

ESTUDIO DE LA RESISTENCIA FRENTE A LA CORROSIÓN POR NITRATOS FUNDIDOS DE RECUBRIMIENTOS BASADOS EN ALUMINUROS EN CONDICIONES DINAMICAS

Rodríguez S.*, Audigié P.*, Agüero A.*, Pedrosa F., Paiva T.**, Diamantino T.C.****

*Área de Materiales Metálicos, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Ctra. Ajalvir Km 4, Torrejón de Ardoz, 28850, (Madrid), España, rodriguezcs@inta.es, audigiep@inta.es, agueroba@inta.es

**Laboratório de Materiais e Revestimentos, Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., Estrada do Paço do Lumiar 22 Ed.E r/c, Lisboa, 1649-038, (Lisboa), Portugal, fatima.pedrosa@lneg.pt, teresa.paiva@lneg.pt, teresa.diamantino@lneg.pt

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.5093>

RESUMEN

Recubrimientos de slurry de aluminio depositados sobre P91, un acero ferrítico-martensítico con un contenido de 9 % en peso de cromo, fueron estudiados y comparados con el material sin recubrir tras ser expuestos por inmersión en la Sal Solar (60 wt.% NaNO₃ – 40 wt.% KNO₃) a 580 °C hasta 1000 h bajo condiciones dinámicas. Dos recubrimientos de aluminuros de diferente microestructura resultantes de la realización de dos tratamientos térmicos distintos después de la aplicación del slurry, fueron ensayados y se compararon los resultados con los obtenidos anteriormente en condiciones estáticas. En ambos casos, el P91 no recubierto mostró un gran descascarillado de los óxidos formados y fue necesario remover los productos de corrosión para realizar una correcta estimación de pérdida de peso. El óxido mostró una estructura de multicapa de Fe₂O₃, Fe₃O₄ y NaFeO₂. Las muestras recubiertas mejoraron significativamente el comportamiento del material no recubierto, exhibiendo una variación de peso mucho menor. La composición y la microestructura de cada recubrimiento se mantuvieron después de 1000 h de ensayo en ambas condiciones de ensayo.

PALABRAS CLAVE: Corrosión; Nitratos Fundidos; Aluminuros; Aceros; Energía de Concentración Solar;

ABSTRACT

Aluminide slurry coatings deposited on P91, a ferritic-martensitic steel with 9 wt.% in chromium, were studied and compared with uncoated P91 after immersion in Solar Salt (60 wt.% NaNO₃ - 40 wt.% KNO₃) at 580 °C for up to 1000 hours under dynamic conditions. Two aluminide coatings of different microstructure and composition, resulting from two different heat treatments performed after the application of the slurry, were tested and the results were compared with those previously obtained under static conditions. Uncoated P91 suffered from oxide significant spallation in both cases and it was necessary to remove the corrosion products to estimate the weight loss. The oxide formed showed a multilayer structure of Fe₂O₃, Fe₃O₄ and NaFeO₂. The coatings significantly improved the behavior of the uncoated material, exhibiting a much lower weight variation. The composition and the microstructure of both coatings were maintained after exposure of 1000 h in both static and dynamic conditions.

KEYWORDS: Corrosion; Molten Nitrates; Aluminides; Steels; Concentrated Solar Power Plant;

INTRODUCCIÓN

Las plantas de energía de concentración solar (CSP) con sistemas de almacenamiento de calor representan una tecnología valiosa para la producción de energía renovable. Sin embargo, todavía necesitan convertirse en una tecnología económicamente viable para ganar ventaja sobre la energía solar fotovoltaica o la eólica. Para superar el principal inconveniente de la intermitencia del sol (condiciones climáticas adversas o los periodos de nocturnidad), mejorar el sistema de almacenamiento de calor aportaría un valor añadido a la CSP. Por eso, las sales fundidas utilizadas como fluidos de transferencia de calor son investigadas. Actualmente, la denominada “Sal Solar” (mezcla eutéctica de 60% NaNO_3 + 40% KNO_3) es el sistema de almacenamiento de calor más empleado, ya que tiene unas buenas propiedades térmicas y físicas pero su temperatura máxima de trabajo es de 580°C debido a la descomposición de la sal (Kearney *et al.* 2003). El principal problema del uso de sales fundidas es que pueden ser muy corrosivas con los componentes metálicos con los permanece en contacto (Bradswad y Goods, 2001; Spiegel y Mentz, 2013), como pueden ser los tubos por los que circula la sal o los tanques de almacenamiento. La resistencia a la corrosión de los aceros en estas condiciones depende de la formación de una capa protectora de óxido rica en Cr, que es similar a lo que ocurre durante la oxidación en las atmósferas gaseosas de alta temperatura. Sin embargo, en contacto con sales fundidas el cromo se disuelve, lo que impide la formación de una capa protectora de óxido (Slusser *et al.* 1985). En su lugar se genera un óxido no protector de rápido crecimiento y resulta en el incremento de la degradación del material debido a mayores velocidades de corrosión.

Proteger los materiales base con recubrimientos puede resolver o moderar la degradación del material debido a la corrosión y así, mejorar la eficiencia de la planta. Por otra parte, el uso de recubrimientos permitiría emplear otros materiales de menor coste en lugar de las caras aleaciones de base níquel utilizadas actualmente, como por ejemplo aceros ferríticos, reduciendo así los gastos de fabricación de nuevas plantas CSP.

Los aluminuros depositados por slurries ya han demostrado una alta resistencia a la corrosión por sales fundidas después de una exposición a corto plazo en condiciones estáticas y dinámicas con una velocidad lineal de 0.2 m/s (Audigí *et al.* 2018). Pero el mecanismo de protección sigue bajo investigación y se requieren condiciones más agresivas, particularmente con mayor velocidad lineal para confirmar el aumento de vida generado por el recubrimiento. Por lo tanto, este estudio se focaliza en la resistencia frente a la corrosión de los recubrimientos de aluminuros después de su inmersión en Sal Solar durante 1000 h bajo condiciones dinámicas (1 m/s) y los resultados serán comparados con los obtenidos anteriormente mediante condiciones estáticas.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Material

Las muestras (40 x 30 x 3 mm) de la aleación de P91, un acero ferrítico-martensítico cuya composición proporcionada por el proveedor, se muestra en la Tabla 1, se mecanizaron a partir de secciones tubulares obtenidas de Vallourec Mannesmann. Las muestras fueron lijadas con SiC con tamaño de grano P180 y, a continuación, desengrasadas con etanol en un baño de ultrasónidos antes de ser recubiertas y/o ensayadas.

Tabla 1. Composición del P91 (wt. %)

Elementos	Fe	Cr	N	Ni	Si	V	S	Mo	C	Mn	W	Nb
wt. %	Bal.	8.6	0.03	0.08	0.40	0.20	0.006	0.95	0.10	0.50	1.80	0.08

Recubrimientos

Las muestras fueron recubiertas por spray con un recubrimiento de slurry de aluminio respetuoso con el medio ambiente (libre de Cr^{+6}) desarrollado por INTA. El slurry fue producido mezclando polvos de aluminio con agua y un aglutinante formado por una mezcla de compuestos inorgánicos. La mezcla resultante fue homogeneizada mediante agitación magnética antes de ser pulverizada sobre las muestras a recubrir con una pistola 475 Xtech. Una vez recubiertas todas las superficies, las muestras se dejaron secar bajo aire del laboratorio durante 3 h. Posteriormente, se realizó el tratamiento térmico de difusión. Para obtener dos tipos de recubrimientos diferentes se realizaron dos tratamientos distintos uno a 1050 °C durante 35 min y otro a 700 °C durante 10 h, ambos bajo un flujo de argón. Después del tratamiento térmico, los residuos de recubrimiento no difundidos (“bisque”) se eliminaron mediante lijado con esponja Scotch Brite.

Ensayo

Tanto las muestras recubiertas como las no recubiertas fueron ensayadas por inmersión en la Sal Solar a 580 °C en condiciones dinámicas. Las sales de calidad industrial fueron proporcionadas por BASF (NaNO_3) y Haifa Chemical (KNO_3) y su composición se muestra en la Tabla 2.

Antes de comenzar el ensayo, las sales fueron calentadas por separado durante 24 h a 120 °C en una mufla y después fueron mezcladas y calentadas a 300° C para eliminar los posibles restos de humedad. A continuación la mezcla de sales (30kg) fue introducida en el horno de ensayo a 580 °C. Por último, las probetas fueron colocadas en varillas de alúmina e introducidas con un soporte dentro del horno, quedando completamente inmersas en las sales. El ensayo se realizó en un horno tubular vertical, con un tanque cilíndrico de AISI 310 equipado con un agitador mecánico de AISI 310, en presencia de aire atmosférico y con agitación mecánica a una velocidad de 1 m/s. Las muestras se sacaron del horno después de 500 y 1000 horas de ensayo para ser pesadas, dejándolas antes enfriar bajo el aire del laboratorio a temperatura ambiente durante unos pocos minutos seguido de un enjuague con agua destilada caliente ($\approx 80^{\circ}\text{C}$) para eliminar los residuos de sal.

Tabla 2. Pureza (%) y composición de las sales de NaNO_3 y KNO_3 (ppm)

Elementos	Pureza (%)	Cl	Na	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Pb
NaNO_3	99.5	190	-	< 5	< 1	< 1	< 0.5		< 1
KNO_3	99.7	150	150	13	5	3	0.5	2	

Decapado

Para realizar una mejor evaluación del comportamiento de las muestras no recubiertas de P91, se eliminaron los productos de corrosión producidos después del ensayo en nitratos fundidos a 580 °C. Algunas probetas, después de ser sacadas del horno y enjuagadas con agua caliente, fueron sometidas a un ataque químico para eliminar los productos de corrosión y determinar la pérdida de material. Dos métodos de decapado diferentes fueron empleados. Un método fue realizado siguiendo la norma ISO 8407:2009: “Corrosion of metals and alloys — Removal of corrosion products from corrosion test specimens” (C.3.1). Para ello se utilizó una solución de HCl al 50% y de hexametenetetramina durante 10 min a temperatura ambiente. El otro método se hizo según la norma ISO 17245:2015: “Corrosion of metals and alloys — Test method for high temperature corrosion testing of metallic materials by immersing in molten salt or other liquids under static conditions”, donde el decapado se hizo en dos pasos: primero con una solución de hidróxido de sodio y permanganato de potasio hirviendo durante aproximadamente 30 minutos y, a continuación, con una solución de citrato de amonio hirviendo durante aproximadamente 30 minutos, repitiendo este procedimiento dos veces.

Las muestras se pesaron después de la eliminación de los productos de corrosión.

Caracterización

Las muestras expuestas se caracterizaron mediante microscopio óptico (Leica MEF 4M) y microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (MEB-EC, de ThermoScientific APREO C-LV) equipado con un espectrómetro de rayos X de energía dispersiva (EDS) de Aztec Oxford. También se realizaron análisis de difracción de rayos X (DRX) (Panalytical X'Pert, Cu $K\alpha$ line) para determinar los productos de corrosión y las fases del recubrimiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del Recubrimiento antes de Ensayar

La microestructura de los dos tipos de recubrimientos obtenidos tras realizar el tratamiento térmico de difusión correspondiente se muestra en la Fig. 1. El recubrimiento formado tras el tratamiento térmico a 1050 °C (recubrimiento denominado INTA1) se muestra en la Fig. 1.a., en la que se observa un recubrimiento denso y libre de grietas con la fase FeAl como única fase intermetálica en la superficie, con un contenido de aluminio de aproximadamente un 25 % en peso. Además, este recubrimiento desarrolla porosidad de Kirkendall entre la fase de FeAl y el sustrato enriquecido en Al que se encuentra debajo, y que también contiene precipitados de AlN como consecuencia de la reacción del Al con el N presente en el sustrato. La Fig. 1.b. corresponde al recubrimiento formado tras realizar el tratamiento térmico a 700 °C (denominado INTA2), este recubrimiento tiene aproximadamente 50 μm de espesor, bastante inferior que el formado en INTA1, y está compuesto de dos capas; una capa gruesa de Fe_2Al_5 (con un alto contenido de aluminio medido por EDS de 45-50 % en peso) con algunos precipitados de Al_9Cr_4 alineados en paralelo a la superficie, y, debajo, una capa delgada de FeAl. Al mismo tiempo, se pueden observar precipitados de AlN en la intercara sustrato-recubrimiento. Este recubrimiento también se caracteriza por la presencia de poros y el desarrollo de grietas perpendiculares a la superficie, producidas durante el proceso de enfriamiento debido a la diferencia del coeficiente de expansión térmica entre las diferentes fases intermetálicas y el sustrato (Agüero et al. 2008).

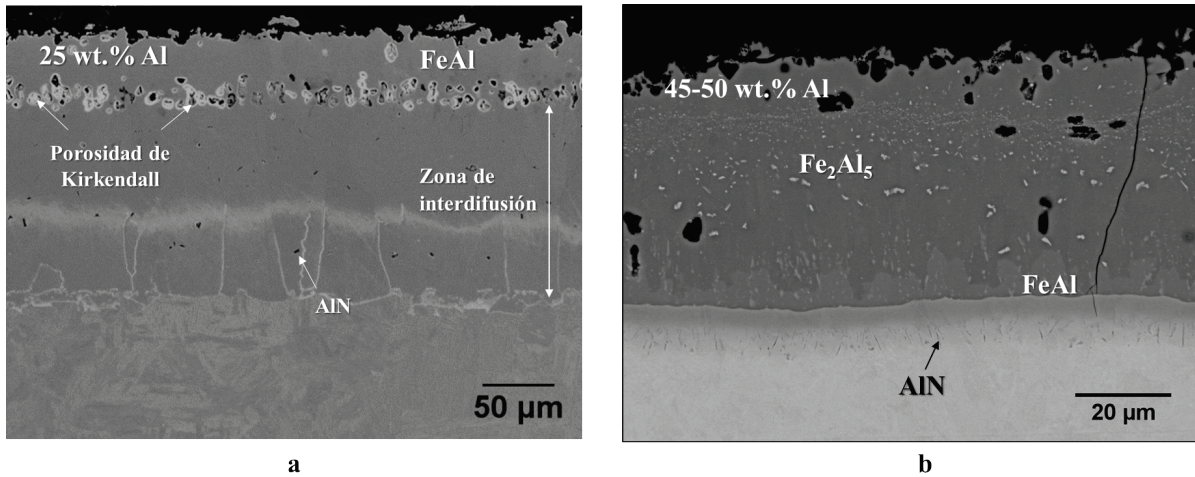


Fig. 1. Microestructura de referencia de los recubrimientos de aluminuros a. INTA1 y b. INTA2 depositados sobre P91 antes de ensayar

Análisis Gravimétrico

Los resultados gravimétricos de las muestras de P91 recubiertas y sin recubrir, tras ser ensayadas hasta 1000 horas en nitratos fundidos bajo condiciones dinámicas, se muestran en la Fig. 2.a. Se puede observar que las muestras recubiertas tienen un mejor comportamiento que las muestras de P91 sin recubrir, presentando una ganancia de peso inferior. Sin embargo, como se distingue en el gráfico, la diferencia de ganancia de peso entre las muestras recubiertas y sin recubrir no es tan alta como cabría esperar. Esto se explica por el descascarillado de los óxidos en las probetas no recubiertas, por lo que la ganancia de peso observada no puede usarse en sí misma como una medida del proceso corrosivo. Comparando ambos recubrimientos, el denominado INTA2 mostró un mejor comportamiento que el de INTA1 con una variación de peso casi insignificante. La ganancia de peso observada en el recubrimiento de INTA1 puede ser debida a la formación de pequeños defectos tras la aplicación del recubrimiento.

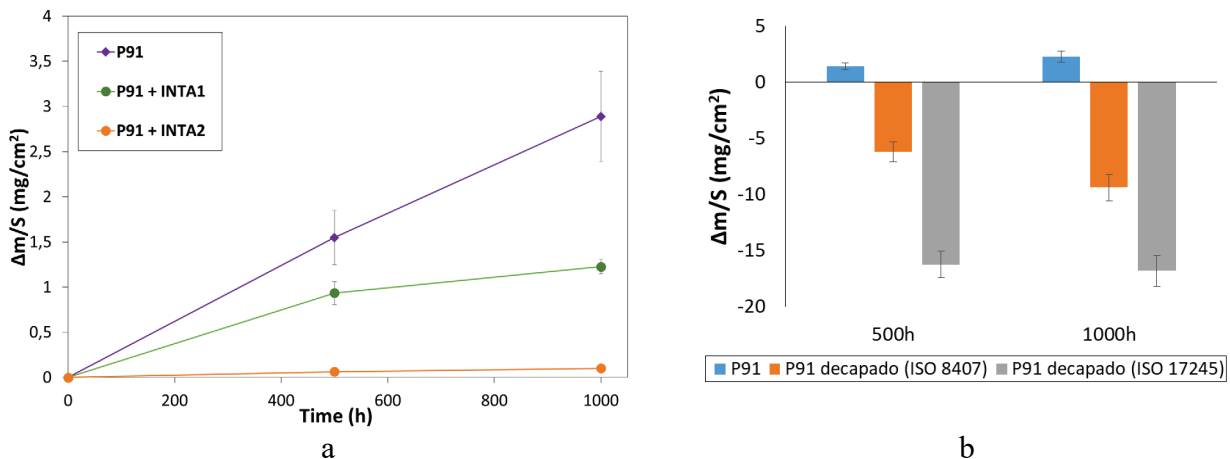


Fig. 2. Resultados gravimétricos después del ensayo en nitratos fundidos a 580°C en condiciones dinámicas durante 1000 h: a) P91 recubierto y sin recubrir sin decapar y b) Comparación de las muestras de P91 decapadas y sin decapar

Para poder estimar el grado de corrosión del sustrato de P91 sin recubrir, las muestras fueron sometidas a un decapado mediante ataque químico para retirar los productos de corrosión y así, determinar la pérdida de material por efecto de la corrosión. Para esto se compararon dos métodos de decapado diferentes siguiendo las normas ISO 8407 e ISO 17245. Los resultados gravimétricos obtenidos tras el decapado, visibles en la Fig. 2.b., muestran que el material base después del ensayo pierde peso al realizar el decapado por cualquiera de los dos métodos empleados. Sin embargo, se aprecia una disparidad entre los resultados obtenidos a partir de los dos métodos. Mediante el método empleado siguiendo la norma ISO 8407 una pérdida de peso de 9.39 mg/cm² fue alcanzada, resultado bastante inferior al obtenido mediante la norma ISO 17245 (16.84 mg/cm²). El método ISO 8407, C3.1 fue comprobado en el laboratorio con probetas sin haber estado expuestas a un medio corrosivo, demostrándose de que no ataca al material base. La menor pérdida de peso podría deberse a que no se eliminaron todos los productos de corrosión, aunque las probetas

fueron analizadas en DRX después del decapado y no mostraron presencia de óxidos. Por otra parte, existe la posibilidad de que siguiendo el método de la norma ISO 17245, el ataque químico utilizado no solo afectara a la disolución de los productos de corrosión sino también al material base, lo que supondría una pérdida de peso mayor. En consecuencia, el método de decapado necesita un estudio más detallado para identificar y optimizar las condiciones que mejor representa el comportamiento del acero con la finalidad de poder calcular la velocidad de corrosión real. Además, ensayos adicionales bajo condiciones dinámicas a velocidades superiores deberían ser realizados para averiguar la influencia de la velocidad en la tasa de corrosión del material. En cualquiera de los casos, los resultados demuestran que el ataque corrosivo de la Sal Solar causa una pérdida importante del material después de pocas horas a 580 °C.

Microestructura tras el Ensayo en Nitratos Fundidos. Condiciones Dinámicas

P91 No Recubierto. La sección transversal del P91 sin recubrir después de 1000 horas de ensayo a 580 °C bajo condiciones dinámicas se muestra en la Fig. 3. Esta probeta que no ha sido previamente decapada, contenía grandes zonas sin presencia de óxidos como consecuencia del descascarillado (Fig. 3.a.). La capa de óxidos que se pudo observar tenía un espesor de aproximadamente 40 µm y presentaba una morfología estratificada con poca adhesión al sustrato y también poca cohesión (Fig 3.b.). El mapeo de elementos realizado mediante EDS (Fig 3.c.) muestra que la capa de óxidos es rica en Fe, Cr, Na y O. Se puede observar que el contenido de Fe y Cr oscila en función del espesor del óxido. Esto indica una repetición de ciclos de oxidación del sustrato en los que se formaron espinelas ricas en Cr, tendencia que se pudo detectar en otros aceros ferríticos expuestos a una atmósfera de vapor (Quaddakers y Ennis, 1998; Agüero *et al.*, 2013). Este comportamiento puede explicarse por ciclos de depleción y redifusión del Cr, pues a estas temperaturas su coeficiente de difusión en los aceros no es muy alto. La presencia de sodio dentro del óxido indica que este elemento ha penetrado a través de las grietas formadas dando lugar, probablemente, a la formación de la ferrita de sodio, NaFeO₂. Este es un producto de corrosión muy estable según Tortorelli *et al.* (1989) y ha sido identificado frecuentemente en aceros expuestos a nitratos fundidos a temperaturas de 600 °C y superiores (Kruizenga *et al.*, 2013). El análisis de DRX (Fig. 4.) mostró la existencia de Fe₂O₃ y la espinela (Fe,Cr)₃O₄ en la capa de óxido. Además, los picos correspondientes al sustrato fueron también detectados como consecuencia del descascarillado. Aunque el NaFeO₂ sea muy estable a esta temperatura, puede haberse formado con un espesor muy fino y además su morfología porosa indica que se puede desprender fácilmente, dos razones por las cuales se explicaría su ausencia en el análisis de difracción. Por otra parte, se detectaron nitruros de cromo en el acero, debajo de la capa de óxidos, y que se formaron tanto inter como intra-granularmente, lo que indica que el material fue nitrurado.

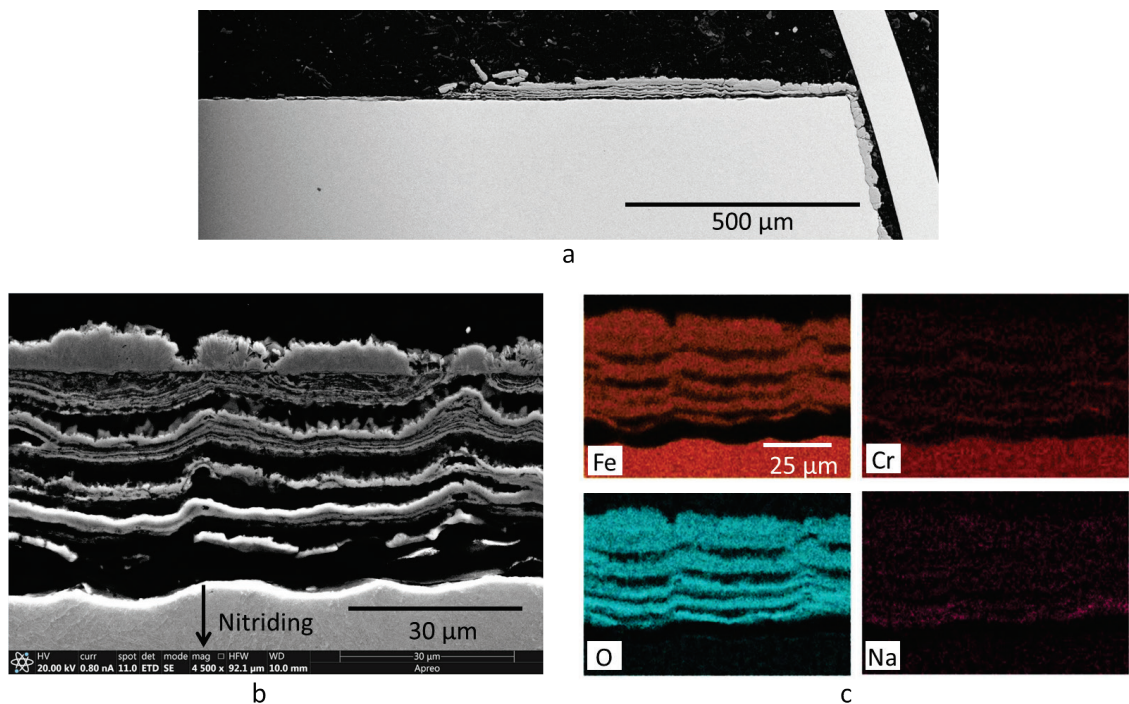


Fig. 3. Sección transversal del P91 no recubierto después de ser ensayado en nitratos fundidos a 580 °C en condiciones dinámicas durante 1000 h. a) Imagen a baja magnificación, b) Imagen a mayor magnificación y c) Mapeo EDS de los elementos detectados en la imagen b)

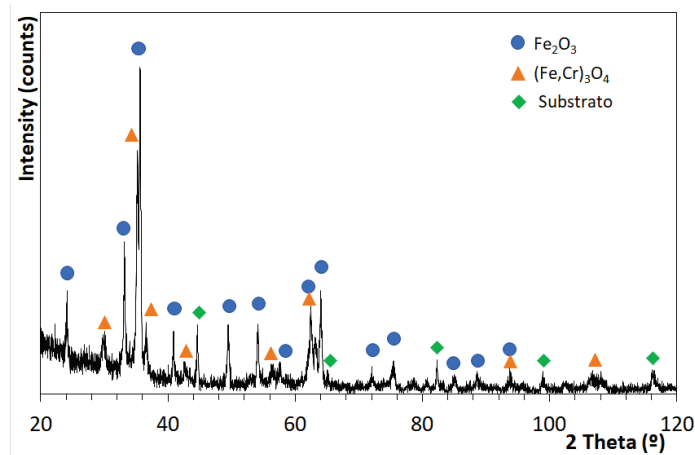


Fig. 4. Difracción de Rayos-X de la muestra de P91 no recubierta después de ser ensayado en nitratos fundidos a 580°C en condiciones dinámicas durante 1000 h

Aluminuros sobre P91. La Fig. 5.a. muestra la microestructura del recubrimiento INTA1 después de 1000 horas de ensayo en nitratos fundidos a 580 °C en condiciones dinámicas. Como se puede observar, el recubrimiento no experimentó cambios ni signos de degradación, exhibiendo la misma microestructura que el recubrimiento sin ensayar. En la parte superior se mantiene la fase de FeAl como única fase intermetálica, siendo esta fase corroborada tras el análisis de DRX (Fig. 8.a.). El contenido de aluminio en esta zona se mantiene en 24-25% en peso (detectado por análisis EDS), composición muy similar a la que mostraban las muestras en el estado inicial, lo que indica que muy poco aluminio fue consumido durante el ensayo. No se pudo observar ninguna evidencia de ataque al recubrimiento. Se desarrolló una capa de óxido muy delgada en su superficie (observar mapeo de elementos mostrado en la Fig 5.b.). El análisis de EDS realizado en esa capa mostró que era rica en O, Al y Fe, conteniendo también en menor medida Na que podría corresponder a NaFeO₂ y/o NaAlO₂. Sin embargo, esta suposición no pudo ser verificada mediante el análisis DRX, que solo identificó los picos de la fase FeAl, esto puede ser debido al poco espesor de la capa de óxidos. Soleimani-Dorcheh y Galetz (2016) ya detectaron estas fases de Na(Fe,Al)O₂ en aceros aluminizados, afirmando que son productos de corrosión estables y protectores.

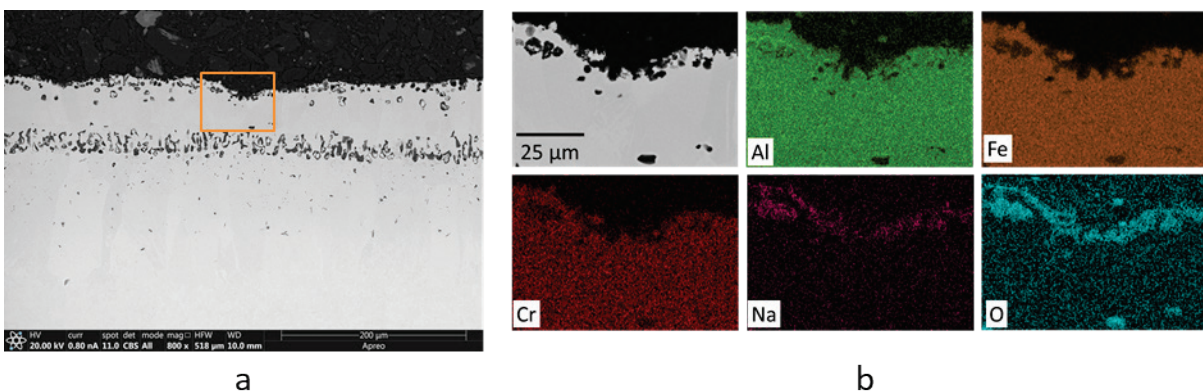


Fig. 5. Sección transversal del recubrimiento INTA1 después de ser ensayado en nitratos fundidos a 580°C en condiciones dinámicas durante 1000 h. a) imagen a baja magnificación del recubrimiento y b) mapeo EDS de los elementos de la zona marcada en a)

Al igual que el recubrimiento INTA1, el recubrimiento INTA2 aplicado sobre P91 tampoco sufrió grandes cambios en la microestructura del recubrimiento y no se observaron signos de degradación evidentes después del ensayo. Como se puede observar en la Fig. 6., la principal diferencia fue un ligero aumento del grosor de la capa de FeAl, así como la creciente presencia de "islas" de FeAl dentro de la fase de Fe₂Al₅, probablemente debido a la lenta interdifusión entre el recubrimiento y el sustrato a medida que el Al se difunde hacia el interior y el Fe hacia el exterior. La Fig. 7. enseña un mapeo EDS de los elementos en la sección transversal de la superficie del recubrimiento INTA2 después de 1000 h de ensayo, donde se puede observar una fina capa enriquecida en O, Al y Fe y con algunas trazas de Na. Aunque el análisis de DRX (Fig. 8.b.) solo identificó la matriz del recubrimiento Fe₂Al₅, estos productos de corrosión podrían corresponder a una capa de óxido protectora de NaFeO₂ y/o NaAlO₂, como ya se dedujo en el recubrimiento INTA1.

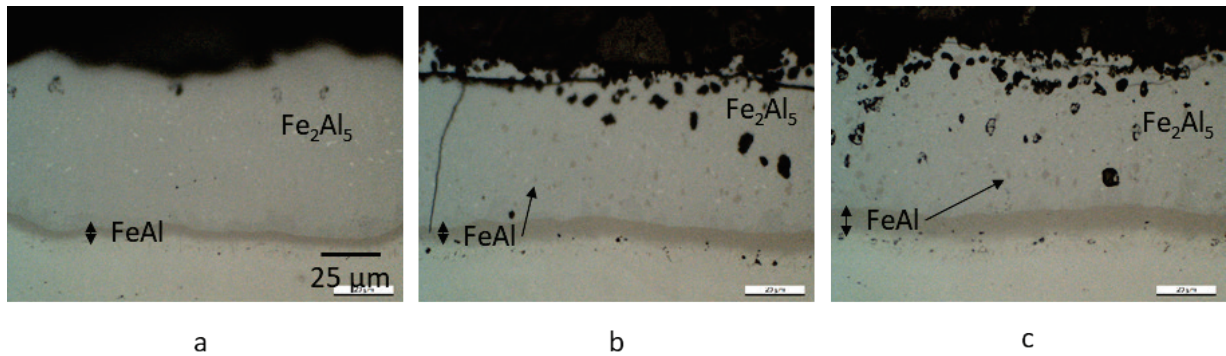


Fig. 6. Evolución de la microestructura del recubrimiento INTA2 antes y después de ser ensayado en nitratos fundidos a 580°C en condiciones dinámicas: (a) estado inicial y después de (b) 500 h y (c) 1000 h

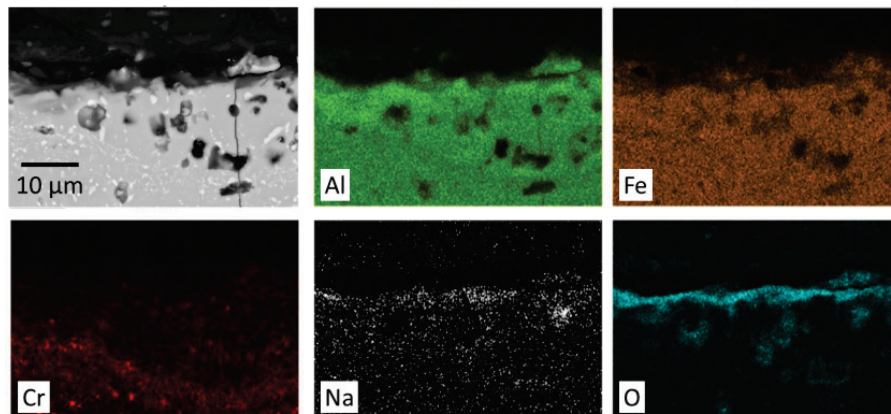


Fig. 7. Mapeo EDS de la distribución de elementos en la superficie del recubrimiento INTA2 después de ser ensayado en nitratos fundidos a 580°C en condiciones dinámicas durante 1000 h

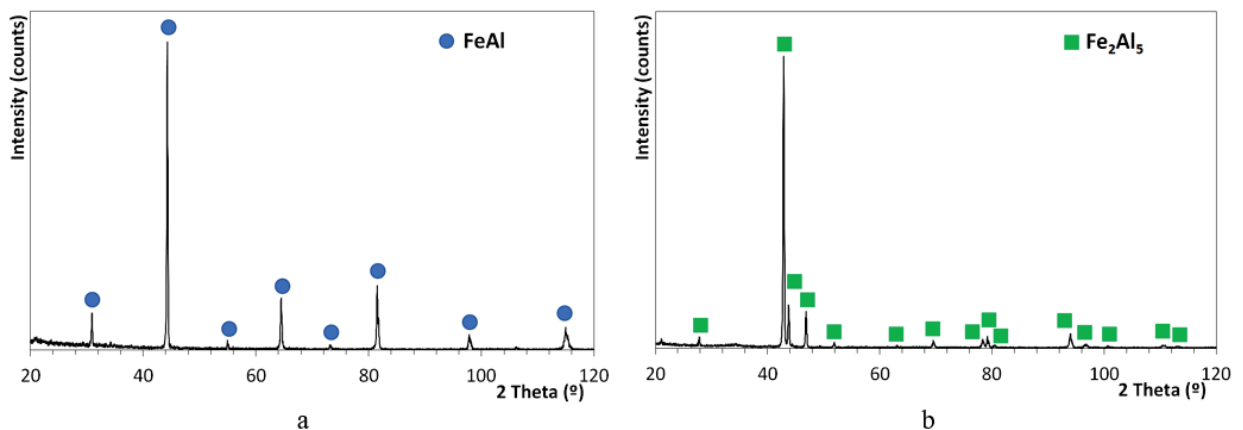


Fig. 8. Difracción de Rayos-X de los aluminuros después de ser ensayado en nitratos fundidos a 580°C en condiciones dinámicas durante 1000 h: a) INTA1 y b) INTA2

Comparación de la Resistencia a la Corrosión de los Materiales Ensayados bajo Condiciones Estáticas y Dinámicas

Comparando los resultados después del ensayo de nitratos fundidos a 580 °C hasta 1000 h bajo condiciones dinámicas, realizadas en este estudio, y condiciones estáticas, de estudios anteriores en el proyecto europeo RAISELIFE, no se apreciaron grandes diferencias en el del P91 recubierto y sin recubrir. En ambas condiciones, el material sin recubrir desarrolló un óxido en multicapas poco adherente y de fácil descascarillado, principalmente formado de Fe_2O_3 y la espinela $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$, aunque también se formó NaFeO_2 que, a diferencia que en condiciones dinámicas, fue fácilmente identificado en condiciones estáticas. Los recubrimientos, INTA1 e INTA2, exhibieron la misma microestructura que en condiciones iniciales sin signos evidentes de degradación, tanto en estático como en dinámico.

CONCLUSIONES

Dos recubrimientos de aluminio de diferente microestructura y composición se depositaron mediante aplicación de un slurry de Al sobre P91 y fueron ensayados, junto con el material sin recubrir, en Sal Solar a 580°C hasta 1000 h bajo condiciones dinámicas con una velocidad lineal de 1 m/s. Ambos recubrimientos mostraron mucho mejor resistencia a la corrosión, comparado con el comportamiento mostrado en el P91 sin recubrir. El recubrimiento INTA1 no mostró cambios en la microestructura ni en la composición después del ensayo. Por otro lado, el recubrimiento INTA 2 tampoco sufrió cambios importantes, salvo el aumento de grosor de la fase FeAl debido a la interdifusión del recubrimiento-substrato producida durante el ensayo.

Como cabía esperar, el material sin recubrimiento fue el que mostró peor comportamiento formando complejas capas de óxidos de fácil descascarillado. Los óxidos formados tenían estructura de multicapas, compuestas por NaFeO_2 , Fe_2O_3 y la espinela $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$. Además, se ha comprobado que para realizar una correcta estimación de la pérdida de material y así tener una mejor constancia de su comportamiento es necesario retirar los productos de corrosión obtenidos después del ensayo en nitratos fundidos. En este estudio se han llevado a cabo dos métodos para decapar el material sin recubrir (siguiendo las normas ISO 8407 e ISO 17245). Sin embargo, estudios adicionales son necesarios para comprobar la eficiencia de cada método.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación H2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención No 823802 para el proyecto SFERA III. Los resultados se obtuvieron durante el proyecto europeo RAISELIFE (GA nº686008) y una colaboración entre LNEG e INTA en el marco del proyecto ProMoTE.

REFERENCIAS

- Agüero A., Gutiérrez M. and González, V. (2008). Deposition process of slurry iron aluminide coatings. *Materials at High Temperatures* 25(4), 257–265.
- Agüero A., Gonzalez V., Mayr P. and Spiradek-Hahn K. (2013). Anomalous steam oxidation behavior of a creep resistant martensitic 9 wt. % Cr steel. *Materials Chemistry and Physics* 141, 432-439.
- Audigié P., Encinas-Sánchez V., Juez-Lorenzo M., Rodríguez S., Gutiérrez M., Pérez F.J. and Agüero A. (2018). High temperature molten salt corrosion behavior of aluminide and nickel-aluminide coatings for heat storage in concentrated solar power plants. *Surf. Coat. Technol.* 349, 1148-1157.
- Bradshaw R.W. and Goods S.H. (2001). Corrosion of alloys and metals by molten nitrates. Sandia National Laboratories Report, SAND 2000-8727
- Kearney D., Herrmann U., Nava P., Kelly B., Mahoney R., Pacheco J., Cable R., Potrovitza N., Blake D. and Price H. (2003). Assessment of a Molten Salt Heat Transfer Fluid in a Parabolic Trough Solar Field. *J. Sol. Energy Eng.* 125(2), 170–176.
- Kruizenga A.M., Gill D.D. and LaFord M. (2013). Materials Corrosion of High Temperature Alloys Immersed in 600°C Binary Nitrate Salt. Sandia Report, SAND 2013-2526.
- Quaddakers W.J. and Ennis P.J. (1998). *Materials for Advanced Power Engineering I*, 123-130.
- Spiegel M. and Mentz J. (2013). High temperature corrosion beneath nitrate melts. *Mater. Corros.* 65, 276–281.
- Slusser J. W., Titcomb J. B., Heffelfinger M. T. and Dunbobbin B. R. (1985). Corrosion in Molten Nitrate-Nitrite Salts. *JOM*, 37(7), 24–27.
- Soleimani Dorcheh, A. and Galetz, M.C. (2016). Slurry aluminizing: A solution for molten nitrate salt corrosion in concentrated solar power plants. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 146, 8–15.
- Tortorelli P.F., Bishop P.S. and DiStefano J.R. (1989). Selection of Corrosion-Resistant Materials for Use in Molten Nitrate Salts. Oak Ridge National Lab. Report. TN.