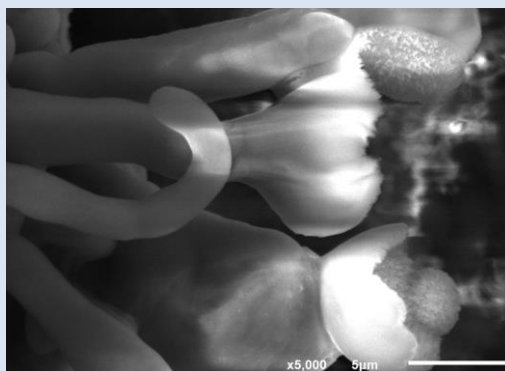


TRANSFORMACIONES DE LA MICROESTRUCTURA EN LA ZAC DE LA SOLDADURA DE ACEROS NO-SIMILARES

Alberto Sandoval, Luis Zamora, Juan Aguilar, Leonardo Díaz*

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Gerencia de Ciencias Aplicadas. Departamento de Tecnología de Materiales. Carretera México-Toluca S/N, La Marquesa, Ocoyoacac, México, C.P. 52750

e-mail: alberto.sandoval@inin.gob.mx*RESUMEN**

Un recubrimiento de acero inoxidable se aplicó sobre una placa de acero al carbono mediante un proceso de soldadura de arco eléctrico. La alta temperatura modifica una región del metal base la cual se denomina zona afectada por el calor. El enfriamiento rápido de la zona afectada por el calor genera una microestructura meta-estable la cual se transforma a temperatura ambiente. Utilizando la técnica de microscopía electrónica de barrido, se realizaron estudios en muestras de material recién sometido a soldadura y en muestras con períodos de envejecimiento de 3 600 horas y 10 000 horas.

En el material no-envejecido se registraron carburos de morfología no-globular, los cuales incluyen en su composición los elementos de los materiales base y de aporte, es decir, son carburos múltiples. En las muestras con 3 600 horas de envejecido la morfología de los carburos fue globular. En muestras con 10 000 horas de envejecido, en los carburos globulares se registró la formación de filamentos. Por su composición no-estequiométrica, los carburos múltiples se clasifican como compuestos intermetálicos.

Palabras clave: Soldadura; aleaciones Fe-C; carburos; microscopía electrónica de barrido; filamentos, compuestos intermetálicos.

MICROSTRUCTURE TRANSFORMATIONS IN THE HAZ AT DISSIMILAR STEELS WELDING

ABSTRACT

A plate of carbon steel was cladding with stainless steel by means of a shielded metal arc welding process. The alloys are considered dissimilar materials. At a welding process, is not possible to predict the final metallographic characteristics of the zones at relation with the welding process. The stainless alloy was applied at melted state therefore the high temperature affected the microstructure of carbon steel, which is called heat-affected zone. Rapid solidification of the filler metal and the rapid cooling of the heat-affected zone led to meta-stable microstructures formation. The changes of the microstructure at the heat-affected zone were studied by scanning electron microscopy technique. At the heat affected zone of no-aging material samples, multiple carbides of no-globular morphology were recorded, which were transformed to globular morphology after of an aging process of 3 600 hours at room temperature. Passed 10 000 hours of aging, whiskers were developed from the globular carbides. Due to non-stoichiometric chemical composition, the multiple carbides are considered as intermetallic compounds.

Keywords: Welding; Fe-C alloys; carbides; scanning electron microscopy; whiskers, intermetallic compounds.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de recubrir un material es protegerlo de la acción de ambientes agresivos. Para la protección de metales existen varias técnicas de aplicación de recubrimientos, entre ellos las técnicas electroquímicas, mediante “spray” y la soldadura.

Los productos de los procesos de soldadura se utilizan en todas las áreas de la ingeniería. En un proceso de soldadura se consideran el metal base y el material de aporte [1]. Al unir por soldadura dos materiales no-similares, no se pueden predecir las características metalográficas de los productos del proceso.

En un proceso de soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW, shielded metal arc welding), el material de aporte se deposita en estado de fusión sobre el metal base, afectando una región interna del metal base en la cual se registran cambios en la microestructura y en la estructura cristalina, esta región se denomina Zona Afectada por el Calor (ZAC); en la ZAC existe una alta probabilidad de fracturas por la influencia de los esfuerzos residuales inducidos por la rapidez de enfriamiento y por la presencia de hidrógeno [1].

El gradiente térmico, la rapidez de solidificación, y la rapidez de enfriamiento determinan las características metalúrgicas de las zonas que intervienen en el proceso de soldadura [2]. Desde el punto de vista metalúrgico, al unir materiales no-similares mediante procesos de soldadura, las zonas relacionadas con el proceso son las más complejas, por ello el interés del estudio.

En la técnica de soldadura SMAW los factores temperatura, tiempo y presión, producen por un proceso de difusión el transporte y la coalescencia de átomos de los elementos base en el rango de fusión [1]. La microestructura final de la zonas involucradas, dependerá de interacciones entre varias variables como son: i) el contenido total de los materiales, ii) la concentración, composición química y distribución de tamaños de inclusiones no metálicas, iii) la rapidez de solidificación, iv) el tamaño de grano previo y v) el ciclo térmico de la soldadura [3].

Durante la fusión de la soldadura, los ciclos térmicos producidos por la fuente de calor causan cambios del estado físico, transformaciones de fases metalúrgicas, esfuerzos térmicos transitorios y difusión de elementos. Al término del proceso de

soldadura, en el producto final existen estructuras cristalinas y microestructuras meta-estables con discontinuidades físicas y defectos cristalinos que afectan las propiedades mecánicas. El enfriamiento rápido genera esfuerzos en tensión y en compresión.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Una placa de acero al carbono (A-36) de dimensiones 28,09 x 10,63 x 1,26 cm se recubrió aplicando soldadura base acero inoxidable con electrodo E309L con la técnica SMAW; el acero al carbono es ferrítico y el material inoxidable austenítico. Por sus características distintas, los materiales se consideran no-similares. La composición del metal base es 0,22C-0,26Si-1,23Mn-0,49Ni-0,15Cu y Fe balance %peso, con P y S como contaminantes; la composición del material de aporte es 0,028C-0,421Si-1,09Mn-23.65Cr-12,49Ni y Fe balance %peso, con trazas de Mo, P, S y Cu. El fundente de la soldadura, entre otros elementos, contiene titanio. Los parámetros del proceso de soldadura SMAW fueron 75 amperios, 24 voltios y velocidad de depósito de 11,15 pulgadas/min.

Muestras de la soldadura se prepararon para análisis metalográfico de acuerdo a la norma ASTM-E3 [4]. El estudio de la microestructura se hizo por microscopía electrónica de barrido (MEB) con un equipo JEOL JSM 6610LV a 20 kV de voltaje de operación, el equipo cuenta con una microsonda INCAx-act modelo 51-ADD0013 con un sensor a 24 volts, de Oxford Instruments. Se estudiaron muestras de material recién preparado; otros estudios se realizaron transcurridos períodos de envejecido de 3 600 horas y 10 000 horas en condiciones ambientales.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Análisis de Material No-envejecido

En el análisis por MEB se identificaron la zona afectada por el calor (ZAC) en el metal base, la zona de fusión (ZF) formada por los elementos de los materiales originales, y la Zona de Dilución (ZD) en el material de aporte.

Durante el proceso de soldadura, al depositar el material de aporte inoxidable en estado de fusión sobre el metal base, se funde una capa de éste último, formando la ZF constituida con elementos de ambos materiales; la ZF solidifica rápidamente. Por las

condiciones de solidificación rápida del proceso de soldadura, la ZF es una región compleja en relación a la estructura cristalina. La zona del metal base adyacente a la ZF base experimenta un enfriamiento rápido, dando origen a la ZAC, Figura 1. La ZAC está formada por microestructuras fuera de equilibrio termodinámico, es decir, por microestructuras metaestables formadas por diferentes fases. Es una región de alta concentración de esfuerzos, en tensión y en compresión. La composición registrada con la microsonda INCAx-act, es 2,94C-0,81Cr-0,97Mn-95,28Fe % peso, la cual indica la formación de carburos.

En la ZAC se registró la formación de microestructuras acicular y espinodal [5], así como carburos inter-granulares e intra-granulares.

3.2 Material envejecido

En la ZAC se registraron formaciones de morfologías globulares en muestras con un período de 3 600 horas de envejecido, Figura 2, su composición es 10,61C-0,83Cr-0,85Mn-43,25O-44,46Fe % peso. En muestras con 10 000 horas de envejecido, en las morfologías globulares se desarrollaron filamentos; se registraron de diversos tamaños, desde crecimiento incipiente, Figura 3, hasta 23 μm de longitud y 3,8 μm de diámetro, Figura 4. En la microestructura se observan fracturas. Las fracturas son evidencia de esfuerzos, en tensión y en compresión, generados por el proceso de soldadura.

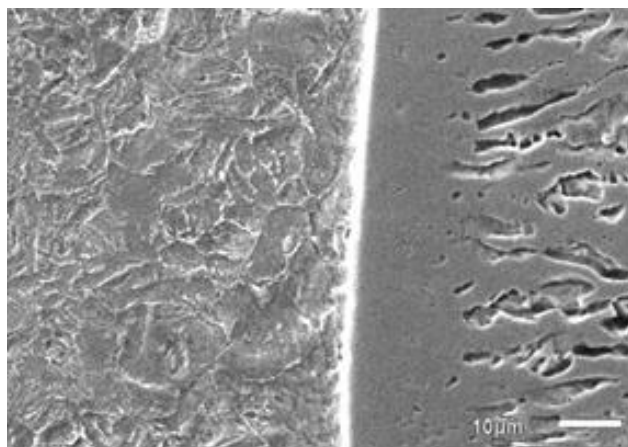


Figura 1. Microestructura original de la ZAC.

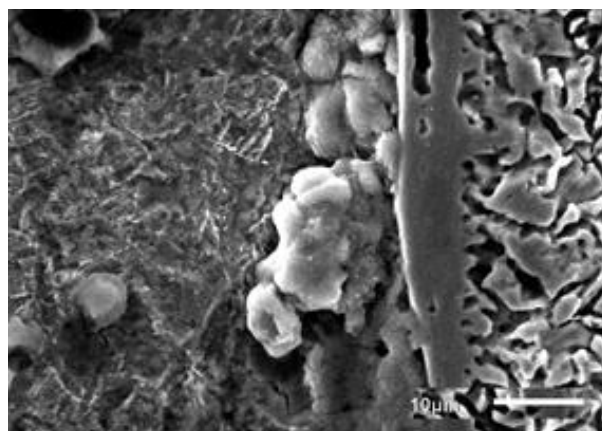


Figura 2. Glóbulos en la ZAC, 3 600 horas de envejecido.

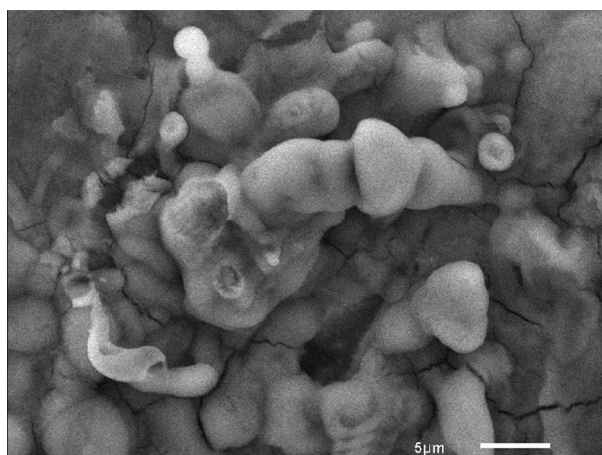


Figura 3. Glóbulos en transformación.

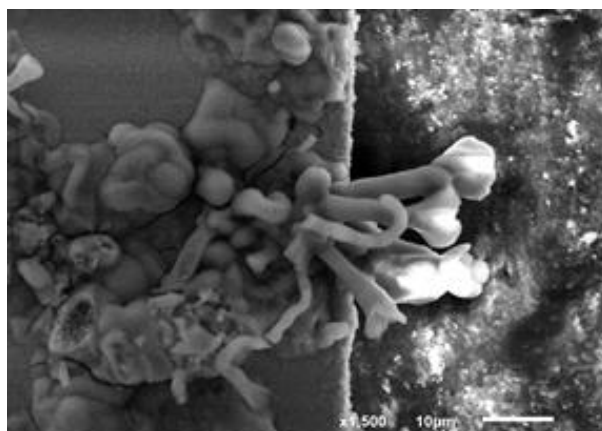


Figura 4. Filamentos, envejecido 10 000 horas.

En materiales no-similares sometidos a soldadura con el proceso SMAW el desarrollo de los filamentos tiene un periodo de incubación. Por datos experimentales obtenidos en ésta investigación, a partir de la fecha del registro de la morfología globular, y hasta que alcanzaron el tamaño máximo,

transcurrieron 6 400 horas ($2,3 \times 10^7$ s). Con base a los datos anteriores, la rapidez de crecimiento promedio de los filamentos es de $1 \times 10^{-3} \text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$, lo cual coincide con datos reportados [6].

La soldadura es un proceso de solidificación rápida (SR). En un proceso de SR se modifican los límites de solubilidad, se registra atrapamiento de soluto y sobre todo, se generan fases cristalinas de no-equilibrio, fases cuasi-cristalinas y fases amorfas [7].

Los elementos de transición Fe, Mn y Cr al pasar del estado de fusión al estado sólido formaron los carburos.

Las condiciones de la soldadura fueron propicias para la formación de carburos con fórmulas generales M_3C , M_7C y $M_{23}C$, donde $M = \text{Fe}, \text{Mn}$ y Cr . El C puede unirse a la vez con los tres elementos. Los elementos anteriores tienen varios estados de valencia, los cuales son C^{+4} , $Cr^{2,3,6+}$, $Mn^{2,3,4,7+}$, $Fe^{2,3+}$ [8].

Las condiciones del proceso también son propicias para la formación de la fase σ (sigma) con composición FeCr, [8]. Por la rapidez de solidificación se formaron los compuestos intermetálicos, con grandes desviaciones de la composición estequiométrica [9].

Los átomos de los metales de transición están en estado iónico, por consiguiente, son altamente reactivos y reaccionan con el oxígeno produciendo los óxidos con estructura tetraedral la cual es la base de las espinelas [9]. Las espinelas generan una microestructura acicular de partículas polarizadas las cuales se unen resultando una morfología globular con un considerable aumento de volumen, Figura 5.

El crecimiento espontáneo de filamentos se ha registrado en metales de bajo punto de fusión, como son Cd, Sn, Al, y Zn [10-12]; en [10] se reporta que los mecanismos de crecimiento de los filamentos se basan en el movimiento de “loops” prismáticos de dislocaciones ascendiendo a la superficie y en un proceso de recrystalización, en el cual se consideran esfuerzos internos y la formación de intermetálicos. En la industria electrónica los filamentos causan fallas ya que inducen cortocircuitos, por ello el interés en su estudio [13-18].

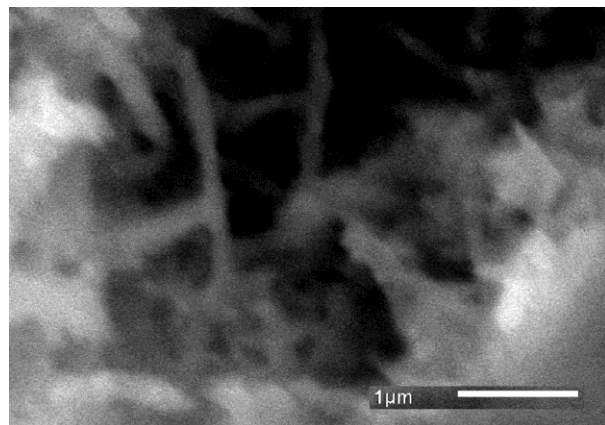


Figura 5. Detalle interno de la microestructura del filamento.

El mecanismo de formación y desarrollo de filamentos aún no se establece después de 70 años de investigación [19]. Un mecanismo propuesto es una ganancia de energía debido a polarización electrostática; el campo de energía es inducido por imperfecciones en la superficie, como son fronteras de grano, estados de oxidación y contaminantes [20].

Es muy posible que existan varios mecanismos de formación, de acuerdo con los elementos de origen.

En este trabajo, se propone la reacción de los elementos de transición con el oxígeno como mecanismo de formación de los filamentos. Los iones de los metales de transición, al unirse entre ellos, forman complejos metálicos. Esto se debe a que tienen orbitales de valencia vacíos y pueden aceptar pares de electrones, de tal manera que se unen con el oxígeno formando estructuras tipo espinelas polarizadas, las cuales al unirse generan el desarrollo del filamento. El oxígeno penetra por las fracturas generadas por los esfuerzos residuales, alimentando la base de los filamentos.

Se realizarán estudios de μDRX y MET para determinar estructuras cristalinas y morfologías de las fases generadas en la ZAC y en la ZF.

4. CONCLUSIONES

La rapidez de enfriamiento induce la formación de microestructuras metaestables con alta energía libre de superficie, fundamental para el desarrollo de las microestructuras globulares, y en consecuencia, de los filamentos.

Las microestructuras meta-estables pueden alcanzar el equilibrio por envejecido a temperatura ambiente.

Los filamentos son microestructuras de fragilidad alta, por lo que se debe evitar su formación; pueden ser los precursores de las fallas en los materiales.

Las transformaciones generan esfuerzos residuales en tensión y en compresión, afectando las propiedades mecánicas del material.

5. REFERENCIAS

- [1]. AWS, *Fundamentals of Welding, Welding Handbook, Seventh Edition, Volume 1*, 1981, p. 37, 127-130, 3-6.
- [2]. *Welding, Brazing and Soldering, Volume 6, ASM Metals Handbook*, 1993, p. 8.
- [3]. Grong O. and D. K. Matlock *Microstructural development in mild and low-alloy steel weld metals*, *Int. Met. Rev.* 31 (1), 1986; p. 27-48.
- [4]. *ASTM handbook; Metallography and Microstructures*, 9, 2004.
- [5]. A. Sandoval ,L. Zamora, J. A. Aguilar, L. Díaz, *Microestructuras meta-estables formadas en un proceso de soldadura A36-E309L; Memorias del 7 Congreso Internacional de Ingeniería Física, UAM-A, México D. F.; 24-28 Noviembre 2014*, pp. 457.
- [6]. E. I. Givargizov; *Highly Anisotropic Crystals; Materials Science of Minerals and Rocks*, D. Reidel Publishing Company, 1986; p. 252-280.
- [7]. E.J. Lavernia, J.D. Ayers, and T.S. Srivatsan, *Rapid Solidification Processing with Specific Application to Aluminium Alloys*, *Int. Mat. Rev.* 37 (1), 1992.
- [8]. *Source Book on Stainless Steels*, American Society for Metals 1976; p. 397-401.
- [9]. B. K. Vainshtein, V.M. Fridkin, V.L. Indebom, *Structure of Crystals, Modern Crystallography Vol. 2*, Springer-Verlag 1995; p.140-144; 134-139.
- [10]. *Metals Handbook Vol. 3*, American Society of Metals 1995; p.44.
- [11]. T. Kakeshita, K. Shimizu, R. Kawanaka, T. Hasegawa, *Grain size effect of electro-plated tin coatings on whisker growth*, *J. Mat. Sci.* 17, 1982; p. 2560-2566.
- [12]. I. Blech, P. M. Petroff, K. L. Tai, V. Kumar, *Whisker growth in Al thin films*, *Journal Crystal Growth* 32, 1976; p. 1691-169.
- [13]. M. Sobiech, U. Welzel, E.J. Mittemeijer, W. Hügel W., A. Seekamp, *Driving force for Sn whisker growth in the system Cu-Sn*, *App. Phys. Let.*, 93, 2008, 011906.
- [14]. W.J. Choi, T.Y. Lee, K.N. Tu, N. Tamura, R.S. Celestre, A.A. MacDowell, Y.Y. Bong, Luu Nguyen, *Thin whiskers studied by synchrotron radiation scanning X-ray micro-diffraction*, *Acta Mater.* 51, 2003; p. 6253-6261.
- [15]. B.Z. Lee, D.N. Lee, *Spontaneous growth mechanism of Tin whiskers*, *Acta Mater.* 46, (10), 1998; p.3701-3714.
- [16]. T.T. Sheng George, C.F. Hu, W.J. Choi, K.N. Tu, Y.Y. Bong, Luu Nguyen; *Tin whiskers studied by focused ion beam imaging and transmission electron microscopy*, *J. App. Phys.* 92, 2002; p. 64.
- [17]. R. Kawanaka, K. Fujiwara, S. Nango, *Influence of impurities on the growth of Tin whiskers*, *Jap. J. App. Phys.* 22, (6), June 1983; p. 917-922.
- [18]. Tu K.N.; *Irreversible processes of spontaneous whisker growth in bimetallic Cu-Sn thin-film reactions*, *Phys. Rev. B* 49, (3), 15 January 1994-I; p. 2030-2034.
- [19]. V.G. Karpov, *Understanding the movements of metal whiskers*, *J. App. Phys.* 117, 2015; 235303.
- [20]. V.G. Karpov, *Electrostatic theory of metal whiskers*, *Phys. Rev. Appl.* 1, 2014; 044001.