

## Agrietamiento por soldadura de un eslabón de cadena fabricado de acero refractario HK-40

**João Afonso Chipepe**

[jachipepe@mecánica.ismm.edu.cu](mailto:jachipepe@mecánica.ismm.edu.cu)

**Tomás Fernández Columbié**

[tfernandez@ismm.edu.cu](mailto:tfernandez@ismm.edu.cu)

**Isnel Rodríguez González**

[irgonzalez@ismm.edu.cu](mailto:irgonzalez@ismm.edu.cu)

**Efraín Guzmán Romero**

[eguzman@ismm.edu.cu](mailto:eguzman@ismm.edu.cu)

Universidad de Moa

**Resumen:** Se determinó el fenómeno de agrietamiento que se origina en un acero inoxidable refractario del tipo HK-40 empleado en la fabricación de un eslabón de cadena, defecto que se genera al ser expuesto al ciclo térmico de soldadura con electrodo UTP 65 de 4 mm. La preparación de borde se realizó a tope con bisel de 60°, fueron cortadas muestras para ensayos de dureza, composición química y observación con microscopía óptica. Fueron analizadas la zona fundida, la interfase y zona afectada por el calor, obteniéndose estructuras de austenita, ferrita, ferrita- $\delta$  y carburos, así como zona descarburada como consecuencias de las altas temperaturas a las cuales se expone la aleación. La dureza desde un valor inicial de 270 HV en el material en estado en bruto de colada, incrementa hasta 670,2 HV en la zona fundida, propiciado por la formación de la fase sigma y la disminución de la tenacidad y el alargamiento.

**Palabras claves:** agrietamiento; ferrita- $\delta$ ; descarburación; refractario; dureza.

## Weld cracking of a chain link made of refractory steel HK-40

**Abstract:** The phenomenon of cracking that originates in a refractory stainless steel of the HK-40 type used in the manufacture of a chain link was determined, a defect that is generated when exposed to the thermal cycle of welding with a 4 mm UTP 65 electrode. Edge preparation was carried out butt with a 60° bevel, samples were cut for hardness tests, chemical composition and observation with light microscopy. The molten zone, the interface and the heat affected zone were analyzed, obtaining structures of austenite, ferrite,  $\delta$ -ferrite and carbides, as well as decarburized zone as consequences of the high temperatures to which the alloy is exposed. The hardness from an initial value of 270 HV in the raw material as cast, increases to 670,2 HV in the molten zone, caused by the formation of the sigma phase and the decrease in toughness and elongation.

**Key words:** Keywords: cracking; ferrite- $\delta$ ; decarburization; refractory; hardness

## Introducción

El campo de temperaturas ejerce influencia sobre el estado microestructural, debido a la distribución de temperaturas no uniforme que se genera, ocurren cambios microestructurales en el área adyacente a la zona de fusión, denominada zona afectada por el calor (ZAC) y en la zona de fusión. El campo de estado microestructural, el de esfuerzos y deformaciones ejercen una influencia débil sobre el de temperaturas, de igual manera el de los esfuerzos y deformaciones influye débilmente sobre el de estado microestructural.

De acuerdo con Goncalves (2006); Gianetto *et al.*, (2014) es necesario controlar el calor aplicado a la unión antes de efectuar el proceso, por esto un modelo matemático, que calcule la energía en dicha unión, servirá para corregir los efectos antes mencionados. El ciclo térmico de una soldadura no puede determinarse con precisión porque depende de variables. Sin embargo, se pueden hacer estimaciones aceptables, para predecir o explicar los efectos del calor, provenientes de un proceso específico de soldadura, sobre determinado metal bajo condiciones prácticas.

González-Cabrera *et al.* (2017) refieren 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 la variación en las propiedades del metal bajo determinadas condiciones. Es posible establecer la modificación en la resistencia, plasticidad, resiliencia debido a la soldadura. Una de las características más sustanciales de la soldabilidad es la ausencia de grietas (Beckitt y Clark, 1967).

Fernández-Columbié *et al.* (2016), en estudios realizados acerca del modo de solidificación de los aceros austenítico, plantean que, hay cuatro posibilidades y transformación en estado sólido para uniones soldadas en estos tipos de aceros. Los tipos de solidificación FA y F tienen ferrita delta como fase primaria. Después de la solidificación, la modificación microestructural adicional ocurre en el estado sólido para los tipos FA y F, debido a la inestabilidad de la ferrita a temperaturas más bajas. Es esencial que las transformaciones de fase post-solidificación sean totalmente

comprendidas para entender la microestructura y las características del metal de aporte en el proceso de soldadura. En los modos A y AF se asocian con la solidificación de austenita primaria, por lo que la austenita es la primera fase en formarse en la solidificación.

Entre los aceros termoresistentes se encuentra el acero refractario HK-40, el cual es una aleación que trabaja hasta 1 100 °C (Beckitt y Clark, 1967). Si es expuesto a altas temperaturas, el proceso de disolución de los carburos primarios propicia la precipitación (Haro *et al.*, 2000). Con lo anterior, sus propiedades mecánicas cambian y tiende a fallar (Whittaker *et al.*, 2013). Recibe su nombre de la AISI, donde la H denota su resistencia a las temperaturas (Heat Resistant), la K el contenido de Cr con base en el diagrama ternario Fe-C-Cr y el 40 se refiere a la cantidad de carbono presente en la aleación; 0,40 % peso. La microestructura es dendrítica; una matriz de austenita, rodeada con zonas interdendríticas de carburos primarios de la forma  $M_{23}C_6$ .

Fuentes-Guilarte *et al.* (2016) establecieron el comportamiento microestructural de dos fundiciones, un acero refractario HK-40 y un acero inoxidable austenítico AISI 321, mediante soldadura manual y electrodo revestido E 309 L-16. La estructura ferrita-austenita que se forma en la unión, es resultado del elevado contenido de carbono del HK-40. La baja velocidad de enfriamiento del cordón reveló ausencia de discontinuidades en el retículo cristalino de la zona afectada térmicamente y atenúa la formación de carburos de cromo del tipo  $Cr_{23}C_6$ , que puede formar la aleación HK-40 durante la difusión del volumen de fracción en masa del cromo.

Independientemente de las particularidades que presentan los aceros refractarios al ser soldados, la formación de estructuras que en ocasiones no son favorables por la entrada de calor, con procedimientos controlados los mismos pueden ser unidos, tanto por soldadura manual por arco eléctrico, como por gas y tungsteno. La limitación en los mismos es por la formación de carburos y de la fase sigma.

El trabajo tiene como objetivo determinar el fenómeno de agrietamiento por efecto del ciclo térmico de soldadura manual por arco eléctrico de un eslabón de cadena fabricado de acero refractario HK-40, soldado con electrodo UTP 65.

## Desarrollo experimental

### Composición química del material

El análisis químico del material (tabla 1), se realizó en un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Tabla 1. Composición química del material base, % en masa

Designación	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
ACI HK-40	0,36	0,48	0,79	0,001	0,018	27,08	0,68	22,01	Balance

Al analizar la composición química obtenida del material de los eslabones y compararla con la que establece la norma se puede plantear que, en la aleación HK-40, luego del proceso de fundición, ha existido variaciones en los elementos químicos, el carbono (<0,40); silicio (<1,27); molibdeno (>0,18). Estos elementos aceleran la formación de fase sigma, por lo que, durante la soldadura, existe la posibilidad de la presencia de esta fase, independientemente que los mismos no se encuentren según lo establecido.

### Caracterización de la unión metalúrgica

La unión es un eslabón de una cadena que presenta un diámetro 15 mm, el cual, al someterlo a proceso de soldadura, por efecto del ciclo térmico surge el fenómeno de agrietamiento en la unión soldada. La figura 1 se corresponde con un eslabón en estado de suministro y en la 1a uno retirado de servicio.



Figura 1. Eslabón en estado de suministro. Figura 1a. Eslabón retirado de servicio.

Este eslabón es fabricado de acero refractario HK-40, donde para obtener la unión en el cierre del extremo se somete a soldadura manual por arco eléctrico con electrodos revestidos (SMAW). En estas aleaciones para su soldeo se debe considerar la composición química, así como su temperatura de fusión. Esta es de 1 465 °C, donde a

815 °C, se corresponde a la transformación austenítica, por lo que entre las isoterms de calentamiento y enfriamiento se tiene la región sobrecalentada y entre 815 y 540 °C la región transformada (Madhusudan y Srinivasa, 2009).

Para realizar el proceso de unión de la aleación HK-40 se seleccionó el material de aporte, el cual presentan como características distintivas un depósito en su estructura del tipo austenítica. La elección se realizó según recomendaciones de la AWS-A5-28-79, ASME SFA 5.28, 2006). El electrodo UTP 65, es considerado como especial austenítico ferrítico de excelentes características de soldabilidad y alta resistencia mecánica.

Para determinar la soldabilidad del acero inoxidable HK-40 o la composición química del cordón resultante se emplean las ecuaciones propuestas por Kotecki y Siewert (1992).

$$Ni_{eq} = \% Ni + 30 \cdot \% C + 0,5 \cdot \% Mn \quad (1)$$

$$Cr_{eq} = \% Cr + \% Mo + 1,5 \cdot \% Si + 0,5 \cdot \% Nb \quad (2)$$

En los aceros inoxidables austeníticos el níquel equivalente es superior a 8, mientras que el cromo equivalente es superior a 18, el material aportado puede presentar estructuras: austenítica, con pequeñas cantidades de martensita, austenítico - ferrítica, con algún contenido de martensita y austenítico - ferrítica. La utilización de este diagrama no se limita a los austeníticos, sino que permite predecir otras estructuras derivadas de la composición química del material (Kotecki y Siewert, 1992).

La operación de corte y encapsulado (Figuras 2) se realizó en una cortadora de disco, según norma ASTM E 3-95. Con regímenes de corte de 1 000 r/min, se empleó abundante refrigeración para evitar que, por producto de la fricción existieran posibles transformaciones en la estructura por cambios de fase. Fueron seleccionadas tres muestras para determinar el fenómeno de agrietamiento en el ACI HK-40.

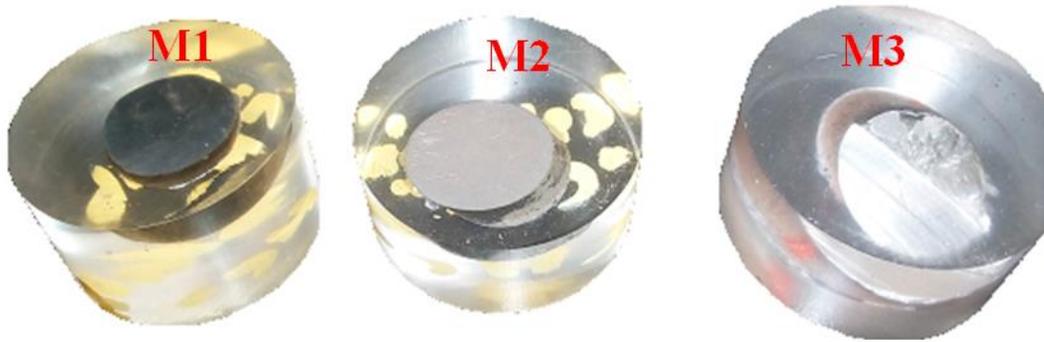


Figura 2. Corte y encapsulado de las muestras.

El corte se ejecutó según los diferentes ensayos a realizar. La muestra M1 se seleccionó para determinar la dureza, la M2 para determinar la composición química y la M3 para la observación con microscopía óptica en las diferentes zonas de la soldadura.

Como en el proceso de soldadura, las zonas que se obtienen son de un margen de pequeños milímetros, se precisó la limitación de cada una de ellas, se midió la dureza en el material base (MB), en la zona afectada por el calor (ZAC) y en la interfase del cordón de soldadura. Se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca echoLAB.

Para la observación microestructural se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100, dotado de una cámara instalada el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe. Las probetas se nivelaron en un dispositivo con plastilina. Para la comparación de las microestructuras obtenidas de la soldadura, se consideró una muestra sin afección del material base. La figura 3 se corresponde con la muestra patrón.

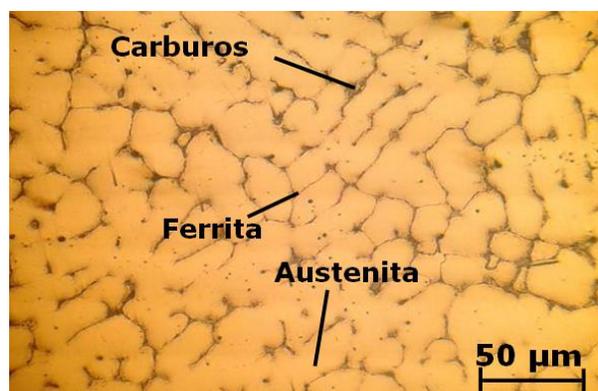


Figura 3. Microestructura de la aleación HK-40.

Se observa la microestructura del material base, caracterizada por carburos alargados, preferencialmente ubicados en bordes dendríticos; por un lado, en forma de collar, rodeando a la fase austenítica y en bordes de grano, mostrando una precipitación parcial. El objetivo fue obtener una muestra sin afectación en su estructura que permitiera determinar, luego de la soldadura, los cambios ocurridos en la zona afectada por el calor (ZAC), en la zona fundida (ZF) y la interfase.

Para revelar esta estructura en el ataque químico se empleó como reactivo el alcohol etílico al 95 % (85 ml), ácido clorhídrico al 32 % (10 ml) y ácido nítrico al 65 % (5 ml).

Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT-3 No 168, del Laboratorio de microscopía de minas de la Universidad de Moa. Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizó con una carga de 50g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante penetrada en un tiempo de 15 segundos (Callister, 2007; Askerland y Phulé, 2010).

El barrido de durezas se realizó de forma longitudinal y transversal, se consideró el centro de la soldadura para obtener valores en las zonas de estudio, cordón de soldadura, zona afectada por el calor y el material base, se realizó durezas en 7 puntos con una separación entre ellos de 1 cm, realizándose en la zona superior e inferior del cordón.

## **Resultados y discusión**

### **Comportamiento macrográfico de la unión**

Por las ecuaciones 2.1 y 2.2 se determinó la composición química del cordón resultante y se ubicó en el diagrama de Schaeffler la composición química del electrodo UTP 65, empleado en la unión del acero refractario HK-40. En la figura 4 se muestra el resultado.

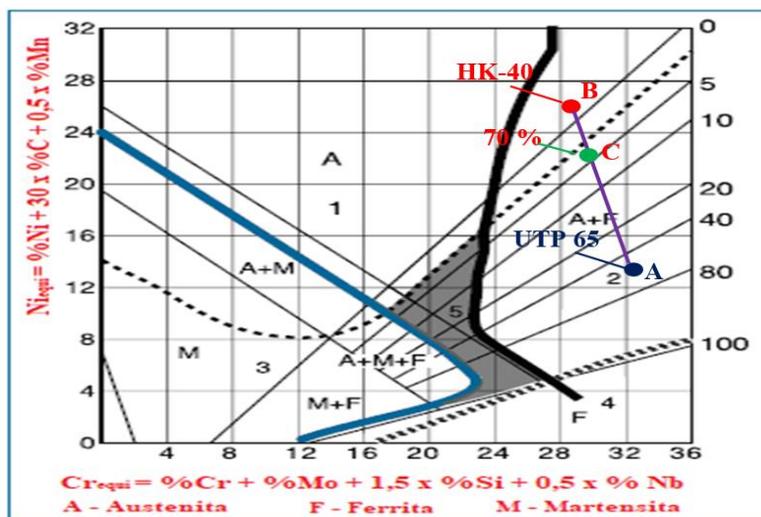


Figura 4. Composición química del cordón resultante.

- El punto A le corresponde al electrodo UTP 65
- El punto B le corresponde a la aleación A 351 grado ACI HK-40.
- El punto C representa la participación de ambos materiales base en la soldadura

Al determinar la composición química del material de aporte, se encuentra ubicado en el campo 2, con una solidificación de ferrita - austenita. Cuando los modos FA y F toman lugar, como el caso del electrodo UTP 65, el núcleo dendrítico está significativamente enriquecido en cromo y carente de níquel. Los núcleos de ferrita en las zonas ricas en cromo y carentes de níquel se presentan como una fase en no-equilibrio. La segregación del cromo a ferrita y del níquel a austenita juega un rol principal en estabilizar la ferrita en la subsiguiente transformación en estado sólido (posterior a la solidificación). Por lo tanto, el control del contenido en ferrita resulta básico. Cuando no sea necesario un cordón austenítico puro es conveniente un porcentaje en ferrita entre el 5 y el 10 % y esto se puede conseguir mediante el control del material y del proceso de soldeo, criterio de Fernández-Columbié *et al.* (2016).

### Análisis fractográfico del eslabón de la cadena

Se realizó un análisis fractográfico en el eslabón de la cadena para determinar el comportamiento del agrietamiento en el mismo. En la figura 5 se muestra la región de inicio, la propagación de grieta y la ruptura final del componente.

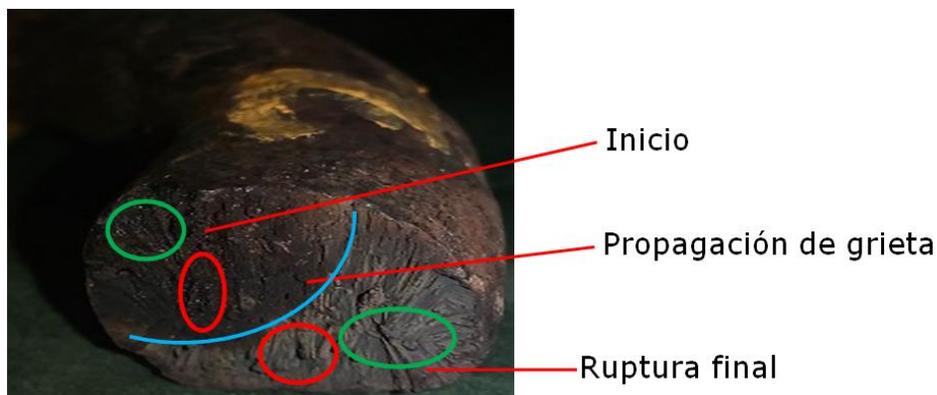


Figura 5. Superficie de fractura por fatiga térmica.

Se observa las tres etapas de formación de la fractura a nivel macroscópico. El mecanismo de propagación de la grieta en cada etapa es diferente, por lo que las mismas aportan información sobre el origen y secuencia de propagación de la fractura, así como el efecto de variables externas (medio ambiente y el patrón de carga).

En el área analizada, se distingue el inicio de la grieta además de marcas de playa en la zona señalada con círculos verdes, se observa una frontera o cambio en las marcas del material la cual es señalada por una línea azul (presumiblemente descarburación), posterior a esta línea existe un cambio en la morfología, observando otro tipo de fractura como si esta se hubiera desgarrado, existen numerosas marcas de una fractura frágil señaladas por círculos rojos.

En la fractografía se registra discrepancia en el tamaño de los granos. Estos difieren entre sí en la orientación cristalográfica o en composición química, están separados por una interfase definida, por la diferencia en composición y en orientación, los módulos elásticos de los granos son diferentes, esto implica que los esfuerzos externos aplicados o los generados internamente producen esfuerzos elásticos diferentes; esto puede derivar en otros locales internos que son aliviados con la aparición de la grieta, según el criterio reportado por Liljedahl *et al.* (2010).

#### **Comportamiento microestructural en las zonas del ACI HK-40**

Se determinó las microestructuras en las diferentes zonas de la unión soldada del eslabón de la cadena fabricado de acero austenítico ACI HK-40 soldado con el electrodo UTP 65. En la figura 6 se muestra el comportamiento.

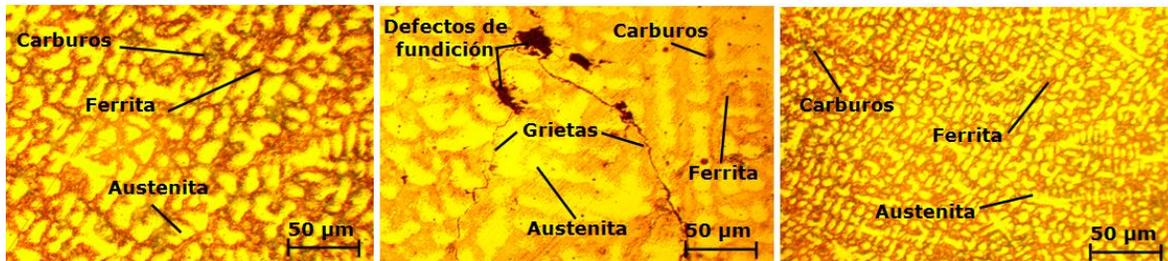


Figura 6. a) Zona fundida, b) Interfase, c) Zona afectada por el calor.

En la zona fundida (figura 6a), se observa una estructura formada por una morfología de austenita y dendritas de austenita en forma de collar, consistente con una red dendrítica de austenita con una pequeña cantidad de austenita retenida entre los brazos y de la ferrita- $\delta$ , lo cual le otorga a este sector una constitución característica de los aceros inoxidable austeníticos. Por la fase presente obtenida el modo de solidificación obtenido es del tipo ferrita-austenita (FA).

Las fases presentes en la interfase (figura 6b) muestran un tamaño de grano mayor que el de la zona fundida, existe la presencia de la ferrita, dendritas de austenita en forma de collar y los carburos. En esta zona, por la morfología de la ferrita, presenta un modo de solidificación ferrítico-austenítico (FA), en concordancia la composición química, tanto del material base, como el de aporte. Este modo es más resistente al agrietamiento en caliente durante la soldadura, debido a que las impurezas (S, P) son más solubles en la ferrita, evitan la formación de fases de bajo punto de fusión, las cuales provocan este agrietamiento.

Las grietas son producto de las tensiones generadas por los cambios de temperatura, a mayor existencia de la misma, más bruscos serán estos, se tendrá mayor probabilidad de falla. La presión local ejercida por la temperatura es superior a la tensión de fluencia del acero, que genera una extensión de las microfisuras, donde los microhuecos o microfisuras finalmente se combinan para formar grietas, a escalas más macroscópicas, que desempeñan un papel importante en la rotura del material, según lo ha reportado Fernández-Columbié *et al.* (2014).

En la zona afectada por el calor (figura 6c) se observa una estructura similar a la del material base, pero con una reducción del tamaño de los granos. Se ha obtenido una matriz austenítica, con la ferrita distribuida sobre la misma e intergranular. La solidificación ocurre desde la fase ferrítica, la cual es estable en el estado sólido sobre algunos rangos de temperatura. Con el enfriamiento alguna austenita se forma a

elevada temperatura en los bordes de grano de ferrita. Luego esta austenita se transforma en ferrita en la zona de fusión por el enfriamiento hasta la temperatura ambiente, criterio que coincide con lo reportado por Fernández-Columbié *et al.* (2014); Fuentes-Guilarte *et al.* (2016).

### Comportamiento de la sensibilización en el HK-40

Uno de los principales criterios para seleccionar un acero inoxidable es su resistencia a la corrosión. Sin embargo, la soldadura puede reducir esta, en especial en las zonas expuestas al calor, tanto al metal base y en la zona afectada por el calor (ZAC). Se analizó el efecto de la sensibilización o corrosión del acero HK-40. En la figura 7 se muestra el comportamiento obtenido.

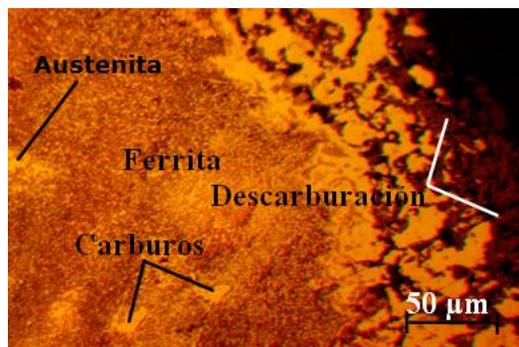


Figura 7. Sensibilización o corrosión del acero HK-40.

Por efecto de las altas temperaturas, en lo cual tiene influencia el diámetro del electrodo (4 mm) que es el encargado de controlar la intensidad de corriente, en los bordes del eslabón de la cadena fabricado de HK-40 existe un área de ferrita, lo cual se traduce en la pérdida del carbono (descarburada) en esta zona. Al ocurrir este fenómeno, la aleación queda empobrecida en cromo, por lo que presumiblemente haya sido recalentada en el rango de temperaturas de 550 a 850 °C. Al observar este comportamiento microscópico y compararlo con el análisis fractográfico, coincide que fue por esta zona donde comenzó la fractura de dicho eslabón. Mientras mayor contenido de carbono presente la aleación, mayor es el riesgo a sensibilizarse en un corto periodo de tiempo.

### Comportamiento de las durezas en las diferentes zonas

La tabla 2 muestra los resultados de las huellas de las indentaciones de microdureza obtenidas en cada una de las zonas analizadas.

Tabla 2. Resultados de la dureza

Zona	Dureza HV							HV <sub>Prom</sub>
MB	270	270	270	270	271	269	270	270
ZF	670	671	671	669	670	670	671	670,2
ZAC	425	425	427	425	426	426	427	425,8

En el análisis de las durezas se observa un comportamiento no homogéneo en las diferentes zonas de la unión soldada, al aplicar el ciclo térmico de soldadura, el calor proveniente de la fuente va deformando la estructura cristalina del acero refractario HK-40, las altas temperaturas modifican el tamaño de los granos y desde un valor inicial de 270 HV en el material en estado en bruto de colada, en la zona fundida se incrementa hasta 670,2 HV y luego decae hasta 425,8 HV al llegar a la zona afectada por el calor.

En cuanto a la dureza del acero refractario HK-40 en términos del contenido relativo de fase sigma, es consecuencia directa de la distribución de una fase de alta dureza en la microestructura; sin embargo, la mayor concentración de la misma es compensada por una mayor cantidad relativa de austenita. A mayor presencia, la tenacidad y el alargamiento disminuyen, a la vez que se manifiesta un incremento de la dureza. El comportamiento de los materiales en fractura indica un mecanismo combinado dúctil-frágil que aumenta su carácter de fragilidad a mayores contenidos relativos de la fase, según lo refieren Garin *et al.* (2006).

## Conclusiones

El agrietamiento del eslabón de la cadena fabricado con el acero ACI HK-40 ocurre por el efecto de empobrecimiento del carbono (descarburación) en la zona afectada por el calor introducido por la temperatura entre 550 y 850 °C del electrodo de 4 mm y la presencia de carburos  $M_{23}C_6$ , quedando sensibilizada la aleación.

Las diferentes zonas de la unión soldada de la aleación ACI HK-40 están compuestas por la austenita dendrítica, carburos de cromo y la ferrita- $\delta$ , siendo la cantidad de esta última de un 6 %, necesaria para mitigar el fenómeno del agrietamiento.

Por efecto del ciclo térmico quedó modificada la estructura del ACI HK-40, con lo cual la dureza desde un valor inicial de 270 HV en el material en estado en bruto de colada, se incrementó hasta 670,2 HV en la zona fundida, propiciado por la formación de la fase sigma y la disminución de la tenacidad y el alargamiento.

## Referencias bibliográficas

- ASKELAND, D. & PHULÉ, P. 2010. Ciencia e ingeniería de los materiales, Cengage Learning Editores, 4ª ed., p. 341. México.
- BECKITT, F. & CLARK, B. 1967. The shape and mechanism of formation of  $M_{23}C_6$  carbides in austenite. *Acta Metallurgica* 15(2): 113-129.
- CALLISTER, D. 2007. Materials Science and Engineering: An Introduction, 7th ed. N.Y.
- FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I.; CORREA-SUÁREZ, R. & ALCÁNTARA, D. 2014. Junta de soldadura disímil de la aleación HK-40 y del hierro fundido 24. *Ingeniería Mecánica* 17(2): 98-107.
- FERNÁNDEZ-COLUMBIÉ, T.; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I.; ALCÁNTARA-BORGES, D.; SALAZAR-PREVAL, A. & ABAD-BROCARD, A. 2016. Caracterización microestructural de uniones soldadas de acero AISI 316L en tuberías. *Minería y Geología* 32(1): 60-75.
- GARIN, J.; MANNHEIM, L.; CISTERNAS, V. & HÉCTOR, M. 2006. Caracterización microestructural de uniones soldadas de aceros refractarios fundidos. CONAMET/SAM.
- GIANETTO, J.; FAZELI, F. & CHEN, Y. 2014. Microstructure and toughness of simulated grain coarsened heat affected zones in X80 pipe steels, 10th International Pipeline Conference, Calgary, Canada.
- GONCALVES, C. 2006. Estimation of heat source and thermal efficiency in GTAW process by using inverse techniques. *Journal of Materials Processing Technology* 172(16) 42-51.
- GONZÁLEZ-CABRERA, O.; GÓMEZ-PÉREZ, C.; PERDOMO-GONZÁLEZ, L. & VÁZQUEZ-BADILLO, E. 2017. Comportamiento de la resistencia al desgaste entre depósitos obtenidos con electrodos simple y doblemente recubiertos. *Soldagem & Inspeção* 22 (1): 87-98.
- HARO, S.; LÓPEZ, D. & VELASCO, A. 2000. Microstructural factors that determine the weldability of a high Cr- high Si HK40 alloy. *Materials Chemistry and Physics* 66(6): 90-96.

KOTECKI, D.; SIEWERT, T. WRC-1992. 1992. Constitution diagram for stainless steels weld metals. *Welding Journal* 71(5): 181-191.

LILJEDAHL, C.; ZANELATO, O. & FITZPATRICK, M. 2010. The effect of weld residual stresses and their redistribution with crack growth during fatigue under constant amplitude loading. *International Journal of Fatigue* 32(3): 735-743.

MADHUSUDAN, G. & SRINIVASA, R. 2009. Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless-steel electron beam and friction welds. *International Journal of Advance Manufacturing Technology* 45(5): 875-888.

WHITTAKER, M.; WILSHIRE, B. & BREAR, J. 2013. Creep fracture of the centrifugally cast super austenitic steels, HK40 and HP40. *Materials Science and Engineering A* (580): 391-396.