

Influencia de la temperatura en las propiedades a tracción de un acero inoxidable superdúplex

A. Gironès*, A. Mateo*, L. Llanes* y M. Anglada*

Resumen Un acero inoxidable superdúplex tipo EN 1.4410 se ensayó a tracción en el rango de temperaturas de 275 a 475 °C. La evolución, en función de la temperatura, de los valores de límite elástico y resistencia máxima indica la existencia de un fenómeno de envejecimiento por deformación (*Dynamic Strain Aging*, DSA). Para evaluar la influencia de la velocidad de deformación sobre dicho comportamiento se realizaron ensayos de tracción a dos velocidades diferentes, ambos a la temperatura de 325 °C, para la cual se había registrado la máxima manifestación de DSA. Dichos ensayos reflejaron una sensibilidad inversa a la velocidad de deformación lo que confirma la presencia de DSA en el acero bifásico estudiado.

Palabras clave Aceros inoxidables dúplex. Comportamiento a tracción. Envejecimiento por deformación (DSA). Sensibilidad a la velocidad de deformación (SRS).

The influence of temperature on the tensile properties of a superduplex stainless steel

Abstract Tensile tests, at temperatures ranging between 275 and 475 °C were performed in a superduplex stainless steel EN 1.4410. The dependence of yield stress and ultimate tensile strength on temperature indicates the existence of dynamic strain aging (DSA). In order to evaluate the influence of strain rate on this phenomenon, tests were conducted at two different strain rates, both at 325 °C, temperature at which DSA is maximum for this material. The results show that the flow stress has an inverse strain rate sensitivity which confirms the existence of DSA in the steel under study.

Keywords Duplex stainless steels,. Tensile behavior. Dynamic strain aging (DSA). Strain rate sensitivity (SRS).

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidables dúplex están constituidos por una fase austenítica y una matriz ferrítica, en fracciones volumétricas similares. En la actualidad, estos materiales son utilizados en múltiples sectores industriales (nuclear, químico, petroquímico, construcción, etc.) gracias a la combinación, a temperatura ambiente, de elevadas propiedades mecánicas, tanto monotónicas como cíclicas, con una excelente resistencia a la corrosión^[1]. Dichas propiedades se han visto mejoradas con el reciente desarrollo de los aceros dúplex de tercera generación o superdúplex, caracterizados por un alto contenido de nitrógeno en su composición química.

Por otra parte, la utilización de estos materiales en aplicaciones en que la temperatura de servicio es elevada, particularmente para aquellas asociadas con la conversión de energía, tales como turbinas, reactores e intercambiadores de calor, hace necesario el estudio de su comportamiento a la temperatura de servicio. En este sentido, existe una extensa bibliografía donde se describe el comportamiento de aceros inoxidables monofásicos, tanto ferríticos como austeníticos, a temperaturas elevadas^[2-6], pero es un campo escasamente explorado en el caso de los dúplex^[7]. Los anteriormente citados estudios sobre aceros inoxidables monofásicos han mostrado discontinuidades en la deformación atribuidas al fenómeno de envejecimiento por

(*) Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica, E.T.S.E.I.B., Universitat Politècnica de Catalunya, Avda Diagonal 647, 08028 Barcelona (España).

deformación (DSA). Considerando que los aceros dúplex están compuestos por ferrita y austenita, resulta lógico suponer que estos materiales también experimenten el fenómeno de envejecimiento por deformación. Sin embargo, en la revisión bibliográfica realizada no se han encontrado estudios que confirmen esta suposición.

El DSA consiste, de forma simplificada, en el anclaje o interacción atractiva entre las dislocaciones móviles por parte de las atmósferas de solutos o atmósferas de Cottrell formadas como consecuencia de la difusividad creciente de estos átomos con la temperatura. La interacción atmósfera-dislocación ejerce una fuerza en contra del movimiento de avance de la dislocación, de manera que ésta se ve temporalmente anclada hasta que la tensión sea superior a un valor crítico. Tsuzaki *et al.*^[8] atribuyen el fenómeno de DSA para aceros monofásicos austeníticos y en el rango de temperaturas 300 – 600 °C a la formación de atmósferas de átomos de Cr, las cuales son responsables del anclaje de las dislocaciones, mientras que a temperaturas inferiores (desde temperatura ambiente hasta 200 °C) los átomos responsables del DSA son los átomos intersticiales de carbono y/o nitrógeno

Los dos principales efectos indicadores del fenómeno de DSA son el aumento del valor de la tensión máxima (σ_{UTS}) con la temperatura y la dependencia inversa con la velocidad de deformación o SRS (*Strain Rate Sensitivity*). También es posible detectar la existencia de DSA mediante la aparición de dentaciones en las curvas de tracción, fenómeno conocido como efecto Portevin-Le Chatelier^[9]. Sin embargo, este último efecto no siempre es fácilmente detectable, y factores como la sensibilidad del dispositivo utilizado en el ensayo influyen de manera decisiva en el registro de éstas oscilaciones de esfuerzo.

El presente trabajo se centra en el estudio de las propiedades monotónicas de un acero inoxidable de tercera generación o superdúplex a temperatura ambiente y en el rango de temperaturas de 275 a 475 °C. Se pondrá especial énfasis en tratar de determinar la existencia de DSA en estos materiales bifásicos.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material utilizado para la ejecución de los ensayos de tracción a temperatura es un acero inoxidable superdúplex, designado comercialmente como SAF 2507, correspondiente a las normativas UNS S32750 y EN 1.4410. Su composición química en

% en peso es 25 Cr, 7 Ni, 3,8 Mo, 0,015 C y 0,26 N. El acero fue suministrado por Sandvik AB (Suecia) en forma de barras de 20 mm de diámetro. Mediante estudio metalográfico se reveló que el material presenta una microestructura constituida por un 56 % de fase austenítica en una matriz ferrítica.

Las probetas utilizadas en estos ensayos se mecanizaron con cabezas roscadas y una zona de ensayo cilíndrica de 5 mm de diámetro.

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina servohidráulica Instron, modelo 1342, la cual dispone de una cámara ambiental que permite asegurar la estabilidad y homogeneidad térmica en su interior. Se situó un termopar en contacto con la probeta para verificar que la temperatura real de la probeta coincidía con la indicada por el registrador de la cámara ambiental, apreciándose desviaciones máximas de 2 °C. La deformación se controló por medio de un extensómetro uniaxial dotado de un sistema de refrigeración que permite su utilización a temperaturas elevadas.

El procedimiento experimental seguido consistió en el calentamiento hasta la temperatura de trabajo, para, a continuación, mantener durante 30 min a dicha temperatura antes del inicio del ensayo. Así, se asegura que la totalidad de la probeta y del dispositivo experimental hayan alcanzado la estabilidad térmica. Los ensayos se efectuaron en control de desplazamiento, a una velocidad de $1,66 \times 10^{-3}$ mm/s, la cual corresponde a una velocidad de deformación aparente ($\dot{\epsilon}$) de $6,6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

En primer lugar, se efectuaron ensayos de tracción a temperatura ambiente y cada 50 °C, dentro del intervalo de 275 a 475 °C. A partir de las curvas σ - ϵ se determinaron los valores del límite elástico (σ_{YS}) y resistencia máxima (σ_{UTS}), en tanto que la ductilidad se ha evaluado por medio de la medida de la reducción de área de la probeta en la zona de fractura.

A partir de los resultados obtenidos en los primeros ensayos, se decidió realizar un ensayo de tracción a una velocidad un orden de magnitud mayor ($\dot{\epsilon} = 6,6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) para la temperatura en que se detectó un máximo efecto de DSA, i.e. 325 °C, con el fin de comprobar la existencia de una sensibilidad inversa a la velocidad de deformación (SRS).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción revelan la dependencia de los valores de los parámetros mecánicos (σ_{UTS} y σ_{YS}) con la

temperatura, tal como se puede observar en la tabla I. Las curvas σ - ϵ obtenidas no evidenciaron con claridad la presencia de fluctuaciones, características del efecto Portevin-Le Chatelier, pero como se ha explicado anteriormente, la aparición de éstas depende, fuertemente, no sólo del comportamiento mecánico sino también de la sensibilidad del dispositivo instrumental utilizado. Por tanto, la no aparición no constituye una indicación de que el fenómeno de envejecimiento por deformación no tenga lugar.

Tanto en la curva σ_{UTS} vs. T , como en la σ_{YS} vs. T (Fig. 1) puede observarse un pico, el cual corresponde a la temperatura para la cual el efecto del DSA es máximo ($T_{DSA,max}$). Dicha temperatura se sitúa, para el acero inoxidable dúplex estudiado, en 325 °C. Como regla general, se suele considerar que este valor pico aparece a una temperatura homóloga, definida como $T_{ensayo}/T_{fusión}$ en grados Kelvin, en torno a 0,3^[9]. Para el acero SAF 2507 el valor de $T_{fusión}$ es 1.723 K, por lo que la $T_{DSA,max}$ esperada sería alrededor de 250 °C, valor inferior al observado experimentalmente. Sin embargo, si se revisan los trabajos publicados sobre DSA en aceros inoxidable, se observa que la $T_{DSA,max}$ se sitúa entre 300 y 600 °C tanto para los austeníticos^[5 y 6] como para los ferríticos^[2-4], por lo que parece existir una tendencia en estos materiales a una $T_{DSA,max}$ comprendida entre 0,3 y 0,5.

La tabla I indica también los valores del parámetro $\Delta\sigma_H$, definido como la diferencia entre los valores de σ_{UTS} y σ_{YS} . Este parámetro, que recibe el nombre de esfuerzo de endurecimiento por DSA (*dynamic strain hardening stress*), presenta valores muy próximos entre 275 y 425 °C, lo que señala la posible presencia de DSA en todo ese rango de temperaturas. Para los aceros inoxidable austeníticos y temperaturas en el rango 300-600 °C los átomos de soluto responsables de este fenómeno son átomos sustitucionales tales como el Cr^[8]. Por lo tanto, es de esperar que para los aceros dúplex y

dentro del rango de temperaturas estudiado, el anclaje de las dislocaciones también sea debido a la formación de atmósferas de cromo.

Asimismo, cabe destacar que a 475 °C el material exhibe un comportamiento anormal pues cabría esperar que los valores de σ_{UTS} y σ_{YS} continuaran disminuyendo comparativamente al valor correspondiente a la temperatura inmediatamente inferior. Esta anomalía en el comportamiento puede explicarse teniendo en cuenta el proceso de envejecimiento térmico, que para los aceros dúplex presenta una cinética de fragilización más rápida a 475 °C^[10]. Por tanto, los 105 min que dura el ensayo, 65 de ellos a 475 °C, pueden ser suficientes para iniciar un proceso de descomposición espínodal de la ferrita que afecte al comportamiento a tracción. Con el fin de corroborar esta hipótesis, se efectuaron ensayos de durezas en zonas no deformadas de las probetas sometidas al ensayo de tracción a temperatura. Además, también se realizó un ensayo de tracción a temperatura ambiente de una probeta sometida previamente al mismo ciclo térmico que la probeta ensayada a tracción a 475 °C. Para el material ensayado a 475 °C se obtuvo un valor de dureza de 278 HV mientras que para la probeta ensayada a temperatura ambiente la dureza obtenida fue de 261 HV. En el ensayo de tracción a temperatura ambiente de la probeta previamente tratada térmicamente se obtuvieron valores de $\sigma_{UTS} = 946$ MPa y $\sigma_{YS} = 687$ MPa, valores significativamente superiores a los medidos a temperatura ambiente para el material en estado de recepción (Tabla I). Así pues, se puede concluir que las desviaciones observadas a 475 °C en la figura 1 son debidas al proceso de envejecimiento térmico.

Por lo que respecta a la evolución de la ductilidad con la temperatura, la tabla I muestra que la estricción es mayor a temperatura ambiente y alcanza valores mínimos a 325 °C, lo cual puede considerarse como otra manifestación de DSA.

Tabla I. Resultados experimentales de los ensayos de tracción a velocidad de desplazamiento de $1,66 \times 10^{-3}$ mm/s⁻¹

Table I. Tensile parameters for tensile tests carried out at a crosshead speed of 1.66×10^{-3} mm/s⁻¹

Temperatura	25 °C	275 °C	325 °C	375 °C	425 °C	475 °C
σ_{UTS} (MPa)	896	778	830	805	768	779
σ_{YS} (MPa)	620	460	502	474	448	488
$\Delta\sigma_H = \sigma_{UTS} - \sigma_{YS}$ (MPa)	276	318	328	331	320	291
% RA	82	72	63	67	71	69

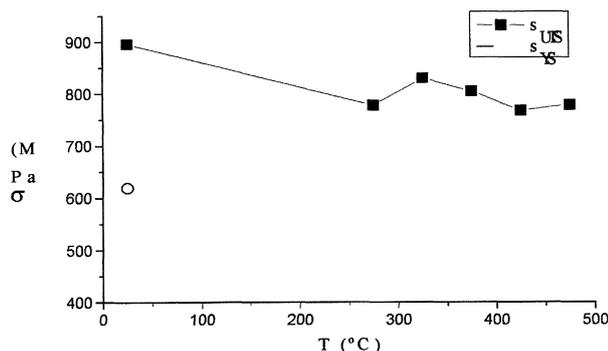


Figura 1. Dependencia de la resistencia máxima (σ_{UTS}) y del límite elástico (σ_{YS}) con la temperatura.

Figure 1. Temperature dependence of tensile strength (σ_{UTS}) and yield stress (σ_{YS}).

Sin embargo, debe hacerse notar que el material conserva una elevada ductilidad en todo el rango de temperaturas estudiado. Mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) se han analizado las superficies de fractura de cada una de las probetas ensayadas. Todas presentan un carácter dúctil, con la presencia de microcavidades con una fuerte deformación plástica a su alrededor, las cuales se han nucleado a partir de inclusiones (Fig. 2).

La comparación de las curvas obtenidas en los dos ensayos de tracción efectuados a diferentes velocidades de deformación a 325 °C, i.e. la $T_{DSA,max}$, se muestra en la figura 3. El parámetro $\Delta\sigma_H$ presenta, para el ensayo efectuado a la mayor velocidad de deformación, un valor de 249 MPa. Dicho valor es inferior a los 328 MPa calculados en el ensayo realizado a $6,6 \times 10^{-5} s^{-1}$. Esta SRS inversa es otra manifestación del fenómeno de DSA,

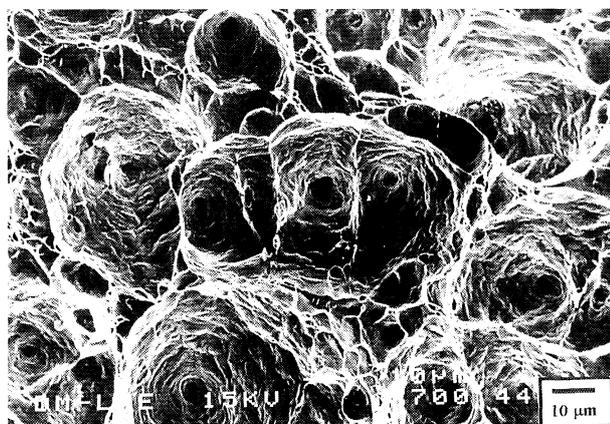


Figura 2. Fotografía obtenida por MEB de la superficie de fractura de la probeta ensayada a 325 °C.

Figure 2. SEM photograph of the fracture surface of the sample tested at 325 °C.

Rev. Metal. Madrid 37 (2001)

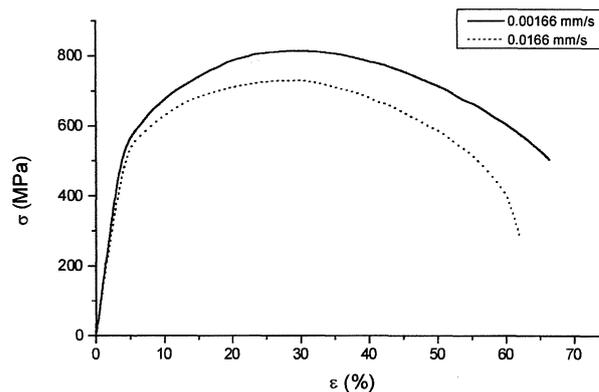


Figura 3. Curvas σ - ϵ para el acero superdúplex ensayado a 325 °C, mostrando la sensibilidad inversa con la velocidad de deformación

Figure 3. Stress-strain curves of the superduplex stainless steel tested at 325 °C, showing inverse strain rate sensitivity.

y su explicación está ligada a la efectividad de anclaje de las dislocaciones móviles por parte de las atmósferas de soluto; así pues, a velocidades de deformación más bajas, el anclaje es más efectivo de manera que se requieren esfuerzos más elevados para liberar las dislocaciones de estas atmósferas de Cottrell, las cuales obstaculizan su deslizamiento.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos de tracción a distintas temperaturas realizados en el acero inoxidable superdúplex SAF 2507 apuntan hacia un efecto de envejecimiento por deformación (DSA). La existencia de dicho fenómeno es conocida para los aceros inoxidables monofásicos, tanto ferríticos como austeníticos, sin embargo, hasta ahora, no había sido referida en aceros inoxidables dúplex.

Para el acero superdúplex estudiado, el efecto de DSA alcanza su máximo a temperaturas en torno a 325 °C. Este valor corresponde a una temperatura homóloga de 0,35, la cual está comprendida en el rango 0,3 - 0,5 en que el fenómeno de DSA es máximo para los aceros inoxidables monofásicos.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Sandvik Steel (Suecia) el suministro del material objeto de este estudio, y a M. Marsal, del Servicio de Microscopía Electrónica del Dept. de Ciència dels Materials i Enginyeria Metallúrgica (UPC), su asistencia técnica. La financiación económica de este trabajo

se debe a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología de España (CICYT, proyecto MAT99-0781). Además, uno de los autores (A.G.), agradece al Ministerio de Educación y Cultura por la beca FPI concedida.

REFERENCIAS

- [1] A. MATEO, L. LLANES y M. ANGLADA, *Deformación Metálica* 236 (1997) 47-54.
- [2] S.C. TJONG y S.M. ZHU, *Metall. Mater. Trans. A* 28 A (1997) 1347-1355.
- [3] J. RAWERS y M. GRUJICIC, *Mater. Sci. Engng. A*207 (1996) 188-194.
- [4] S.C. TJONG y J.S. ZHANG, *Scr. Metall. Mater.* 32 (1995) 1589-1593.
- [5] L. SHI y D.O. NORTHWOOD, *Acta Metall. Mater.* 43 (1995) 453-460.
- [6] H. MUGHRABI y H.J. CHRIST, *ISIJ Int.* 37 (1997) 1154-1169.
- [7] J. CHARLES, *Duplex Stainless Steels'91*, vol. 1, Editions de Physique, Les Ulis, Francia, 1991, pp.3.
- [8] K. TSUZAKI, T. HORI, T. MAKI e I. TAMURA, *Mater. Sci. Eng.* 61 (1983) 247-260.
- [9] J.M. ROBINSON y M.P. SHAW, *Int. Mater. Rev.* 39 (1994) 113-122.
- [10] L. ITURGOYEN, Tesis Doctoral, E.T.S.E.I.B., Universitat Politècnica de Catalunya, 1994.