

Resistencia mecánica de uniones soldadas en aceros sometidos en servicio a alta temperatura

Mechanical resistance of welded joints in steels subjected to high temperature service

Presentación: 06/10/2020

Doctorando:

Fernández Luis Enrique

Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
lfernand@frbb.utn.edu.ar

Director:

Lilian Moro

Co-director:

Lucio Iurman

Resumen

Los componentes de plantas industriales que trabajan a altas temperaturas (plantas químicas/petroquímicas y generadoras de energía) fallan por permanecer a la exposición prolongada a altas temperaturas y presión, este fenómeno se conoce como termofluencia (Creep).

El objetivo de esta tesis es estudiar en forma teórica y experimental uniones soldadas realizadas en aceros ferríticos – martensítico como el que contiene 9% de Cr, tipo P9 o P91. Posteriormente se estudian las aleaciones base níquel, Inconel 601 (60 Ni – 25 Cr e Incolloy 800 H (30 Ni – 20 Cr) que poseen alta resistencia termo mecánica asociadas a su microestructura.

Analizando el comportamiento de los aceros sometidos a un ciclo térmico de soldadura por arco realizada por dos procesos sucesivos: FCAW-*Alambre tubular por Arco*-, SMAW-*Arco de Metal protegido*-, y GTAW*-Electrodo de Tungsteno protegido por gas*-, realizando un estudio sistemático que permita encontrar interrelaciones entre la composición química del material, el procedimiento de soldadura, la microestructura y las propiedades de la junta soldada, como así también los efectos del tratamiento térmico postsoldadura (PWHT) sobre la microestructura y las propiedades mecánicas (Tracción, tenacidad y resistencia al creep)

Palabras clave: Acero ferrítico 9% Cr, Unión soldada, Creep Microestructura.

Abstract

The components of industrial plants that work at high temperatures (chemical / petrochemical plants and power generators) fail due to prolonged exposure to high temperatures and pressure, a phenomenon known as slow creep (creep).

The objective of this thesis is to study in a theoretical and experimental way welded joints made in ferritic - martensitic steels with 9% Cr, type P9 or P91. Subsequently with nickel-based alloys, Inconel 601 (60 Ni - 25 Cr and Incolloy 800 H (30 Ni - 20 Cr) in all cases have high thermo-mechanical resistance associated with their microstructure.

Analyzing the behavior of steels subjected to a thermal cycle of arc welding carried out by two successive processes FCAW- * Arc Cored Wire * -, SMAW- * Protected Metal Arc * - and GTAW * -Gas-protected Tungsten Electrode- *, carrying out a systematic study that allows finding interrelations between the chemical composition of the material, the welding procedure, the microstructure and the properties of the welded joint, as well as the effects of the post-weld heat treatment (PWHT) on the microstructure and properties. mechanical (traction, toughness and creep resistance)

Keywords: 9%Cr Ferritic Steel, creep, microstructure, welded joint

Introducción

En este trabajo de tesis se propone estudiar en forma teórica y experimental uniones soldadas realizadas en distintos aceros ferríticos que difieren entre sí en el contenido de cromo y en aleaciones de níquel como el Inconel 601 y el Incoloy 800. Se analiza el comportamiento de los materiales sometidos a ciclos térmico de soldadura por arco realizada por dos procesos sucesivos, primero por arco de Tungsteno y Gas (GTAW) y luego por arco de Metal Protegido (SMAW), realizando un estudio sistemático que permita encontrar las interrelaciones entre la composición química del material, el procedimiento de soldadura, la microestructura y las propiedades de la junta soldada. Se estudian también los efectos del tratamiento térmico postsoldadura (PWHT) sobre la microestructura y las propiedades de tracción, tenacidad, resistencias al creep y a la oxidación de la junta soldada.

Se inició el trabajo estudiando el acero ferrítico – martensítico con 9% de Cr, tipo P9 o P91, que es muy requeridos por la tecnología actual, para ser utilizados a altas temperaturas durante el servicio porque presenta buena resistencia al creep, alta tenacidad y resistencia a la oxidación. En las últimas décadas se ha logrado mejorar las propiedades del P9 modificándolo con el agregado de aleantes (en el P91 se agrega Nb, V, N) (Bhadeshia, 2001). Teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas, se los utilizan para la fabricación o reparación de componentes de centrales térmicas, industria petroquímica y en plantas de generación de energía. En estos procesos generalmente se requiere realizar operaciones de soldaduras, que provocan transformaciones de la microestructura y cambios en la resistencia mecánica. Las principales causas de falla de las uniones soldadas se deben a formación de ferrita delta, segregación de impurezas y crecimiento del grano austenítico primario (Ramini M., 2011).

Estos cambios microestructurales acompañan a la variación de la composición química en pequeñas regiones que se ubican dentro de la zona fundida (ZF) y en la zona afectada por el calor (ZAC). Thomas y col. (2007) describen en forma detallada las distintas microestructuras generadas durante el proceso de soldadura en el acero P 91. Para realizar la caracterización microestructural utilizaron microscopía óptica y electrónica y proponen el posible gradiente térmico que puede soportar cada zona.

El acero P91 en su estado de suministro posee una micro estructura martensítica y/o de bainita revenida con carburos y carbonitruros estables a alta temperatura. Para mantener las condiciones que aseguren un buen comportamiento al creep, tanto el ciclo térmico de la soldadura como el tratamiento térmico post soldadura (PWHT) deben realizarse a una temperatura controlada, este problema se ve incrementado al realizar soldaduras de pasadas múltiples. En este tipo de soldadura, en cada pasada se aporta calor, modificando la zona ZAC de la pasada anterior (Abe F. y col. 2008).

Desarrollo y método experimental

1. Materiales estudiados

Se estudió la unión soldada realizada en acero ASTM A335 Gr P91 aleado con Cr y Mo; en su condición de suministro, normalizado 10 min a 1050 °C y luego revenido 45 min a 785 °C. La composición química del material, según la certificación del fabricante se muestra en la tabla 1.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Co	Nb	Ti	V
0,107	0,44	0,32	0,030	0,009	9,26	0,173	0,036	0,86	0,004	0,027	0,088	0,002	0,021

Tabla 1: Composición química del metal base

El material se obtiene a partir de una cañería sin costura de 350 mm de diámetro y 28,5 mm de espesor, cuyas propiedades mecánicas se indican en la tabla 2.

Rt (MPa)	LF 0,2 (MPa)	A (%)	HV
705	533	44	222

Tabla 2: Propiedades mecánicas del metal base

Para realizar la junta soldada se ha utilizado el proceso FCAW y como material de aporte un alambre AWS A5.29:2010 E91T1-B9M, en la técnica de soldadura empleada fue realizado un cordón de soldadura circunferencial de pasadas múltiples, a una temperatura de 260°C tanto para el precalentamiento como para cada pasada. Con este valor de temperatura se mantienen constantes las condiciones de soldadura [4].

Al ser una soldadura multipasadas se producen cambios microestructurales debido al calor aportado en cada ocasión. Los parámetros utilizados para realizar la soldadura fueron: tensión de arco de 25 V, intensidad de corriente: 155 A y velocidad de avance: 2,6 mm/s, lo que generó un calor aportado promedio de 1,49 kJ/mm. En el proceso de soldadura se efectuaron cinco capas con protección gaseosa de 80%Ar/20%CO₂, fijando un caudal de gas de 20 L/min. Se realizó una junta en V como se muestra en el esquema de la figura 1.

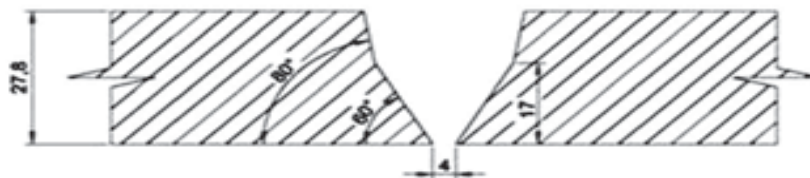
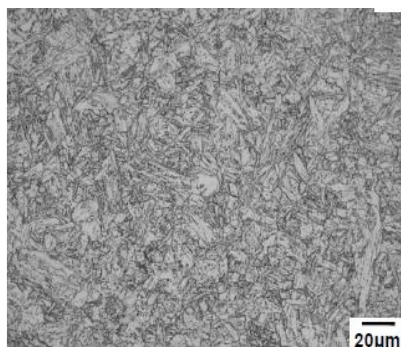


Figura 1: Probeta utilizada multipasadas para soldadura FCAW

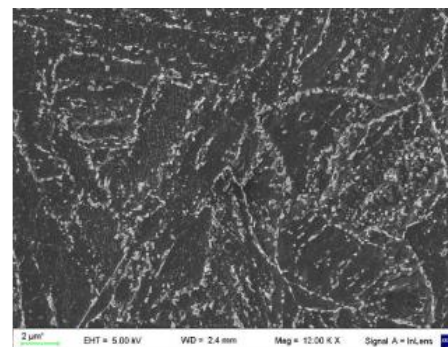
2.- Estudio Metalográfico

Para realizar el estudio de la microestructura de las muestras, se ha empleado microscopía óptica y de barrido (SEM), utilizando un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo Zeiss Supra 40, empleando electrones secundarios (contraste topográfico), el cual tiene adosado un sistema de microanálisis del tipo EDX.

Las muestras fueron desbastadas con papeles abrasivos de diferentes granulometrías y atacadas químicamente por inmersión, con reactivo Vilella (1% de HCl en alcohol con el agregado de 1g de ácido pícrico). En la figura 3.a se muestra la microestructura del acero observada por microscopía óptica en su forma de partida, se puede observar una estructura martensítica de revenido de morfología irregular. En la figura 3.b se observa la micrografía SEM de la muestra en la condición de suministro, donde se evidencian gran cantidad de precipitados tanto en el seno de la matriz como en los bordes de grano.



(a)



(b)

Figura 2: Metalografías ópticas y electrónicas del metal base

3. Método de ensayo de creep

El equipo utilizado para realizar los ensayos de creep se diseñó y construyó en la FRBB. Posee un sistema de tres máquinas, iguales, que someten al material bajo ensayo a tensión y temperatura constantes, manteniendo la independencia de funcionamiento de cada una de ellas con la particularidad de estar controlado por un único sistema de adquisición y software. El equipo está construido por una barra principal, apoyada en un extremo a un amortiguador regulable, y en el otro extremo posee una leva circular de radio constante. De la barra principal cuelga un peso variable, de trazabilidad controlada, que se desplaza a lo largo de la misma, permitiendo modificar la distancia al centro de rotación y así poder lograr la tensión que se desea aplicar. El peso está ubicado sobre un carro con rodamientos que permiten el desplazamiento del mismo a lo largo de la barra. El movimiento se realiza mediante un tornillo patrón impulsado por un moto-reductor de corriente continua. El equipo tiene anexado un horno eléctrico, donde el control de la temperatura se efectúa por medio de una termocupla de cromel

alumel, cuyo extremo caliente se ubica sobre la superficie de la zona central calibrada de la probeta. La deformación de la zona calibrada de la probeta se mide por medio de dos transformadores lineales de diferencial variable (LVDT) Marca Solartron, que produce una señal adquirida por un sistema analógico- digital (Molina y col., 2018). Estos ensayos se realizaron respetando las condiciones de la norma (ASTM E 139).

Se utilizaron probetas de 4mm de diámetro y 20 mm de longitud calibrada. En la figura 3 se muestra la probeta de ensayo, donde se puede observar en la zona calibrada al metal de soldadura (MS), la zona ZAC y el metal base (MB). Se ha empleado un reactivo de ataque que evidenció las tres zonas y permitió poder ubicar la zona de rotura

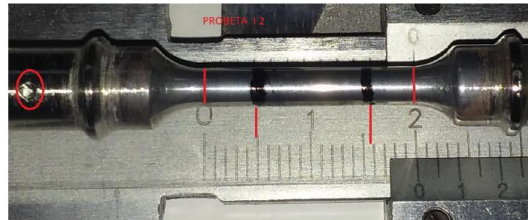


Fig. 3: Probeta preparada y atacada donde se observan la distintas zonas de soldadura

Resultados

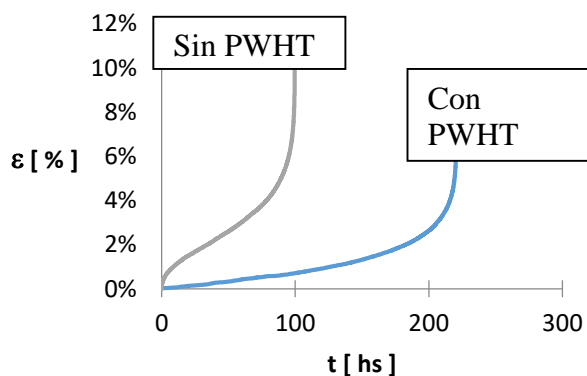
Se realizaron ensayos de creep a 160 MPa y 600 °C, a partir de los datos obtenidos se determinó la velocidad de deformación de la etapa secundaria, el tiempo de rotura y la deformación porcentual al finalizar el ensayo, del material que presenta las tres zonas características es decir zona mixta, también sin y con PWHT.

En la Tabla 3 se indican los parámetros de creep donde se observa una mayor resistencia del material tratado térmicamente, donde los ensayos duran aproximadamente 220 horas mientras que en el material sin PWHT la probeta se ha fracturado en la mitad del tiempo anterior; así mismo la velocidad de la etapa estacionaria cambia de 0.04 en el material sin tratar a 0.007 %/h en el material tratado.

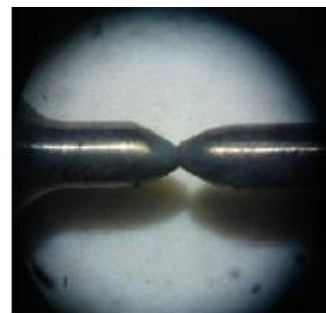
En la figura 4.a se muestra la gráfica de la deformación en función del tiempo de ensayo, donde se compara el comportamiento del material sin y con PWHT, y se evidencia un aumento de la resistencia del material tratado térmicamente. A partir del estudio de la zona de fractura se observa que la rotura se presentó en forma de copa y cono, característica de los materiales dúctiles (figura 4.b).

Condición	Contenido longitud calibrada	Velocidad Mínima de Creep (%/h)	Tiempo de rotura (h)	Deformación de rotura (%)
Sin PWHT	Mixta	0,04000	100	11,41
Con PWHT	Mixta	0,00700	220	6,87

Tabla 3: Resultados obtenidos de los ensayos cuando la zona calibrada presenta las tres zonas características.



(a)



(b)

Fig. 4: a) Gráfica de la deformación específica % por creep en función del tiempo para el material con las zonas de soldadura mixtas, sin y con PWHT. b) Fractura mostrando la rotura copa - cono.

La diferencia de resistencia se evidenció observando la zona de fractura, si bien ambos materiales fracturaron en forma de copa y cono, en el material con PWHT se ha producido en el metal base mientras que en el menos resistente, la fractura se observó en la zona ZAC. El comportamiento coincide con el resultado obtenido del estudio del barrido de microdurezas realizado en las probetas con tratamiento térmico y sin él. Así el resultado del barrido de dureza Vickers con 100 gr de carga, sobre la probeta con PWHT se han obtenido durezas de 201 HV en el metal base y de 233 HV en la zona ZAC y el material de soldadura; se observa entonces que estas últimas zonas son las de mayor valor. La ZAC de estos aceros presenta una disminución de dureza en la zona intercrítica, la cual presentó un valor de 190 HV

En forma similar se estudió el material de soldadura, en la Tabla 4 se indican los valores de la velocidad de deformación de la etapa secundaria, el tiempo de rotura y la deformación porcentual al finalizar el ensayo. Se observa que el material con PWHT presenta una velocidad en la etapa secundaria de 0,00386 %/h que es levemente mayor que la del material sin tratamiento térmico, es decir menor resistencia al creep. Esta menor resistencia se evidencia mejor cuando se observan las gráficas de la figura 5.a, donde se muestra la deformación en función del tiempo de ensayo y se compara el comportamiento del material sin y con PWHT. También se observó que en el material de soldadura, la rotura se produce según un plano próximo a los 45° (figura 5.b). Este comportamiento difiere del que presenta el material investigado anteriormente, donde se estudian las tres zonas de soldadura en la cual se observa una fractura tipo copa y cono.

Condición	Contenido longitud calibrada	Velocidad Mínima de Creep (%/h)	Tiempo de rotura (h)	Deformación de rotura (%)
Sin PWHT	M. Soldadura	0,00221	2264	17,85
Con PWHT	M. Soldadura	0,00386	964	18,56

Tabla 4: Resultados obtenidos de los ensayos cuando la zona calibrada es el material de soldadura.

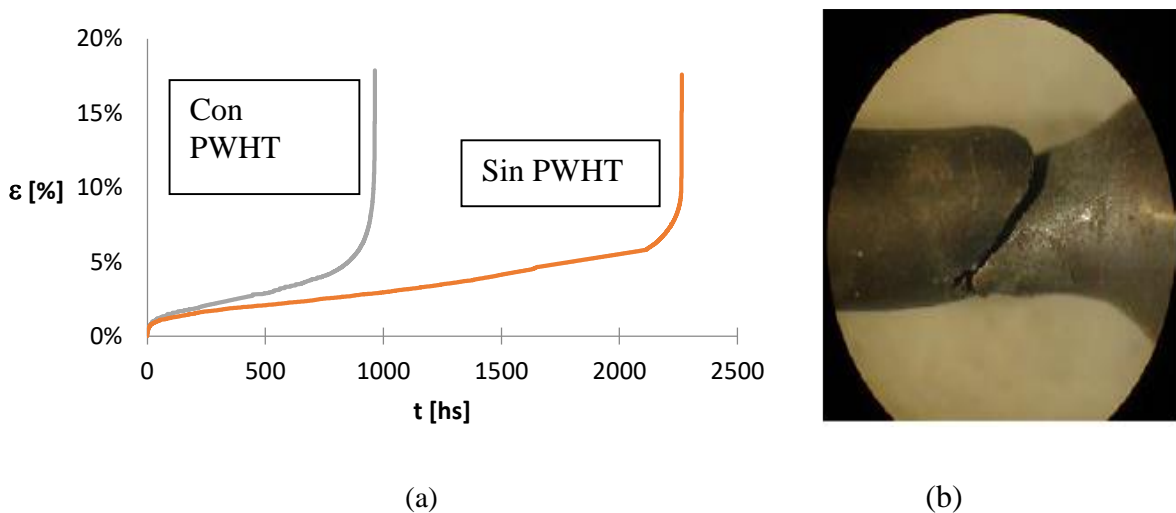


Fig. 9: a) Gráfica de la deformación específica % por creep en función del tiempo para el material de soldadura sin y con PWHT. b) Fractura a 45° sobre el metal de soldadura.

Conclusión

Del estudio del comportamiento al creep, realizado sobre acero P91 que presenta una unión soldada, donde se ha comparado la resistencia del mismo cuando fue sometido a un tratamiento térmico post soldadura (PWHT) con el material sin tratar térmicamente, se concluye lo siguiente:

Que en las probetas donde el volumen ensayado incluye toda la unión soldada (metal de soldadura, ZAC y metal base) se observa que:

El material con tratamiento térmico presenta mayor resistencia al creep.

Tanto el material sin o con PWHT se fracturan en forma de copa – cono, evidenciando en la observación microscópica de la cara de fractura la presencia de grandes huecos productos de la coalescencia de cavidades.

En ambas situaciones, sin y con PWHT, se presentan roturas en distintas zonas de la muestra, así en el material con PWHT las roturas ocurren en el metal base, mientras que en el otro caso, las roturas se presentan en la zona ZAC, siendo entonces estas las de menor resistencia al creep.

Que en las probetas donde el volumen ensayado es metal de soldadura se concluye que:

La densidad de defectos y su tamaño, que son mayores a los micro-huecos otorgan la mayor resistencia al creep en el material sin PWHT.

La rotura se produce según un plano próximo a los 45°, sobre la superficie de fractura se muestran partículas de gran tamaño, con formas geométricas. La rotura se inicia en puntos de discontinuidad estructural y se produce a lo largo de las zonas de debilidad, y progresa en forma de corte o cizallamiento.

Los defectos predominan frente a los efectos beneficiosos del PWHT es decir, la precipitación de carbonitruros en borde de grano son los que otorgan mayor resistencia al creep.

Referencias

- Bhadeshia H.K.D.H., (2001) Bainite in steels, transformations, microstructure and properties, 2nd Ed. Thomson
- Ramini M., Surian E., Castillo M. J., y Zalazar M. (2014), Caracterización de soldaduras circunferenciales de aceros avanzados 9 Cr. *Soldag. Insp. Sao Pablo. 19*, N° 01, 010 – 018.
- Thomas Paul V., Saroja S., Hariharan P., Rajadural A. y Vijayalakshmi M., (2007) Identification of microstructural zones and thermal cycles in weldment of modified 9Cr-1Mo steel, *J. Mater. Scie. 42*, 5700 - 5713
- Abe F., Kern T.U. y Viswanathan R., (2008), Creep resistant steels, Woodhead Publishing and Maney Publishing. ISBN-13: 978-1845691783
- Molina R., González G., Pender G., Moro, L., (2018), Checking of the uniformity of results of simultaneous creep testing equipment. *Revista Materia, 26* N.02, ISSN 1517-7076 artículo e-12022, 2018
<https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0358> .
- ASTM E139 -11(2018), Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials. ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, US 2011
<https://www.astm.org/Standards/E139.htm>.