

La importancia de caracterizar las
soldaduras del cuchillo
a nivel microestructural,
como parte del proceso de control
de calidad.



Caracterización entre uniones soldadas de acero AISI 430 y AISI 420 por el proceso GTAW

Characterization of Welded Joints between Stainless Steel AISI 430 and AISI 420 by GTAW Welding Process

RESUMEN

Es una investigación sobre la microestructura de juntas soldadas en acero inoxidable AISI 430 con el AISI 420 posterior al proceso de soldadura GTAW. Mediante técnicas de caracterización como microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM) se estudia la presencia de carburos o precipitados que puedan afectar la tenacidad de la junta soldada debido a la elevada cantidad de cromo en solución sólida, lo que se evalúa y analiza con ensayos mecánicos.

ABSTRACT

A study on the microstructure of welded stainless steel AISI 430 with AISI 420 after GTAW welding process is discussed. Characterization techniques as optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) were used to observe the presence of carbides or precipitates that may affect the toughness of the joint due to the high amount of alloying elements in solid solution. These properties were evaluated and analyzed with mechanical tests.

INTRODUCCIÓN

El proceso de soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) o de arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno, es considerado uno de los más versátiles para aceros inoxidables. Se puede utilizar para soldar cualquier metal y en una amplia variedad de espesores. La soldadura obtenida es limpia, libre de escoria [1] y apropiada para estructuras de acero inoxidable, lo que constituye el propósito del estudio.

La industria que fabrica cuchillos utiliza este proceso de soldadura para unir el mango de la herramienta con la lámina de corte. Debido a que los materiales empleados en las láminas son del tipo inoxidable martensítico y en los mangos, del tipo inoxidable ferrítico, para su unión por soldadura se aplica el GTAW por las ventajas anteriormente citadas. Para efectos de investigación, el cuchillo es dividido en tres partes (Figura 1):

- Parte 1: Una lámina de acero inoxidable martensítico de alta dureza (AISI 420).
- Parte 2: Una pieza que denominaremos unión entre la lámina con el mango de agarre. Fabricado en acero inoxidable ferrítico (AISI 430).
- Parte 3. Un mango de acero inoxidable ferrítico (AISI 430).



Palabras Clave

Microestructura, carburos, inoxidables, soldadura.

Key words

Microstructure, Carbides, Stainless, Welding.

Se analizarán las uniones por soldadura entre la lámina, la unión y el mango, elementos de diferentes aceros inoxidable.

El objetivo de este trabajo es caracterizar las soldaduras del cuchillo a nivel microestructural, como parte del control de calidad, pues la posibilidad de formación de precipitados en los contornos de grano de la microestructura puede afectar las propiedades mecánicas del cuchillo al momento de su uso. Se considerará un lote de fabricación de 30 mil unidades por día.



Figura 1. Cuchillos en despiece. Se dividieron en 3 partes: láminas, uniones y mangos
Fuente: Elaboración propia.

FUNDAMENTOS

Los aceros inoxidable martensíticos contienen cromo como principal elemento de aleación (11,5% a 18,0%). Pueden ser templados, lo que mejora la resistencia a la corrosión y elimina la precipitación de carburos.

Aquellos de tipo AISI 420, por su alta dureza y tenacidad adquiridas luego de un adecuado tratamiento térmico (temple y revenido), son empleados en cuchillos, instrumentos quirúrgicos, ejes de bombas, válvulas, bocinas, etc. [2]. La Figura 2 muestra la microestructura del AISI 420 después del temple y revenido. La dureza obtenida luego del tratamiento térmico es de 50 HRC (valor característico de martensita revenida a temperatura media).

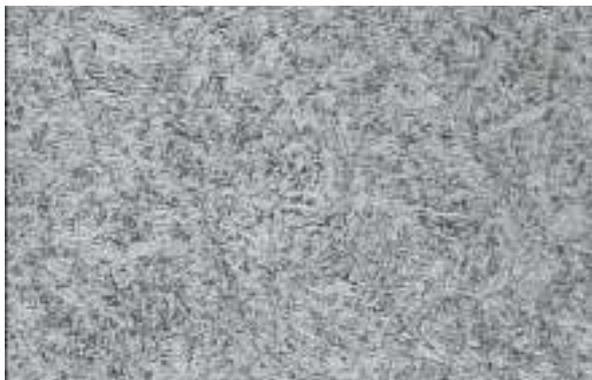


Figura 2. Microestructura del acero inoxidable martensítico AISI 420 luego del tratamiento térmico de temple y revenido. Aumento: 1000x. Ataque: Kalling I.
Fuente: Elaboración propia.

Los aceros inoxidable ferríticos, al igual que los martensíticos, incluyen al cromo como el principal elemento de aleación, cuyo contenido puede alcanzar valores elevados, superiores al 25%. Tienen, además, una cantidad muy baja de carbono (máximo de 0,2%) por lo que no son endurecidos por temple [2]. La Figura 3 presenta la microestructura de un acero inoxidable AISI 430. Los aceros inoxidable ferríticos no endurecen por temple debido al efecto del elevado contenido de cromo, que reduce el campo de la austenitización. Visto que la transformación austenítica es suprimida, no habrá cambio de fase en el calentamiento y posterior enfriamiento. La Figura 4 exhibe el efecto del cromo sobre la reducción del campo austenítico.

Este tipo de acero inoxidable contiene adiciones de ciertos elementos de aleación como manganeso, molibdeno, titanio, niobio y fósforo. Poseen una mayor resistencia a la corrosión que los aceros inoxidable martensíticos [3].

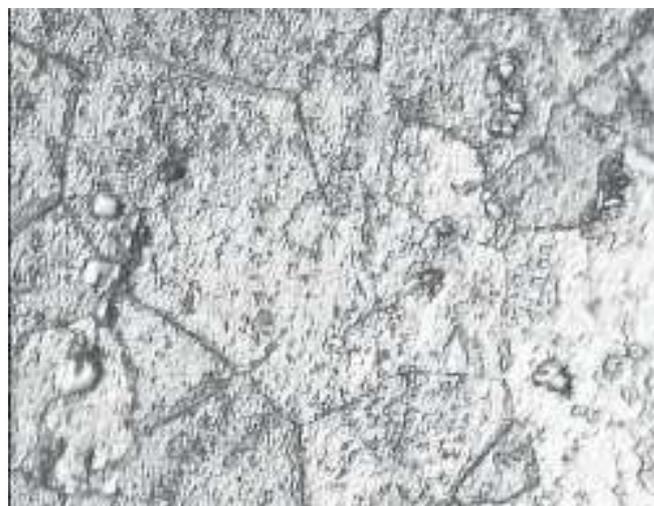


Figura 3. Microestructura típica del acero inoxidable ferrítico AISI 430. Se observan granos de ferrita con algunos carbonatos. Aumento: 1000x. Ataque: Kalling II.
Fuente: Elaboración propia.

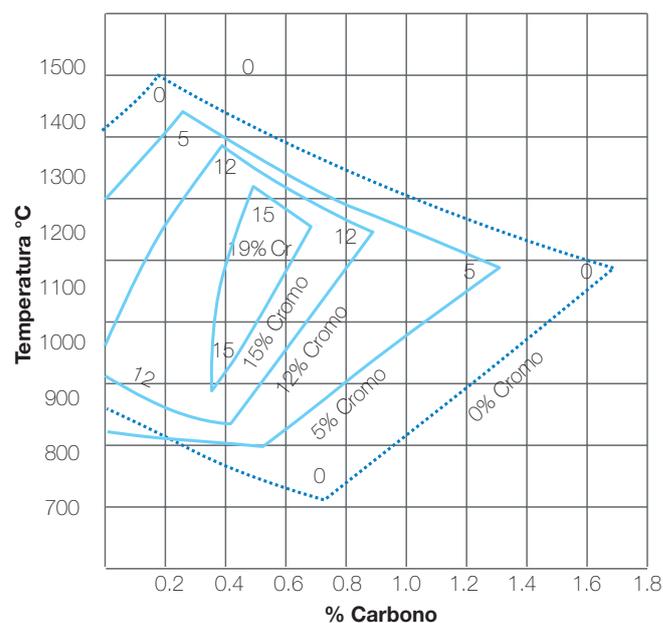


Figura 4. Efecto del cromo sobre la reducción del campo austenítico [2].
Fuente: Adaptado de [2].

Cabe señalar que los aceros inoxidables ferríticos sometidos a temple solo desarrollarían mínima dureza y su resistencia a la corrosión estaría perjudicada. De un modo genérico, con este procedimiento los mecanismos de aumento de resistencia no dan los efectos esperados al resultar en fragilidad y pérdida de ductilidad y resistencia mecánica a la temperatura ambiente. Consecuentemente, el único tratamiento térmico aplicable es el recocido, el cual alivia las tensiones generadas durante los procesos de soldadura y trabajo a frío [4].

En la Figura 5 se observa el diagrama de equilibrio Fe-Cr-C (hierro – cromo – carbono) con 18% de Cr. Se constata que la línea vertical que pare de aproximadamente del valor 0,1% de carbono no alcanza al campo austenítico. En otras palabras, un tratamiento térmico a una temperatura de 1.000 °C, por ejemplo, no producirá un cambio de fase de ferrita a austenita y consecuentemente durante el enfriamiento no habrá transformación martensítica.

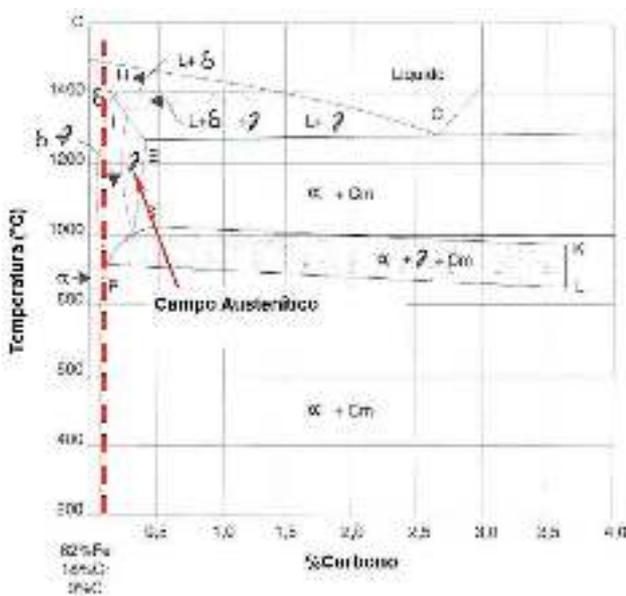


Figura 5. Diagrama de equilibrio Fe-Cr-C con 18% de Cr. La línea vertical que se origina aproximadamente en 0,1% de carbono no alcanza el campo austenítico Fuente: Adaptado de [2].

La Figura 6 muestra de forma esquemática la alteración de la microestructura del metal base luego de la soldadura. La microestructura más próxima a la zona fundida es la que resulta más afectada, la que se conoce como ZAC (zona afectada por el calor) [5]. Esta puede presentar fragilidad y comprometer las propiedades mecánicas de todo el componente.

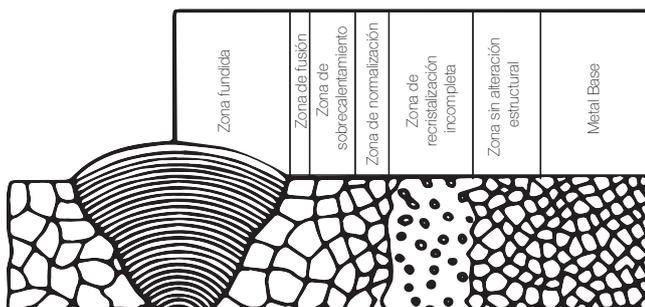


Figura 6. Representación esquemática de las zonas afectadas durante la soldadura de un metal. Fuente: Adaptado de [5].

La soldadura con técnicas de láser es otra alternativa para la unión de inoxidables. Sin embargo, es posible un incremento de la dureza debido a la precipitación de carburos $M_{23}C_6$ en los contornos de grano, lo que puede comprometer la tenacidad del material [9].

METODOLOGÍA

Para los análisis fueron utilizados materiales procedentes de los mangos soldados a las uniones, conforme a la Figura 1. Básicamente, el mango y el elemento de unión son fabricados en acero inoxidable ferrítico, en tanto que las láminas son de acero inoxidable martensítico. Las composiciones químicas de ambos tipos de acero fueron verificadas por medio de espectrometría de emisión óptica (OES) y se determinaron sus elementos y cantidades que se presentan en las tablas I y II.

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Fe
0,04	0,32	0,135	15,85	0,0156	<83,44

Tabla I. Composición química del AISI 430 (vía espectrometría de emisión óptica) Fuente: Elaboración propia.

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Fe
0,24	1,09	-	15,01	-	88,66

Tabla II. Composición química del AISI 420 (vía espectrometría de emisión óptica) Fuente: Elaboración propia.

Las muestras fueron obtenidas de las uniones soldadas de estos dos componentes (mango y unión) y sometidas a métodos metalográficos convencionales: corte, lijado, seguido de pulido y ataque químico recomendado para microscopía óptica y electrónica. Se seleccionaron las secciones transversales y longitudinales de las piezas según procedimientos de la norma ASTM E3-01 y atacadas químicamente con el reactivo Kalling I y Kalling II [6]. También se registraron los datos de dureza según la ASTM E10-07a [7] [8].

Finalmente, se realizaron análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) en un microscopio Modelo XL30 (marca Philips) para determinar si hubo precipitación de carburos que pudiesen comprometer la resistencia a la corrosión o la tenacidad del material.

RESULTADOS

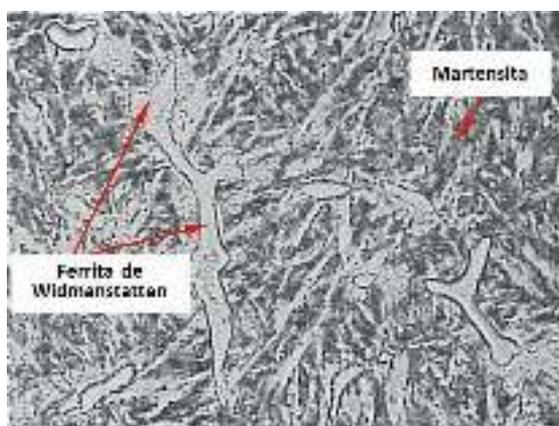
a) Análisis metalográficos

Luego de retirar las muestras de los mangos, láminas y uniones, las secciones transversales fueron analizadas por microscopía óptica. En la Figura 7(a) se presenta la microestructura de una lámina. Se observa una estructura martensítica revenida, donde son notorios los contornos de grano austeníticos previos al temple. No se advierten carburos junto a la morfología de las agujas de martensita. En la Figura 7(b) se observa una región próxima al cordón de soldadura entre la lámina y la unión. Se distingue una estructura irregular con ferrita acicular, conocida como ferrita de Widmstätten, proveniente de altas tasas de enfriamiento duran-

te la solidificación, que distorsiona la formación de los granos y da el aspecto de agujas superpuestas, característico del proceso de soldadura.



(a)



(b)

Figura 7. (a): Microestructura de la sección transversal de la lámina de acero AISI 420. Aumento: 1000x. **(b):** Región próxima al cordón de soldadura. Aumento: 1000x. Ataque: Kalling I. Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 8 y 9 revelan las zonas de soldadura entre el elemento de unión y el mango. Se aprecian diferentes morfologías de granos como resultado del proceso de soldadura. Asimismo, se muestran el metal base de acero AISI 430 con inclusiones (1), la zona afectada por el calor (2) y el metal fundido (3).



Figura 8. Microfotografía de la sección longitudinal del metal fundido. Aumento: 50x. Ataque: Kalling II. Fuente: Elaboración propia.

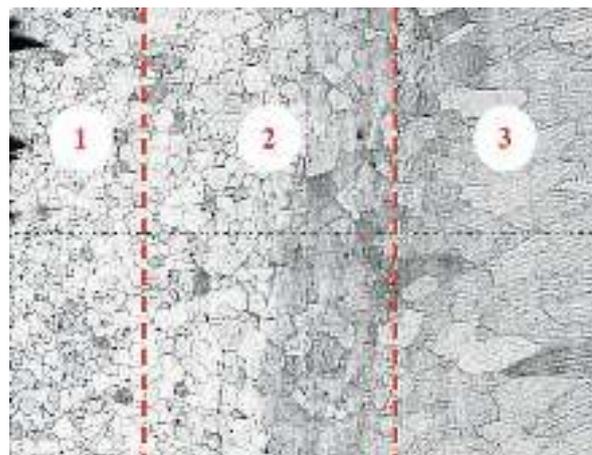


Figura 9. Microfotografía de la sección longitudinal de la región soldada. (1) Metal base. (2) Zona afectada por el calor. (3) Zona fundida. Aumento: 50x. Ataque: Kalling II. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10 presenta el límite entre el metal fundido y la zona afectada por el calor. Se observan regiones oscuras que fueron analizadas mediante SEM para obtener su composición química elemental. El propósito del examen fue constatar la existencia de altas cantidades de cromo, lo que supondría precipitación de fase sigma (fase rica de cromo que afecta la resistencia a la corrosión).

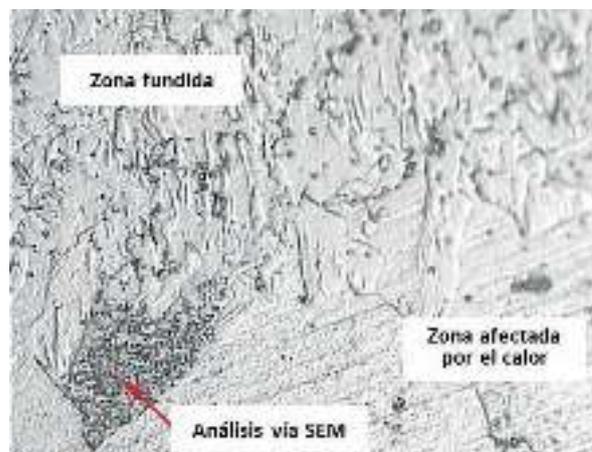


Figura 10. Microfotografía de la sección longitudinal de la región soldada donde se observa la zona afectada por el calor y la zona fundida. Aumento: 500x. Ataque: Kalling II. Fuente: Elaboración propia.

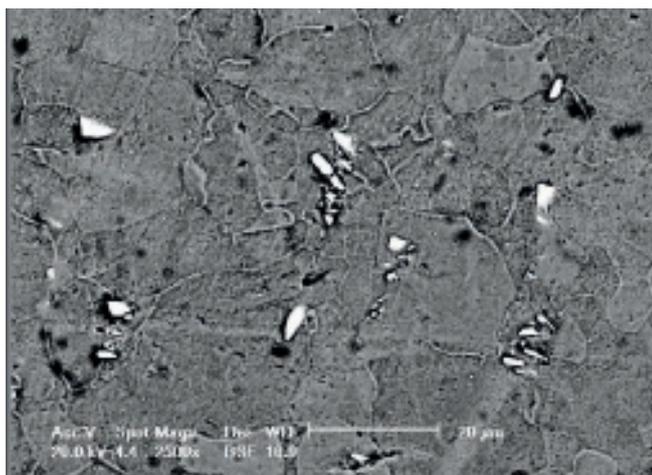
b) Análisis por SEM

La Figura 11 presenta el resultado del análisis por SEM de la zona afectada por el calor (Figura 10), en la que se observan carburos. La Tabla III detalla la composición química elemental de la región indicada (marca cuadrada). El resultado del análisis químico revela que tales carburos son ricos en Mo (molibdeno). Este elemento es adicionado en el acero AISI 430 para formar carburos durante el rápido enfriamiento, lo que evita alterar el contenido de cromo de la aleación, que ocasionaría pérdida en la resistencia a la corrosión. La Figura 12 muestra los mismos precipitados en diferentes regiones del material luego del proceso de soldadura. La Figura 13(a) y la Figura 13 (b) presentan el resultado del análisis por SEM de la región oscura que fue señalada con flecha roja en la Figura 10, en un aumento de 10050x. No se constata la

formación de algún tipo de carburo. La Tabla IV muestra el resultado de la composición química elemental de la región señalada (marca cuadrada) de la Figura 13. El resultado del análisis químico puede ser comparado con los mostrados en la Tabla I.



Figura 11. Carburos de molibdeno presentes en la zona afectada por el calor. Aumento: 4000x. Ataque: Kalling II. Fuente: Elaboración propia.



(a)

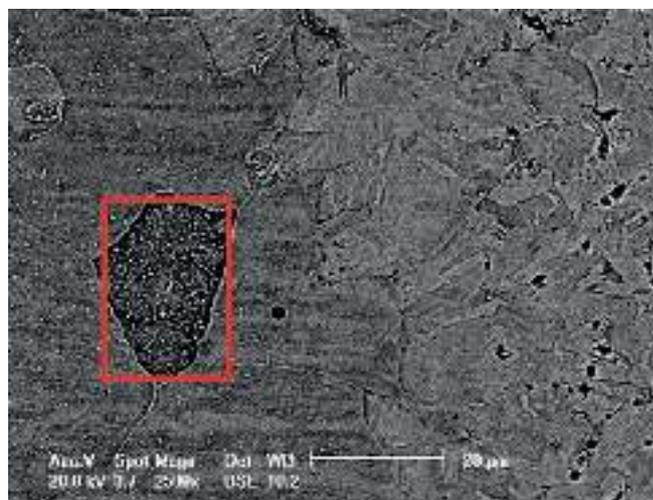


(b)

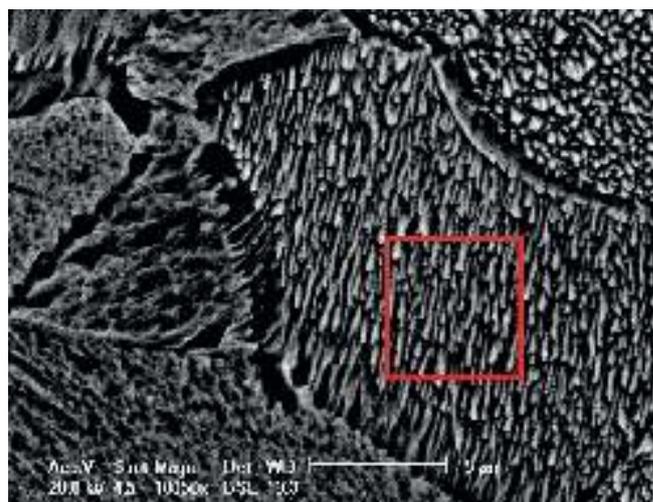
Figura 12. Carburos de molibdeno presentes en otras regiones del material. (a) aumento: 2500x. (b) aumento: 4000x. Ataque: Kalling II. Fuente: Elaboración propia.

%Cr	%Mo	%Fe
5,26	91,35	3,39

Tabla III. Composición química de carburos formados (SEM) Fuente: Elaboración propia.



(a)



(b)

Figura 13. Análisis de las región oscuras señaladas en la Figura 10. (a) aumento: 2500x. (b) aumento: 10050x. Ataque: Kalling II. Fuente: Elaboración propia.

%Cr	%Fe
16,72	83,28

TABLA IV. Composición química local (SEM) Fuente: Elaboración propia.

La región oscura de la Figura 10 contiene cromo en cantidades normales. Luego, se descarta la precipitación de alguna fase rica en cromo como la fase sigma, que suele afectar la tenacidad de las aleaciones inoxidables ferríticas, cuando el material atraviesa altas temperaturas de trabajo (por ejemplo, en el proceso de soldadura).

c) Ensayos de dureza

La Tabla V indica los valores de dureza Rockwell B (HRB) y Vickers (HV20) con carga de 20 kgf de la junta soldada (promedio de 6 ensayos).

Región	HRB	HV
Metal base	88	169
Zona afectada por el calor	85	162
Zona fundida	78	140

Tabla V. Durezas de las regiones soldadas (media de 6 análisis)
Fuente: Elaboración propia.

La zona fundida exhibió una dureza menor que la zona afectada por el calor y el metal base. Sin embargo, esta diferencia no es significativa. Por ende, el material de las regiones analizadas fue homogéneo en lo que respecta a dureza.

CONCLUSIONES

El acero inoxidable AISI 430 sometido a altas temperaturas no experimenta precipitación de fase sigma. En el material y el metal fundido no se observa ese fenómeno luego del proceso de soldadura probablemente debido a la poca cantidad de cromo encontrado en la aleación (15,85%). Para precipitar fracciones de esta fase se necesita aproximadamente 25% de cromo en solución sólida en el acero inoxidable ferrítico.

Todas las muestras de acero inoxidable ferrítico AISI 430 presentaron precipitados de molibdeno conforme al análisis químico elemental por SEM. Este elemento es adicionado para impedir que el cromo precipite en forma de carburos, disminuyendo la cantidad de cromo en la solución sólida y, consecuentemente, la resistencia a la corrosión del acero resulte afectada.

La estructura ferrítica de Widmanstätten se manifiesta en la zona afectada por el calor de la soldadura entre el acero inoxidable martensítico AISI 420 y el acero inoxidable ferrítico AISI 430. Tal estructura afecta la tenacidad del material, debido a su morfología acicular, lo cual podría ser solucionado con tratamientos térmicos que recristalicen los granos del acero en cuestión.

REFERENCIAS

[1] Jeffus, L. (2010). *Manual de la Soldadura GTAW (TIG)*. Madrid: Paraninfo.

[2] Chiaverini, V. (2005). *Aços e Ferros Fundidos* (6ª ed.). São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

[3] Strobel, E. (2005). Efeito do tratamento térmico na resistência à corrosão do aço inoxidável martensítico CA6NM

em Meio Marinho Sintético (Tesis de maestría). Universidade de São Francisco, São Paulo.

[4] Chandler, H. (Ed.). (1995). *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*. USA: ASM International.

[5] Chiaverini, V. (1986). *Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento* (2ª ed., II Vol.). São Paulo: McGraw-Hill.

[6] ASTM E3-01. (2001) Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken: ASTM International.

[7] ASTM E10-07. (2007) Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International.

[8] ASTM E384-99. (2000). Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken: ASTM International.

[9] Baghajari, S., & Akbarimousabi, S. (2014). Experimental investigation on dissimilar pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 420 stainless steel to kovar alloy. *Materials & Design*, 57, 128–134.

ACERCA DE LOS AUTORES

César R. Nunura

Es graduado en Ingeniería Mecánica titulado por la Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS - BRASIL). Maestría en Ingeniería de Procesos de Fabricación por la Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS - Brasil). Es Doctor en Ingeniería y Tecnología de Materiales por la Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS - Brasil). Experiencia en Análisis Numérico en Transferencia de Calor, Ciencia de los Materiales y Metalurgia Física. Actualmente es profesor a tiempo completo en Tecsup Lima y responsable del Laboratorio de Ensayos de Materiales.

@ cnunura@tecsup.edu.pe

César Lecaros

Tiene estudios de maestría en Ingeniería y Ciencias de los Materiales por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Es ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Ingeniería, con una especialización en Materiales de Ingeniería. Especialización en Automatización de la Producción en Senai - Brasil. Es especialista en Metrología, con capacitación en México y Brasil. Es miembro de la American Society of Mechanical Engineers (ASME).

@ clecaros@tecsup.edu.pe