Mecánica de Materiales

Ingeniantes

Estudio experimental de los efectos de la soldadura en pruebas de crecimiento de grieta en PTR de acero AISI 1020

RESUMEN: En este trabajo se presentan resultados de una investigación sobre la propagación de grietas por fatiga en lámina de acero estructural, sometida a un proceso de soldadura MIG. El estudio se realizó en el acero estructural utilizado en la fabricación de estructuras, de perfil tubular rectangular (PTR) de 2 x 1 pulg. y 2 mm de espesor, con y sin cordón de soldadura, debido a fallas que se detectaron en una estructura de un camión de pasajeros. El maquinado de las probetas diseñadas fue por medio de electroerosión por hilo. Se realizaron 12 pruebas de propagación de grietas por fatiga en material base y soldado. Los resultados muestran una detención de grieta en la zona afectada por el calor, requiriendo mayor amplitud del factor de intensidad de esfuerzos con un valor de 50 ΔK para que la grieta se propague de una manera estable hasta alcanzar una longitud de 23 mm para después terminar la prueba. Los resultados muestran que la combinación de microestructura y los esfuerzos residuales en la zona afectada por el calor son los que predominan en el comportamiento de la grieta en el material soldado.

PALABRAS CLAVE: Grieta, fatiga, esfuerzo, soldadura, lámina.



Colaboración

José Luis Ramírez Cruz, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco; José Emiliano Martínez Ordaz, Universidad Iberoamericana, Santa Fe

ABSTRACT: This paper presents results of research on the propagation of fatigue cracks in structural steel sheet, subjected to a MIG welding process. The study was conducted on structural steel used in the manufacture of structures of rectangular tubular profile (PTR) for 2 x 1 inch and 2 mm thick, MIG welded and non welded, due to failures that were detected in a structure of a passenger truck. The machining of the designed specimens was by means of wire EDM. 12 Samples were tested for fatigue crack propagation at the base material and welded metal. The results show a crack arrest in the heat affected zone (HAZ), requiring greater amplitude of the stress intensity factor with a value of 50 ΔK for propagate the crack in a stable manner until reaching a length of 23 mm to then finish the test. The results show that the combination of adequate microstructure and residual stress in the HAZ are those factors which can stop the advance of the crack in the weld material.

KEYWORDS: Crack, fatigue, stress, welding, sheet.

INTRODUCCIÓN

En una estructura de un autobús se han encontrado fallas por fatiga debido a las solicitaciones a que se ve sometida durante la operación cotidiana del autobús. Se detectó y ubicó el punto de inicio de la falla Figura 1. En este caso, las grietas se observan en los puntos donde el marco está soldado en forma de T, con los perfiles PTR horizontales. Las probetas ensayadas en esta investigación fueron obtenidas del elemento de acero estructural del cual están ensamblados los autobuses, que es un acero de bajo carbono.

Investigaciones previas, que han realizado pruebas de propagación de grietas en lámina soldada para determinar el cambio en la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos, I ΔK , en diferentes secciones de la zona alrededor de la soldadura [1], han concluido que la resistencia al crecimiento de la grieta disminuye cuando la relación de carga disminuye en la región de la soldadura, excepto en la zona afectada por el calor. Esto puede ser debido a la no uniformidad en la estructura cristalina causada por el sobrecalentamiento durante la aplicación de la soldadura.

Por otro lado, se ha reportado que un factor importante es el efecto que tiene el espesor del material a ensayar sobre la propagación de grietas por fatiga.

En otra investigación [2] se obtuvieron datos que sustentan la hipótesis de que la propagación de grietas es función del espesor del material y que está crece conforme el espesor del material crece.



Figura 1. Localización de la grieta en miembro estructural de un autobús.

El objetivo de este estudio es determinar el efecto de la soldadura en la propagación de grietas por fatiga en una lámina de acero de bajo carbono para saber si una grieta que inicia en la zona aledaña de la soldadura se propagara de una manera estable o no.

MATERIAL Y MÉTODOS

El material utilizado fue obtenido del perfil tubular. Se secciono para obtener las muestras para el análisis químico y para maquinar las probetas para las pruebas de tensión y de crecimiento de grieta.

La Tabla 1 muestra la composición química del acero estructural analizado.

Tabla I. Composición química del acero estructural original analizado (Acero AISI 1020).

%C	%S	%Mn	%P	%Si
0.1838	0.0082	0.4533	0.0089	0.0183

Metalografía

Para conocer la microestructura se tomó una muestra del material soldado, el cual se preparó con los procedimientos metalográficos para obtener una superficie pulida a espejo, después se atacó con Nital al 2% para revelar la microestructura.

Ingeniantes

Fabricación de las probetas para pruebas de tensión

Mediante el proceso de electroerosión por hilo, se fabricaron 16 probetas de PTR calibre 14, de acuerdo a la Norma ASTM E08 – 00 [3].

El promedio de las propiedades mecánicas del material, obtenidas en las pruebas de tensión se muestran en la Tabla 2.

PTR calibre (mm)	E(GPa)	Sy(MPa)	Su(MPa)
2.0	217	372	427

Geometría de probetas para mecánica de fractura. Las probetas empleadas son tipo CT (Compact Tension), cuya geometría se muestra en la Figura 2, y sus dimensiones son: ancho W = 50 mm y espesor B = 2 mm.

Todas las probetas fueron obtenidas de una misma chapa y fabricadas según las recomendaciones de la Norma ASTM E647-05 [4], con el proceso de electroerosión por hilo.

La Figura 2 muestra una probeta del material ensayado sin cordón de soldadura.

El maquinado de las probetas soldadas consistió en realizar el inicio de la entalla en el borde del cordón de soldadura, con el objetivo de generar la grieta en esta parte, las Figuras 3 y 4 muestran las probetas con cordón de soldadura.



Figura 2. Probeta para pruebas de fatiga sin cordón de soldadura.

Revista Ingeniantes 2018 Año 5 No. 1 Vol. 1



Ingeniantes

Figura 3. Entalla en el borde del cordón de soldadura de la probeta para fatiga.



Figura 4. Probeta para pruebas de fatiga con cordón de soldadura.

Condiciones para las pruebas de fatiga.

Para las pruebas se consideraron las siguientes condiciones:

Amplitud de carga = 1.757 kN Relación de cargas = 0.1 Carga máxima = 1.955 kN Carga mínima = 0.1955 kN Precarga = 1.075 kN.

Pruebas de fatiga

Las pruebas se realizaron de acuerdo a la Norma ASTM E 647-05 [4] a carga constante y a una frecuencia de 10 Hz en una máquina servohidráulica Instron 8801.

La longitud de grieta se midió considerando la función complianza dada en dicha Norma. El desplazamiento de abertura se midió con un extensómetro colocado en la cara frontal de la probeta.

Se realizaron 12 pruebas de velocidad de crecimiento de grieta:

Siete pruebas en probetas de 2 mm de espesor con 5 mm de ancho de entalla.

Cinco pruebas en probetas de 2 mm de espesor, incrementando 10 % la carga cada 20,000 ciclos.

Medición de esfuerzos residuales

Con el método de Hole-Drilling se identificaron y cuantificaron los esfuerzos residuales en un plano, cerca de la superficie de medición en el material analizado.



Figura 5. Aparato para realizar la prueba mediante el método Hole-Drilling y probeta instrumentada.

Se aplicó el método Hole-Drilling para determinar los esfuerzos residuales cerca de la superficie del cordón de soldadura, para esto se fijaron galgas extensométricas Figura 5 en la superficie de la lámina, se perforó un agujero en el centro de estas, y se obtuvieron las mediciones de los esfuerzos resultantes aliviados.

En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos de esfuerzos en el material cerca del cordón de soldadura.

Tabla 3. Valores de esfuerzos medidos

Profundidad (mm)	Esf. max.(Pa)		
0.1016	-128707161		
0.2032	-66207160		
0.3048	-72275016		
0.4064	-77779110		
0.508	-72790927		
0.6096	-75788975		

Simulación

Se encontró un modelo que permite una simulación compleja pero flexible de una evolución de crecimiento de grieta junto con los esfuerzos, este modelo se obtuvo a partir de un problema real.

Se obtuvieron varias imágenes que simulan el crecimiento de la grieta, que corresponde a un paso de tiempo de una décima parte del tiempo requerido para que la grieta alcance 23 mm de longitud. La primera y la última se muestran para el caso analizado, Figuras 6 y 7.



Figura 6. Inicio de grieta.



Figura 7. Grieta completa.

RESULTADOS

En la Figura 8 se muestra la microestructura del metal base, que consiste de una estructura característica de perlita más ferrita. Asimismo, se muestra la microestructura de la soldadura característica de un material solidificado y la zona afectada por el calor, donde existe la presencia de granos grandes, zona de transición y metal base.

La gráfica de una de las probetas PGF, Figura 9, elaborada con los datos que se obtuvieron de las pruebas en probetas del material sin cordón de soldadura, muestran que la región de crecimiento estable de la grieta e<u>sta</u> aproximadamente en

25 $\Delta K \; MPa \sqrt{m}$ y termina aproximadamente en 50 $\Delta K \; MPa \sqrt{m}$



Figura 8. Microestructura del material soldado donde se muestra la soldadura, zona afectada por el calor y el material base.

La línea de tendencia de los datos graficados muestra una pendiente mayor a la de los datos obtenidos de las pruebas de las probetas con cordón de soldadura.

La gráfica de una de las probetas CGS, Figura 10, obtenida con los datos de la probetas con cordón de soldadura muestran que en un inicio la velocidad de propagación de grietas por fatiga disminuye, por lo que se considera que existe una zona de arresto (detención) de grieta, la velocidad se incrementa hasta que alcanza un valor de 50 $\Delta K MPa\sqrt{m}$ y termina en 70 $\Delta K MPa\sqrt{m}$ este intervalo representa la zona de crecimiento de grieta estable. Por otro lado, las líneas de tendencia muestran una pendiente menor que la de la línea de tendencia de los datos de las pruebas del material sin cordón de soldadura.

Es probable que este comportamiento inicial de disminución de la velocidad de propagación de grieta por fatiga se deba a una combinación de la estructura de la zona afectada por el calor y los esfuerzos residuales. Cuando el tamaño de grano del acero es grande la velocidad de propagación es menor que los de tamaño de grano fino, debido al efecto del fenómeno de cerradura de grieta inducida por la rugosidad de la superficie de fractura [5]. Otro factor importante son los esfuerzos residuales debido al proceso de soldadura. Son esfuerzos residuales de compresión por lo que se contrarresta con los esfuerzos de tensión produciéndose un K efectivo menor que el que se le aplica en la punta de la grieta [6].

En las Tablas 4 y 5 se muestran los valores obtenidos de las constantes de Paris. Estas tablas muestran que el valor de m es más alto en el acero sin soldar que el acero soldado, entre menor sea el valor m, mayor dificultad de avanzar la grieta por fatiga debido probablemente a un efecto combinado de

microestructura con esfuerzos residuales.

CONCLUSIONES



Figura 9. Gráfica de da/dN - ΔK del material base. Sin cordón de soldadura.



Figura 10. Gráfica de da/dN - ΔK del material con cordón de soldadura.

Tabla 4. P Constantes de Par	ris para el material base.
------------------------------	----------------------------

PGF-01 1X10 ⁻⁹ 3.5346	
PGF-02 3X10 ⁻⁸ 2.656	
PGF-03 4X10 ⁻⁹ 3.3301	
PGF-04 5X10 ⁻⁹ 3.1456	
PGF-05 2X10 ⁻⁹ 3.4273	
PGF-06 8X10 ⁻⁹ 3.0349	
PGF-07 7X10 ⁻⁹ 3.0874	

Tabla 5. C	Constantes	de Paris	para el	material	soldado.
------------	------------	----------	---------	----------	----------

Probeta	С	m
CGS-01	$1X10^{-6}$	0.1174
CGS-02	2X10 ⁻⁶	0.1058
CGS-03	5X10 ⁻⁸	0.1581
CGS-04	3X10 ⁻⁷	0.1349
CGS-05	2X10 ⁻⁷	0.1490

Las pruebas de propagación de grietas por fatiga realizadas en el acero del perfil rectangular tubular, muestran diferencias significativas en las constantes de Paris, lo que implica que es más difícil propagar una grieta por fatiga en el material soldado que en el material sin soldar.

Es posible afirmar que la mayor resistencia a la fatiga en el material soldado se da por la combinación de la microestructura en la zona afectada por el calor y los esfuerzos residuales medidos.

BIBLIOGRAFÍ A

[1]. K. Krishnaprasad, and Raghu V. Prakash. Fatigue crack growth behavior in dissimilar metal weldment of stainless steel and carbon steel. World Academy of Science, Engineering and Technology (56). Pages 873 – 879. 2009.

[2]. Heung-Bae Park, and Byong-Whi Lee. Effect of specimen thickness on fatigue crack growth rate. Nuclear Engineering and Design (197). Pages 197–203. 2000.

[3]. American Society for Testing and Materials, E 8M – 00 Standard Test Method for Testing of Metallic Materials [Metric], American Society for Testing and Materials, USA. 2000.

[4]. American Society for Testing and Materials, E 647 - 05 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, American Society for Testing and Materials, USA. 2005.

[5]. González, Jorge L., Mecánica de fractura, bases y aplicaciones, Segunda edición. Limusa Noriega, México D. F. 2004.

[6]. Shi Y. W., Chen B. Y., Zhan J. X. Effects of welding residual stress on fatigue crack growth behaviour in butt welds of a pipeline steel. Engineering Fracture Mechanics. Volume 36, pages 893 – 902. 1990.

[7]. Chapetti M. D., Belmonte J.,T. Tagawa, T. Miyata. Integrated fracture mechanics approach to analyse fatigue behaviour of welded joints. Science and Technology of Welding and Joining. Volume 9, Issue No. 5, pages 430 – 438. 2004.

[8]. Li Y., Wierzbicki T, Sutton M., Yan J., Deng X. Mixed mode stable tearing of thin sheet Al 6061-T6 specimens: experimental measurements and finite element simulations. International Journal of Fracture. December 2009.

[9]. Shahani A.R., Rastegar M., Botshekanan M., Moayeri H. Experimental and numerical investigation of thickness effect on ductile fracture tough-

ness of steel alloy sheets. Engineering Fracture Mechanics. Volume 77, pages 646 – 659. 2009.

[10]. Oluseun J. On the fracture and fatigue crack growth of thin sheets of nanocrystalline metal alloys. Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2010.

[11]. Al-Haidary J. T., Wahab A. A., Abdul Salam. E. H. Fatigue crack propagation in austenitic stainless steel weldments. Metallurgical and Materials Transactions. Volume 37a, pages 3205 - 3214. 2006.

[12]. Pouget G., Reynolds A.P. Residual stress and microstructure effects on fatigue crack growth in AA2050 friction stir welds. International Journal of Fatigue. Volume 30, pages 463 – 472. 2008.

Ingeniantes