



Santiago GUTIERREZ DE SAIZ-SOLABARRIA es Ingeniero Industrial y Licenciado en Ciencias Químicas (Universidad del País Vasco). Desempeña el cargo de Jefe del Departamento de Laboratorios de Investigación y Desarrollo de Babcock & Wilcox Española, S. A., siendo además Profesor de Ciencia de los Materiales del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Universidad del País Vasco. Es Representante español en el Comité de Expertos de la CECA para la Investigación en el campo de "Aceros para alta temperatura y Recipientes a Presión", Miembro de ASM (American Society for Metals) y de NACE (National Association of Corrosion Engineers). Ha presentado varias publicaciones en revistas técnicas, tanto nacionales como internacionales y ha participado como ponente en numerosos Congresos. Trabajó como experto metalográfico, durante 5 años, en la Central Nuclear de Ascó (1977-1981).

DIAGNOSIS DE FALLO EN SERVICIO DE UN CALENTADOR DE AGUA DE ALIMENTACION DE BAJA PRESION EN UNA CENTRAL NUCLEAR ESPAÑOLA

S. GUTIERREZ

En el presente trabajo se va a diagnosticar el porqué del fallo en servicio sufrido por un calentador de agua de alimentación y de baja presión acaecido en una Central Nuclear Española en el año 1988. Para ello se van a caracterizar muestras representativas de los tubos fallados, tanto química, como física y metalúrgicamente.

INTRODUCCION

El calentador afectado presenta los siguientes parámetros de operación al 100% de carga máxima (punto de diseño):

- Vapor de extracción.
 - Caudal de entrada: 201.549,5 kg/h.
 - Entalpía: 607,8 kcal/kg.
 - Presión: 13,2 kg/cm²
 - Temperatura: 191°C.
- Entrada de drenaje del calentador inmediato con presión superior.
 - Caudal de entrada: 345.841 kg/h.
 - Entalpía: 199,3 kcal/kg.
 - Presión de la fuente: 26,9 kg/cm²
 - Temperatura de la fuente: 196°C.
- Entrada de drenajes a los recalentadores (1.ª etapa).
 - Caudal de entrada: 72.956 kg/h.
 - Entalpía: 236,2 kcal/kg.
 - Presión de la fuente: 28,4 kg/cm²
 - Temperatura de la fuente: 230°C.
- Entrada de drenajes al reparador de humedad.
 - Caudal de entrada: 252.188,5 kg/h.
 - Entalpía: 194,8 kcal/kg.
 - Presión de la fuente: 13,3 kg/kg.
 - Temperatura de la fuente: 191°C.
- Salida de drenajes.
 - Caudal de salida: 872.535 kg/h.
 - Entalpía: 194,2 kcal/kg.
 - Temperatura: 194,2°C.

Se detectan fugas en varios tubos al realizar la prueba neumática. Una posterior inspección por "Eddy Current" muestra pérdidas de espesor asimismo en varias filas de tubos, siéndolo de forma acusada en la intersección con las placas soporte 5, 6 y 9. Desmontando la válvula de seguridad e introduciendo a través de ella una sonda de fibra óptica, se confirman acusadas pérdidas de espesor, así como rotura total de tubo entre las placas 7 y 8. La rotura se presenta transversal total a 490 mm. de la placa 8, localizada en la parte superior exterior del haz tubular y en la zona de conexión de un venteo. La longitud de vano entre placas es de 1.004 mm.

La citada conexión de venteo es considerada, en el diseño del calentador como tal, presentando un $\varnothing = 50,8$ mm. y carencia de placa deflectora o impacto. Posteriormente se modifica a $\varnothing = 101,6$ mm. y se hace entrar en caudal de drenajes (agua-vapor) de 27.759 kg/h. procedente de los MSR, no protegiéndose el haz tubular mediante chapa impacto. Teniendo en cuenta el pequeño diámetro de la conexión y el elevado caudal de drenajes, el fluido adquiere una elevada velocidad (177,3 m/s.) incidiendo, obviamente, sobre los últimos tubos del haz, una elevada carga cinética.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El estudio lo vamos a realizar sobre una muestra de tubo de la última fila del haz sobre el cual incide el fluido de drenajes.

INSPECCION VISUAL

La muestra de tubo tiene una longitud de 490 mm., un diámetro exterior de 16 mm. y un espesor de pared de 1 mm. Presenta

rotura transversal total, por ambos extremos, de bordes paralelos y sin extricción. Se observan zonas friccionadas por el exterior del tubo, de morfología longitudinal convergente y, como consecuencia de ello, el espesor del tubo se presenta irregular. Se asocia rotura y agrietamiento longitudinal localizados en la zona de máximo desgaste. Tienen una longitud de 65 mm. y la zona de máximo desgaste una longitud de 180 mm. y una cuerda de 5 mm. Los labios de esta rotura enrojecen de forma flechada siguiendo una de las generatrices del tubo. Las cinco zonas de desgaste que se observan en el exterior del tubo presentan la misma morfología: longitudinales, en

forma de triángulo isósceles donde la base se ubica en la rotura principal; la base y la altura del citado triángulo son variables, observándose rotura y agrietamiento longitudinal en la de máximo desgaste. El total de la superficie desgastada se presenta marcada con rayas transversales paralelas entre sí y a la rotura principal.

A 80 mm. del borde de la rotura principal se observa una zona brillante de morfología "teja" donde pensamos incide la vena líquida de drenajes, así como una proyección de soldadura a 20 mm. del extremo.

El extremo opuesto al de rotura principal que se encontraba encastrado a la placa

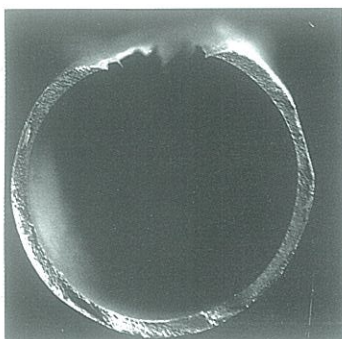
soporte se presenta distorsionado y de espesor irregular. Son evidentes entallas, mordeduras, abultamientos y zonas de resquebrajamiento. A 45 mm. de citado extremo se observa una zona oscura de longitud 30 mm. y afectando a los 360° del tubo.

En las fotografías 1 a 6 (F I) anexas se puede observar lo comentado.

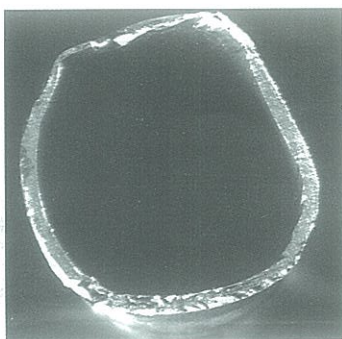
ANÁLISIS QUÍMICO DE COMPOSICIÓN

Utilizando las técnicas instrumentales de emisión atómica ICP y chispa, obtenemos:

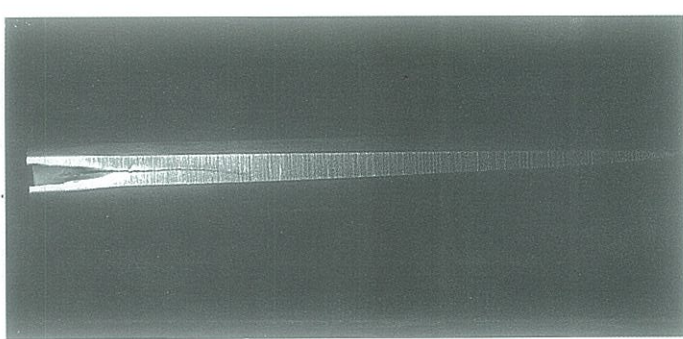
F I



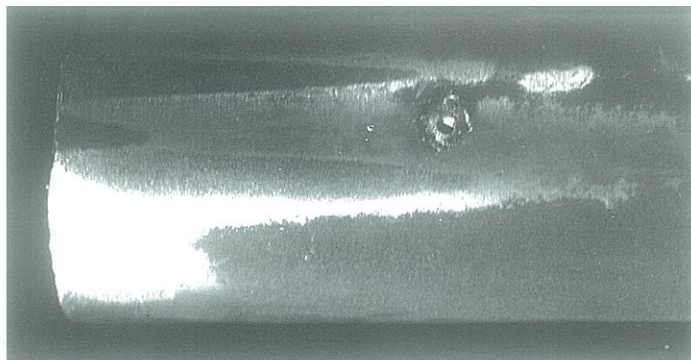
n/s 1.—Rot. principal. Estado de recibo



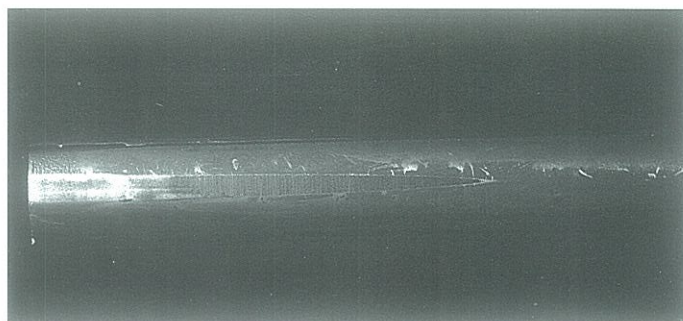
n/s 2.—Ext. encastrado en placa soporte



n/s 5.—Zona de máximo desgaste



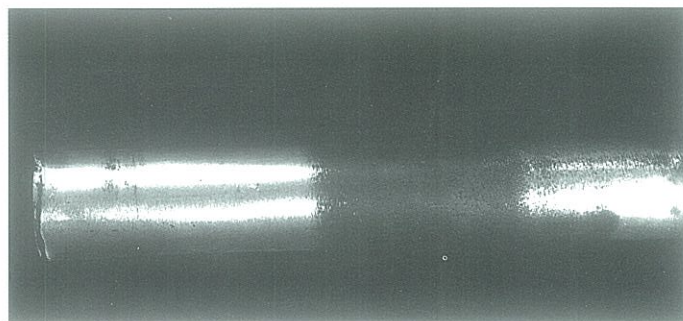
n/s 3.—Proyección de soldadura



n/s 6.—Otra zona de desgaste



n/s 4.—Incidencia del fluido de drenajes



n/s 7.—Zona oscura

C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)
0,03	1,81	0,40	0,028
S(%)	Cr(%)	Ni(%)	Mo(%)
0,017	18,01	10,28	0,20

composición que cumple con la calidad ASTE SA 688 Typ 304L especificada.

ANÁLISIS FÍSICO Y METALÚRGICO DE CONSTITUCIÓN

La observación microscópica de diferentes probetas metalográficas obtenidas tanto en sentido longitudinal como transversal y en todas las zonas del tubo comentadas en la inspección visual, nos manifiesta lo siguiente:

— La estructura se corresponde con una distribución uniforme de granos equiaxiales y finos de austenita, donde es evidente la presencia de maclas. No se observa precipitación de carburos, fase intermetálica sigma ni cualquier otro compuesto perjudicial. La estructura se presenta libre de cualquier defecto físico o estructural. Evaluado el tamaño de grano mediante análisis de imagen, observamos que se corresponde con el n.º 10 de ASTM. La estructura aquí comentada es consecuencia de un correcto tratamiento térmico. El acero se presenta limpio, con un contenido normal en microinclusiones.

— La superficie de fractura de la rotura principal se presenta granular fina, de bordes paralelos y sin extricción asociando rotura y agrietamiento longitudinal localizado en la zona de máximo desgaste. La rotura principal es transversal.

— La morfología de las cinco zonas de desgaste es de triángulo isósceles, donde la base es cuerda de la circunferencia de rotura principal y el vértice opuesto a la base se encuentra en una de las generatrices del tubo y alejado de la rotura principal. El espesor del tubo en la zona de máximo desgaste es de 0,1 mm. Toda la zona desgastada se encuentra rayada circunferencialmente.

— La zona de incidencia de la vena líquida de drenajes presenta morfología "teja" de aspecto brillante, ubicándose en la superficie exterior del tubo. No se corresponde con ninguna de las zonas de desgaste. La morfología es típica de impacto de una vena líquida de alta velocidad en una superficie curva, como lo es la exterior del tubo.

— La superficie de fractura de la rotura transversal total de la zona del tubo encastrada en placa soporte se presenta de morfología similar a la de la rotura principal, con la diferencia de que aquí se observan zonas de abultamiento con extricción y fractura de resquebrajamiento, así como la presencia de entallas mecánicas. El extremo de rotura se encuentra ligeramente expansionado.



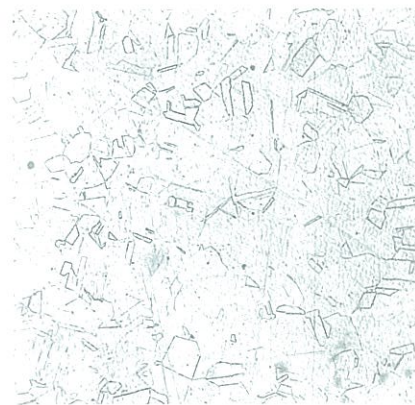
n/s 1. Rotura principal. Austenita 200X



n/s 2. Rotura en encastre. Austenita 200X



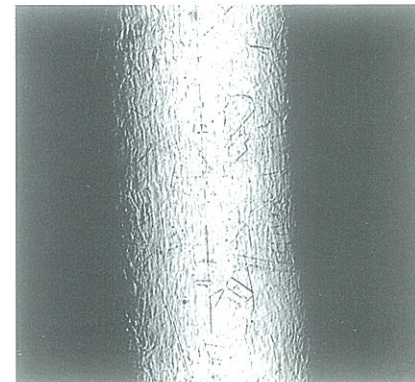
n/s 3.—Impacto líquido de drenaje. Austenita 200X



n/s 4. Zona oscura. Austenita 200X



n/s 5.—Idem a n/s 4. Total espesor 100X



n/s 6.—Máximo desgaste espesor 0,1 mm. Austenita

F II

— Los 30 mm. de zona negruzca, que afectan a los 360° del tubo, y que se encuentra localizada cerca del extremo de encastre, se presenta uniforme y con ausencia de defectos físicos o estructurales; esto último es aplicable, asimismo, a la zona que contiene la proyección de soldadura y que se encuentra localizada cercana a la rotura principal y en la misma franja-generatriz de impacto del líquido de drenajes. Esta proyección es el típico pegote o desprendimiento de metal aportado en alguna zona vertical superior y cercana. En las micrografías 1 a 6 (F II) se puede observar lo comentado.

CONCLUSIONES

Basándonos en lo anteriormente expuesto, podemos decir que:

— El tubo presenta unas características de limpieza, composición y estructura que se corresponden con la calidad especificada, en estado de correcto tratamiento térmico. No se observa defecto físico o estructural alguno que haya podido contribuir, mediante algún mecanismo determinado, a la incubación y propagación de fisuración-agrietamiento, abocando éste a la rotura, ni producir en servicio el fallo del calentador de agua de alimentación.

Pasa a la pag. 36

— Entendemos que el mecanismo de fallo ha sido el siguiente: Parte del caudal de drenajes procedente de los MSR, de 27.759 kg/h., en estado de vena líquida en equilibrio con vapor, ambos de agua, al hacerlo entrar al calentador por una conexión diseñada como venteo de $\varnothing = 50,8$ mm. inicialmente y modificada a $\varnothing = 101,6$ mm. posteriormente, adquiere una elevada carga cinética de 177,3 m/s. e incidirá directamente sobre el haz tubular al carecer la citada conexión de placa deflectora. Así las cosas, y teniendo en cuenta los 1.004 mm. de distancia entre placas, la longitud del tubo correspondiente a este vano vibra, con una frecuencia de vibración variable como consecuencia de fluctuaciones de la carga cinética. Esta vibración incubada en el vano de las placas 7 y 8 se propaga al total de la longitud del tubo del calentador hasta que el tubo adquiere una frecuencia de vibración que le es propia como consecuencia de su calidad, espesor, encastre en placas y configuración geométrica.

El tubo flexando en el vano de las placas 7 y 8 desarrolla un mecanismo de fatiga incubando fisuración y abocando a rotura transversal total por la zona de máxima amplitud de onda que tiene como nodos las citadas placas. En la longitud del tubo encastrada y constreñida en placas

soporte se desarrollará un mecanismo de resonancia por vibración debido, principalmente, a las ligaduras físicas de la placa sobre la propagación del movimiento de ubicación del tubo que dará lugar al incubado de fisuras por fatiga y que en servicio se propagan a grietas que dan lugar a la rotura transversal total por la zona de encastre.

- El resquebrajamiento que presenta la superficie de fractura del extremo encastrado indica que en sinergesis con el mecanismo de fatiga por vibración resonante, el tubo gira parcialmente, en principio, y totalmente después de roto. La zona oscura cercana a este extremo, así nos lo confirma y el que se encuentre localizada a 45 mm. del extremo se debe a que el tubo se ha desplazado sobre su generatriz por efecto retráctil.
- Las zonas desgastadas que presenta la superficie exterior del tubo son producidas por el roce o fricción con los tubos adyacentes del haz. En principio, el desgaste es producido por el tubo que vibra sin romperse y posteriormente por el flexado y cabeceo del tubo roto. El que las máximas anchuras de las cinco zonas desgastadas (base del triángulo isósceles) se localicen en el borde de rotura principal se debe a que la máxima flecha de flexión se encuentra en la zona de

rotura, como es obvio. El que la magnitud de las zonas de desgaste sean distintas se debe a la configuración geométrica del haz tubular por la cual friccionará más con unos tubos que con otros.

- El agrietamiento y fisuración longitudinal que asocia la rotura principal y que se localiza en la zona de máximo desgaste es producido por la resistencia disminuida frente a los esfuerzos exigidos en la vibración, debido al reducido espesor del tubo (0,1 mm.) en la zona. El rayado transversal indica que el tubo gira circunferencialmente mientras fricciona con los tubos colaterales.
- El tubo, vibrando con la frecuencia que le es característica, friccionará con los colaterales y les transmitirá aquella, con lo cual, por reacción en cadena, el calentador en su conjunto entrará en resonancia.

SOLUCION

Evitar la incidencia directa sobre el haz tubular del caudal de drenajes colocando la placa deflectora y rediseñando el diámetro de la conexión para disminuir la carga cinética, o bien desviar el caudal de drenajes a la cámara de "flashing" del calentador. Se adoptó esta última.