

Dominios magnéticos en el acero AISI 4340 tratado térmicamente y soldado con electrodos revestidos

Anival Nicot Hinojosa

aenicot@cdemoa.une.cu

Tomás Fernández Columbié

tfernandez@ismm.edu.cu

Rafael Castillo Díaz

rcastillod@ismm.edu.cu

Cayetano Durán Abella

cduran@ismm.edu.cu

Universidad de Moa (Cuba).

Resumen: Se estableció el comportamiento del acero AISI 4340 luego de ser sometido a proceso de soldadura con electrodo E 7018 de cuatro milímetros de diámetro, el electrodo E 312-16 y UTP 65 con diámetro de 3,2 mm, respectivamente. Se prepararon muestras con dimensiones de 100 x 50 mm que luego del ciclo térmico de soldadura, se les realizó ensayo no destructivo (END) como el Ruido Magnético Barkhausen. El análisis microestructural reveló que la soldadura del acero AISI 4340 con electrodos del tipo E 7018 promueve la formación de la fase sigma a partir de la ferrita e introduce una dureza de 498,70 HV originando un cordón frágil, con el depósito con el electrodo UTP 65 se aprecian cambios favorables en las señales Barkhausen, las envolventes y las microestructuras de ferrita-austenita con dureza de 315 HV demuestran la factibilidad en la soldadura con este último.

Palabras claves: Ruido magnético; microestructuras; electrodos; envolventes; austenita-ferrita.

Magnetic domains in heat treated and welded AISI 4340 steel with coated electrodes

Abstract: The behavior of AISI 4340 steel was established after being subjected to welding process with electrode E 7018 of four millimeters in diameter, electrode E 312-16 and UTP 65 with a diameter of 3,2 mm, respectively. Samples with dimensions of 100 x 50 mm were prepared which, after the thermal welding cycle, were subjected to a non-destructive test (END) such as Barkhausen Magnetic Noise. The microstructural analysis revealed that welding AISI 4340 steel with electrodes of type E 7018 promotes the formation of the sigma phase from the ferrite and introduces a hardness of 498,70 HV causing a fragile bead, with the deposit with the UTP electrode 65 favorable changes in the Barkhausen signals, the ferrite-austenite microstructures and hardness of 315 HV are shown demonstrate the feasibility in welding with the latter.

Key words: Magnetic noise; microstructures; electrodes; envelopes; austenite - ferrite.

Introducción

En la fabricación de elementos de máquinas se emplea con frecuencia los aceros aleados y dentro de la gran variedad que presentan estos tipos de aceros están los aleados al cromo, siendo el AISI 4340 de gran versatilidad; permite la fabricación de árboles, ejes, ruedas dentadas, ballestas de automóviles, piezas de altas exigencias, por la susceptibilidad que presenta a procesos como el tratamiento térmico y la soldadura. La no aplicación correcta de uno de estos procedimientos provoca en él propiedades adversas, que conducen a fallos catastróficos en la estructura.

A consecuencia de los procesos de fabricación de los materiales, de la mecanización de componentes, de las condiciones de servicio de estos últimos y el suministro de uniones soldadas, se generan en los agregados policristalinos campos de tensiones residuales (Seok, 2008); estas tensiones residuales pueden llegar a condicionar negativamente la vida en servicio de los dispositivos y estructuras. Microscópicamente, las tensiones residuales actúan alterando las distancias entre los planos atómicos de los cristales.

Nolan, Sterjovski & Dunne (2005) y Quintero *et al.* (2006) plantean que la soldabilidad de un material está dada por tres factores, de ellos el factor material es el que se refiere a la influencia de la composición química, método de fusión, existencia de impurezas, grado de desoxidación y las operaciones precedentes (laminado, forja y tratamiento térmico), también depende de la relación de las impurezas, elementos de aleación y el carbono. El grado de soldabilidad representa una característica cualitativa o cuantitativa, la cual muestra cuánto varían las propiedades del material al soldar bajo determinadas condiciones.

Generalmente los esfuerzos que afectan y producen fallas en las estructuras soldadas son los esfuerzos a tensión, los cuales disminuyen la resistencia a la fatiga de los materiales. En caso contrario existen los esfuerzos de compresión que pueden generarse o ser creados en el material para proveerle de una mayor resistencia a la fatiga y contribuyen de manera positiva a mejorar sus propiedades (García *et al.*, 2006).

La relación entre los cambios complejos de temperatura que tienen lugar en la soldadura y las deformaciones plásticas obligan a seguir sus estudios, los cuales son el

análisis del flujo de calor, de los desplazamientos, de las deformaciones y, por último, de las tensiones térmicas residuales (García *et al.*, 2006).

El calentamiento y el enfriamiento rápido en regiones localizadas del trabajo durante la soldadura por fusión, especialmente la soldadura con arco eléctrico, producen expansiones y contracciones térmicas, que a su vez, provocan tensiones residuales en la soldadura y distorsión del ensamble soldado (Prasad y Dwivedi, 2008).

Un cordón de soldadura debe ser capaz de soportar los esfuerzos para los que ha sido diseñado. Es necesario realizar pruebas de esfuerzo para verificar si realmente la soldadura satisface los requerimientos deseados. Para controlar la calidad durante el proceso y no alterar significativamente la integridad de la pieza se usan pruebas no destructivas, como son: inspección visual, uso de líquidos penetrantes, radiografías, ultrasonido (Price *et al.*, 2008).

Ruido magnético Barkhausen (RMB)

La señal de Ruido Magnético Barkhausen (RMB) obtenida de un material ferromagnético por el sistema experimental comúnmente se procesa para obtener algunos parámetros cuantitativos y cualitativos que son empleados para relacionar sus valores con las propiedades del material. Los parámetros más comunes son el valor RMS, el valor de la energía y la envolvente de la señal de RMB (Ruiz *et al.*, 2008).

Trabajos de RMB en soldaduras han sido realizados en microestructuras simuladas con tratamientos térmicos (Moorthy, Shaw & Evans, 2003 y Park, Kim & Hong, 2000) y otros han sido ejecutados en soldaduras reales para evaluar el efecto del tratamiento térmico después de la soldadura (Moorthy, 1997) o el desempeño de la unión soldada sometida a fatiga (Lachmann, Nitschke & Wohlfahrt, 2000). Las emisiones de RMB son afectadas por cambios en la microestructura del material, el esfuerzo aplicado y las deformaciones, lo que permite utilizar el RMB como una técnica de evaluación no destructiva de materiales.

Coinciden en plantear algunos autores (Jiles, 2000; Pérez *et al.*, 2005) que la potencialidad de los métodos magnéticos para evaluar, desde defectos hasta esfuerzos residuales en las estructuras de aceros, han permitido que estos métodos ganen interés por parte de la industria, por lo cual ahora es uno de los campos en desarrollo de evaluación no destructiva de materiales más importante.

Este trabajo tiene como objetivo determinar el efecto del Ruido Magnético Barkhausen en muestras de acero AISI 4340 soldado con diferentes tipos de electrodos, así como el comportamiento microestructural, evolución de las envolventes y la dureza luego del ciclo térmico de soldadura.

Análisis de la composición química

Se determinó mediante análisis espectral la composición química del acero AISI 4340; para ello se utilizó un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En la Tabla 1 aparece la composición química del material.

Tabla 1. Composición química del AISI 4340, % en masa

C	Mn	Ni	Cr	Mo	Si
0,40	0,65	2,00	1,70	0,28	0,30

El contenido de carbono lo convierte en un material ferromagnético, que puede ser sometido a ensayo no destructivo con el empleo del Ruido Magnético Barkhausen.

Análisis microestructural

Para el análisis microestructural se empleó un microscopio binocular marca NOVEL modelo NIM-100, dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe. La Figura 1 se corresponde con la muestra patrón del acero AISI 4340.

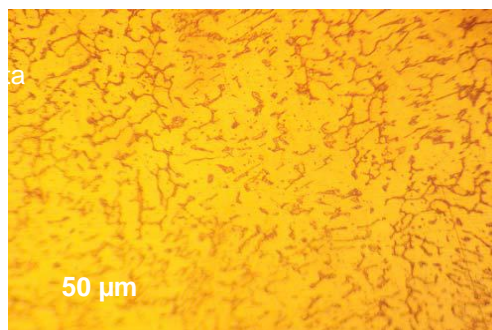


Figura 1. Estructura metalográfica del acero 4340.

La estructura que se observa es de cementita dispersa en ferrita, las etapas de transformación de la martensita durante el calentamiento conducen finalmente a una estructura de cementita y ferrita. Sin embargo, la diferencia está en el tamaño de los glóbulos de cementita.

Preparación de la junta

Para determinar el comportamiento microestructural se prepararon muestras de la ballesta, se cortaron nueve probetas, las cuales fueron soldadas con electrodos E 7018, UTP 65 y E 312-16. Las muestras se prepararon según indica la Figura 2; se emplearon los siguientes procedimientos:

1. Preparación del biselado en X previo a la soldadura
2. Precalentamiento del material
3. Soldadura.

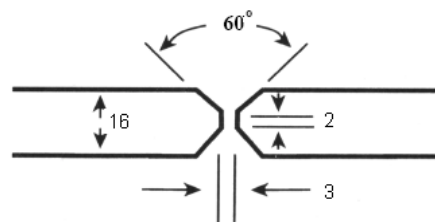


Figura 2. Preparación de la junta en las muestras para la soldadura.

Los parámetros de soldadura empleados aparecen en la Tabla 2, los cuales se seleccionaron a partir del tipo y del diámetro del electrodo.

Tabla 2. Parámetros para la soldadura de las probetas

No	Electrodos	Intensidad (A)	Veloc (m/s)	Tensión (U)	Diámetros (mm)
1	E 316-12	150	1,12	26	3,2
2	E 316-12	150	1,12	26	3,2
3	E 316-12	150	1,12	26	3,2
4	UTP 65	120	1,12	25	3,2
5	UTP 65	120	1,12	25	3,2
6	UTP 65	120	1,12	25	3,2
7	E 7018	160	1,12	28	4,0
8	E 7018	160	1,12	28	4,0
9	E 7018	160	1,12	28	4,0

Las diferentes probetas se cortaron longitudinalmente, después de cortada y antes de soldarla, se procedió a puntearla en ambos extremos para de esta forma evitar alabeo y distorsiones. La selección de los diferentes electrodos se basa en buscar un material de aporte que pueda emplearse para atenuar los problemas que ocurren en el cordón de soldadura.

Preparación de las muestras para el análisis metalográfico

Para la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: corte, desbaste, pulido, desengrasado y lavado (ASTM E 3-95 y Norma NC 10-56: 86).

Para el corte de las muestras y la soldadura con los diferentes electrodos (Figura 3a) se utilizó una fresadora vertical, luego de sujetar las muestras con las mordazas se procedió a realizar el corte con abundante refrigeración para evitar el calentamiento de la pieza y la herramienta, provocar alteraciones en la microestructura por efecto de la acritud. Los regímenes de corte seleccionados fueron $n=150$ rev/min y $S=25$ mm/rev. En la Figura 3b se exhiben las probetas con la preparación de los bordes y luego soldadas.



Figura 3. a) soldadura con diferentes electrodos. b) Preparación y soldadura de las muestras.

En la Figura 3a se pueden apreciar las características de los depósitos de los cordones en correspondencia con el electrodo empleado; en la Figura 3b se corresponde con la vista superior, se observa la preparación del bisel en doble "V" empleado en la preparación.

Instalación experimental para la medición de la señal Barkhausen

Para la medición de la señal de Barkhausen se utilizó la instalación experimental ubicada en el laboratorio de Física de la Universidad de Oriente, la cual está constituida por un circuito magnetizador capaz de suministrar una onda sinusoidal de 10 Hz a un amplificador de potencia que alimenta la sonda magnetizadora con un campo magnético de $1,4 \times 10^4$ A/m, para alcanzar la saturación del material. La señal del sensor de RMB es amplificada y filtrada por un filtro pasabanda de 1 kHz hasta 200 kHz. Las señales son visualizadas en un osciloscopio digital Tektronic TDS210 y una tarjeta National Instrument NI USB-6212xO que adquiere los datos a una frecuencia de muestreo de 400 kHz. A través de un software de medición desarrollado por los usuarios en LabView se controla y almacenan los datos en una PC.

Análisis del depósito por el diagrama de Schaeffler

Se empleó el diagrama para analizar el depósito de los electrodos E 312-16 y del electrodo UTP 65 (Figura 4). No se consideró el electrodo E 7018 ya que tanto el electrodo como el material base se consideran totalmente ferrítico.

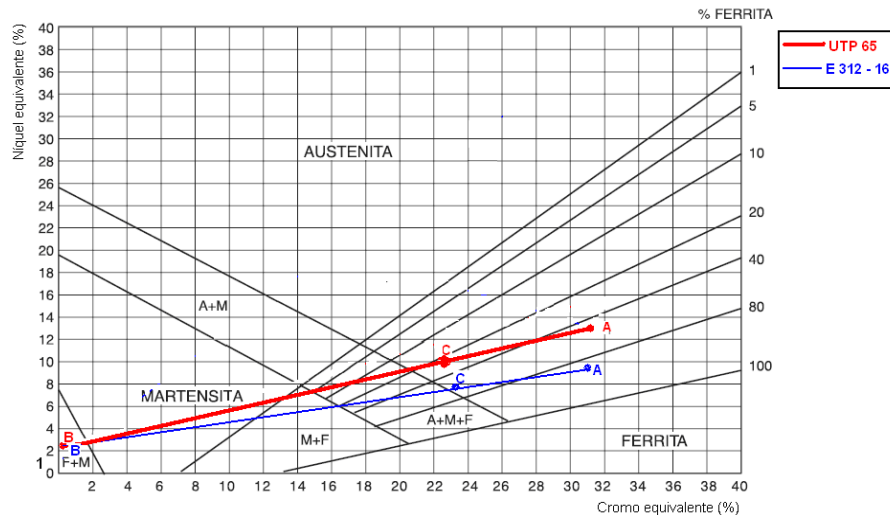


Figura 4. Depósito del electrodo UTP 65 y del electrodo E 312-16.

En la figura la línea más gruesa representa el depósito del electrodo UTP 65 y la más fina el electrodo E 312-16. El punto B, para ambas uniones, se corresponde con el material base, ubicados en el campo de F + M. Con el electrodo UTP 65 se obtiene un 22 % aproximado de ferrita y con el electrodo E 312-16 un aproximado de 45 % de ferrita, por lo que al realizar la unión soldada se va a obtener estructura generalmente del tipo ferrita, pero se requiere la aplicación de calentamiento para evitar el agrietamiento en frío.

Análisis microestructural del depósito con electrodo E 7018

A diferencia del metal de soldadura, la zona afectada térmica solo es influenciada por los ciclos térmicos del proceso de soldadura, pues la composición química se afecta notablemente debido a que no existe similitud con el metal de aporte y el acero 4340, lo cual está en función de las transformaciones en estado sólido. Las micrografías 5a y 5b son las obtenidas durante el proceso de soldadura, realizada con electrodos E 7018; en ellas se representa la ZF y la ZIT.

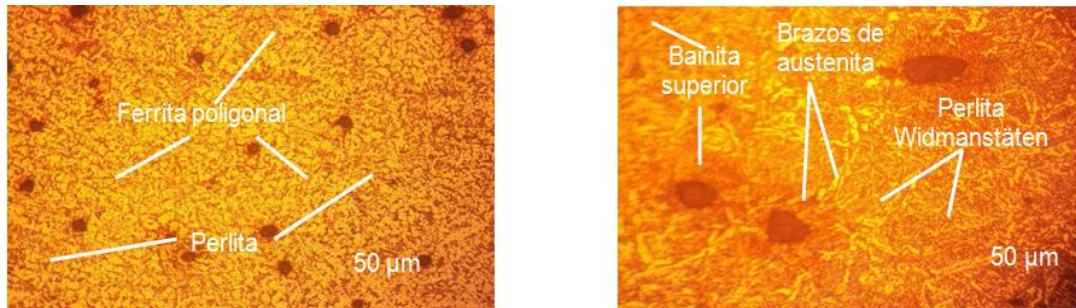


Figura 5. a) Zona de influencia térmica. b) Zona fundida.

En la microestructura de la Figura 5a se ha obtenido una mezcla de ferrita poligonal y perlita, la cual es resultado del enfriamiento lento. Este tipo de enfriamiento permite que los átomos de carbono encuentren lugares intersticiales en los bordes de la ferrita, entonces precipita en placas de cementita que crecen adjuntas a placas de ferrita para formar la constituyente perlita dentro del rango de temperaturas de 550 °C a 720 °C.

En la Figura 5b, correspondiente a la zona de fusión, se aprecia una frontera con una cantidad razonable de ferrita que incluso se extiende hacia la ZIT; esta ferrita ayuda a evitar el crecimiento de grano, pero al mismo tiempo podría promover el debilitamiento del material en esta zona por la formación de la fase sigma a partir de la ferrita. Se puede observar la formación de brazos de austenita.

El paso de relleno de la unión soldada presenta transformaciones de fase en la ZAT, diferentes a las encontradas en el paso de raíz, como lo es la bainita superior y ferrita Widmanstätten. Estas microestructuras se caracterizan por presentar un elevado contenido de carbono debido a las velocidades de enfriamiento a las que se forman. La bainita superior se origina a partir de placas de ferrita que tiene a su alrededor, una elevada concentración de carbono. Este carbono, cuando alcanza su máxima concentración transforma en cementita, lo cual brinda la morfología característica de plumas, mientras que la ferrita Widmanstätten se caracteriza por contener una elevada concentración de carbono a los lados de sus placas.

Análisis microestructural del depósito con electrodo E 312-16

El efecto de la soldadura en la unión soldada entre el acero 4340 y el electrodo E 312-16 debe realizarse como una unión disímil, ambos materiales presentan composición química diferentes, acentuado por el elevado contenido del material base. En las Figuras 6a y 6b se perciben las microestructuras de la unión soldada.

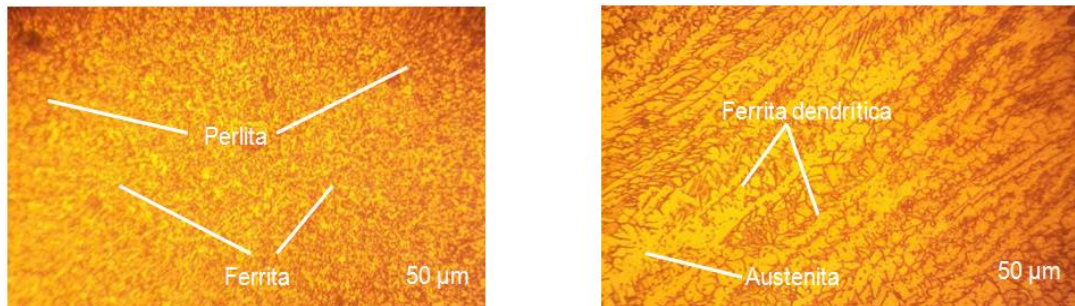


Figura 6. a) Zona de influencia térmica. b) Zona fundida.

En la Figura 6a se nota la ZIT de la unión soldada, que por efecto del ciclo de soldadura impuesto se puede observar muy poca perlita en una matriz ferrítica. La ferrita de borde de grano es la primera morfología que se forma durante el enfriamiento, teniendo como ubicación preferencial los bordes de grano de austenita, aunque también puede localizarse dentro de los granos de la austenita, por lo que presenta una estructura bien definida. Durante la formación de ferrita, el carbono es expulsado, dando lugar a la formación de cementita (Fe_3C) así como a la generación de ferrita acicular a partir de inclusiones no metálicas.

En la Figura 6b se distingue que, durante el proceso de soldadura, al aplicar temperaturas superiores a $900\text{ }^\circ\text{C}$, en el acero 4340 con el electrodo E 312-16, por la composición química que deposita el metal de aporte, no se aprecia la formación de fase sigma y, por lo tanto, el de ferrita aumenta en formas de dendritas, mientras que pequeñas islas de austenita secundaria vuelven a formarse bordeando el grano ferrítico.

Análisis microestructural del depósito con electrodo UTP 65

Previamente a la fabricación de las uniones soldadas con electrodo UTP 65 se estudiaron las transformaciones de fase de cada una de las zonas afectadas por el ciclo térmico, basado en la distribución de temperaturas, mediante el empleo de los mismos parámetros que se utilizarían en la fabricación de las uniones soldadas disímiles. En las Figuras 7a y 7b aparece el comportamiento.



Figura 7. a) Zona de influencia térmica. b) Zona fundida.

Para la Figura 7a, que se corresponde con la zona de influencia térmica, se puede apreciar que se ha obtenido una estructura de solidificación del tipo ferrita-austenita, con morfología de ferrita columnar y tipo placa; posee ferrita eutéctica en una matriz austenítica.

En la zona fundida (Figura 7b) se puede percibir mayor cantidad de precipitados dentro de la matriz ferrítica y en la frontera de fusión se ha obtenido una solidificación ferrita-austenita; posee ferrita columnar en una matriz austenítica.

Por otro lado, se mantiene un mayor balance de fases ferrita/austenita, el cual resulta de su elevado porcentaje de cromo y molibdeno como formadores de ferrita y el níquel como estabilizador de la austenita, lo cual ayuda a mantener las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, ya que es importante mantener el equilibrio de ambas fases.

Los cambios obtenidos están asociados a las tasas de enfriamientos, al ser moderadas y la relación cromo y níquel equivalente es bajo, pero aún se encuentran dentro de los rangos FA, resultando en una morfología columnar. Ello ocurre como consecuencia del avance de la austenita, la cual consume la ferrita hasta que esta se enriquece de elementos promotores alfégenos y agota elementos promotores de austenita (Ni, C y N), que son estables a bajas temperaturas donde la difusión es limitada.

Análisis de la señal Barkhausen en las muestras soldadas

Se analizó la señal Barkhausen para el depósito con los diferentes electrodos (Figura 8) con lo cual se puede examinar el comportamiento de esta señal para cada uno de ellos.

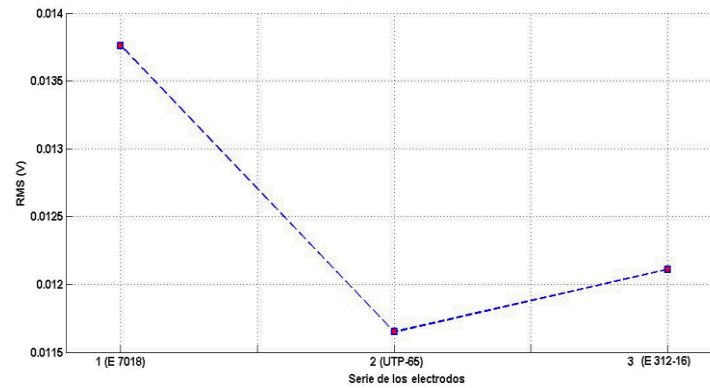


Figura 8. Señal Barkhausen para el depósito con los diferentes electrodos.

La dependencia obtenida en el análisis del depósito con los tres electrodos está influenciado por la magnetización del material, que tiene la característica de ser ferromagnético, así como por su estado de tensiones a través de la magnetostricción. Existe una señal más pronunciada para el electrodo E 7018, debido a que la deformación plástica y el ciclo térmico impuesto han aumentado las regiones con alta densidad de dislocaciones que impiden el movimiento de las paredes de dominio, producto del menor tamaño del grano, que induce mayor dureza en la unión soldada, tal como lo reportan Pupo y Pérez (2009).

Se observa para el electrodo E 312-16, donde se ha obtenido una menor variación en la señal Barkhausen, que presumiblemente está asociado a una menor densidad de dislocaciones, pues las tensiones introducidas por el ciclo térmico no han provocado altas tensiones típicas de los procesos de soldadura, lo cual también está asociado con cambios peculiares de la estructura de dominio, porque, en menor dominio, existe un menor tamaño de grano.

Para el electrodo UTP 65 se aprecia una disminución del salto Barkhausen, lo cual está influenciado por el crecimiento del tamaño del grano, que provoca que la envolvente se desplace hacia el campo coercitivo ($H=0$) y se produzcan cambios dimensionales en la nucleación del acero.

Los aceros, en general, presentan un coeficiente de magnetostricción positivo. Por esta razón, el vector de magnetización en los granos de acero se orienta usualmente en la dirección cristalográfica $\langle 100 \rangle$. Al aplicar una tensión mecánica a las muestras de acero, la estructura magnética de los dominios se modifica, de manera que se minimice la energía total (mayormente constituida por la energía magnetostática, la

magnetoelástica y la de anisotropía). A este proceso se le conoce como efecto magnetoelástico, lo cual ha sido reportado por Martínez y otros investigadores (2010).

Análisis de la envolvente

En la Figura 9 se enseñan las señales de las envolventes de RMB obtenidas a lo largo del eje de fácil magnetización (EFM) y del eje de difícil magnetización (EDM) del acero AISI 4340 soldada con los electrodos E 7018 y E 312-16. Se advierte que existe una diferencia más notable en la forma de la señal envolvente de RMB para el EFM respecto al EDM de cada acero.

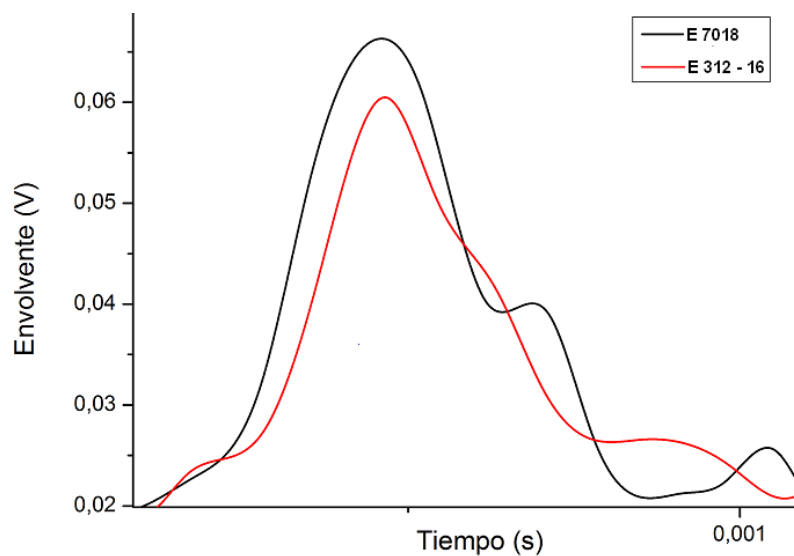


Figura 9. Señales de las envolventes para el electrodo E 7018 y E 312-16.

El valor máximo de la envolvente de la señal de RMB se reporta en cada una de las curvas de la Figura 9, el EFM con respecto al EDM. Los valores fueron obtenidos para cada una de las muestras soldadas a lo largo de los dos ejes de magnetización y promediados de tres mediciones.

El valor máximo de las señales de las envolventes se ofrece para la soldadura con el electrodo E 7018 y luego un ligero descenso para el electrodo E 312-16. Las envolventes revelan tendencias diferentes, que está relacionado con sus propiedades magnéticas, como pueden ser las variaciones del contenido de carbono, el electrodo E 7018 tiene una anisotropía magnética mayor, así como el cambio de fases al someterlo a tratamientos térmicos (ciclo de soldadura). La soldadura con electrodo E 312-16 deposita una estructura del tipo austenítica, por el contenido de níquel que es de un 13

%, lo cual lo convierte en un material amagnético, no susceptible al ruido magnético Barkhausen.

Determinación de perfiles de microdurezas

Se realizaron mediciones de perfiles de microdurezas en correspondencia con los resultados obtenidos en el proceso de soldadura. Los ensayos se realizaron en cada una de las zonas analizadas (ZF y ZIT). La Tabla 3 señala estos resultados.

Tabla 3. Comportamiento de la microdureza

Zona / E 7018	Dureza HV
ZF	498,70
ZIT	325,37
Zona / E 312-16	Dureza HV
ZF	494,42
ZIT	320,16
Zona / UTP 65	Dureza HV
ZF	315,12
ZIT	300

Se percibe que en la zona afectada térmicamente en la región que corresponde a la zona de crecimiento de grano (ZIT) se incrementa de forma significativa la dureza desde 300 HV hasta 325 HV, lo cual es indicativo de la fuerte posibilidad de que se presente el problema de agrietamiento en frío. Los resultados obtenidos de la dureza Vickers son consistentes con los obtenidos en la aplicación del RMB, pues, como se ha manifestado, hay una mayor dureza en el electrodo E 7018 (498,70 HV), precedido por el electrodo E 312-16 (494,42 HV) y, por último, el electrodo UTP 65 (315,12 HV).

El mayor valor de dureza está influenciado por la microestructura resultante obtenida, ya que, tanto el MB como el material de aporte, presenta en su composición elevado contenido de carbono y cromo que propician el endurecimiento de esta zona producto al ciclo térmico de soldadura impuesto. Por otro lado hay que significar que debido al depósito de los cordones, presumiblemente, haya existido un tratamiento de recocido, el cual introdujera un recocido en la zona de fusión y la dureza tenga una disminución.

Conclusiones

Los resultados de la señal del ruido magnético Barkhausen, las micrografías y la dureza de 498 HV permiten predecir una estructura con mayor fragilidad para el electrodo E 7018 por el calentamiento del material en esta zona y por la formación de estructuras Widmanstätten.

El análisis metalográfico realizado evidencia que en la unión soldada con los diferentes tipos de electrodos se han obtenidos solidificaciones del tipo ferrita-austenita, donde la ferrita ha sido del tipo Widmanstätten y columnar, influenciado por elementos cromo y carbono.

De los tres electrodos empleados en la soldadura del acero AISI 4340, el que mejores propiedades presentó para lograr una unión metalúrgica libre de fisuración, luego de ser aplicado el ciclo térmico de soldadura, es el UTP 65.

Referencias bibliográficas

GARCÍA, Y.; BURGOS, J.; GIL, F. & RIVALTA, J. 2006. Obtención de tensiones residuales a lo largo de un cordón de soldadura mediante métodos analíticos y experimentales. *Soldagem Insp* 11(2): 4-9.

JILES, D. 2000. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. *Czechoslovak Journal of Physics* 50(8): 893-988.

LACHMANN, C.; NITSCHKE, T. & WOHLFAHRT, H. 2000. Characterisation of residual stress Relaxation in Fatigue Loaded Welded Joints by X-Ray Diffraction and Barkhausen Noise Method. *Materials Science Forum* 347(349): 374-379.

MARTÍNEZ, P.; ESPINA, J.; HALLEN, J.; LINARES, R. & MIRANDA, Y. 2010. Caracterización de Aceros API-5L por Medio de la Medición de Ruido Magnético Barkhausen. *Revista Científica* 14(2): 81-87.

MOORTHY; V.; SHAW, B. & EVANS, J. 2003. Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN steel using magnetic Barkhausen noise analysis. *NDT&E International* 36(12): 43-49.

NOLAN, D.; STERJOVSKI, Z. & DUNNE, D. 2005. Hardness prediction models based on HAZ simulation for in - service welded pipeline steels. *Science and Technology of Welding and Joining* 6(10): 681-694.

NORMA ASTM E 3-95. 2017. *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*.

NORMA CUBANA NC 10-56. 1986. *Metalografía. Microestructura de Metales de aleaciones duras. Métodos de ensayo.*

PARK, D. G.; KIM, C. G. & HONG, J. H. 2000. Microstructural dependence of Barkhausen noise and magnetic relaxation in the weld HAZ of and RPV steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 215(216): 765-768.

PÉREZ, J.; CAPÓ, J.; ANGLADA, Y. & PADOVESE, L. 2005. A model for the influence of microstructural defects on magnetic Barkhausen noise in plain steels. *J. Magn. Magn. Mater.* 288: 433-442.

PRASAD, K. & DWIVEDI, D. 2008. Some investigation on microstructure and mechanical properties of submerged arc welded HSLA steel joints. *International Journal of advance manufacturing technology* 36(6): 475-483.

PRICE, J. W.; ZIARA-PARADOWSKA, A.; JOSHI, S.; FINLAYSON, T.; SEMETAY, C. & NIED, H. 2008. Comparison of experimental and theoretical residual stresses in welds: The issue of gauge volume. *International Journal of Mechanical Sciences* 50(3): 513-521.

PUPPO, C. & PÉREZ, J. 2009. Influencia del tamaño de grano en el ruido magnético de Barkhausen en los aceros AISI/SAE 1005-1070. *Revista Cubana Física* 26(2B): 251-256.

QUINTERO, M.; CERPA, S.; MEJIAS, G.; LEÓN, J. & QUINTERO, A. 2006. Soldadura de un acero inoxidable dúplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* 56(4): 1-3.

RUIZ, D.; PIOTRKOWSKI, R.; LÓPEZ, M. & RUZZANTE, J. 2008. Ruido Barkhausen y emisión magneto acústica para la caracterización de materiales ferromagnéticos. *Matéria* 13(1): 31-45.

SEOK, J. 2008. Characterization of bainitic microstructures in low carbon HSLA steels. *International Journal of Moder Physics B* 22(31): 5965-5970.