

Oxidación cíclica de un acero refractario AISI 310 a alta temperatura en atmósferas con contenidos de oxígeno variables^(*)

V. Higuera-Hidalgo*, F.J. Belzunce-Varela** y J. Riba-López**

Resumen Se ha llevado a cabo un estudio experimental sobre la oxidación a altas temperaturas de un acero inoxidable refractario AISI 310, en dos ambientes diferentes: en una atmósfera convencional (21 % de O₂), a 704, 800, 884 y 1.000 °C y en un ambiente simulativo de una turbina de gas y del generador de vapor de una central eléctrica de ciclo combinado (10-11 % de O₂), a 800 y 1.000 °C. La cinética de la oxidación del material se ha determinado a partir, tanto de la ganancia de peso por unidad de superficie experimentada por las probetas objeto de ensayo como por la determinación de los espesores de las capas de óxido formados. Se han obtenido resultados comparables con ambas metodologías y se ha puesto de manifiesto el efecto del contenido de oxígeno y de las demás diferencias experimentales a partir de la comparación de las cinéticas de oxidación del acero en los dos medios oxidantes analizados. La oxidación del acero AISI 310 en situaciones térmicas cíclicas empieza ya a ser importante a partir de una temperatura de 1.000 °C.

Palabras clave Aceros refractarios. Oxidación cíclica. Alta temperatura. Oxígeno.

High temperature cyclic oxidation of AISI 310 steel in atmospheres with variable oxidation content

Abstract High temperature oxidation tests of an AISI 310 stainless steel was performed in two different environments: in a standard atmosphere (21 % oxygen) at 704, 800, 884 and 1,000 °C and in the typical environment of a gas turbine and vapor generator of a combined-cycle electric generation unit (10 % oxygen) at 800 and 1,000 °C. The oxidation kinetics was determined by means of the measurement of the weight gain per unit surface of the specimen and also determining the thickness of the oxide layer. Comparable results have been obtained using both methodologies and the effect of the oxygen content along with the other experimental differences were determined observing the oxidation kinetics in both environments. The cyclic oxidation of AISI 310 deteriorates at temperatures higher than 1,000 °C.

Keywords High temperature. Stainless steels. Cyclic oxidation. Oxygen.

1. INTRODUCCIÓN

A causa de las severas condiciones de operación de los materiales en una planta energética de ciclo combinado deben elegirse éstos de forma que garanticen la fiabilidad del proceso. Así, en los álabes de las primeras etapas de potencia, donde la temperatura de entrada de los gases supera los 1.200 °C se utilizan superaleaciones de níquel mono y policristalinas que se recubren con capas anticorrosivas del tipo MNiCrAlY y barreras térmicas a base de

zircona (ZrO₂)^[1]. El resto de los elementos del ciclo se encuentran sometidos a unas temperaturas cercanas a los 1.000 °C en atmósferas cuyos contenidos de oxígeno libre son superiores al 10 %, caso de la turbina de gas y generadores de vapor y del 21 % de oxígeno libre en el compresor de aire, donde las temperaturas llegan a alcanzar los 650 °C. Bajo estas condiciones tan extremas, el metal estructural que constituye estos elementos se oxida de forma muy severa, por lo que es muy importante

(*) Trabajo recibido el día 13 de diciembre de 2004 y aceptado en su forma final el día 9 de marzo de 2005.

(*) Universidad de Oviedo, Dpto. Construcción e Ingeniería de Fabricación. Campus Universitario, 33203 Gijón, Asturias, España.

(**) Universidad de Oviedo. Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Campus Universitario, 33203 Gijón, Asturias, España. E. mail: vhiguera@uniovi.es, belzunce@uniovi.es, jriba@uniovi.es

analizar estos fenómenos, a fin de alargar la vida del material y mejorar la fiabilidad del proceso mediante un mantenimiento predictivo que evite paradas no programadas por fallo de los componentes, lo que conllevaría altísimos costes. De este modo, con el fin de conocer la vida útil de cualquier componente que deba trabajar en un ambiente oxidante es preciso determinar, con la mayor precisión, la cinética de estos procesos en situaciones similares a las de su servicio.

Por otro lado, es bien sabido que la mejor forma de aumentar la resistencia a la oxidación de las aleaciones de base hierro consiste en la aleación con cromo, ya que este elemento se oxida selectivamente para formar una capa protectora (adherente, continua y compacta) de Cr_2O_3 [2 y 3]. La capa de óxido protectora puede llegar a desprenderse en servicios intermitentes cíclicos, calentamientos y enfriamientos alternados, lo que limita la temperatura máxima de servicio de los aceros inoxidable en estas circunstancias, en virtud de las tensiones térmicas que surgen debido al diferente coeficiente de dilatación que tienen el acero y la capa de óxido: los aceros inoxidable austeníticos AISI 304 y 316 (17-20 % de cromo) se utilizan hasta temperaturas de 870 °C, mientras que el acero austenítico AISI 310 (24-26 % de cromo) admite temperaturas ligeramente superiores a los 1.000 °C, siendo los aceros ferríticos de mayor contenido en cromo (AISI 446: 23-27 % de cromo) los que admiten las temperaturas mayores, situadas en torno a los 1.100 °C [2 y 4].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material utilizado en el estudio que se presenta es un acero inoxidable refractario austenítico AISI 310. Su composición química se expone en la tabla I. Se han utilizado probetas cilíndricas de 25 mm de altura, procedentes de perfiles calibrados de 25 mm de diámetro exterior.

El acero refractario AISI 310 ha sido sometido a ensayos de oxidación cíclica, tanto en atmósfera normal como en una atmósfera con 10-11 % de oxígeno.

2.1. Ensayo de oxidación cíclica al aire (21 % oxígeno libre), en horno metalúrgico

Inicialmente, se había previsto la realización de ensayos a las temperaturas de 800 y 1.000 °C. Sin embargo, la incertidumbre en el comienzo del proceso de oxidación, una vez ensayado el material a 800 °C, en el horno, junto con los datos obtenidos en los ensayos realizados a esta temperatura en el combuster experimental, motivó la realización en el horno de otro ensayo a la temperatura media medida en el material en aquellos ensayos, que resultó ser de 704 °C ya que, a causa de la refrigeración interna a la que se someten las probetas en el combuster (Figs. 1 y 3, que se explicarán más adelante), se crea un gradiente de temperatura entre el valor de la temperatura en el hogar y el del material. Asimismo, el ensayo realizado en el combuster a una temperatura en el hogar de 1.000 °C, correspondía a una temperatura del material de 884 °C. Así pues, los ensayos realizados en horno metalúrgico se llevaron a cabo a cuatro temperaturas distintas 704, 800, 884 y 1.000 °C, con un 21 % de oxígeno y enfriamiento al aire. Las velocidades máximas de calentamiento y enfriamiento fueron, respectivamente, 350 y 250 °C/min. En todos los casos, la temporización de los ciclos de oxidación a cada temperatura fue de 1, 2, 4 y 8 h, a partir de las cuales se continuó con ciclos de 8 h de duración, cada uno, hasta alcanzar las 160 h (20 ciclos de 8 h).

La oxidación de las probetas se ha determinado en virtud de su ganancia de peso por unidad de superficie expuesta, para lo que fueron pesadas antes y también después de cada ciclo de oxidación en una balanza con una sensibilidad de 0,1 mg. Además, después de 8, 16, 40, 80 y 160 h se obtuvieron probetas destinadas al estudio de la formación de las capas de óxidos mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X y a la determinación del espesor de la capa de óxido superficial, para lo que fue preciso el niquelado de las probetas por vía química, con el fin de evitar que la capa de óxido superficial se desprendiera durante la preparación metalográfica de las mismas.

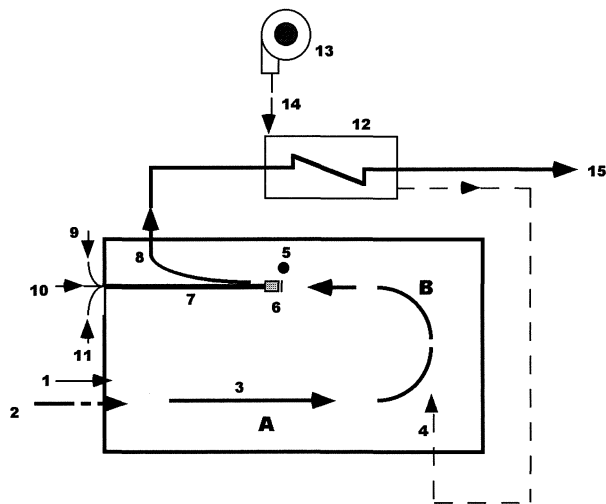
Tabla I. Composición del acero

Table I. Steel composition

%C	%P	%S	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%Ti	%Cu
0,045	0,027	0,002	0,759	1,613	25,365	19,356	0,217	0,067	0,205

2.2. Ensayo de oxidación cíclica en un ambiente con un 10 % de exceso en oxígeno

Se llevaron a cabo ensayos a las temperaturas de 800 y 1.000 °C, en un banco de pruebas de una turbina de gas, proyectado y construido previamente por el equipo de investigación (Fig. 1) [1]. El banco de pruebas es un combustor experimental donde se han reproducido las condiciones ambientales existentes en la propia turbina de gas y en el generador de vapor adyacente, mediante un quemador multigás dotado de una potencia de 0,3 MW. De este modo, ha resultado posible obtener atmósferas de gases de postcombustión con temperaturas y contenidos de oxígeno libre variables. En el caso presente, las temperaturas de ensayo fueron de 800 y 1.000 °C, el contenido en oxígeno libre, del 10-11 % y, además, en todos los ensayos, el contenido de CO fue de 0 ppm. Los ciclos térmicos a las temperaturas de 800 y 1.000 °C, se rea-



1. Entrada de combustible (propano)
 2. Entrada de aire de combustión (aire primario)
 3. Primer paso de los gases de combustión
 4. Entrada aire precalentado (aire secundario)
 5. Toma de muestras de los gases de combustión
 6. Probetas
 7. Portaprobetas y tubos de refrigeración
 8. Salida de los gases de combustión
 9. Termopares (temperatura del seno del material, T1)
 10. Termopar (temperatura del hogar, T2)
 11. Entrada aire de refrigeración de las probetas
 12. Precalentador de aire
 13. Ventilador aire secundario
 14. Aire secundario
 15. Salida de los productos de combustión a la atmósfera
- A. Zona de combustión
 B. Zona de dilución gases combustión/aire secundario

Figura 1. Combustor experimental.

Figure 1. Experimental combustor.

206

lizaron de 4 en 4 h, hasta totalizar las 40 h de ensayo (10 ciclos). La rampa de calentamiento se ha llevado a cabo de forma idéntica a la que tiene lugar en una turbina de gas de ciclo combinado, tal y como se representa en la figura 2, donde partiendo de la temperatura ambiente, se alcanzan 1.000 °C en el hogar en, aproximadamente, 14 min (70 °C/min). Una vez finalizado el ensayo, es decir, transcurridas 4 h a la temperatura de consigna, se lleva a cabo el enfriamiento, hasta alcanzar de nuevo la temperatura ambiente (velocidad de 50 °C/min).

La figura 3 muestra las particularidades de las probetas empleadas en los ensayos llevados a cabo en el combustor experimental. Las probetas utilizadas son idénticas a las ensayadas en el horno metalúrgico, con la particularidad que, en este caso, se les ha practicado un orificio (1, en la figura 3) para la ubicación de un termopar (T1), y varios orificios en sentido radial que comunican con el vaciado interno roscado, a fin de dar salida al aire de refrigeración que se inyectaba de modo continuo desde una instalación de aire a presión (0,35 bares) y que llegaba al seno de las probetas a través del útil que las sustenta en el hogar (7, en la figura 1). La refrigeración aplicada a la probeta en el curso de todo el ensayo justifica, como ya se ha expuesto, que la temperatura en el seno de la misma fuera, siempre, apreciablemente inferior (100-125 °C) a la de la atmósfera que la rodea. El útil de sustentación utilizado posibilita la ubicación de dos probetas de forma simultánea y la de los termopares, tanto los dispuestos en el interior de las probetas objeto de ensayo como el empleado para determinar la temperatura del ambiente en la zona de ensayo del combustor.

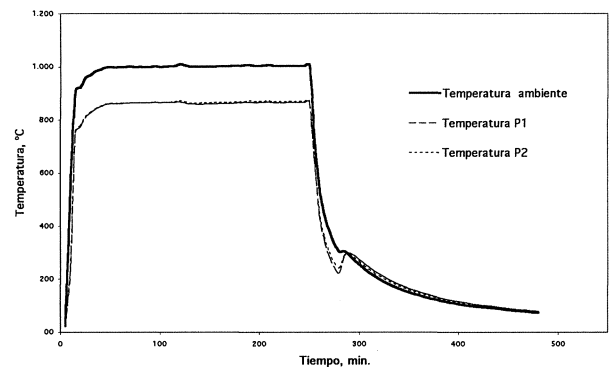


Figura 2. Variación de la temperatura en un ciclo de calentamiento-enfriamiento de dos probetas P1 y P2, ensayadas de forma simultánea en el combustor experimental.

Figure 2. Temperature evolution in a thermal cycle applied to two specimens P1 and P2 simultaneously tested in the experimental combustor

Rev. Metal. Madrid 41 (2005) 204-211

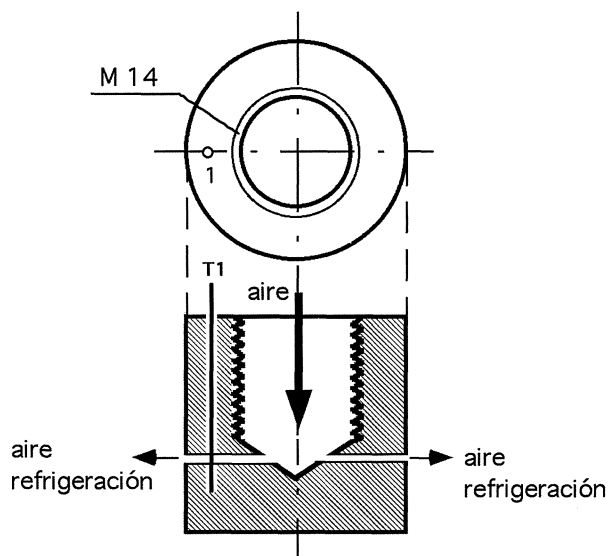


Figura 3. Geometría de las probetas mostrando la refrigeración interna por aire y la localización del termopar (T1) para la medida de la temperatura en el material.

Figure 3. Specimen geometry showing the air cooling system and the thermocouple location (T1) for the measurement of the material temperature.

El análisis en continuo de la atmósfera en el interior del combustor (oxígeno libre y monóxido de carbono), se ha efectuado con un analizador Hartmann Braun, URAS 14.

Al final de cada ciclo de oxidación se midió la ganancia de peso, del mismo modo en que se había hecho en los ensayos realizados en el horno y, en algunas de estas probetas se procedió, igualmente, a determinar el espesor de la capa de óxido formado y a su estudio metalográfico.

3. RESULTADOS

3.1. Oxidación cíclica en horno metalúrgico (21 % de oxígeno libre)

La figura 4 muestra la ganancia de peso por unidad de superficie obtenida en los ensayos de oxidación realizados a las 4 temperaturas indicadas. Se observan curvas de oxidación parabólicas, que son indicativas del carácter protector del óxido formado^[5 y 6].

A partir de estos resultados se han representado las ganancias de peso al cuadrado en función del tiempo, con el propósito de determinar las constantes cinéticas de la oxidación parabólica a cada temperatura:

$$(\Delta m/S)^2 = k_w t \quad (1)$$

La figura 5 muestra la representación de los datos indicados a 800 °C y la tabla II los valores de

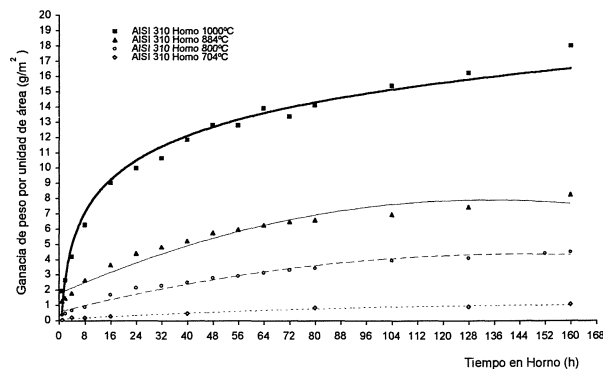


Figura 4. Evolución de la ganancia de peso por unidad de superficie del acero AISI 310 a 704, 800, 884 y 1.000 °C en horno metalúrgico (21 % de O₂ libre).

Figure 4. Evolution of the AISI 310 weight gain per unit of area at 704, 800, 884 and 1000 °C in an standard atmosphere (21 % oxygen).

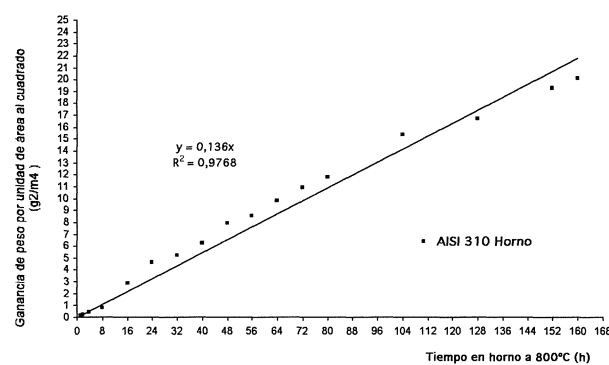


Figura 5. Ganancia de peso por unidad de área al cuadrado en función del tiempo del acero AISI 310 a 800 °C.

Figure 5. Weight gain per unit area against time (AISI 310, 800 °C).

Tabla II. Constantes cinéticas de la oxidación del acero AISI 310 (basadas en la ganancia de peso, k_w y en el espesor de la capa de óxido, k_e) en una atmósfera normal
 Table II. Kinetic constants in the AISI 310 oxidation (based on the weight gain, k_w , and on the oxide thickness, k_e) in an standard atmosphere

Temperatura, °C	Contenido libre de oxígeno	Cte. cinética oxidación, k_w g ² /m ⁴ ·h	Cte. espesor, k_e μm ² /h
704	21	0,0069	sin determinar
800	21	0,136	0,0564
884	21	0,491	0,0898
1.000	21	2,3386	1,0663

las constantes cinéticas de oxidación obtenidas en esta serie de ensayos realizados en contacto con una atmósfera normal (21 % oxígeno).

Por otro lado, una vez finalizados estos ensayos, se ha procedido a determinar el tipo de óxido superficial formado y a medir el espesor de estas capas. Del análisis del espectro de difracción de rayos X efectuado sobre la superficie oxidada, tras el ensayo a 1.000 °C del acero AISI 310 (Fig. 6), se deduce la existencia de una capa de óxido compleja formada por el óxido mixto de hierro y cromo, FeCr_2O_4 , junto con el óxido de cromo Cr_2O_3 . Idéntico resultado se ha obtenido a las demás temperaturas.

Haciendo uso del microscopio electrónico de barrido se han medido los espesores de las capas de óxido generadas en el curso de estos ensayos, que dieron lugar, del mismo modo, a curvas de oxidación parabólicas, que se han podido ajustar a leyes del tipo

$$x^2 = k_e t \quad (2)$$

La figura 7 muestra el ajuste de la evolución del espesor de la capa de óxido al cuadrado en función del tiempo de mantenimiento a 800 °C. La oxidación a la temperatura inferior, 704 °C, ha sido tan baja que no ha resultado posible determinar la constante cinética de la oxidación a esta temperatura y solo se ha podido medir una capa oxidada con un espesor medio de, aproximadamente, 0,6 μm , tras las 160 h de ensayo, tal y como se aprecia en la figura 8. Por el contrario, a las demás temperaturas, se formaba una capa oxidada continua que ha permitido realizar el ajuste tal y como se refleja

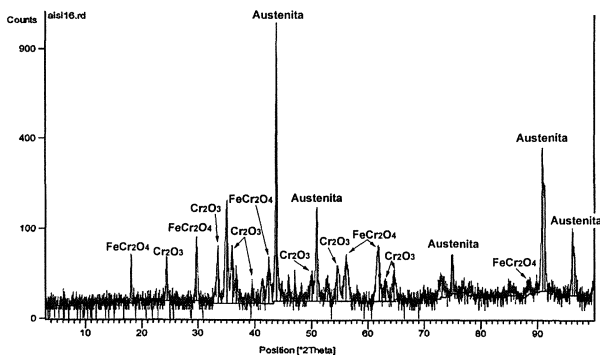


Figura 6. Análisis por difracción de rayos X de la capa de óxido formada tras oxidación cíclica durante 160 h a 1.000 °C, al aire (21 % de O_2).

Figure 6. X-ray diffraction analysis of the oxide layer generated after 160 h of cyclic oxidation in an standard atmosphere (21 % O_2) at 1000 °C.

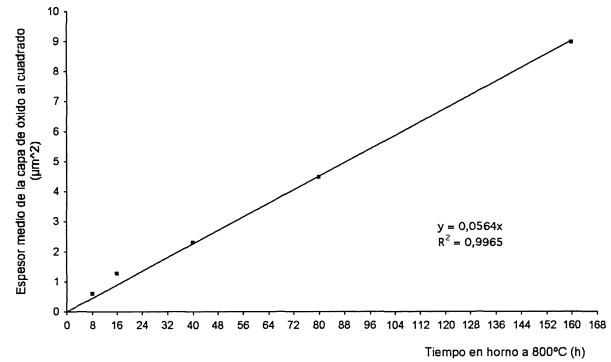
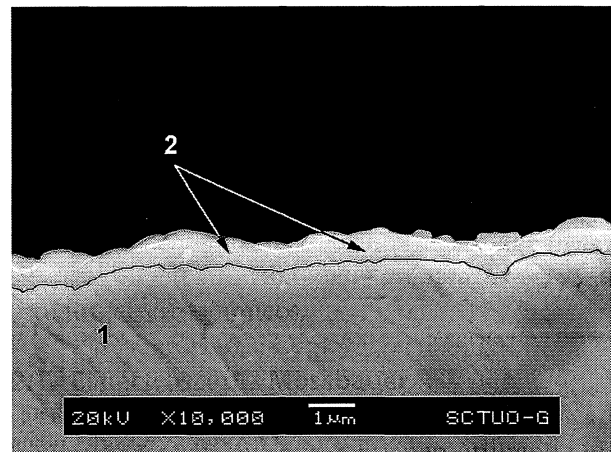


Figura 7. Espesor del óxido al cuadrado en función del tiempo a 800 °C y 21 % oxígeno libre.

Figure 7. Thickness oxide against time at 800 °C and 21 % free oxygen.



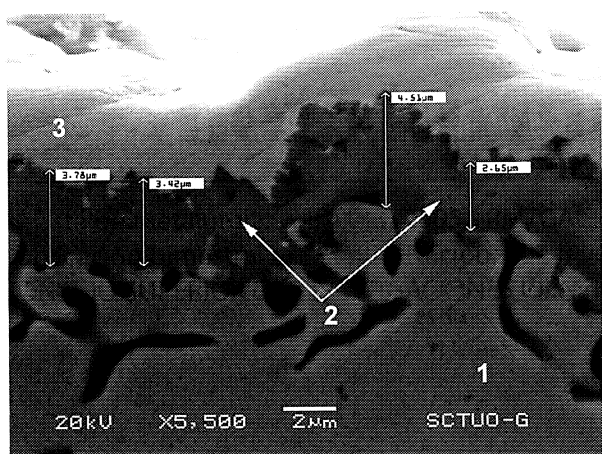
- | | |
|--------------|------------------|
| 1. Substrato | 2. Capa de óxido |
| 1. Substrate | 2. Oxide layer |

Figura 8. Capa de óxido sobre la superficie de un AISI 310 después de ser sometido a oxidación cíclica a 704 °C durante 160 h en atmósfera normal (21 % oxígeno).

Figure 8. Oxide layer on the surface of AISI 310 after 160 h of cyclic oxidation in an standard atmosphere at 704 °C (21 % oxygen).

en la figura 7. Las figuras 9 y 10 muestran el aspecto de la capa oxidada observada a 884 y a 1.000 °C. En ambas, se pone de manifiesto la formación de porosidad interna ligada a la difusión catiónica^[7 y 8] y, en el caso de la temperatura mayor, la rotura de la capa de óxido como consecuencia de las fuertes tensiones térmicas desarrolladas en el enfriamiento al aire. Esta es, sin duda, la causa del significativo aumento de la oxidación registrado a esta temperatura (Fig. 4).

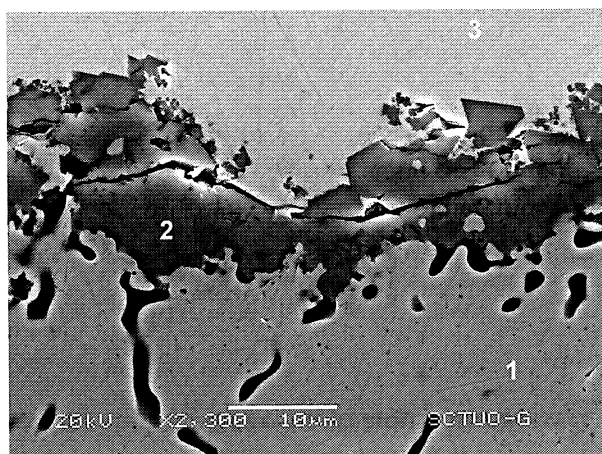
En la tabla II se exponen, también, los resultados de las constantes cinéticas derivadas de las medidas del espesor de la capa de óxido (k_e). Si se



1. Acero refractario 2. Capa de óxido
 3. Recubrimiento de Niquel
 1. AISI 310 2. Oxide layer 3. Nickel-plated

Figura 9. Morfología de la capa de óxido y zona de material adyacente tras 160 h de ensayo cíclico a 884 °C en atmósfera normal.

Figure 9. Morphology of the oxide layer and adjacent area after 160 h of cyclic oxidation at 884 °C in a standard atmosphere.



1. Acero refractario 2. Capa de óxido
 3. Recubrimiento de niquel
 1. AISI 310 2. Oxide layer 3. Nickel-plated

Figura 10. Morfología de la capa de óxido y la zona de material adyacente tras 160 h de ensayo cíclico a 1.000 °C en atmósfera normal (21 % O₂).

Figure 10. Morphology of the oxide layer and adjacent area after 160 h of cyclic oxidation at 1000 °C in a standard atmosphere (21 % O₂).

asume que la oxidación del acero AISI 310 consiste en la formación de óxido de cromo, Cr₂O₃ (no es exactamente así, ya que también se forma el óxido mixto FeCr₂O₄), que la ganancia de peso se

debe exclusivamente a la incorporación de oxígeno para la formación del citado óxido y tomando como densidad de este óxido 5,21 g/cm³ [9], es posible calcular el espesor de la capa de óxido tras las 160 h de ensayo a partir de la ganancia de peso. La figura 11 compara el resultado obtenido a partir de la cinética de la ganancia de peso con el que resulta de aplicar directamente la cinética derivada de la determinación del espesor de la capa de óxido y da cuenta de una correlación bastante buena teniendo en cuenta las hipótesis que se han asumido.

Finalmente, la ganancia de peso por unidad de superficie en la oxidación del acero AISI 310 sigue una ley tipo Arrhenius, que se puede expresar:

$$(\Delta m/S)^2 = k_{w0} e^{-(Q/RT)} t \quad (3)$$

siendo k_{w0} y Q las constantes cinéticas características de este proceso de oxidación (Q es la energía de activación de la oxidación) y R la constante de los gases (8,314 J/molK). La figura 12 muestra el buen ajuste al que ha dado lugar la representación del $\ln k$ frente a $1/T$ y que nos ha permitido calcular las citadas constantes, cuyos valores se muestran en la tabla III.

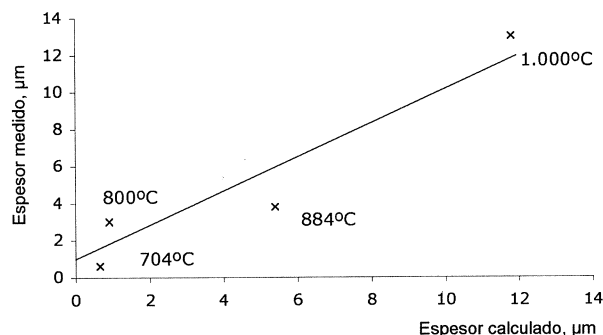


Figura 11. Comparación entre el espesor de la capa de óxido medido sobre la superficie de las probetas y el calculado a partir de las constantes cinéticas de la ganancia de peso.

Figure 11. Thickness comparison of the oxide layer directly measured from the specimen surface and the value calculated from the weight gain kinetic constants.

Tabla III. Constantes cinéticas generales descriptivas de la oxidación del acero AISI 310 en una atmósfera normal

Table III. General kinetic constants for the AISI 310 oxidation in a standard atmosphere

k_{w0} (g ² /m ⁴ h)	Q (kJ/mol)
$5.32 \cdot 10^8$	201

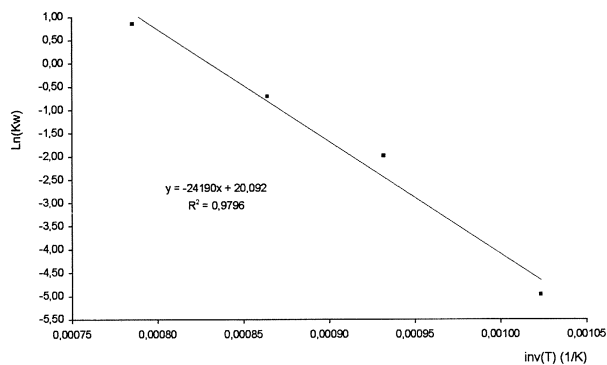


Figura 12. Regresión lineal para el cálculo de las constantes cinéticas generales, k_{w0} y Q del acero AISI 310 en una atmósfera normal (21 % de O_2 libre).

Figure 12. Graphic determination of the general oxidation constants, k_{w0} and Q of AISI 310 in an standard atmosphere (21 % O_2).

3.1. Oxidación cíclica en contacto con gases de post-combustión con contenidos del 10 % de oxígeno libre

El objetivo de estos ensayos era estudiar la oxidación cíclica del acero AISI 310 en un ambiente que reprodujera el existente en el interior de una turbina de gas y generador de vapor operando en un ciclo combinado. Al finalizar los ensayos, se determinó la temperatura media del material en el curso de los mismos que, en virtud de la refrigeración interna de las probetas, era inferior a la de la atmósfera de la cámara, resultando ser de 704 °C para el ensayo realizado a 800 °C y de 884 °C en el caso del ensayo realizado a 1.000 °C, es decir, aproximadamente 100 y 115 °C, respectivamente, por debajo de la reinante en el hogar o ambiente.

En los ensayos realizados a 800 °C (material a 704 °C y 11,5 % de oxígeno libre) la oxidación del acero refractario AISI 310 detectada ha sido despreciable, lo que fue, asimismo, confirmado por microscopía electrónica y difracción de rayos X.

En los ensayos realizados a 1.000 °C (material a 884 °C y valor medio del contenido en oxígeno libre de 10,1 %), se determinó la constante cinética representativa de la ganancia de peso por oxidación de acuerdo con la ecuación (1). La figura 13 da cuenta de la correlación encontrada, con una constante cinética k_w igual a $0,477 \text{ g}^2/\text{m}^4\text{h}$. La figura 14 muestra la capa de óxido superficial formada tras 40 h de ensayo cíclico realizado en las condiciones indicadas: se ha medido un espesor medio de la capa de óxido de 1,95 mm, siendo ésta continua y mostrando, tal y como ya se había puesto de

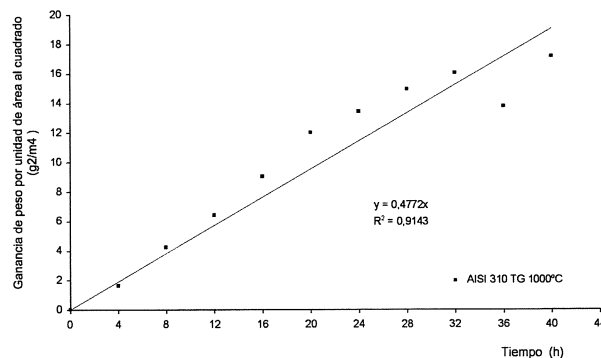
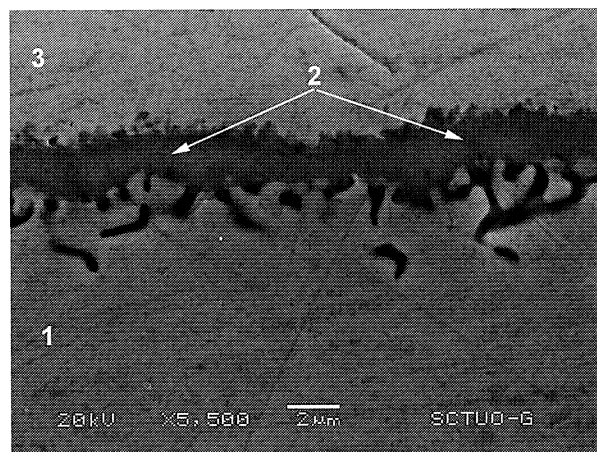


Figura 13. Ganancia de peso por unidad de área al cuadrado respecto al tiempo (1.000 °C y 10.1 % de O_2 libre).

Figure 13. Weight gain per unit area against time (1000 °C and 10.1 % free oxygen).



1. Acero refractario 2. Capa de óxido 3. Niquelado
 1. AISI 310 2. Oxide layer 3. Nickel-plated

Figura 14. Morfología de la capa de óxido y la zona de material adyacente tras 40 h. de ensayo cíclico a 1.000 °C en atmósferas controladas del 10,1 % de O_2 .

Figure 14. Morphology of the oxide layer and adjacent region after 40 hours of cyclic oxidation at 1000 °C in an atmosphere of 10.1 % of O_2 .

manifiesto en los ensayos en atmósfera normal, la formación de porosidades en las regiones adyacentes a la misma.

Se ha podido, finalmente, en la figura 15, comparar los resultados de oxidación cíclica obtenidos sobre el acero AISI 310 a 704 y a 884 °C en las dos series de ensayos efectuados: tal y como cabía esperar, la oxidación disminuye ligeramente en el caso de los ensayos realizados en el ambiente simulativo de las condiciones de trabajo de una turbina de gas/generador de vapor de una central de ciclo combinado, en virtud del menor contenido de oxígeno libre existente en este tipo de atmósfera

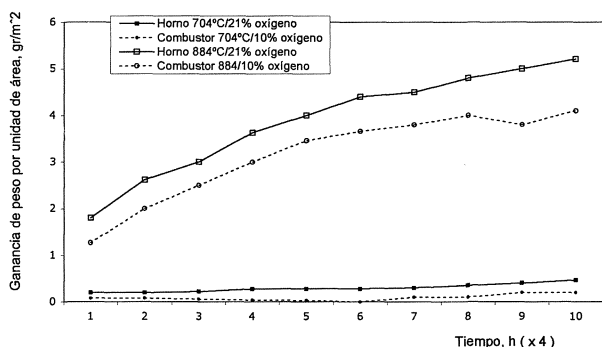


Figura 15. Comparación de la ganancia de peso por unidad de área en atmósfera normal de 21 % oxígeno libre y en una atmósfera de postcombustión con 10-11 % de oxígeno libre. Temperaturas de 704 y 884 °C.

Figure 15. Weight gain comparison in tests performed in a standard atmosphere and in a postcombustion atmosphere with 10-11 % of free oxygen. 704 and 884 °C temperatures.

(10-11 % frente a 21) y del uso de rampas de calentamiento/enfriamiento menos acentuadas.

4. CONCLUSIONES

Las curvas de oxidación cíclica del acero AISI 310 obtenidas, tanto a partir de la ganancia de peso por unidad de superficie como a partir de la medida del espesor de la capa de óxido, han sido siempre de tipo parabólico, en todo el rango de temperaturas y de contenidos de oxígeno libre estudiados.

La determinación del espesor de óxido teórico, a partir de la valoración de la ganancia de peso y asumiendo la hipótesis de que el óxido formado era mayoritariamente óxido de cromo, ha proporcionado resultados aceptables aunque, de hecho, se ha apreciado igualmente la formación del óxido mixto de hierro y cromo.

Se puede estimar que la temperatura de inicio de la oxidación del acero AISI 310 en condiciones cíclicas, en un atmósfera normal (21 % de oxígeno libre), tiene lugar a una temperatura en torno a los 700 °C y que la cinética de oxidación de este acero es lenta, hasta temperaturas en torno a los 1000 °C,

temperatura a la que se aprecia la formación de fisuras a lo largo de la capa de óxido, perdiendo, de esta forma, su carácter protector.

La oxidación del acero AISI 310 disminuye ligeramente en el caso de los ensayos realizados en el ambiente simulativo de las condiciones de trabajo de una turbina de gas/generador de vapor de una central de ciclo combinado en virtud del menor contenido de oxígeno libre existente en este tipo de atmósfera y del uso de rampas de calentamiento/enfriamiento menos acentuadas.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Principado de Asturias a través de la FICYT (Fundación para el Fomento en Asturias de la Investigación Científica Aplicada y la Tecnología) y la empresa Hidroeléctrica del Cantábrico. Proyecto número PC-CIS01-10. Plan I+D+I 2001-2003 del Principado de Asturias.

REFERENCIAS

- [1] F.J. BELZUNCE-VARELA, V. HIGUERA-HIDALGO Y S. POVEDA-MARTÍNEZ, *J. Therm. Spray Technol.*, Vol. 11, N°4 (2001) 461-467.
- [2] G. DI CAPRIO, *Los aceros inoxidable*, Edit. Grupinox, Barcelona, 1999.
- [3] C.Mª. ABREU, Mª.J. CRISTÓBAL, X.R. NOVOA, G. PENA Y Mª.C. PÉREZ, *Rev. Metal. Madrid* 40, (2004) 224-229.
- [4] S. GUTIÉRREZ Y J.M. SAN JUAN, *Rev. Metal. Madrid* 31 (1995) 326-331.
- [5] J. BOTELLA, J. ALMAGRO, E. OTERO, P. HIERRO Y C. MERINO, *Rev. Metal. Madrid* 35 (1999) 22-32.
- [6] J. BOTELLA, J. ALMAGRO, E. OTERO, P. HIERRO Y C. MERINO, *Rev. Metal. Madrid* 34 (1998) 67-70.
- [7] G.Y. LAI, *High-temperature corrosion of engineering alloys*, ASM International, 1990
- [8] N.Y. BIRKS Y G.H. MAIER, *Introduction to high temperature oxidation of metals*, Edward Arnold Pub. Londres, 1983.
- [9] ASM, *Engineered Materials Reference Book*, ASM International, U.S.A., 1994.