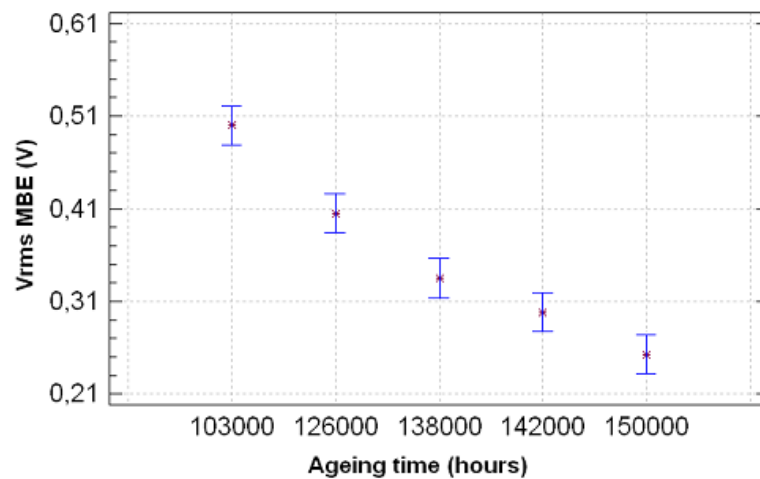


Fig. 6. Variación de V_{rms} en el acero 12Cr1MoV con diferentes niveles de degradación.

$$V_{rms} = 1.08 - 0.0000055 T_e \quad (2)$$

Donde T_e es el tiempo de envejecimiento en (h).

Igualando T_e de las ecuaciones 1 and 2 se obtiene:

$$T_g = \exp \left(\frac{1.78 - 0.43 V_{rms}}{0.55} \right) \quad (3)$$

Con la ecuación 3 es posible calcular el tamaño de grano en el acero 12Cr1MoV, el cual se va a corresponder a un tiempo de explotación y en consecuencia con un nivel de degradación determinado, la determinación cuantitativa del tamaño de grano a partir de técnicas de caracterización magnética fortalece la posibilidad de emplear el método propuesto como no destructivo para la evaluación del nivel de degradación. Sin embargo, más allá de este análisis, se evalúa también con el ruido magnético de Barkhausen la morfología de los carburos, lo cual puede ser relacionado con mayor fiabilidad con el nivel de degradación; para llevar a cabo este estudio se midieron las muestras con un sensor micrométrico de lectura de $GAP=6 \mu m$, con el mismo se garantiza tomar exclusivamente la interacción de las paredes de dominio con defectos microestructurales de carácter puntual como es el caso específico de carburos.

La garantía de evaluar dicha correspondencia fue posible debido a que las muestras fueron medidas con el RMB en diferentes pares de coordenadas específicos y dichos puntos fueron posteriormente analizados con microscopía electrónica de barrido.

Con esta técnica se obtuvieron señales donde fue observado con claridad el segundo pico de la envolvente de la señal, que de acuerdo a [17] el mismo se produce por la interacción de las paredes de dominio con partículas de segunda fase, por tanto su altura máxima fue relacionada con el nivel de esferoidización de los carburos según las teorías de Kersten y de los dominios ferromagnéticos, y en consecuencia con la degradación del acero estudiado.

En la figura 7 se muestra el doble pico que se produce en la envolvente de la señal Barkhausen, así como las magnitudes que pueden ser empleadas para su caracterización: donde W y h representan los anchos y alturas de las diferentes zonas del mismo respectivamente, las cuales pueden estar relacionadas con el tiempo de permanencia de la pared de dominio anclada en la partícula de segunda fase y con la energía del salto Barkhausen respectivamente, el eje "x" representa la duración del salto Barkhausen.

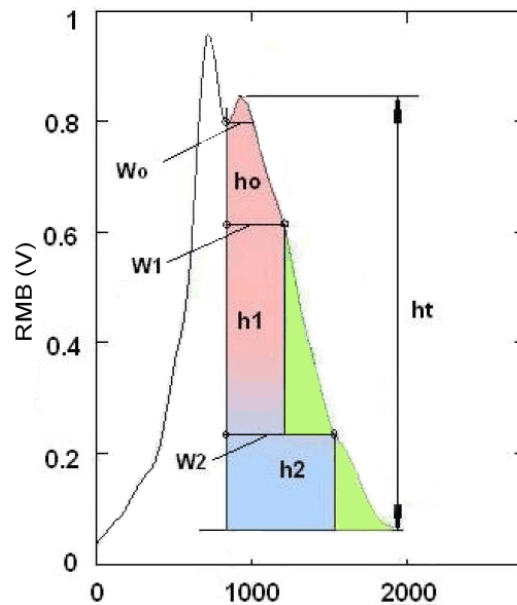


Fig. 7. Esquema del doble pico de la envolvente de la señal RMB en el acero 12Cr1MoV

Estas magnitudes pueden ser relacionadas debido a que alrededor de las 100000 horas de explotación en este acero, las laminas de cementita procedentes de la perlita se encuentran finamente dispersas en la matriz y los carburos poseen una forma excelentemente acicular, hereditaria de estas láminas [26], lo cual fue corroborado con los estudios de caracterización microestructural con microscopía electrónica de barrido (figuras 2 y 3). Este carburo tiene dominios magnéticos de naturaleza distinta a las paredes de dominio, los cuales están asociados a la interfase matriz ferrítica-carburo, cuya cantidad será directamente proporcional al número de interfases carburo-matriz ferrítica en direcciones arbitrarias. Estos dominios magnéticos convierten a los carburos en fuertes sitios de anclaje que van a interactuar fuertemente con el movimiento de las paredes de dominio, bajo la acción del campo magnético de la muestra.

Del análisis anterior se induce que la fortaleza del carburo como sitio de anclaje, va a depender del número de dominios asociados a él, lo cual depende del número de interfases matriz ferrítica-carburo que interactúa con la matriz, que a su vez está relacionado con el nivel de esferoidización del carburo.

Esto provoca que a mayor grado de acicularidad, o bien menor nivel de esferoidización, exista una mayor retención de la pared de dominio en el carburo, lo cual trae consigo que durante el movimiento de las paredes de dominio debido al proceso de magnetización, los carburos se conviertan en fuertes sitios de anclaje que tratarán de oponerse al movimiento de dichas paredes, una vez prosiga la acción del campo magnético, la pared de dominio logra desanclarse buscando un menor estado de energía libre y se registran pues, elevados valores de voltaje durante la actividad Barkhausen; una vez incrementa el nivel de degradación, los carburos tienden a una forma geométrica esferoidal según muestra la tabla 1, perdiendo dominios asociados a la interfase matriz ferrítica-carburo y la retención de la pared de dominio es menor, y por tanto, más discretos los saltos, todo esto puede ser representado gráficamente mediante la variación del voltaje máximo del segundo pico de la envolvente de la señal con el tiempo de explotación, según muestra la figura 8, en la cual puede verse además los valores máximos y mínimos para cada grado de envejecimiento, notándose al igual que en la figura 7 un ligero solapamiento de los valores de altura total del segundo pico solamente entre los estadios de envejecimiento entre 138000 horas y 142000 horas, lo cual denota la similitud en forma geométrica de los carburos y da medida de la exactitud del método propuesto.

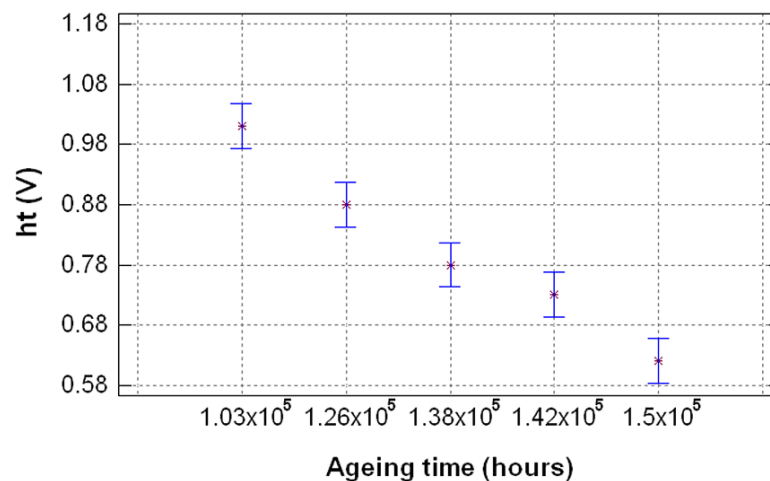


Fig. 8. Variación de los valores de la altura del segundo pico en función del tiempo de explotación

Algunos investigadores [22] muestran que la señal del ruido magnético de Barkhausen depende del número de paredes de dominio moviéndose en un instante dado las cuales están fuertemente influenciadas por las diferentes características microestructurales. Es bien conocido que la magnetización involucra varios procesos tales como la nucleación, movimiento de las paredes de dominio y rotación de los dominios pero la mayor contribución de la magnetización viene del movimiento irreversible de las paredes de dominio lo cual causa grandes cambios en la razón de magnetización [22].

Puede ser considerado que en aleaciones policristalinas ferromagnéticas envejecidas de energía magnética libre, tanto el límite de grano como en la interfase entre matriz-carburo son las dos mejores barreras al movimiento de las paredes de dominio comparado con dislocaciones individuales, fluctuaciones en la composición química en la matriz, etc., sin obviar que la presencia de carburos incrementa la cohercividad del material, lo cual es atribuido al anclaje de la pared de dominio con los carburos.

Algunos investigadores han establecido la relación existente entre vida remanente en componentes que trabajan a elevadas cargas y temperaturas y nivel de esferoidización de los carburos del material, de ahí que se proponga, realizar futuros trabajos que permitan obtener la vida remanente a partir del RMB.

Conclusiones

En el presente trabajo se han desarrollado dos métodos que pueden ser aplicados como técnicas de ensayo no destructivo para evaluar el grado de envejecimiento del acero de las Líneas principales de Vapor de las Centrales Termoeléctricas de nuestro país.

En el primer método, se obtiene un descenso inicial y posteriormente un descenso más gradual del voltaje medio cuadrado de la señal con el tiempo de envejecimiento del acero analizado, lo cual se atribuye a la disminución de la cantidad de dominios magnéticos con el incremento del tamaño de grano como resultado del envejecimiento térmico.

En el segundo método se evalúa la morfología de las fases de carburos a partir del voltaje medio máximo del segundo pico de la señal, notándose una disminución de dicha magnitud debido a la tendencia hacia una forma esférica de los carburos.

Ambos métodos permiten monitorear continuamente el estado de la microestructura de los materiales de las tuberías de vapor de plantas térmicas, así como también en futuras investigaciones pudiera establecerse la correlación entre el ruido magnético de Barkhausen y los niveles de esferoidización obtenidos por ZHAO [27] para la determinación de vida remanente de componentes que trabajan a elevados niveles de carga y temperatura.

Todo ello asegura el control de integridad estructural de estas instalaciones termoenergéticas así como la adecuada planificación de oportunas tareas de mantenimientos parciales y preventivos.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo quisieran agradecer a los señores Dolores Gómez Briceño y Gonzalo de Diego Velasco del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. CIEMAT de Madrid, por la ayuda en la caracterización microestructural y procesamiento de imágenes (SEM) del acero 12Cr1MoV.

Referencias

1. Auerkari, P., Holmström, S., Veivo, J., *et al.* "Creep damage and expected creep life for welded 9-11% Cr steels". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2007. vol. 84, nº. 1-2: p. 69-74. ISSN 0308-0161.
2. Baltušnikas, A., levinskas, R. y Lukošūūtė, I. "Kinetics of carbide formation during ageing of pearlitic 12X1MΦ steel". *Material Science*, 2007. vol. 13, nº. 4, p. 286-292. ISSN 1392-1320.
3. Baltušnikas, A., Levinskas, R. y Lukošūūtė, I. "Analysis of heat resistant steel state by changes of lattices parameters of carbides phases". *Material Science*, 2008. vol. 14, nº. 3, p. 210-214. ISSN 1392-1320.
4. Azevedo, C.R.F. y Sinátori, A. "Erosion-fatigue of steam turbine blades". *Engineering Failure Analysis*, 2009. vol. 16, nº. 7, p. 2290-2303. ISSN 1350-6307.
5. Bolton, J., "Analysis of structures based on a characteristic-strain model of creep". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008. vol. 85, nº. 1-2, p. 108-116. ISSN 0308-0161.
6. Cicero, S., Gutiérrez Solana, F. y Álvarez, J.A. "Structural integrity assessment of different components of a power plant". *Engineering Failure Analysis*, 2007. vol. 14, nº. 2 p. 301-309. ISSN 1350-6307.
7. Jong Bum, K., Hyeong Yeon, L. y Jae Han, L. "Creep-fatigue test of a SA 316SS structure and comparative damage evaluations based upon elastic and inelastic approaches". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008. vol. 85, nº. 8, p. 550-556. ISSN 0308-0161.
8. Latha, S., Mathew, M.D. y Mannan, S. L. "Thermal creep properties of alloy D9 stainless steel and 316 stainless steel fuel clad tubes". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008. vol. 85, nº. 12 p. 866-870. ISSN 0308-0161.
9. Maharaj, C., Clément, A.C. y Imbert, J. D., "Failure analysis and creep remaining life of hydrogen reformer outlet pigtail tubes". *Engineering Failure Analysis*, 2008. vol. 15, nº. 8, p. 1076-1087. ISSN 1350-6307.
10. Psyllaki, P.P., Pantazopoulos, G. y Lefakis, H. "Metallurgical evaluation of creep-failed superheater tubes". *Engineering Failure Analysis*, 2008. vol. 16, nº. 5, p. 1420-143. ISSN 1350-6307.
11. Swaminathan, J. "Mechanical strength and microstructural observations for remaining life assessment of service exposed 24Ni-24Cr-1.5Nb cast austenitic steel reformer tubes". *Engineering Failure Analysis*. 2008. vol. 15, nº. 6, p. 723-735. ISSN 1350-6307.
12. Whan Kim, D., Jong Hwa, C. y Woo Seog, R. "Evaluation of the creep-fatigue damage mechanism of type 316L and type 316LN stainless steel". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008. vol. 85, nº. 6, p. 378-384. ISSN 0308-0161.
13. Bulloch, J. H., Callagy, A.G., Scully, S., *et al.* "A failure analysis and remnant life assessment of boiler evaporator tubes in two 250 MW boilers". *Engineering Failure Analysis*, 2009. vol. 16, nº. 3, p. 775-793. ISSN 1350-6307.
14. Pala, J., Bydžovský, J., Stoyka, V., *et al.* "Barkhausen noise study of microstructure in grain oriented FeSi steel". *Journal of Electrical Engineering*, 2008. vol. 59, nº. 7, p. 58-61. ISSN 1335-3632.
15. Altpeter, I. y Kroning, M. "Nondestructive evaluation of ageing steel structure". En: *IV Conferencia de Ensayos No Destructivos*, Buenos Aires, Argentina. 2007.
16. Pérez Benítez, J.A., "Estudio del ruido magnético de Barkhausen en aceros al carbono". Tesis Doctoral, Universidad de Oriente. Cuba. 2007.
17. Anne Yardley, V. "Detection of microstructural change in power plant steels". PhD Thesis. Emmanuel College Magnetic, University of Cambridge. 2003.
18. Mohapatra, J. N., Bandyopadhyay, N. R., Gunjan, M.K., *et al.* "Study of high temperature ageing and creep on bainitic 5Cr-0.5Mo steel by magnetic NDE techniques". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010. vol. 322, nº. 4, p. 589-595. ISSN 0304-8853.

19. Ranjan, R., Jiles, D.C., Buck, O., et al. "Grain size measurement using magnetic and acoustic Barkhausen noise". *Journal of Applied Physics*, 1987. vol. 61, nº. 8, p. 1322-1325. ISSN 1089-7550.
20. Kersten, M., *Underlying theory of ferromagnetic hysteresis and coercivity*. New York: H. Leipzig. 1943 ISBN 1402079834.
21. ASTM STANDARD E 112-96, *Standard test methods for determining average grain size*. PA 19428-2959, 1ra Ed. United States: West Conshohocken. 1996.
22. Clapham, L., Jagadish, C. y Atherton, D. L. "The influence of pearlite on Barkhausen noise generation in plain carbon steel". *Acta Metallic Materials*, 1999. vol. 39, nº. 7, p. 1555-1562. ISSN 1338-4252.
23. Nakai, N., Furuya, Y. y Obata, M. "Effect of carbide particle morphology and prior austenite grain size on Barkhausen noise in 0.4C-5Cr-Mo-V hot work tool steel". *Materials Transactions*, 1997. vol. 30, nº. 3, p. 197-199. ISSN 1073-5623.
24. Park, D. G., Kim, S. S., Ahn, B. G. et al. "The change of Barkhausen noise due to thermal ageing in Inconel 600". *Journal of Applied Physics*, 1998. vol. 8, nº. 4. ISSN 1089-7550.
25. Pirfo, S. *Characterisation of Thermal Ageing by Barkhausen Signal Analysis*. Hungary: Applied Structural Integrity Consulting (ASI), 2000.
26. Callister, W., *Materials Science and Engineering*. An introduction, V Edition, EE.UU: John Wiley & Song. Inc. 2000. ISBN 0-471-32013-7.
27. Zhao, J., Han, S., Gao, H. et al. "Remaining Life Assessment of a CrMoV Steel Using the Z-parameter Method". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004. vol. 81, nº. 12 p. 757 - 760. ISSN 0308-0161