

Caracterización de la rotura del transportador sinfín de mineral laterítico sometido a altas temperaturas

Isnel Rodríguez González
Alberto Velásquez del Rosario
Tomás Fernández Columbié
José Nicolás Muñoz Gómez
Vladimir González Fernández

Resumen

El artículo presenta la caracterización metalográfica del acero austenítico AISI 321 del tubo del transportador sinfín, utilizado para el acarreo de mineral laterítico en la industria metalúrgica del níquel de tecnología Caron. Se hizo una investigación fractográfica, con técnicas de macro y microanálisis, que permitió comprobar la fractura por la propagación de grietas que surgen bajo la exposición prolongada a elevadas temperaturas (650-700 °C), así como aquellas debidas a defectos internos de fabricación. Para conocer la composición química del acero, revelar sus características intrínsecas y la morfología de las grietas que provocan la fractura, se emplearon muestras del acero sometido al proceso productivo y se realizaron ensayos destructivos a la temperatura de trabajo del transportador. El análisis de microdureza para la matriz metálica y los compuestos duros de carburo revelaron un valor elevado para estos últimos, que se comportan como concentradores de tensión cuando forman conglomerados.

Palabras clave

Análisis fractográfico, carburos, morfología de grietas, transportador sinfín.

Analysis of a failure of the laterite ore screw conveyor due to exposure to high temperatures

Abstract

This work presents a metallographic characterization of austenitic stainless steel AISI 321, which is the material of construction used in the pipe of the lateritic mineral screw conveyors operating in the nickel industries using Caron technology. A fractography was carried out by using macro and micro-analysis techniques; which allowed analyzing the fractures caused by spreading of cracks due to prolonged exposure to high temperatures (650-700 °C) in addition to manufacturing defects. Samples of steel used in the process were taken to determine the chemical composition and an optical microscopy was conducted to identify the intrinsic characteristics and the morphology of the cracks causing the rupture. Destructive testing trials were completed at the conveyor's operating temperatures. A microhardness testing for metal matrix and carbide hard compounds indicated high values for the latter elements, which act as stress concentrators when forming conglomerates.

Key words

Fractographic analysis, carbides, morphology of cracks, screw conveyor.

INTRODUCCIÓN

La fatiga térmica es un fenómeno que afecta los mecanismos inoxidables sometidos a altas temperaturas (Altenbach *et al.* 2004, Syed 2006). Los tubos del transportador sinfín utilizado por el proceso metalúrgico Caron y construidos de acero austenítico inoxidable, conducen el mineral laterítico a elevadas temperaturas, lo que ocasiona con frecuencia fracturas por fatiga. La distribución no uniforme de la temperatura a lo largo del tubo produce la expansión y contracción del acero inoxidable, dando lugar a tensiones térmicas cíclicas que condicionan el comienzo de la rotura por fatiga en el tubo del transportador.

Las tensiones térmicas son típicamente equi-biaxiales y de mayor valor en la superficie cargada; al mismo tiempo las tensiones locales elevadas pueden incrementarse como resultado de los concentradores (Zharkova & Botvina 2003). Si las mencionadas tensiones locales exceden las de fluencia del material, las térmicas residuales se elevan. Debido a las tensiones superficiales sobre la periferia, la fractura por fatiga térmica forma un mosaico como modelo de fractura de poca profundidad, conocido como fractura "piel de elefante". Algunas de las grietas, inicialmente poco profundas, penetran más en el material pudiendo crecer a través de la pared. Estos rasgos morfológicos la asemejan a la rotura por fatiga mecánica, lo que en ocasiones confunde a los especialistas en la toma de decisiones.

El comportamiento mecánico y fractográfico del acero AISI 321 en transportadores que operan bajo condiciones de elevadas temperaturas no ha sido suficientemente estudiado, por lo que el objetivo del presente trabajo es caracterizar la rotura del tubo de un transportador sinfín sometido a temperaturas en el rango de 500 a 780°C.

MATERIALES Y METODOS

Determinación de las propiedades mecánicas

Para determinar las propiedades mecánicas del AISI 321 sometido hasta 800 °C de temperatura se realizaron los ensayos de Kappich/Fisher, norma DIN 50 125, empleando para ello tres probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro para promediar los resultados.

Análisis químico

Para el análisis químico se tomaron ocho muestras (con tres réplicas cada una) en diferentes zonas del tubo del transportador y se comparó la composición del material utilizado en la fabricación de los tubos con la establecida por los estándares. Se empleó un espectrómetro cuántico de masa con electrodos de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Análisis de falla

Para verificar la rotura por fatiga térmica se realizaron ensayos destructivos y no destructivos en el tubo del transportador; el análisis de falla incluyó el examen fractográfico para la caracterización de las fracturas. El análisis de las macro y microgrietas se hizo mediante inspección visual, con lupa de 10 aumentos, y mediante técnicas de microscopía óptica de baja resolución, con el propósito de establecer la morfología y tipo de falla a elevadas temperaturas, y comparar las condiciones de operación de los elementos con los datos e informaciones disponibles de las propiedades físico-químicas y mecánicas de las aleaciones, teniendo en cuenta que las temperaturas y el tiempo de exposición provocan inestabilidades en la estructura metalúrgica de la aleación (García *et al.* 2007).

Selección y preparación de las muestras

Las muestras se tomaron de las zonas de fractura en tubos de distinta durabilidad, ocho en los de menor durabilidad y dos en los de mayor. El corte de las probetas se realizó con sierra mecánica o cortadora de cinta, bajo refrigeración, evitando que el calentamiento pudiese ocasionar alteraciones estructurales.

Para desbastar las muestras se utilizó papel abrasivo de diferentes grados (150, 280, 320, 400, 500, 800), colocados sobre discos giratorios, rotando la probeta 90 grados al pasar de un papel a otro, desbastando hasta borrar por completo las huellas del abrasivo anterior y lavando la probeta con abundante agua en cada operación.

El pulido permitió eliminar las marcas finas producidas en la última operación de desbaste y conseguir una superficie sin rayado y con

elevado brillo. Las muestras se trataron en una pulidora metalográfica tipo Rathenow-43, empleando paños de fieltro y una solución de pasta abrasiva de diamante con granulometría de 3 μm .

Luego de la preparación de las superficies, las probetas se lavaron con acetona para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir, cuidando de no frotar la superficie pulida. Posteriormente se limpiaron con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad.

Ataque químico

Las superficies de las probetas limpias se atacaron de manera independiente, durante 20 segundos, con beraja y agua regia. Posteriormente se lavaron con agua destilada para evitar la acción desmedida de los reactivos.

Análisis microestructural

Se empleó un microscopio óptico binocular dotado con portaobjeto giratorio e iluminador vertical, utilizando distintas combinaciones de objeto y ocular para obtener una imagen más precisa. Las probetas se montaron en una base con plastilina, asegurando una nivelación óptima.

La observación microscópica de la superficie analizada fue fotografiada para reconocer la presencia de inclusiones no metálicas, sulfuros, silicatos, aluminatos, óxidos, microporosidades, microgrietas, carburos, grafito y otros, así como defectos internos en el acero de los tubos del transportador una vez sometidos al proceso de explotación.

Análisis de dureza

La dureza del material da una idea de la resistencia mecánica de este; puede identificarse en dos direcciones fundamentales: dureza y microdureza. Los procedimientos para el ensayo de dureza y microdureza se realizaron según lo establecido por las Normas NC 10-56:86 y ASTM E 384-09. Para la dureza se empleó un durómetro Rockwell con penetrador esférico de acero templado, estableciendo tres mediciones en cada muestra, distanciadas a 1 cm. Para la definición de la microdureza se utilizó un microdurómetro, marca Pomo Metan P, con

penetrador piramidal de diamante y carga de 80 g, totalizándose 8 huellas para cada probeta (4 en la matriz y 4 en los carburos) y promediando los valores tanto en la matriz como en los carburos para determinar la dureza Vickers (Hv).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos de Kappich/Fisher revelaron que la resistencia mecánica del material es alterada por el efecto de la temperatura (Figura 1), con una disminución considerable de un 26 % del límite de proporcionalidad y las tensiones de rotura respecto a los valores del material a temperatura ambiente establecidos en las normas (Key to Steel 2006). Se observa además un comportamiento elástico no lineal antes de la rotura.

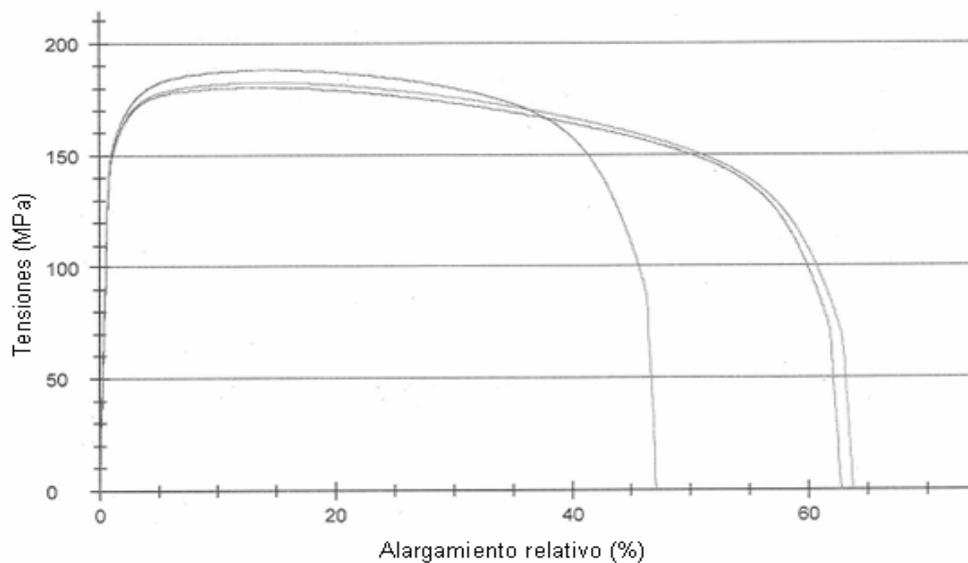


Figura 1. Curva tenso-deformacional del AISI 321 a 800 °C.

La composición química de las muestras (Tabla 1), según el promedio de tres análisis en puntos diferentes, estuvo dentro del rango establecido para la aleación, de acuerdo con las especificaciones (Key to Steel 2007) que corresponden con el acero AISI 321 (DIN 1.4541).

Tabla 1. Composición química promedio de las muestras

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti
Patrón	0,08	1	2	0,045	0,03	9-12	17-19	0	>0,40
Probetas	0,06	0,78	1,6	0,035	0,02	8,82	17,34	0,27	0,36

Dureza

Los resultados de las mediciones de dureza mostraron valores que varían desde HRB 80 hasta los HRB 89, para un valor promedio de HRB 83. Los valores más altos se encontraron en las muestras I-2; III-4; IV-2 y VI-4, las demás se mantuvieron entre HRB 80-86 (Figura 2), revelando inexistencia de fragilidad a nivel macroscópico.

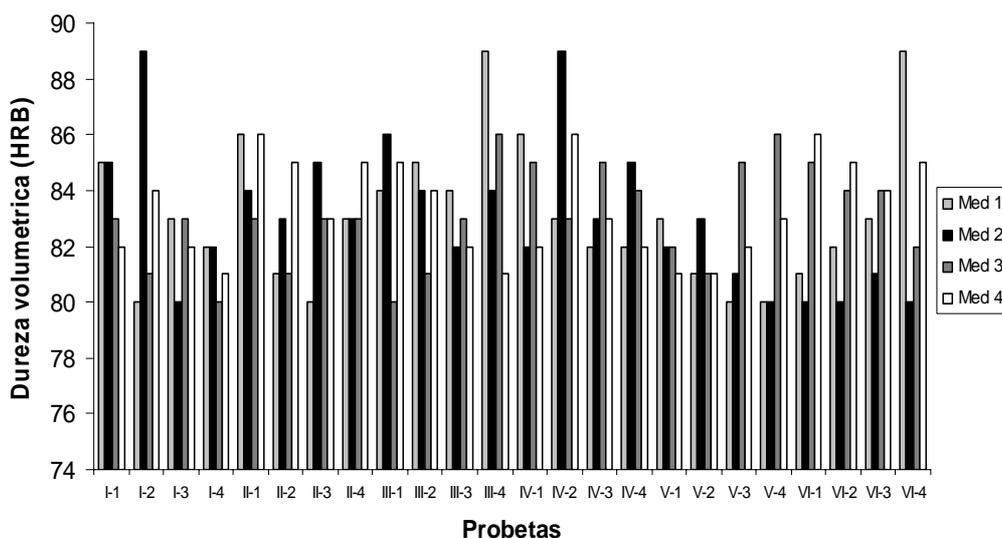


Figura 2. Comportamiento de la dureza en las muestras fracturadas.

Microdureza

La matriz metálica mantiene un patrón de microdureza casi constante con un valor promedio de 258 Hv, no siendo así en los carburos, que presentan mínimos de 821 Hv y picos de hasta 877 Hv (Figura 3); existe una gran diferencia entre ambos, observándose que la microdureza en los carburos toma valores hasta 3,2 veces mayores que en la matriz.

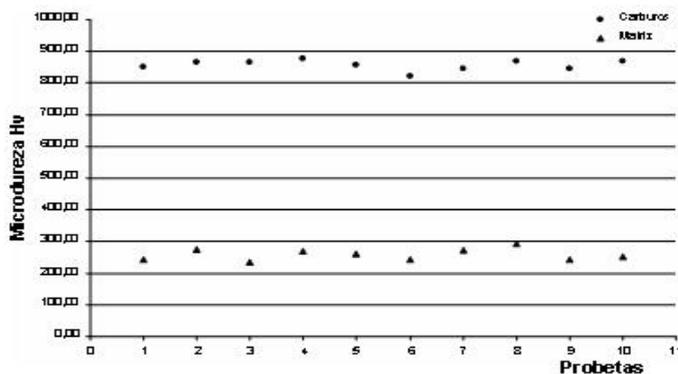


Figura 3. Comportamiento de la microdureza de los carburos respecto a la matriz.

Los valores de microdureza aseguran a la matriz buena plasticidad y capacidad para amortiguar la energía elástica del frente de ondas de la microgrieta que se propaga, evitando que la misma alcance el interior de los granos. Lo contrario pasa con las fases de carburos cuyos elevados valores indican una gran fragilidad y, por lo tanto, representan importantes focos de concentración de tensiones, además de una vía idónea para la propagación de las grietas.

Análisis microestructural

El análisis microscópico a 500x de muestras de metal fracturado y la comparación con el diagrama de Schaeffler revelan una estructura austenítica (Figura 4), presencia de inclusiones no metálicas (Figura 5) y picaduras (Figura 6) así como presencia de carburos (Figura 7) que precipitan de manera masiva, lo cual es consistente con resultados obtenidos por Spinosa *et al.* (2003) y García *et al.* (2007).

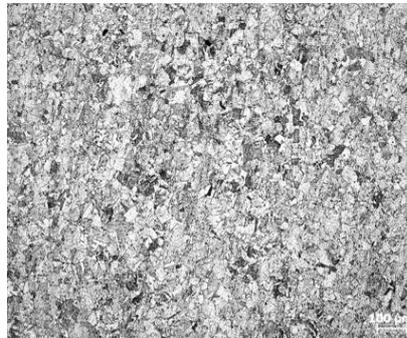


Figura 4. Estructura austenítica de muestra sometida a 750 °C.

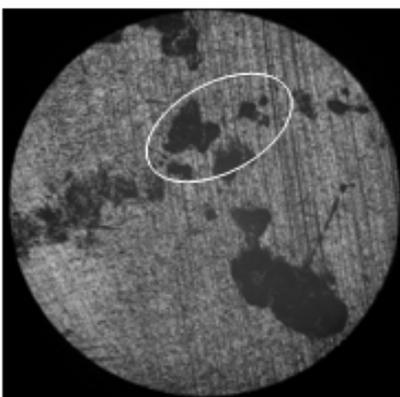


Figura 5. Inclusiones no metálicas (500x).

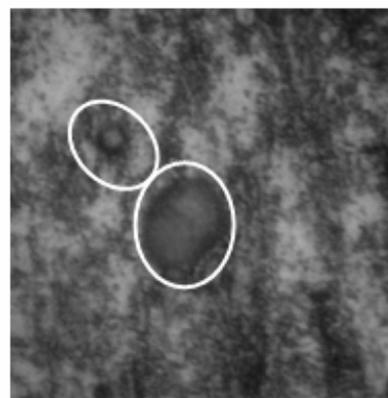


Figura 6. Picaduras (10x) .

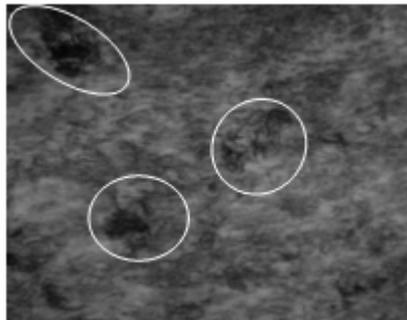


Figura 7. Formación de carburos (500x).

Examen fractográfico

La sección transversal del tubo no presenta indicios de deformaciones ni torceduras, sin embargo presenta agrietamientos tanto al nivel microscópico como macroscópico (Figura 8).



Figura 8. Tubo fracturado (cortesía Empresa Che Guevara-Moa).

La micrografía de la Figura 9 muestra el agrietamiento típico de aceros inoxidables austeníticos expuestos a elevadas temperaturas, lo que también ha sido reportado por Zharkova & Botvina (2003). La grieta se produce debido a defectos que aparecen en la estructura interna del material durante su proceso de obtención, como son carburos de cromo e inclusiones no metálicas. En estas zonas se forman superficies débiles que pueden romperse y generar fisuras bajo la influencia de las tensiones de trabajo.



Figura 9. Grieta resultante de defectos internos del acero (10x).

CONCLUSIONES

La rotura prematura de los tubos del transportador sinfín de mineral laterítico ocurre según el mecanismo de fractura dúctil con propagación de grietas, que surgen bajo la exposición prolongada a temperaturas en el rango $500\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 780\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La temperatura de trabajo del transportador favorece la formación de carburos con dureza 3,2 veces superior a la de la matriz metálica, lo que unido a la presencia de inclusiones no metálicas y picaduras hace que se comporten como concentradores de tensiones que dan lugar a la formación de grietas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Ingeniería de la Empresa "Ernesto Che Guevara" y a la TU-Clausthal de Alemania, por el valioso aporte y el oportuno financiamiento para los ensayos.

REFEERENCIAS

ALTENBACH, J.; ALTENBACHAND, H. & NAUMENKO, K. 2004: Edge Effects in Moderately Thick Plates under Creep Damage Conditions *Journal Technische Mechanik* 24(3-4): 254-263.

- GARCÍA, J.; VILLA Y RABASA, G.; HERNÁNDEZ, L. H. & CASTILLO, M. 2007: La precipitación de carburos intergraníticos y su efecto en las propiedades mecánicas de un acero inoxidable austenítico tipo 310. En: 8vo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. 23 al 25 de Octubre de 2007. Cusco. Colombia.
- KEY TO STEEL. 2006: Database developed by Key to Metals Task Force & INI International.
- SPINOSA, C.; MARENGO, J.; RUCH, M. & OVEJERO, J. 2003: Desarrollo de un Equipo para la Evaluación de Variaciones de Conductividad por Reluctancia Magnética. En: Pan-American Conference for Nondestructive Testing. Río de Janeiro, Brasil, 2 al 6 de junio de 2003.
- SYED, A. 2004: Accumulated Creep Strain and Energy Density Based Thermal Fatigue Life Prediction Models for S_nA_gCu Solder Joints. Electronic Components and Technology Components, Junio 3 de 2004 Conference Proceedings. 737 – 746.
- ZHARKOVA, N. & BOTVINA, L. 2003: Estimate of the Life of a Material under Creep Conditions in the Phase-Transition Theory. *Doklady Physics* 48(7): 379-381.

Isnel Rodríguez González

Ingeniero Mecánico MSc. Profesor Auxiliar. Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

irgonzalez@ismm.edu.cu

Alberto Velázquez del Rosario

Ingeniero Mecánico. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

avelazquez@ismm.edu.cu

Tomás Fernández Columbié

Ingeniero Mecánico. MSc. Profesor Asistente Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

tfernandez@ismm.edu.cu

José Nicolás Muñoz Gómez

Ingeniero Geólogo. Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular. Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

jnmuñoz@ismm.edu.cu

Vladimir González Fernández

Ingeniero Mecánico. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Departamento de Mecánica. Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría. Ciudad de la Habana.

vladimir@mecanica.cujae.edu.cu