

# COMPORTAMIENTO CÍCLICO ANÓMALO DE ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

M. AVALOS, I. ALVAREZ ARMAS, A.F. ARMAS

Instituto de Física de Rosario, CONICET  
Bv 27 de Febrero 210bis, 2000, Rosario, Argentina  
e-mail: [martina@ifir.ifir.edu.ar](mailto:martina@ifir.ifir.edu.ar)

The strain cyclic behaviour of high-chromium ferritic stainless steels (AISI 430F, AISI 420 and MANET II) has been investigated at temperatures ranging from room temperature to 823 K. Cyclic hardening curves of type AISI 430F steel show a strong temperature dependence. A pronounced cyclic hardening and an increase in saturation peak stress is observed between 623 and 773 K where the flow stress for the first tensile stroke at the maximum strain is independent of temperature. For fully annealed AISI 420 initial hardening followed by saturation stage was observed at each test temperature. A temperature independent stress saturation is the characteristic feature observed in this steel between 523 and 723 K. Normalised and tempered MANET II (a variant of the German steel DIN Nr. 1.4914) softens during cyclic loading at all temperatures. Negative strain rate sensitivity was observed plotting the peak tensile stress difference between hysteresis loops at different strain rates. It is proposed that dynamic strain aging mechanism caused by the drag of solution carbon atoms is responsible for the unusual cyclic behaviour observed in these steels.

Los aceros inoxidable de alto contenido en Cromo tienen un amplio espectro de uso a temperaturas elevadas. En tal sentido, el presente trabajo estudia el comportamiento bajo deformación cíclica de aceros tales como AISI 430F, AISI 420, MANET II en un rango de temperaturas que va desde ambiente hasta 823K. En AISI 420 recocido se observa, para todo el rango de temperaturas, endurecimiento inicial seguido por un estado de saturación. Entre los 523 y 723K, la tensión de saturación es independiente de la temperatura. MANET II (una variante del acero DIN Nr. 1.4914) normalizado y revenido, presenta ablandamiento al ser sometido a cargas cíclicas en el rango de temperaturas ya mencionado. Se consigna para este material, un comportamiento anómalo en la sensibilidad a la velocidad de deformación. Para AISI 430F entre 623 y 773K, la tensión de fluencia para el primer ciclo de tensión a deformación máxima, es independiente de la temperatura. En este mismo intervalo de temperatura, se observa un pronunciado endurecimiento cíclico. Se propone que el mecanismo de "envejecimiento por deformación dinámica" causado por el anclaje por parte de átomos en solución es responsable por el inusual comportamiento cíclico observado en cada uno de estos aceros.

## INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable ferríticos reciben variados usos a elevadas temperaturas debido a su excelente combinación de propiedades mecánicas y de corrosión. En la actualidad son considerados para aplicaciones tanto en tecnología nuclear como clásica. A pesar de su creciente importancia, es escasa la literatura referida al comportamiento cíclico de estos materiales en alta temperatura. Existe un fenómeno conocido como "envejecimiento por deformación dinámica" (dynamic strain aging, DSA) que en estos aceros tiene lugar debido a la interacción elástica entre átomos intersticiales y dislocaciones que se produce durante la deformación. En tal sentido, es fundamental analizar la influencia del DSA sobre el comportamiento cíclico de los aceros. Con relación a la deformación en fatiga de aceros inoxidable, muchos autores<sup>(1,2)</sup> han reportado la fuerte influencia de DSA en aceros inoxidable austeníticos. No es el caso de los aceros inoxidable ferríticos, en los cuales se observaron manifestaciones de DSA en temperaturas entre 523 y 723 K<sup>(3,4)</sup> pero durante la aplicación de tensiones monotónicas.

El objetivo de este trabajo es el análisis del comportamiento cíclico de aceros representativos de dos importantes grupos: 12% Cr y alto contenido de Cromo (17% Cr). El propósito es reportar hechos anómalos observados durante la fatiga de estos materiales y que podrían ser manifestaciones de DSA.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Probetas de fatiga de bajo número de ciclos fueron maquinadas a partir de los distintos materiales en estudio. Los aceros AISI 420 y MANET II son representativos del grupo de 12%Cr y AISI 430F para el grupo de alto contenido de Cromo. Las respectivas composiciones químicas se consignan en la Tabla 1.

A los fines de este trabajo, es importante llevar a cabo los ensayos en muestras que contengan la menor densidad posible de dislocaciones para evitar los efectos de "enmascarado". Para obtener esta condición, el acero AISI 420 fue tratado en vacío durante 1 h a 1173 K y enfriado lentamente en aire. La estructura resultante consiste en una matriz de ferrita con nódulos de perlita.

El tratamiento térmico para MANET II, también en vacío fue: austenización a 1348 K/ 30 min., enfriado en aire y revenido 1023 K/ 1 h. La estructura martensítica transforma así a una matriz ferrítica con precipitados<sup>(5)</sup>. Esta estructura, llamada martensita revenida, consiste en subgranos elongados cuyas paredes contienen una alta densidad de dislocaciones y carburos  $M_{23}C_6$  ubicados a lo largo de los antiguos granos de austenita y los límites de grano de la estructura revenida.

El acero AISI 430F fue recocido en vacío a 1323 K durante 1 h y enfriado en aire. Luego de este tratamiento, el material consiste en una matriz ferrítica con algunas islas de martensita y una pequeña población

de carburos tanto en la matriz como en los límites de grano.

Es importante remarcar que todos los aceros ensayados en este trabajo consisten principalmente en una matriz de ferrita con diferencias en densidad de dislocaciones, población de carburos y concentración de átomos de carbono disueltos en la matriz.

Se realizaron ensayos de fatiga bajo control de deformación total usando una forma de onda triangular completamente revertida en una máquina INSTRON modelo 1362. El rango de deformación total usado fue  $\Delta \epsilon_t = 0.01$  y la velocidad de deformación

$\dot{\epsilon}_t = 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Todos los ensayos se desarrollaron en aire. El análisis de la microestructura se realizó mediante técnicas de extracción por réplica y láminas delgadas utilizando microscopía óptica y electrónica.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra las curvas de tensión de un AISI 430F sometido a deformación cíclica en varias temperaturas. En el ciclo 1 de todas las curvas se hace evidente una de las típicas manifestaciones de envejecimiento por deformación: la dependencia anómala de la tensión de fluencia con la temperatura. En el rango de 623 - 773, la tensión de fluencia para el primer pico de tensión a máxima deformación es prácticamente independiente de la temperatura.

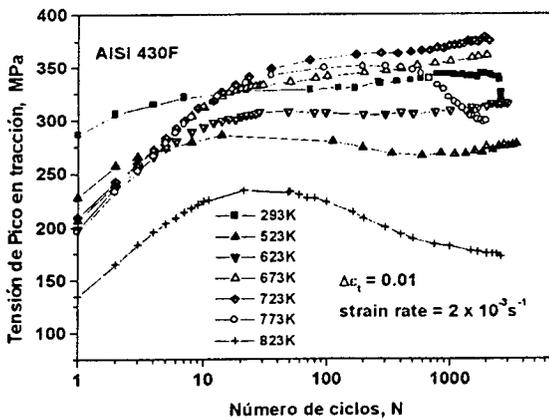


Figura 1. Curvas de comportamiento cíclico de AISI 430F

Todas las curvas muestran un período de endurecimiento inicial que es corto en comparación con la vida en fatiga del material. De la figura 1 es evidente que este período de endurecimiento es más largo y más pronunciado en el rango de temperaturas entre 623K y 773K, mostrando un máximo a 723K. Por debajo de 773K, al endurecimiento inicial sigue un endurecimiento de escasa pendiente hasta la fractura de la probeta.

El acero AISI 430 previo al ciclado consiste en una matriz de ferrita saturada en átomos de carbono y algunas islas de martensita. En este trabajo se considera que la deformación plástica inducida por fatiga está casi completamente restringida a los granos de ferrita. Debido a la saturación en carbono de la matriz, el movimiento de

dislocaciones probablemente favorezca la segregación de átomos en las dislocaciones, lo cual promovería la precipitación de carbono. Esta precipitación y el consecuente anclado podrían producir una aceleración en la velocidad de multiplicación de dislocaciones debido a un mecanismo adicional de endurecimiento por dispersión. Este efecto sería muy importante en relación al pronunciado endurecimiento cíclico observado entre 623 K y 773 K en la fig. 1. La microscopía óptica proporciona evidencias de precipitación en las llamadas "bandas de deslizamiento" en el material fatigado hasta 2500 ciclos a 723 K como puede verse en la figura 2.

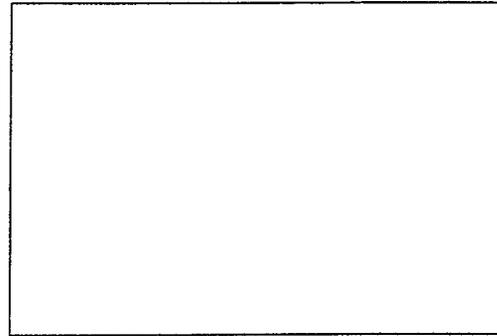


Figura 2. Carburos en las bandas de deslizamiento en el material ciclado hasta 2500 ciclos a 723 K

Por encima de los 773K, el endurecimiento inicial es seguido por un pronunciado ablandamiento luego de un período de estabilidad. La microestructura a esta temperatura muestra precipitados grandes que han crecido a expensas de otros más pequeños. El sinergismo entre el proceso de ciclado y la mayor movilidad de átomos de soluto, consecuencia de la temperatura del ensayo, podría producir la coalescencia de los pequeños carburos en los más grandes. El ablandamiento observado por encima de los 773 K estaría directamente relacionado con este hecho.

Con referencia al acero AISI 420, la figura 3 muestra su respuesta cíclica bajo control de deformación en el rango de 300 a 823 K. Todas las curvas exhiben un corto período de endurecimiento inicial seguido por una etapa de saturación, independiente de la temperatura del ensayo, que continúa hasta la fractura, excepto en algunos casos donde la tensión decrece de modo apenas perceptible. El hecho predominante en la figura 3 es la pequeña variación entre los valores de saturación de cada curva en el rango de temperatura entre 523 y 723 K. El hecho de que la tensión de saturación sea independiente de la temperatura sugiere que el DSA influye en el comportamiento cíclico. Sin embargo, no se observa un pronunciado endurecimiento cíclico en este material si se compara con el endurecimiento observado en AISI 430F. Al igual que este último, la estructura del AISI 420 completamente recocido también consiste en una matriz ferrítica pero con una cantidad importante de carburos que precipita durante el enfriado en horno. De esta forma, la concentración de carbono en matriz es mucho menor que en el AISI 430F normalizado. Debido al escaso contenido de carbono disuelto, el DSA probablemente no es lo suficientemente intenso como para favorecer de manera

sensible la multiplicación de dislocaciones durante el ciclado.

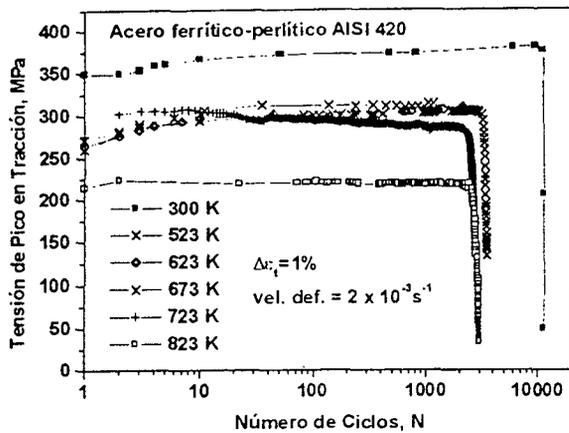


Figura 3. Curvas de comportamiento cíclico de AISI 420

Los ensayos realizados en MANET II normalizado y revenido, tanto a temperatura ambiente como en altas temperaturas muestran invariablemente una tendencia al ablandamiento cíclico. Algunos autores<sup>(6,7,8)</sup> consideran este comportamiento como el resultado del rearrreglo de dislocaciones debido a deformación cíclica. Estas dislocaciones, que fueron introducidas por el proceso de templado, prácticamente no desaparecen cuando el revenido se lleva a cabo. Esta densidad de dislocaciones podría enmascarar los efectos de la interacción dislocación - átomo de soluto en las curvas de endurecimiento cíclico. Dado que valores negativos de la velocidad de deformación son también manifestaciones bien conocidas de DSA, se realizaron cambios de velocidad de deformación en los ensayos de fatiga de este material a fin de examinar su influencia en los picos de tensión de tracción durante los lazos de histéresis. Se define  $\Delta\sigma_1$  como la diferencia entre los picos de tensión de tracción de los lazos de histéresis generados con una velocidad de deformación de  $\dot{\epsilon}_1 = 1.5 \times 10^{-3} s^{-1}$  y  $\dot{\epsilon}_2 = 1.5 \times 10^{-4} s^{-1}$  y  $\Delta\sigma_2$  como la correspondiente a la diferencia generada a partir de  $\dot{\epsilon}_1 = 1.5 \times 10^{-3} s^{-1}$  y  $\dot{\epsilon}_3 = 1.5 \times 10^{-5} s^{-1}$ . La fig. 4 muestra estas diferencias en función de la temperatura.

Los valores negativos en la curva corresponden a un comportamiento considerado "normal", con menores picos de tensión de tracción para menores velocidades de deformación. Por lo tanto, en la figura, se observa un comportamiento anómalo entre los 500 y 700 K, con mayores picos de tensión correspondientes a menores velocidades de deformación. Ambas curvas presentan un máximo en aproximadamente 623 K. En el rango de temperatura desde 500 a 700 K los átomos de soluto podrían adquirir suficiente movilidad para difundir a los centros de las dislocaciones produciendo el anclado de dislocaciones móviles. Este efecto sería más pronunciado para las menores velocidades de deformación.

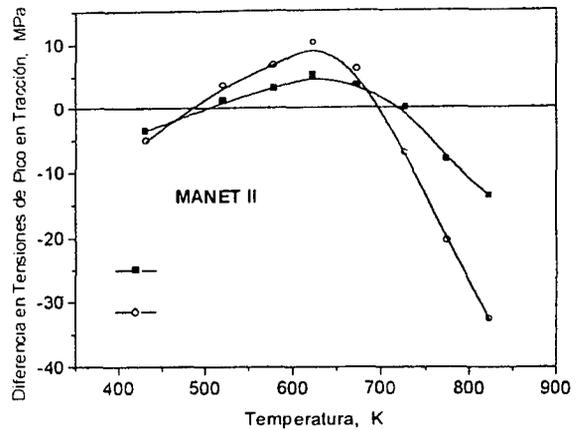


Figura 4. Diferencia entre Picos de Tensión vs. Temperatura. Ver el texto

## CONCLUSIÓN.

En este trabajo se propone que el comportamiento cíclico anómalo observado en aceros ferríticos es producido por el mecanismo de envejecimiento por deformación dinámica (DSA) consecuencia de la interacción entre las dislocaciones y los átomos de carbono disueltos en la matriz.

En AISI 430F, con una alta concentración de átomos de carbono disueltos en la matriz, la difusión favorecida, por la fatiga, promueve la segregación de átomos de carbono a las dislocaciones lo cual produce una aceleración en la velocidad de multiplicación de las dislocaciones. El pronunciado endurecimiento cíclico observado en la figura 1 podría ser explicado por este mecanismo.

Por otro lado, el AISI 420 completamente recocido con bajas concentraciones de átomos de carbono disueltos, debido a la abundante precipitación ocurrida durante el proceso de enfriado en horno, no muestra un endurecimiento cíclico significativo.

En MANET II, de acuerdo a lo observado en la figura 4, los valores positivos en las curvas de diferencias de tensiones de pico podrían ser atribuidos a los efectos de anclado de las dislocaciones móviles por átomos de carbono.

## Referencias

- 1 Tsuzaki, K., Hori, T., Maki, T. and Tamura, I. (1983) Mater. Sci. Engng. **61**, 247.
- 2 Armas, A.F., Bettin, O.R., Alvarez-Armas, I. and Rubiolo, G.H. (1988) J. Nucl. Mater. **155-157**, 646.
- 3 Pink, E. and Grinberg, A. (1981) Mater. Sci. Engng. **51**, 1.
- 4 Marny, P., Ruan, Y. and Victoria, M. (1989) PSI-Bericht Nr. 37 Paul Scherrer Institut, Wuerenlingen, Switzerland.
- 5 Vitek, J.M. and Klueh, R.L. (1983) Metall. Trans. **A14**, 1047.
- 6 Kim, S. and Weertman, J.R. (1988) Metall. Trans. **A19**, 999.

- 7 Earthman, J.C., Eggeler, G. and Ilchner, B. (1989)  
Mater. Sci. Engng. **A110**, 103.
- 8 Chang, H.J., Tsai, C.H. and Kai, J.J. (1994) Int. J. Pres.  
Ves. and Piping **59**, 31.

Table I. Composición química de los distintos aceros

Acero	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Nb
AISI 420	0.27	0.36	0.35	0.02	0.03	12.3	0.13	0.07	--	0.03
MANET II	0.11	0.18	0.85	0.004	0.005	10.3	0.65	0.58	0.19	0.14
AISI 430F	0.05	0.26	0.94	0.21	0.03	17.1	0.28	0.28	--	--

**CEILAP**  
CITEFA - CONICET  
ZUFRIATEGUI Y VARELA  
1603 - VILLA MARTELLI  
REPUBLICA ARGENTINA