

ANÁLISIS DE FALLA POR CORROSIÓN BAJO TENSIÓN EN LA TUBERÍA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

Carlos Alberto López C.

Magister en Gestión Tecnológica, Investigador proyecto PGM, Universidad EAFIT. Medellín, Colombia.
Email: dalpe99@yahoo.com

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados del análisis de las causas de falla por corrosión bajo tensión de los compensadores de dilatación de la tubería de acero inoxidable de un intercambiador de calor que opera a temperaturas entre 70 °C y 900 °C, donde se presentó una falla en algunos de los compensadores que se manifestó por agrietamiento de los mismos. Se realizaron ensayos de composición química, microscopía óptica y SEM. Con base en los resultados obtenidos se concluyó que la falla por agrietamiento se debió al fenómeno de corrosión bajo tensión, que a su vez se produjo por la sensibilización del acero inoxidable, debido a la exposición a las altas temperaturas de trabajo y su fluctuación a otras más bajas. Como resultado del análisis para prevenir otra posible falla de este tipo, se recomienda el empleo de aceros inoxidables de menor contenido de Carbono y con estabilizadores de carburos como el Niobio o Titanio.

Palabras clave: Aceros inoxidables, corrosión bajo tensión, intercambiador de calor, precipitación de carburos, análisis de falla.

Recibido: 14 de septiembre de 2013. Aceptado: 20 de Noviembre de 2013.
Received: September 14th, 2013. Accepted: November 20th, 2013

STRESS CORROSION FAILURE ANALYSIS IN THE PIPE OF A HEAT EXCHANGER

ABSTRACT

This paper presents the analysis and results of the stress corrosion failure causes in expansion joints of a stainless steel pipe heat exchanger that operates at temperatures between 70 °C and 900 °C, where the failure that occurred in some compensators was manifested by cracking thereof. Assays of chemical composition, optical microscopy and SEM were performed. Based on the obtained results it was concluded that the failure by cracking was due to stress corrosion cracking, which in turn was caused by the sensitization of stainless steel, in response to exposure to high operating temperatures and fluctuation to lower temperatures. As a result of the analysis to prevent another possible failure of this type, the use of stainless steels of lower carbon content and carbide stabilizers such as niobium or titanium is recommended.

Keywords: *Stainless steels, stress corrosion cracking, heat exchanger, carbides precipitation, failure analysis.*

1. INTRODUCCIÓN

El análisis de las causas de falla es una técnica efectiva para explorar los posibles factores que pueden contribuir a la falla o deterioro de un material. Entre las causas se pueden encontrar los errores de tipo humano, problemas de los materiales y aspectos de diseño, entre otros. En los análisis de falla, se trata entonces de que las causas sean adecuadamente identificadas y se aprendan lecciones de los incidentes, de tal forma que diferentes tipos de acciones correctivas y preventivas puedan ser desarrolladas para evitar la recurrencia del problema [1].

La adecuada selección de aceros o materiales en general para una aplicación específica involucra una relación entre la eficiencia que se desea obtener a determinadas condiciones de operación y el valor de los equipos, incluyendo materiales, procesos de fabricación, reemplazo y los costos de inactividad. De esta forma, actualmente se seleccionan los aceros más adecuados, de acuerdo con un riguroso estudio de las condiciones de trabajo, donde se tienen en cuenta los ciclos térmicos, las propiedades requeridas para trabajo a altas temperaturas, la resistencia mecánica, la degradación química y el medio al cual está sometido [2].

Las fallas de servicio en máquinas y estructuras, incluso las repentinas, se han experimentado en diferentes industrias y equipos con una gran variedad en la intensidad en los daños y consecuencias, de ahí que los análisis sistemáticos de las causas de falla han generado información valiosa para diseñadores, fabricantes y usuarios de los equipos, lo que ha permitido incorporar diversas soluciones técnicas y de esta forma prevenir nuevos inconvenientes en los sistemas previamente estudiados.

En general, los materiales pueden fallar por las siguientes razones principales: El material se encuentra sometido a un medio ambiente que supera su diseño, se trató de una inapropiada selección de este para las condiciones de diseño y operación, el material ha resultado defectuoso y se presenta un diseño inapropiado [3].

La corrosión siempre ha sido un problema en diversos tipos de industrias como el refinamiento del petróleo o la industria química, por ejemplo, donde los elementos de los equipos de procesos

como las cámaras de los hornos, válvulas y las tuberías, entre otros, se encuentran frecuentemente operando a diferentes condiciones de temperatura, presión y en ambientes altamente corrosivos. Por esta razón son empleados principalmente aceros resistentes a las altas temperaturas y a la corrosión, como los aceros inoxidable austeníticos, sin embargo en ambientes con la presencia de cloruros y sulfuros de Hidrógeno (H_2S) y una alta temperatura, se producen picaduras y el agrietamiento por corrosión bajo tensión que son a menudo asociados con este tipo de operaciones [4].

El agrietamiento por corrosión bajo tensión designa a una falla bajo la acción combinada de la corrosión y la presencia de esfuerzos residuales o aplicados. La trayectoria de la grietas pueden ser intergranulares o transgranulares, lo cual depende del tipo de metal y del medio corrosivo. La falla resulta entonces de la aplicación de repetidos y fluctuantes esfuerzos en un medio corrosivo, que usualmente se caracteriza por una corta vida útil de los materiales o equipos [5].

En la literatura científica y técnica se reportan interesantes estudios sobre fallas en materiales y equipos por el agrietamiento por corrosión bajo tensión, como es el caso de la falla de los tubos de acero inoxidable de un intercambiador de calor en una planta de fertilizantes, los cuales se fracturaron en un corto periodo de tiempo [6]. Al realizar el análisis se verificó que el material cumplía especificaciones y que la causa de la grietas de corrosión bajo tensión fue la presencia de cloruros en el sistema, en conjunto con la presencia de esfuerzos y el trabajo a alta temperatura. La propuesta de solución fue el empleo de un material con mayor resistencia a la aparición de grietas de corrosión bajo tensión por la presencia de cloruros, como son los aceros inoxidable dúplex UNS S31500 y S31803.

Se reporta también un caso similar al estudio llevado a cabo en este trabajo con la falla por agrietamiento por corrosión bajo tensión en una junta de expansión de una tubería de Acero Inoxidable 321 para el transporte de gases, que presentó fugas a las tres semanas de su instalación, la cual operaba a una presión de 260 psi y una temperatura de 810 °C-850 °C [7]. La causa principal de la falla fue el agrietamiento por corrosión bajo tensión inducida por la presencia de cloruros en el agua empleada para la prueba

hidrostática y que quedaron atrapados en los pliegues de la junta de expansión.

Este estudio de materiales y de las causas de falla se refiere a un equipo intercambiador de calor, que cuenta con unos elementos denominados compensadores, los cuales tienen como función permitir la expansión térmica y contracción del cilindro y los tubos que conforman este equipo, que se emplea para precalentar el aire que ingresa para los gases de proceso. Estos son esencialmente productos de combustión como monóxido de carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, acetileno de dióxido de sulfuro y agua, saturados con negro de humo.

El aire ingresa por la parte superior del intercambiador a una temperatura de aproximadamente 70 °C y es precalentado por los gases de proceso, los cuales entran a la tubería del intercambiador por la parte inferior de este a una temperatura aproximada de 900 °C–1000 °C. El aire precalentado sale por la parte inferior del intercambiador a una temperatura entre 650 °C–900 °C.

La falla consistió en el agrietamiento en diferentes puntos de varios compensadores de la tubería del intercambiador de calor, el cual se representa con un esquema del sistema termodinámico en la figura 1.

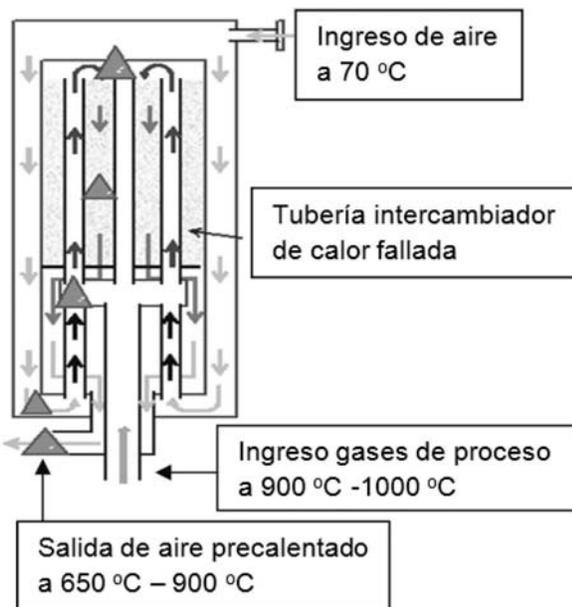


Figura. 1. Esquema del sistema termodinámico del intercambiador de calor.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras examinadas con los distintos ensayos de materiales corresponden a un compensador y una sección en forma de anillo del mismo, como el que se muestra en la figura 2, las cuales fueron extraídas de una zona cercana a la falla y cortadas por el proceso de corte con chorro de agua con el fin de evitar alterar las propiedades del material.



Figura. 2. Compensador y parte del anillo de este sobre el cual se realizaron las distintas pruebas para el análisis de falla. Se seleccionó el que visualmente presentaba un mayor deterioro.

Se llevaron a cabo los siguientes ensayos a las muestras seleccionadas del compensador y el anillo:

- Composición química: Realizado en Espectrómetro de Emisión Óptica Marca Shimadzu, Modelo Oes 5500.
- Análisis químico semicuantitativo: Efectuado a la muestra y realizado en Espectrómetro de

Fluorescencia de Rayos X marca Thermo modelo Optim`X.

- Análisis metalográfico: De cada material recibido, se cortaron muestras para análisis y embebidas en baquelita se las pulió a grado espejo luego, atacadas con Agua Regia se las observó al microscopio y se registraron todos aquellos aspectos de más relevancia. Las mediciones de grano se realizaron según las normas ASTM E112. Mediciones y capturas de imagen, mediante Sistema de Análisis de Imagen Nis Elements de NIKON.
- Ensayo en microscopio electrónico de barrido (SEM)
- Espectrometría de energía dispersiva de rayos X (EDS)

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Composición Química

Los resultados de la composición química de la muestra del compensador, se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados del análisis químico a la muestra denominada Compensador 1. La composición se da en porcentaje en masa.

ELEMENTO	PORCENTAJE
Carbono (C)	0.046
Silicio (Si)	0.308
Manganeso (Mn)	1.577
Azufre (S)	0.011
Fósforo (P)	0.028
Níquel (Ni)	9.972
Cromo (Cr)	17.452
Molibdeno (Mo)	0.430
Aluminio (Al)	0.016
Cobre (Cu)	0.318
Titanio (Ti)	0.313
Vanadio (V)	0.048

3.2 Resultados del análisis metalográfico del compensador 1

En las figuras 3 y 4 se observa que la muestra estudiada del compensador presenta precipitación de carburos, sensibilización del material y corrosión tanto intergranular, como transgranular.

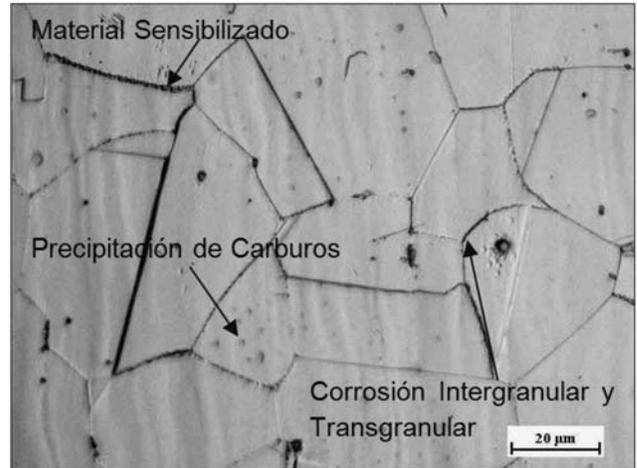


Figura 3. Detalles de la estructura, la cual presenta la precipitación generalizada de carburos. Otro efecto de la afectación térmica: el material está sensibilizado y hay inicio de corrosión intergranular.

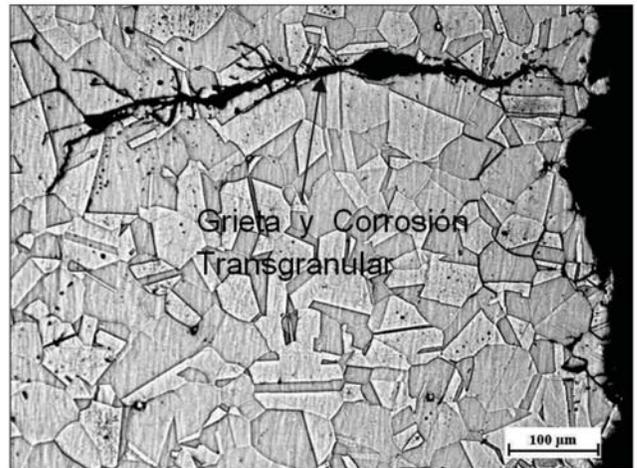
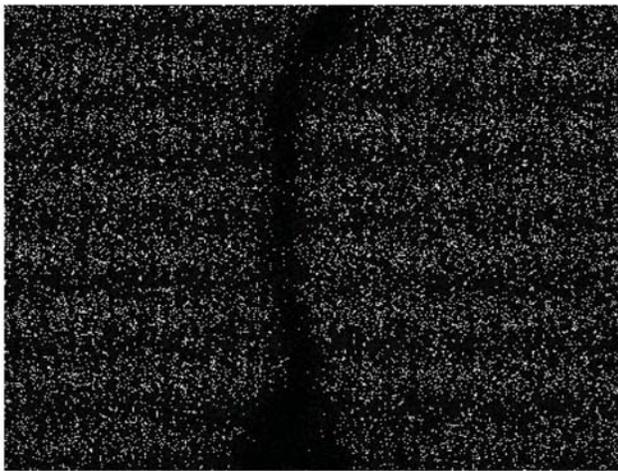
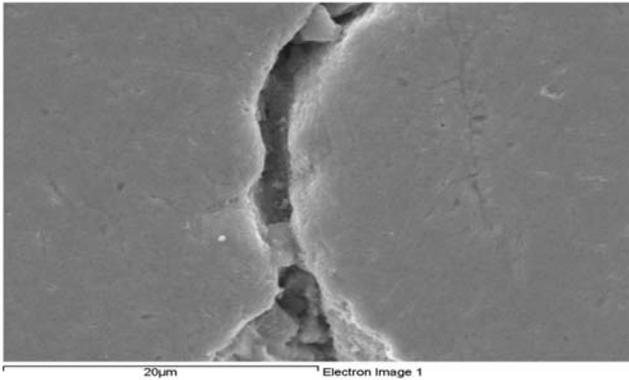


Figura 4. Grieta y corrosión transgranular iniciada en la cara exterior del material y originando grieta que se propagó hasta 1 milímetro de profundidad. A pesar de la sensibilización, las grietas no son intergranulares sino que son típicas de la corrosión bajo tensión, esto es, transgranulares y ramificadas.

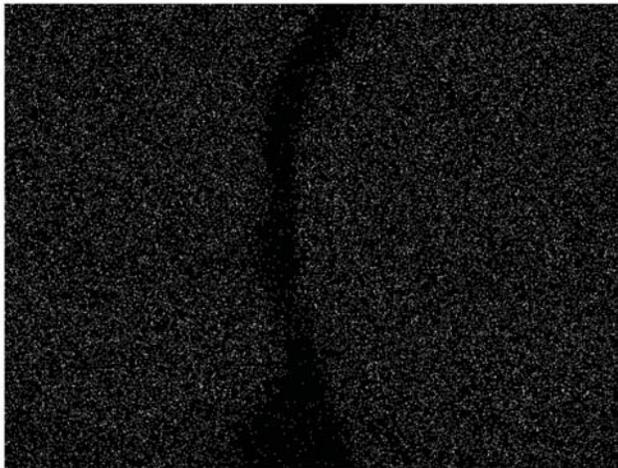
3.3 Resultados del análisis en microscopio electrónico de barrido SEM

Observación de la grieta y mapeo de composición química en la muestra denominada Cam -1 (Compensador 1).

Se puede observar que el Cromo, representado en la figura 5 como la zona roja y el Níquel, zona verde, se encuentran uniformemente distribuidos.



Cr Ka1



Ni Ka1

Figura. 5. Vista de la zona de la grieta con SEM

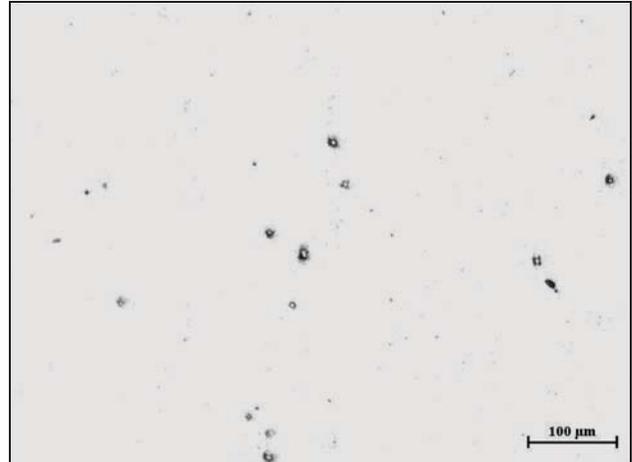


Figura. 6. Se presenta una variedad de inclusiones no metálicas de diferentes tamaños y morfologías.

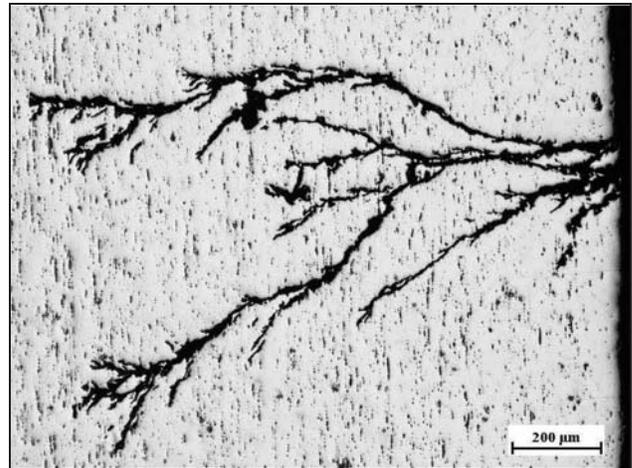


Figura. 7. Se muestran además algunas grietas con una longitud de hasta el 80% del espesor de la pieza.

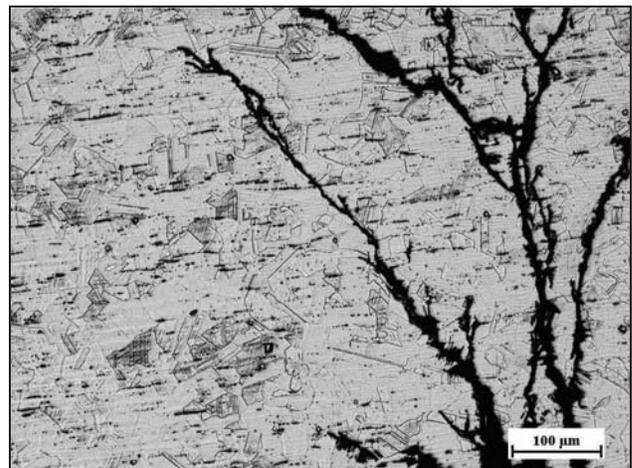


Figura. 8. El ataque ha revelado una estructura completamente austenítica con un tamaño de grano No. 6.5 y la presencia de grietas.

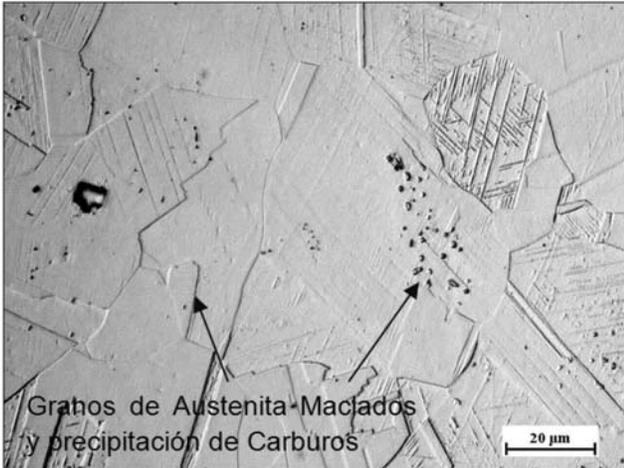


Figura. 9. Una observación detallada de ésta estructura, muestra que los granos de Austenita están maclados y en su interior se han precipitado algunos Carburos.

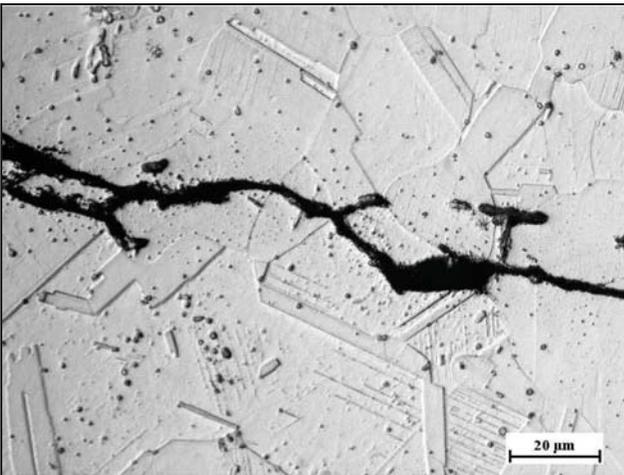


Figura. 10. Las grietas detectadas se propagan principalmente por el interior de los granos, mismas que se tipifican como Corrosión Bajo Tensión.

3.4 Resultados del análisis metalográfico del anillo

En estado pulido el material del anillo presenta variedad de inclusiones no metálicas de diferentes tamaños y morfologías (figura 6), además de algunas grietas (figura 7) con una longitud de hasta el 80% del espesor de la pieza.

El ataque ha revelado una estructura completamente austenítica (figura 8) con un tamaño de grano No. 6.5.

Una observación detallada de ésta estructura (figuras 9 y 10), muestra que los granos de austenita están maclados y sólo en su interior se

han precipitado algunos carburos; todas las grietas detectadas se propagan principalmente por el interior de los granos, las mismas que se tipifican como Corrosión Bajo Tensión.

4. CONCLUSIÓN

La resistencia a altas temperaturas de los aceros inoxidables con cromo mayor al 18% surge principalmente de la formación de una capa protectora de óxido de Cromo (Cr_2O_3) que protege al metal subyacente de oxidación adicional. La integridad de la adherencia y la naturaleza protectora de esta, sin embargo, depende de diferentes variables de los procesos de fabricación y operación tales como la presencia de cloruros (Cl), azufre (S), la temperatura y presión. Además, los cambios de ciclos térmicos frecuentes del proceso en los equipos, así como los apagados y arranques de operación, afectan de manera significativa la estabilidad de esta capa. A temperaturas por encima de $950\text{ }^\circ\text{C}$, la capa de óxido de Cromo no es protectora debido a la disociación en trióxido de Cromo (CrO_3), lo que conduce a la difusión de otros elementos constitutivos. La operación a temperaturas superiores a $950\text{ }^\circ\text{C}$ por lo tanto, puede causar el daño de la capa de Cr_2O_3 , dando como resultado problemas de corrosión en el material [8].

En las aplicaciones particulares de equipos que funcionan a altas temperaturas, como la combustión de carbón, la formación de procesos corrosivos se puede deber a diferentes factores: la composición de materiales procesados, la naturaleza de los depósitos que se generan, la composición de los gases, las temperaturas de operación. Debido a que esto ha sido un problema recurrente de fallas en equipos sometidos a trabajos a altas temperaturas y en particular con cámara de combustión con carbón donde se generan entre otros, productos con diferentes tipos de cenizas, las cuales pueden tener un mayor efecto corrosivo en los materiales, algunos investigadores [9] propusieron el estudio de 5 aceros inoxidables para determinar su respuesta a estas condiciones de operación, los cuales fueron los del tipo 304, 316, 321, 347 y la aleación 800H.

Una de las conclusiones del estudio se refirió a la complejidad de las relaciones entre algunas de las variables examinadas, como por ejemplo, el tipo de ceniza y la temperatura, que hizo difícil obtener un resultado definitivo sobre cuál de estos aceros se

comportó mejor ante los ataques corrosivos, por lo que los ensayos acelerados de laboratorio debían ser comparados contra otros ensayos de mayor duración o con respecto a pruebas de campo.

El agrietamiento por corrosión bajo tensión se define como la aparición de una grieta por la acción combinada de la corrosión y esfuerzos de tensión, los cuales pueden ser aplicados o tratarse de esfuerzos residuales. Este tipo de grietas pueden ser transgranulares o intergranulares, dependiendo del metal y el agente corrosivo, resultando en que las grietas crecen gradualmente durante un determinado periodo de tiempo hasta alcanzar un tamaño crítico, que hace que la concentración de esfuerzos provoque una repentina fractura frágil del material.

Por ejemplo, los aceros inoxidable austeníticos de la serie 200 y 300 se encuentran sujetos a agrietamiento de corrosión bajo tensión en la presencia de cloruros y sus haluros y bajo ciertas condiciones de esfuerzos aplicados [10].

Particularmente en muchos aceros inoxidable austeníticos, una operación a altas temperaturas puede causar sensibilización o la segregación del Cromo debido a la formación de carburos complejos de este elemento en los límites de grano. Debido a que el Cromo es el elemento que principalmente hace resistente a la corrosión al acero inoxidable, el agrietamiento por corrosión bajo tensión puede ocurrir a lo largo de los carburos en los límites de grano donde existe muy poco o nada de este elemento.

Cuando un acero inoxidable se enfría lentamente de 870 °C a 425 °C, se precipitan los carburos de Cromo en los límites de grano. La austenita en estos puede contener menos del 12% de Cromo, que es el mínimo requerido para producir una capa de óxido pasiva, por lo cual se dice que el acero se encuentra en estado sensibilizado, dado que las regiones de límite de grano son pequeñas y muy anódicas, se presenta una rápida corrosión de la austenita en los límites de grano [11].

En el caso particular del Compensador del equipo intercambiador de calor sobre el cual se realiza este estudio, los resultados del análisis metalográfico mostraron una grieta por sensibilización, donde se puede concluir que este fenómeno se presentó debido a que la temperatura de operación de 800°C y el contenido de carbono

del material con el que fue fabricado (0.046 wt%) son propicios para la aparición del mismo. Para subsanar el problema, la primera posibilidad sería emplear un acero de bajo Carbono como el SAE 304L, sin embargo, dada la temperatura de operación, existe la posibilidad de que el fenómeno de sensibilización se produzca de todas formas en el largo plazo debido a fenómenos de difusión, por tanto se sugiere el uso de aceros estabilizados con niobio o titanio tipo SAE 347 o SAE 321 [12].

5. RECOMENDACIONES

De acuerdo con la literatura técnica para evitar el fenómeno de sensibilización se deben seguir las siguientes recomendaciones [13]:

1. Usar aceros con contenidos de carbono inferior a 0.03 wt% para reducir la posibilidad de formar carburos de cromo.
2. Utilizar aceros con contenidos altos de cromo que eviten que, aun cuando se formen carburos de cromo, el contenido de este aleante que se encuentre cercano a los límites de grano no disminuya por debajo del 12 wt%.
3. Utilizar aceros estabilizados con Niobio o Titanio para fijar el carbono y evitar la formación de carburos de cromo.
4. Evitar la temperatura de formación de carburos, la cual se ubica en el rango de 425-870°C (este es el rango de temperaturas más conservador, algunos autores establecen el rango de 500-800°C), durante la manufactura y el servicio de piezas susceptibles a este fenómeno.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASM International. Failure Analysis and Prevention, Volume 11, 2002, pp. 15.
- [2] ASM International. Properties and Selection: Iron, Steel and High Performance Alloys Volume 1, 2002, pp. 1431.
- [3] V. Ramachandran, A.C. Raghuram, R.V. Krishnan, and S.K. Bhaumik. Failure Analysis of Engineering Structures. ASM International Methodology and Case Stories, Ohio, 2005, pp. 5-7.
- [4] Y.Y. Chen, Y.M. Liou, H.C. Shih. Stress corrosion cracking of type 321 stainless steels in simulated petrochemical process environments containing

hydrogen sulfide and chloride. *Materials Science and Engineering A* 407, 2005, pp. 114–126.

[5] ASM International. Atlas of stress-corrosion fatigue curves. Ohio, 1990, pp. 3.

[6] ASM International. Handbook of case histories in failure analysis, volume 1, 2 ed. Ohio, 1996, pp. 126-127.

[7] Handbook of case histories in failure analysis, volume 2, 2 ed. Ohio, 1999, pp. 222-224.

[8] Raghuvir Singh, J. Swaminathan, S. Paswan, V. Rajinikanth, I. Chattoraj. Investigations on high temperature corrosion of wire enameling oven, *Engineering Failure Analysis*, 18, 2011, pp. 1375-1387.

[9] Suneeta Shamanna, Harold H. Schobert. Fireside corrosion of selected alloys by ash recovered from coal-water slurry combustion, *Fuel Processing Technology* 53, 1997, pp. 133-156.

[10] Wulpi, J. Donald. Understanding how components fail. ASM International, 2 ed. Ohio, 1999, pp. 217-219.

[11] W.D. Callister, *Materials science and engineering an introduction*, seventh edition, Wiley, 2007. Pp. 644-645.

[12] D. Askeland, P. Phule, *The science and engineering of material*, Fifth edition, Thomson, 2005.

[13] W. F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Segunda edición, Mc Graw-Hill, 1992.