

FRACTURA FRÁGIL DE UN GANCHO DE GRUA

Y. Torres, J. M. Gallardo y J. Domínguez

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla, Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales
Avda. Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla.

E-mail: ytorres@us.es

Tfno: 95 448 73 04

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es discernir las causas que originaron la fractura en servicio de un gancho de una grúa. En el estudio de este accidente se incluye: 1) el resumen y análisis de las particularidades inherentes a las normas UNE-EN que rigen la fabricación y el uso de este tipo de dispositivo, 2) el análisis metalográfico, químico, y fractográfico, así como 3) el comportamiento mecánico en términos de perfil de durezas *Vickers* en la sección transversal e intradós, resistencia mecánica a la tracción, y energía de fractura. La inspección visual y microestructural revelan la presencia de un cordón de soldadura situado en la superficie y de una grieta que crece desde esa zona hacia el interior del material, respectivamente. El análisis de la superficie de fractura indica la presencia marcada de rasgos característicos de una rotura frágil (clivaje y fractura transgranular). El acero no aleado y de bajo contenido en carbono presenta un contenido relativamente bajo de aluminio (< 0,025 %) y elevado de nitrógeno no combinado (> 0,0075 %). Los resultados permiten señalar al envejecimiento por deformación (atmósfera de *Cottrell*) como la causa de la fragilidad del material, ocurriendo la fractura a partir de una grieta generada en la zona afectada por el proceso de soldadura al que fue sometido el gancho.

ABSTRACT

The scope of this work is analyzing the causes of an accident. Fracture surface examination (visual, optical and electronic examination), metallographic and chemical analysis and mechanical properties determinations (microhardness, strength-strain, and fracture energy) were carried out. Chemical analysis of the steel showed that aluminium content was low (< 0.025 %) but nitrogen high enough (> 0.0075 %) as for strain-age embrittlement to occur. The combination of strain-age embrittlement and a welding defect (cracks) has been the primary cause of the brittle fracture.

PALABRAS CLAVE: Envejecimiento por deformación, gancho, fractura frágil.

1. INTRODUCCIÓN

En materia de política social, el artículo 118 A del tratado CEE estableció que los estados miembros procurarán promover la mejora del medio de trabajo para proteger la seguridad y la salud de los trabajadores. Disímiles son las leyes, normas, y técnicas encaminadas a prevenir los riesgos laborales, garantizando la seguridad e higiene del trabajo [1,2]. Particularmente, las normas UNE 58-509-79 (1979) [3], UNE-EN 1677-1 (2001) [4] y UNE-EN 1677-5 (2002) [5] recogen y describen los términos y requisitos a considerar en el diseño, fabricación, uso, y control de los ganchos de elevación. Su cumplimiento evitará la caída de la carga durante servicio, debido al fallo de éste (abertura significativa o rotura catastrófica), y el riesgo al que están expuestas las personas situadas en la zona de peligro. En este marco de ideas, el objetivo de este trabajo es discernir las causas que originaron la fractura en servicio de un gancho de elevación, lo que devino en la muerte en accidente laboral de un trabajador.

2. PARTICULARIDADES DE LAS NORMAS QUE RIGEN LA FABRICACIÓN Y EL USO DE GANCHOS DE ELVACIÓN

El acero debe fabricarse mediante un procedimiento eléctrico o mediante un proceso de afinado mediante oxígeno. Estar completamente calmado, y tener un tamaño de grano austenítico de 5 o más fino (según la norma UNE-EN-ISO 643:2004 [6]). Su composición química debe contener al menos un 0,025 % de Al y el de nitrógeno no superar el 0,0075 %¹. El contenido de S y P no debe superar el 0,03 %.

El gancho debe ser forjado o estampado en caliente, generalmente en una sola pieza. Se deben eliminar cualquier tipo de rebaba, aristas vivas, defectos superficiales perjudiciales incluidas las posibles grietas

¹ Los aceros con un contenido bajo en aluminio (< 0,025 %) y elevado de nitrógeno (> 0,0075 %), y que además han experimentado, bajo condiciones de servicio, una deformación plástica o permanente, son susceptibles a fragilizarse al calentarlos a temperaturas bajas (~100-300 °C).

(obtener una superficie lisa). Además, deben controlarse las cotas iniciales e incluso durante la vida en servicio del mismo. En caso de necesitar mecanizado, hay que evitar los concentradores de tensiones (radios de acuerdo pequeños) ya que éstos son sitios críticos de inicio de la fractura. No se deben realizar labores de soldeo durante la fabricación de los ganchos, a menos que se asegure que tanto la zona donde se realiza la soldadura como la afectada por la temperatura no se encuentre sometida a carga, así como el acabado debe ser suave (redondeado).

Los ganchos de elevación deben ser sometidos a los siguientes tratamientos térmicos: **1)** templado (por encima de AC₃) y revenido al menos a 475 °C durante una hora, **2)** normalizado (por encima de AC₃). No se autoriza que se realice ningún temple superficial en las partes de los accesorios que soportan la fuerza. Después del tratamiento térmico se debe eliminar la calamina.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Observación visual y macroscópica, evaluación de cotas

El examen inicial del gancho (figuras 1 y 2), revela la presencia de daño superficial generalizado: rebabas, golpes, restos de óxido y la presencia de un cordón de soldadura en uno de los bordes.



Figura 1. Imagen de la parte del gancho fracturada. Se incluye una escala graduada en cm.

Precisamente, el origen de la fractura (zona brillante en la figura 2b) se sitúa en la superficie original del gancho, adyacente al cordón de soldadura, según se deduce de la presencia de marcas de propagación emanando de dicho origen. También se aprecian restos de salpicaduras del material fundido en el proceso de soldadura al que fue sometido el gancho de elevación (figura 2c).

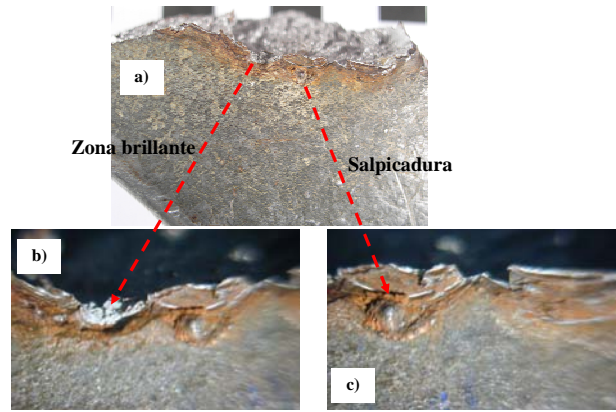


Figura 2. Detalles de la superficie y de los restos del cordón de soldadura.

Las dimensiones medidas del gancho y la estimación de su peso se han comparado con los teóricos (norma DIN 15401), permitiendo indicar que en el gancho siniestrado, las cotas no cumplen con las tolerancias permitidas en la norma: **1)** se ha producido un importante desgaste provocado por el roce con los medios de elevación como eslingas u otros, y **2)** se ha generado una deformación plástica por efecto de la elevación de cargas superiores a las que están permitidas suspender del gancho en condiciones de trabajo ordinario. En la figura 1 se observa cómo el círculo teórico de trazos rojos se transforma en una elipse representada en este caso con trazos de color azul.

3.2. Análisis químico de la composición

El análisis químico del acero se llevó a cabo con técnicas complementarias: espectrofotometría de emisión visible, y analizador de gases Leco, particularmente, para el contenido de N. En la tabla 1 se presenta la composición del acero con que fue elaborado el gancho y se señalan los elementos más indicativos de este acero o los que dan alguna información de las posibles causas de la rotura del gancho.

Tabla 1. Composición del acero empleado en la fabricación del gancho de elevación.

| Elementos | C | Mn | Si | S | P | Cr | Ni |
|-----------------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| Composición (%) | 0,18 | 0,76 | 0,16 | 0,03 | 0,01 | 0,16 | 0,12 |
| | Mo | Al | Cu | Sn | N | Fe | |
| | 0,02 | 0,017 | 0,21 | 0,04 | 0,011 | 98,2 | |

Los resultados del análisis, como se esperaba, indican que es un acero no aleado y de bajo contenido en carbono, calmado al aluminio. El contenido de S se encuentra en el límite marcado por norma, el 0,03 %. Sin embargo, lo más representativo e importante es el hecho que tanto el contenido de aluminio como de nitrógeno no cumplen con los valores requeridos en la norma (mínimo un 0,025 % y máximo un 0,0075 %, respectivamente), aspectos que indican que el acero era un claro candidato a fragilizarse debido al

envejecimiento por la deformación a la que ha sido sometido el gancho de elevación durante su vida en servicio (ver figura 1). En el estado actual del gancho, se puede indicar que no presenta calamina (óxido de hierro), no está galvanizado (no hay presencia de zinc), ni está protegido con pintura.

3.3. Análisis metalográfico

El análisis metalográfico se realizó sobre una sección mecanizada en un plano perpendicular tanto a la superficie de fractura del gancho como a la superficie original de éste y el corte se realizó justo en el límite del defecto con apariencia brillante y que como se ha citado anteriormente en el apartado 3.1 ha sido el origen de la fractura catastrófica de dicho elemento de elevación. En la figura 3 se muestra una imagen de dicha sección en la que se aprecia la presencia de grietas que parten desde la superficie del gancho y que crecen hacia el interior del mismo. Debe remarcarse que la morfología de las grietas (bordeando y/o bifurcando entre los granos del material), es típica de las grietas originadas durante la solidificación (agrietamiento por licuación).

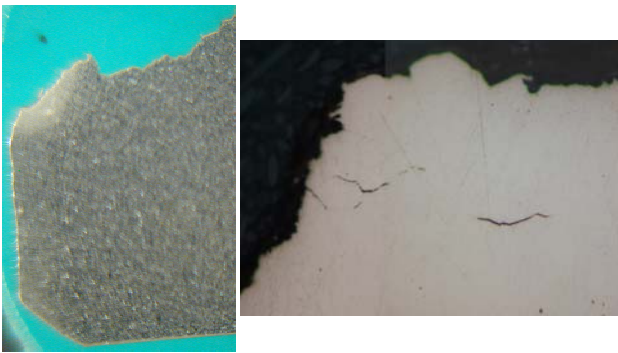


Figura 3. Micrografía de la sección perpendicular a la superficie de fractura y en el límite del origen de la fractura.

Finalmente, se atacó químicamente (Nital al 5 %) la superficie de la muestra (figura 4). Particularmente, en la figura 4c se aprecia la estructura de ferrita más perlita típica de un acero bajo en carbono con un tratamiento de normalizado. El tamaño de grano es de 6, según UNE-EN-ISO 643:2004. Más cerca del origen de la rotura, la estructura varía (figura 4a), apreciándose a mayores aumentos una estructura globulizada y, coincidiendo con la zona agrietada, una estructura de grano afinado, típica de la zona afectada por el calor (ZAC) de una soldadura en este tipo de aceros (figura 4b) y en la que se ha superado los 800 °C. Debe precisarse que dicha zona de grano fino se encuentra limitando con la superficie de fractura del gancho y que en ella el tamaño de grano disminuye a un valor de 8 por efecto del ciclo térmico de la soldadura. A medida que nos acerquemos al cordón de soldadura (presente en la contraparte del gancho fracturado, pero que no ha sido suministrada), es decir, zonas en las que se alcanzaron temperaturas mayores, irán apareciendo otras estructuras características de la ZAC de este tipo

de aceros. Esto permite indicar que la rotura no se ha iniciado en un defecto situado en la intercara entre el metal fundido y el metal base, sino en la ZAC que haya alcanzado una temperatura comprendida entre unos 850 y 1000°C. En esta parte de la ZAC los defectos típicos son agrietamientos por: 1) temple o hidrógeno, y 2) licuación. El agrietamiento por temple vendría acompañado de la aparición de una estructura típica martensítica y que no se observa en la muestra². Sin estructuras martensíticas de elevada dureza, el hidrógeno es generalmente inocuo. Por su parte, la susceptibilidad al agrietamiento por licuación puede calcularse relacionando el contenido de carbono, azufre y manganeso del acero. Para una relación manganeso/azufre de 25 el contenido máximo de carbono para evitar el agrietamientos es del 0,15 %. Se postula en consecuencia, que la grieta de la que partió la rotura del gancho era de las llamadas de "licuación".

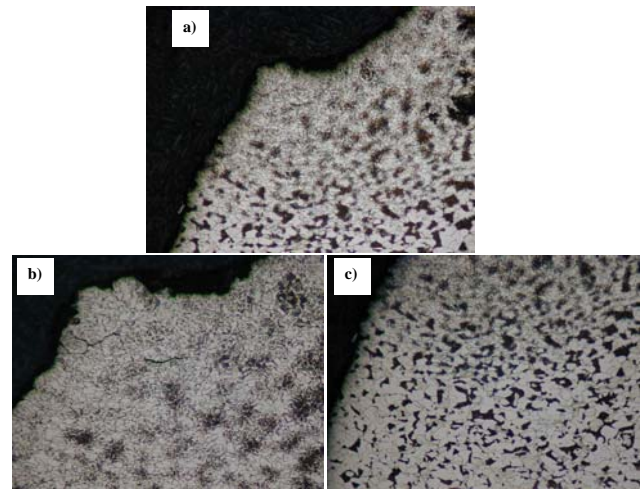


Figura 4. Microestructura de la sección perpendicular a la superficie de fractura y en el límite del origen de la rotura.

3.4. Propiedades mecánicas

En este trabajo el comportamiento mecánico se evalúa en términos de: 1) perfil de durezas Vickers (en la sección transversal y longitudinal del gancho), 2) resistencia mecánica a la tracción, y 3) energía de fractura.

3.4.1. Perfil de dureza Vickers

Se midió la dureza Vickers con una carga de 49 N. El primer estudio consistió en realizar una serie de medidas de dureza en toda la sección transversal del gancho y para dos distancias diferentes con respecto a la superficie del intradós del gancho (1 y 6 mm, aproximadamente). Los resultados obtenidos, arrojan una dureza de 220 ± 13 y 212 ± 11 , para 1 y 6 mm,

² Teniendo en cuenta el contenido de carbono relativamente bajo, la ausencia de elementos de aleación y la cantidad de calor aportada a la soldadura (a la vista de la longitud del cordón que se observa en la figura 2a), es asumible que no se haya producido dicho temple en el enfriamiento posterior a la soldadura.

respectivamente, indicando un ligero endurecimiento del material en todo el borde del gancho.

Por su parte, el segundo estudio consistió en medir la dureza en la dirección perpendicular a la superficie de fractura (dirección de las grietas de licuación). Los resultados obtenidos, indican una dureza en la zona interior del gancho de 191 ± 13 (ferrita más perlita), y en la ZAC de 259 ± 5 , (globulizada y con un tamaño de grano menor e igual a 8), indicando en este caso, un endurecimiento del material en la zona afectada térmicamente durante el proceso de soldadura al que se sometió el gancho de elevación.

3.4.2. Resistencia mecánica

La resistencia mecánica se evaluó en términos de resistencia a la tracción (norma UNE-EN-10002-1 [7]). El ensayo se realizó, en una máquina electromecánica Instron, en control de carga y a una velocidad de aplicación de la misma de 400 N/s hasta la rotura. Se empleó una probeta cilíndrica de 6 mm de diámetro aproximadamente (mecanizada a partir del gancho) y se define el límite de fluencia para un alargamiento del 0,2 %. En la figura 5 se muestra la gráfica correspondiente al ensayo de tracción, añadiéndose los valores de la tensión, y el alargamiento cuando se alcanza la rotura del material, así como la imagen de la muestra ensayada. La reducción de área fue de 57,6 %. Los resultados obtenidos corresponden al comportamiento esfuerzo-deformación típico de un acero de bajo contenido en carbono, arrojando valores apropiados y coherentes para límite de fluencia, la resistencia a la rotura y la ductilidad.

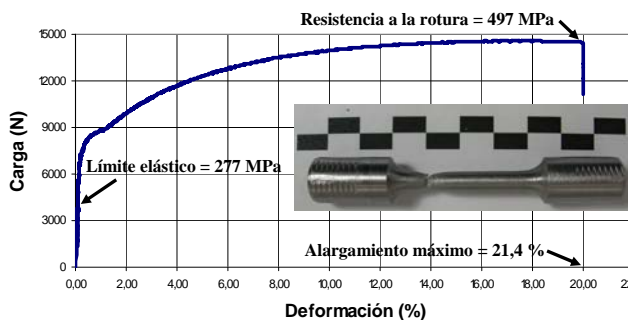


Figura 5. Comportamiento esfuerzo-deformación del acero investigado.

3.4.3. Tenacidad de fractura

La determinación del factor de intensidad de tensiones crítico bajo condiciones de deformación plana (tenacidad de fractura, K_{Ic}) se evaluó con una probeta compacta de tracción (Compact Tension, CT), aplicando la norma ASTM E-399 [8]. Una vez mecanizada la muestra se introdujo en la punta de la entalla una grieta, aguda y pasante, aplicando esfuerzos cíclicos (20000 ciclos) en una máquina de ensayos servohidráulica Instron. Finalmente, una vez prefisurada la muestra, se somete a tracción hasta la rotura con una velocidad de aplicación de la carga de 4000 N/s,

registrándose *insitu* la variación de la carga en función de la abertura de la grieta (medida en la boca de la entalla, COD) mediante un extensómetro. En la figura 6 se muestra la relación P-COD para el acero investigado y se añade la imagen de la probeta ensayada. El ensayo realizado no se encuentra bajo condiciones de deformación plana ya que el tamaño de la probeta era insuficiente y el frente de la grieta no es plano. Además, la relación entre P_{max}/P_Q es mayor que 1,1 y por tanto, no tiene sentido calcular la tenacidad de fractura a partir del valor de P_Q , ya que como se observa la fractura ocurre a valores de P_{max} muy superiores. En estos casos, materiales con un comportamiento elastoplástico, se recomienda evaluar la energía disponible para la fractura, J, como el producto entre el CTOD (área bajo la curva P-COD), el límite elástico y una constante que depende del estado tensional en la punta de la grieta. La deformación plástica alrededor de la grieta y la forma de la curva P-COD indica que el material, al igual como ocurrió en el ensayo de tracción, experimenta un comportamiento dúctil característico de aceros no aleados de bajo contenido en carbono.

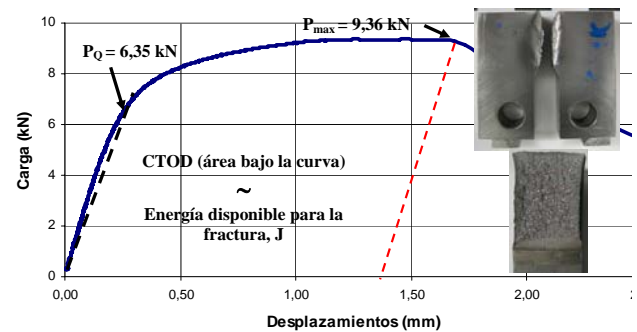


Figura 6. Curva P-COD para el acero investigado.

3.5. Análisis fractográfico

El análisis detallado de la superficie de fractura del gancho se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Dicho estudio permite evaluar y discernir con mayor precisión el origen, tamaño y morfología del defecto que causó la rotura, así como los rasgos característicos del tipo de fractura que experimentó el gancho bajo las condiciones de servicio (impacto, carga o sobrecarga) e historia (defectos superficiales, calentamientos locales inherentes a la soldadura y/o acumulación de deformación). En la figura 7 se presentan imágenes de la superficie de fractura del gancho, observándose rasgos característicos e inequívocos de que ha ocurrido una fractura frágil (presencia de clivaje, fractura transgranular y grietas secundarias).

A diferencia del comportamiento frágil del acero en la gran parte de la sección de rotura, en la figura 8 se muestra la micrografía correspondiente a la superficie de fractura de la ZAC. En toda esta zona se observa una rotura con rasgos claros de fractura dúctil como son la presencia de microcavidades u hoyuelos. Esta observación concuerda con el hecho de que el acero en

esa zona globalizada es más duro y tenaz (tiene un tamaño de grano menor). En el seno de esta zona, las grietas de licuación originadas durante el proceso de soldadura (figura 4b), crecen establemente al ser sometido el gancho a los esfuerzos mecánicos inherentes a las condiciones de servicio (elevación de cargas).

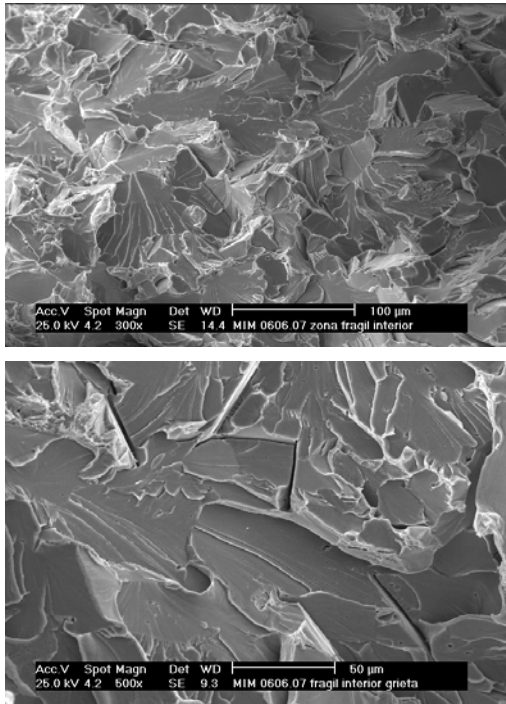


Figura 7. Fractura frágil: presencia de clivaje, fractura transgranular y grietas secundarias.

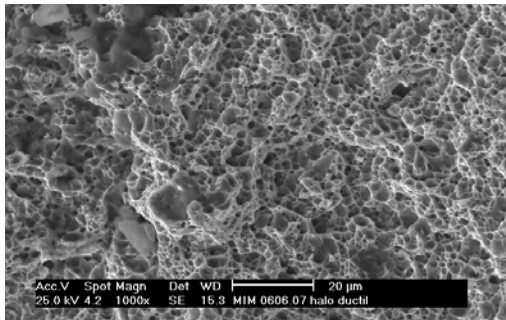


Figura 8. Presencia de fractura dúctil (presencia de microcavidades u hoyuelos) en la zona afectada por el calor.

En la figura 9 se muestra la superficie de fractura correspondiente al ensayo de tenacidad de fractura (probeta CT). En la misma se aprecia, a partir del frente de entalla, una primera zona asociada al proceso de prefisuración bajo cargas cíclicas (presencia de estrías de fatiga). A continuación, sería de esperar un crecimiento subcrítico de la grieta hasta alcanzar la condición crítica, además de la presencia en toda la fractura de microcavidades. Sin embargo, en dicha imagen se aprecia que dicho crecimiento estable ocurrió formando marcados e intercalados escalones, unos de

apariencia más rugosa y con rasgos de fractura dúctil (hoyuelos) y otros de aspecto brillante y presencia de clivaje y rotura transgranular (fractura frágil). Con ayuda del análisis de imágenes, se contabilizaron las correspondientes fracciones de área, resultando en un 47% y 53% de frágil y dúctil, respectivamente.

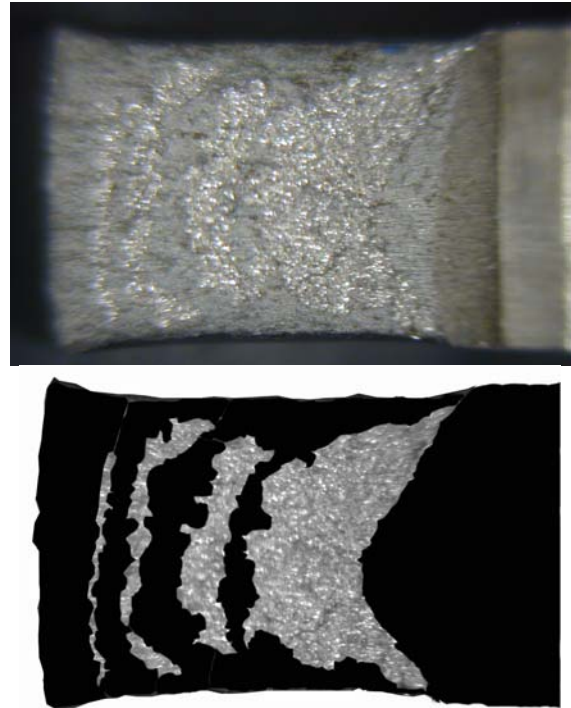


Figura 9. Superficie de fractura asociada al ensayo de tenacidad de fractura. Fracciones de área.

4. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Los principales resultados de los ensayos realizados en esta investigación son los siguientes:

- 1) El gancho de elevación no cumplía determinados requisitos exigidos por las normas UNE que rigen el uso de este tipo de dispositivos, entre los que destacan:
 - a) insuficiente contenido de aluminio (menor que 0,025 %) y a la vez una proporción de nitrógeno elevada (mayor que 0,0075 %), situación que marca a este acero como candidato a resultar fragilizado por envejecimiento por deformación,
 - b) marcado daño superficial generalizado (rebabas, golpes, restos de óxido y la presencia de un cordón de soldadura), y
 - c) marcado desgaste y deformación, con el consecuente incumplimiento de las cotas del gancho (fuera del rango de tolerancias).
- 2) Se observan grietas en la zona afectada por el calor (ZAC) de la soldadura, con morfología propia del llamado “agrietamiento por licuación”. Los contenidos relativos de carbono, manganeso y azufre del acero se encuentran fuera de los límites que evitan la aparición de dicho agrietamiento.
- 3) En la superficie de rotura existen evidencias que señalan el origen de la rotura en la ZAC de la

soldadura. En esta zona, que alcanzaría durante el soldeo una temperatura por encima de 500 °C y habría resultado recristalizada, la rotura tiene aspecto dúctil al observarla mediante microscopio electrónico de barrido (MEB).

4) La superficie de rotura muestra de manera generalizada una propagación frágil de la misma, con mecanismos de tipo clivaje, lo que se atribuye a una fragilización por envejecimiento tras la deformación.

5) La superficie del intradós del gancho tiene durezas superiores a las medidas en el núcleo del gancho, lo que sería consecuencia de la intensa deformación de esta zona por rozamiento y acción de los medios auxiliares de elevación.

6) Las propiedades mecánicas evaluadas lejos de la zona de rotura (esfuerzo de rotura = 497 MPa, límite de fluencia = 277 MPa, alargamiento máximo = 21,4 %, y “tenacidad” de 44,3 MPam^{1/2}) muestran valores que son “característicos” de un acero de la composición aquí determinada, en estado normalizado.

De acuerdo a las observaciones anteriores, la sucesión de hechos conducentes a la rotura fueron los siguientes:

1) El gancho fue fabricado con un acero cuya composición hacía posible el que pudiera experimentar tanto agrietamientos por licuación, como envejecimiento tras la deformación.

2) El uso del gancho produjo un deterioro superficial intenso, así como una deformación plástica o permanente por encima de lo que indican las normas. Esta deformación causó un endurecimiento del material.

3) La ejecución de un cordón de soldadura, coincidiendo con la zona en el gancho que se encuentra sometida al esfuerzo máximo de tracción, indujo varios efectos:

a) Generó grietas por licuación en la (ZAC) de la soldadura,

b) Permitió la regeneración de la estructura endurecida por deformación en aquellas zonas cercanas al cordón que alcanzaron temperaturas superiores a 500 °C, y

c) Indujo el envejecimiento tras la deformación de la sección restante del gancho, que alcanzó durante el soldeo temperaturas del orden de 200°C, pero no afectó a partes del gancho más lejanas al cordón.

4) Las grietas presentes en la zona afectada por el calor en la soldadura, en presencia de un esfuerzo mecánico externo (elevación de carga) experimentaron un crecimiento estable adentrándose en la zona donde sí cobra importancia el esperado fenómeno de fragilización.

5) Cuando la combinación entre el tamaño de una de las grietas mencionadas y el esfuerzo externo aplicado alcanzó un valor crítico (tenacidad a la fractura) el gancho experimentó una fractura catastrófica súbita (rotura inestable).

En resumen, los resultados permiten concluir que el accidente se debió a la fragilización por envejecimiento tras la deformación [9-15] del acero utilizado y que la fractura frágil ocurrió a partir de una grieta generada en el material durante el proceso de soldadura al que fue sometido el gancho de elevación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer, la ejecución de la caracterización microestructural y de los ensayos mecánicos, a los técnicos de laboratorio Jesús Pinto (Y. Torres y J.M. Gallardo) y José Guareño (J. Domínguez).

REFERENCIAS

- [1] Cortés, J. M., “Ley de Prevención de Riesgos Laborales. Su Desarrollo complementario”, 3ª edición, Tébar, Madrid (2004)
- [2] Cortés, J. M., “Técnicas de Prevención de Riesgos Laborales. Seguridad e Higiene del trabajo”, 3ª edición, Tébar, Madrid (1998)
- [3] UNE 58-509-79, “Ganchos de elevación. Características generales”, (1979)
- [4] UNE-EN 1677-1, “Accesorios para eslingas. Accesorios de acero forjado, clase 8”, (2001)
- [5] UNE-EN 1677-5, “Accesorios para eslingas. Ganchos de elevación de acero forjado con lengüetas de seguridad”, (2002)
- [6] UNE-EN ISO 643:2004, “Acero. Determinación micrográfica del tamaño de grano aparente”, (2004)
- [7] UNE-EN 10002-1, Materiales Metálicos. Ensayos de Tracción. Parte 1: Método de Ensayo a Temperatura Ambiente, (2002)
- [8] E 399-90, “Standard Test Method for Fracture Toughness of Metallic Materials”, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, (1990)
- [9] A.H. Cottrell, B.A. Bilby, Proc. Phys. Soc. A 62, 49 (1949)
- [10] J.D. Baird, Metall. Rev. 5, 1 (1971)
- [11] Faqian, L., Shuanlu, L., Helin, L., Changyi, Q., Jie, Z., Jiping, T., Jun, C., “Analysis of causes of casing elevator fracture”, Engineering Failure Analysis, 14, 606–613 (2007)
- [12] GB/T 4160-1984, “The experimental method for steel strain aging sensitivity (Charpy V impact testing) [S]”
- [13] Yokoyama Ken_Ichi, Nagumo Michihiko, “Brittle fracture initiation associated with the strain localisation in a heat-affected zone of a low carbon steel [J]”, Metall Mater Trans A; 29 (2):551–8 (1998)
- [14] Soenen, B., De, A.K., Vandeputte, S., De Cooman, B.C., “Competition between grain boundary segregation and Cottrell atmosphere formation during static strain aging in ultra low carbon bake hardening steels”, Acta Materialia 52, 3483–3492 (2004)
- [15] Dimitrmdies, C. A., Huang, Davidson, S. M., “Sem Cathodoluminescence Studies of Dislocation Recombination in Gap”, Solid State Electronics, 21, 1419-1423 (1978)