

Laboratorio de Materiales en el Instituto de Fusión Nuclear: crecimiento y caracterización de recubrimientos con aplicaciones nucleares

R. González-Arrabal, N. Gordillo, M. Panizo-Laiz,
I. Fernández-Martínez, A. Wennberg, A. Rivera, O. Peña,
F. Briones y J. M. Perlado

En este artículo se presentan las capacidades del nuevo laboratorio de Materiales del Instituto de Fusión Nuclear para el desarrollo de recubrimientos con potenciales aplicaciones nucleares. Se describen los dos objetivos básicos del laboratorio: (a) "diseño" de recubrimientos que satisfagan las demandas industriales, y (b) desarrollo de la instrumentación necesaria para recubrir superficies no planas, por ejemplo el interior o exterior de tubos.

Se muestran ejemplos de materiales que son más resistentes a la radiación, materiales autosanantes. Así mismo se presentan materiales solución de otros problemas; en concreto aquellos más resistentes a la corrosión con metales líquidos, que podrían conformar los circuitos de refrigeración de los futuros reactores tanto de fisión como de fusión nuclear.

We report on the capabilities of the new materials lab located at the Instituto de Fusión Nuclear to develop coatings for nuclear applications. The main objectives of the lab are described: (a) "design" of coatings which fulfil industrial requirements and (b) development of the needed instrumentation to coat non-planar surfaces, i. e. inner and outer surface of pipes.

Some examples of radiation resistance materials (self-healing) will be shown. Moreover, we present some new solution with improved corrosion resistance when facing liquid metals to conform the cooling system of future fission and fusion nuclear reactors.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de recubrimientos con propiedades específicas es un tema de actualidad en diversos sectores industriales tales como la microelectrónica, telecomunicaciones, óptica, espacial y nuclear. En la industria nuclear es particularmente interesante el desarrollo de recubrimientos resistentes a la irradiación y a la corrosión a altas temperaturas bajo la presencia de metales líquidos.

Una de las técnicas más versátiles para la fabricación de recubrimientos a escala industrial es la técnica de pulverización catódica (*sputtering*, en inglés). La pulverización catódica es una técnica de depósito en fase de vapor que consiste en la vaporización de los átomos de un material sólido denominado "blanco" mediante el bombardeo de éste por iones energéticos y su condensación sobre el sustrato que se pretende recubrir.

Por lo tanto, el *sputtering* se basa en el intercambio de momento durante la colisión de los iones incidentes con los átomos del material a vaporizar. Desde el punto de vista industrial las ventajas de esta técnica frente a otras son principalmente dos: (a) permite diseñar las propiedades microscópicas (morfología, microestructura, y grado de estrés) y, por ende, las propiedades macroscópicas (conductividad eléctrica, dureza, resistencia a la corrosión) del material depositado y (b) los depósitos se pueden llevar a cabo a temperatura ambiente. Las propiedades microscópicas de los recubrimientos depositados por *sputtering*, dependen de los parámetros de depósito utilizados tales como: el voltaje aplicado al cátodo, la presión de gas en la cámara donde se realiza el depósito, la distancia entre el cátodo y el sustrato y la temperatura de depósito [1]. De manera que la varia-

RAQUEL GONZÁLEZ ARRABAL

es profesora/investigadora en el Instituto de Fusión Nuclear (UPM). Doctora por la Universidad Técnica de Viena. Su actividad investigadora se centra en el estudio de materiales para aplicaciones en futuras plantas de Fusión Nuclear.

NURIA GORDILLO

es doctora en CC. Físicas por la UAM. Actualmente es investigadora en el Instituto de Fusión Nuclear. Su trabajo se centra en la investigación y desarrollo de nuevos materiales con aplicaciones en fusión.

MIGUEL PANIZO LAÍZ

es ingeniero industrial y Máster en Ciencia y Tecnología Nuclear por la UPM. Investigador en el Instituto de Fusión Nuclear, realizando su tesis sobre materiales de primera pared en reactores de fusión.

IVÁN FERNÁNDEZ MARTÍNEZ

es doctor en CC. Físicas por la UAM. Fundador, co-propietario y director general de la empresa Nano4Energy. Diez años de experiencia en el área de recubrimientos depositados mediante pulverización catódica.

AMBIORN WENNBERG

es ingeniero industrial (metalúrgico). Co-propietario y director de negocios de la empresa Nano4Energy. Diez años de experiencia en la industria de fabricación de equipos de crecimiento de materiales, varios artículos y patentes publicadas.

ANTONIO RIVERA

es profesor/investigador en el Instituto de Fusión Nuclear (UPM). Doctor por la Universidad Politécnica de Delft. Su actividad investigadora se centra en el estudio de materiales para aplicaciones en futuras plantas de Fusión Nuclear.

OVIDIO PEÑA RODRÍGUEZ

es doctor en CC. Físicas por la Universidad Nacional Autónoma de Méjico. Actualmente es investigador en el Instituto de Fusión Nuclear. Su trabajo se centra en la investigación y desarrollo de nanopartículas con aplicaciones plasmónicas.

FERNANDO BRIONES

es académico de la Real Academia de Ciencias. 45 años de experiencia en proyectos científicos de I + D. Más de 300 trabajos publicados y 10 patentes autorizadas.

JOSÉ MANUEL PERLADO

es catedrático de Física Nuclear en la UPM y director del Instituto de Fusión Nuclear. Representante del Gobierno español en el Comité Consultivo de la UE/Euratom y asesor de la representación española en el Programa *Keep in Touch* de Fusión Nuclear Inercial.

ción adecuada de estos parámetros permite “diseñar” un material que cumpla aquellas especificaciones para las que fue concebido. Un ejemplo de la dependencia de la morfología del material en función de los parámetros de depósito se presenta en la Figura 1. En ella se muestran dos imágenes de microscopía electrónica de barrido de la sección transversal de dos recubrimientos de wolframio (W) depositados sobre sustratos de acero mediante pulverización catódica utilizando parámetros de depósito diferentes. El recubrimiento de la Figura 1a ha sido depositado aplicando un voltaje de cátodo en configuración de corriente continua (DC). En esta imagen se observa un recubrimiento con estructuras nano-columnares en forma de pirámide invertida. El recubrimiento de la Figura 1b, ha sido depositado aplicando una alta densidad de potencia en el cátodo ($\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$) durante pulsos de corta duración (lo que se conoce como *High Impulse Power Magnetron Sputtering* (HIPIMS)). En este caso se aprecia que el recubrimiento es mucho más denso, y tiene una menor densidad de fronteras de grano y porosidad. Ambos recubrimientos se han depositado en el laboratorio de materiales del Instituto de Fusión Nuclear.

Otra ventaja a destacar del *sputtering* es que no sólo permite diseñar la morfología y microestructura de los materiales, sino también su composición química. Las dos formas más comúnmente utilizadas para ello son: (a) el *sputtering* reactivo [2] (en el que se hace uso de un gas reactivo tal como N_2 u O_2 que interacciona químicamente con aquel material que se pretende depositar) (b) el uso simultáneo de varios blancos cada uno de ellos con una composición química determinada [3]. Así se pueden depositar materiales compuestos con gran interés en la industria nuclear como por ejemplo el nitrato de titanio (TiN), que posee muy buenas propiedades y se postula como barrera para prevenir la interdifusión entre el combustible nuclear y las barras que lo encierran.

¿QUIÉNES SOMOS Y CUÁLES SON NUESTROS OBJETIVOS?

El laboratorio de Materiales del Instituto de Fusión Nuclear (IFN) es un laboratorio conjunto concebido y creado por investigadores de dicho Instituto de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), del Instituto de Microelectrónica de Madrid (IMM/CSIC) y de la empresa de base tecnológica Nano4Energy SLNE [4], con ayuda de

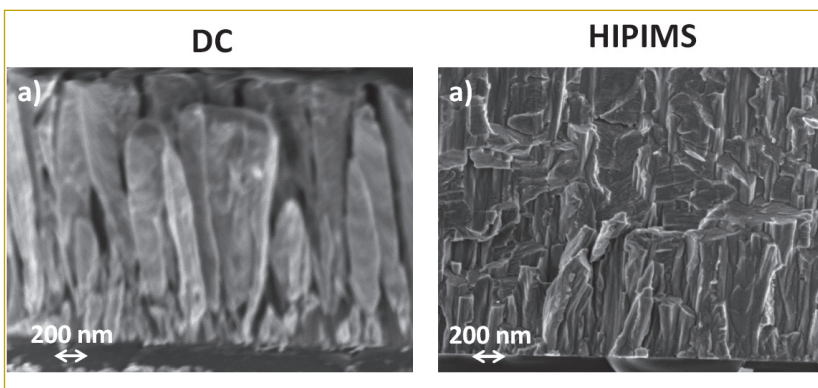


Figura 1. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de la sección transversal de dos recubrimientos de wolframio (W) depositados sobre sustratos de acero mediante pulverización catódica utilizando parámetros de depósito diferentes. (a) el recubrimiento ha sido depositado aplicando un voltaje de cátodo en configuración de corriente continua (DC). (b) el recubrimiento ha sido depositado aplicando una gran densidad de voltaje de cátodo ($\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$) en pulsos de 10 μs de duración. En estas imágenes se observa una clara dependencia de la morfología de las películas en el voltaje aplicado al cátodo. Los recubrimientos han sido crecidos en el Laboratorio de Materiales del Instituto de Fusión Nuclear y las imágenes han sido tomadas por E. Tejado del Departamento de Ciencia de Materiales de la ETSI Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.

profesores del Departamento de Ingeniería Nuclear (DIN) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII). Dicho laboratorio se encuentra situado en el Instituto de Fusión Nuclear y está operativo desde enero 2013. En la Figura 2, se muestra una foto del laboratorio.

Nuestros objetivos son fundamentalmente: (a) el diseño de recubrimientos que cumplan las propiedades demandadas por la industria y par-

ticularmente aquellas demandadas por la exigente industria nuclear, y (b) el diseño y validación de instrumentación que nos permita recubrir superficies no planas, por ejemplo el interior o exterior de tubos.

Nacido como consecuencia de los programas de investigación de materiales de primera pared en el área de la fusión nuclear por confinamiento inercial mediante láser, desde el primer momento se comprendió la gran



Figura 2. Fotografía del laboratorio de materiales del Instituto de Fusión Nuclear situado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales en la Universidad Politécnica de Madrid. En ella pueden apreciarse varios equipos de vacío para el diseño de recubrimientos a nivel de laboratorio y en gris a la derecha está una cámara de depósito que permite fabricar recubrimientos a escala semi-industrial.

variedad de usos de la técnica y las conexiones con los otros campos de la ciencia y tecnología ya mencionados.

Diseño de recubrimientos

En cuanto al diseño de materiales con aplicaciones nucleares, actualmente estamos trabajando en el desarrollo de recubrimientos que presenten una mayor resistencia a irradiación. El daño por irradiación es el resultado de fundamentalmente dos tipos de interacción entre las partículas que conforman la irradiación y los átomos del material sujeto a la misma: (a) el daño por desplazamiento que se origina como consecuencia de la colisión entre la partícula incidente y los átomos del material, generando lo que se conoce como par vacante-intersticial o par de Frenkel y (b) generación de especies ligeras (hidrógeno, helio, deuterio) producto de las reacciones de transmutación ((n, p), (n, α)).

En un material convencional, por ejemplo un acero aleado comúnmente utilizado en un reactor de fisión, lo que ocurre es que los intersticiales y las vacantes se difunden en el interior del material a velocidades muy distintas de manera que típicamente se generan aglomerados de intersticiales (cerca de la superficie del material) y de vacantes (en el interior). Con esta configuración de defectos inducidos por irradiación, las especies ligeras generadas en la transmutación podrían migrar hacia las vacantes acumulándose en su interior formando burbujas que desencadenarían el hinchamiento del material, pudiendo llegar a fracturarlo por sobrepresión interna. Nuestro objetivo es buscar materiales en los que la aniquilación del daño generado por la irradiación sea efectiva (lo que se conoce como propiedades autosanantes), en los que la acumulación de especies ligeras generadas en reacciones de transmutación sea menor y/o en los que éstas se puedan acomodar sin generar fracturas en el material. En principio, los materiales nanoestructurados pueden ser diseñados para cumplir estos requisitos. Un material nanoestructurado es aquel que posee un tamaño de grano del orden de nanómetros en alguna de las direcciones espaciales. Por tanto, tal y como se pone de manifiesto en la Figura 3, una de las principales diferencias entre un material nanoestructurado y un material convencional (denominado masivo) es que los primeros poseen una densidad de fronteras de grano órdenes de magnitud superior a los segundos. Las fronteras de grano son las que

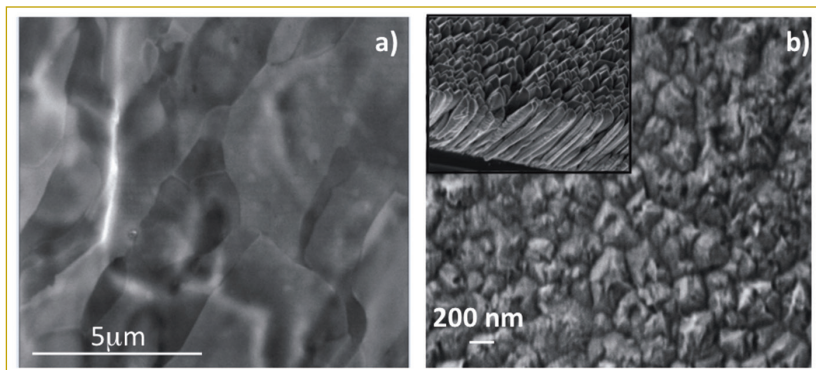


Figura 3. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de: (a) una muestra de Wolframio convencional en la que puede observarse un tamaño de grano típico de unas cuantas micras, (b) un recubrimientos de wolframio nanoestructurado depositado en el laboratorio de materiales del Instituto de Fusión Nuclear formado por estructuras columnares con un diámetro típico de unos cuantos nanómetros.

en última instancia van a dominar el comportamiento del material frente a irradiación favoreciendo la aniquilación de los defectos, acomodando las especies ligeras y sirviendo como caminos preferentes para su difusión hacia el exterior. En el caso ideal, lo que ocurre en los materiales nanoestructurados es que los intersticiales quedan anclados en las fronteras de grano lo que va a favorecer su encuentro con las vacantes y por tanto la aniquilación de ambos (autosanado) [5]. Así mismo, las fronteras de grano también sirven como centros de anclaje para las especies ligeras, aumentando así el volumen efectivo en el que éstas se pueden acomodar y por tanto retrasando a fluencias mayores, la rotura del material por sobrepresión interna.

En particular, uno de los proyectos en los que estamos trabajando en el laboratorio del IFN, está dedicado al desarrollo de materiales nanoestructurados basados en W para ser situa-

dos en la primera pared del reactor de fusión por confinamiento inercial, fusión láser, que se planea construir en Europa dentro del proyecto HiPER [6, 7, 8]. El proyecto HiPER es un proyecto europeo dedicado a demostrar la viabilidad de la fusión inercial o fusión láser como fuente de energía. En HiPER se pretende conseguir las reacciones de fusión (D, T) mediante ignición rápida; para ello diversos haces láser iluminan directamente un pequeño blanco, en el que se encuentra el combustible, hasta conseguir las condiciones de altas presiones y temperaturas necesarias para que ocurra la fusión.

Según estimaciones teóricas [9, 10] el material de primera pared, aquel directamente expuesto a la explosión termonuclear, en HiPER debe soportar flujos térmicos del orden de $70 \text{ MJm}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ y debe ser capaz de acomodar y/o liberar sin fracturarse el C, H, He y D generados durante la explosión y eyectados hacia el material de

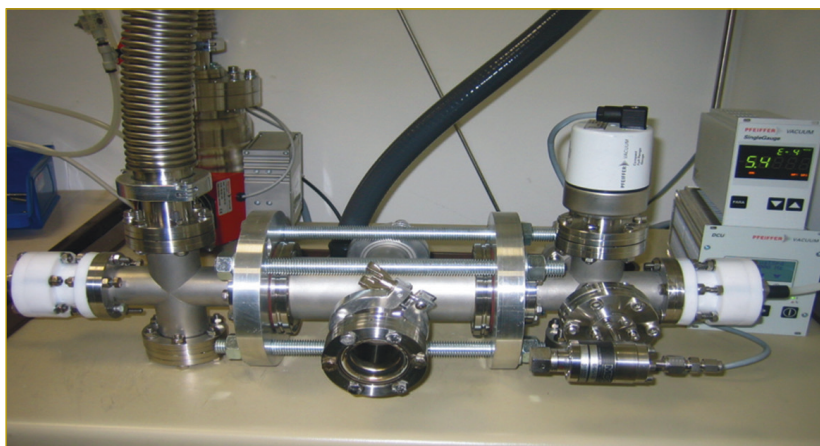


Figura 4. Fotografía del equipo de pulverización catódica en configuración coaxial construido por la empresa Nano4energy en colaboración con el Instituto de Fusión Nuclear para el recubrimiento de superficies internas de tubos.

primera pared con energías del orden de 10^{-13} J, mayores que la umbral para que se produzca daño por desplazamiento. Debido a sus propiedades el wolframio ha sido propuesto como el mejor candidato para formar parte de esta primera pared [11]. Sin embargo, el wolframio convencional (aquel con un tamaño de grano en el orden de las micras) presenta una serie de limitaciones, principalmente relacionadas con su comportamiento termomecánico y la alta retención de especies ligeras en su interior [12]. Estas limitaciones deben ser superadas de cara a su utilización en reactores de fusión.

En nuestro laboratorio se han depositado recubrimientos de W nanoestructurado con la morfología mostrada en la Figura 1 y con espesores de hasta $4\text{ }\mu\text{m}$, que es un espesor suficiente para acomodar las cargas térmicas y los productos resultantes de la explosión en un reactor de fusión inercial con una configuración igual a la propuesta para HiPER. Estos recubrimientos están compuestos únicamente de la fase α -W pura (estable bcc), poseen una densidad muy similar a la del W convencional y una alta pureza. Además presentan un grado de estrés bajo y una buena adhesión al sustrato (silicio o acero). Este último punto es muy importante, especialmente cuando los recubrimientos van a trabajar en ambientes extremos de temperatura e irradiación.

Posteriormente, se ha estudiado la respuesta de los recubrimientos frente a irradiación. Comparando su respuesta con aquella del W convencional. Para ello se irradiaron diversas muestras de W nanoestructurado y de W convencional con: (a) hidrógeno, (b) secuencialmente con carbono e hidrógeno y (c) simultáneamente con carbono e hidrógeno. La caracterización morfológica y microestructural de las muestras antes y después de la irradiación se ha llevado a cabo mediante microscopía electrónica de barrido y de transmisión y por difracción de rayos X. La distribución de hidrógeno en función de la profundidad se ha determinado mediante una técnica de haces de iones denominada reacciones nucleares resonantes, haciendo uso de la reacción $\text{H}^1(\text{N}^{15}, \alpha\gamma)\text{C}^{12}$ [13]. Los resultados obtenidos apuntan que el wolframio

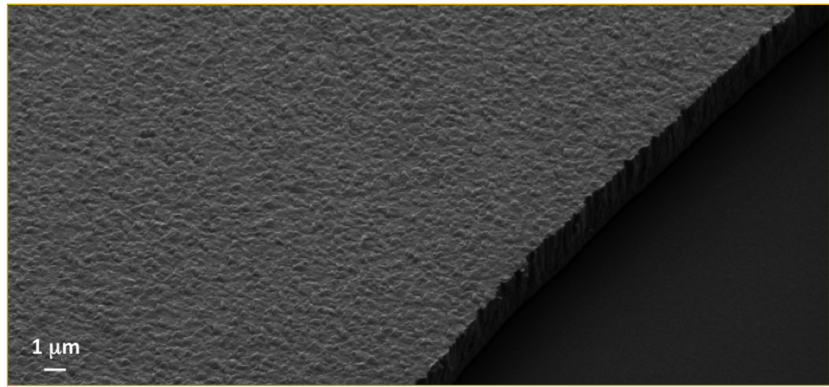


Figura 5. Imagen de microscopía electrónica de barrido de la superficie de un recubrimiento de wolframio depositado sobre acero en el equipo de pulverización catódica en configuración coaxial. En esta imagen puede apreciarse la homogeneidad del recubrimiento.

nanoestructurado presenta propiedades más prometedoras que el wolframio convencional, aunque todavía queda un largo camino por recorrer en la validación del material y en la descripción de sus ventanas operacionales.

En nuestro laboratorio y gracias a la colaboración con Nano4Energy SLNE, el desarrollo de recubrimientos se lleva a cabo, no sólo a escala de laboratorio, sino también a escala semi-industrial. Para ello contamos con una campana de vacío y unas fuentes de pulverización (ver Figura 2) a escala semi-industrial que nos permite extrapolar los resultados de laboratorio a una escala mayor, y con una buena homogeneidad de las propiedades de los recubrimientos (espesor y propiedades morfológicas principalmente).

Diseño y validación de instrumentación para el depósito de recubrimientos

Otro de los objetivos que nos planteamos es el de recubrir superficies que no sean planas. Muchas de las aplicaciones de los recubrimientos, especialmente aquellas que tienen que ver con la resistencia a la corrosión pasan por recubrir superficies interiores o exteriores de tubos cilíndricos. Para abordar este objetivo es necesario diseñar y probar equipos de depósito no convencionales, como por ejemplo aquellos dedicados a la pulverización catódica en configuración coaxial. Actualmente en el laboratorio del IFN se ha desarrollado el equipo de *sputtering*

coaxial que se muestra en la Figura 4 y se ha verificado su escalabilidad industrial a varios metros de longitud.

En nuestro caso el desarrollo de este tipo de equipos está orientado fundamentalmente al recubrimiento interior de tubos. En particular estamos trabajando en el diseño de recubrimientos de W de tubos de acero para su utilización en los circuitos de refrigeración en los que se pretende hacer uso de metales líquidos tales como reactores de generación IV [14] y reactores de fusión tanto en confinamiento inercial (LIFE en EE UU [15], e HiPER en Europa) como de fusión por confinamiento magnético (DEMO) [16]. El objetivo de utilizar metales líquidos como refrigerantes es el aumento de la eficiencia de la planta mediante el aumento de la temperatura de salida del ciclo de refrigeración. En concreto, en el caso de reactores de fusión los metales líquidos con mayor interés son el litio y el eutéctico plomo-litio. En este caso el beneficio, del uso de los metales líquidos que contienen litio se debe a que aúnan excelentes propiedades termohidráulicas y neutrónicas. De manera que permiten trabajar a altas temperaturas además de permitir la producción de tritio por captura neutrónica. El tritio producido de esta manera será el que posteriormente se inserte en la cámara de reactor para alimentar las reacciones de fusión. Sin embargo, el uso de metales líquidos se encuentra muy limitado por los problemas de corrosión que presentan en contacto con otras superficies metálicas. De hecho, la corrosión es tan severa que limita la temperatura máxima de trabajo del material tal y como se pone de manifiesto en la Tabla I.

Tradicionalmente, y debido a su bajo coste de producción el acero es el material más utilizado para estos

Material	Li	Eutectico Li-Pb
Acero (ferrítico/martensítico)	550-600 °C	450 °C
W	> 1370 °C	> 600 °C

Tabla I: Temperaturas máximas de operación marcadas por los problemas de compatibilidad con litio y plomo-litio basados en límites de corrosión según la ref.

circuitos. Sin embargo, tal y como se muestra en la Tabla I el uso del W, supondría un notable aumento de la temperatura de trabajo y, por lo tanto, de la eficiencia de la planta. Entonces, ¿por qué no utilizar el wolframio? La respuesta es clara, el wolframio es un material con una temperatura de transición dúctil-frágil (DBTT) alta, lo que hace que su mecanización sea muy difícil y cara. Por ello, los elevados costes derivados de la mecanización del wolframio, hacen que el W no sea a día de hoy una apuesta competitiva. Nuestra propuesta es recubrir con wolframio los tubos de acero que tradicionalmente se usan en estos circuitos. El uso de un recubrimiento de wolframio permitiría aprovechar las excelentes propiedades de corrosión de este metal en contacto con los metales líquidos, asemejando sus costes de fabricación a aquellos del uso de tubos de acero.

En nuestro laboratorio se han depositado recubrimientos de wolframio en el interior de tubos de acero. Las condiciones de depósito se han optimizado para conseguir las propiedades demandadas en aquellos materiales que deben retrasar y/o evitar la corrosión en contacto con metales líquidos. Es decir, hemos depositado recubrimientos que presenten una buena adhesión al sustrato, que son homogéneos, con una alta pureza y lo mas compactos posibles. En la Figura 5, se muestra una imagen de microscopia electrónica de barrido de la vista superior de un recubrimiento de W con un grosor de 2 μm , depositado sobre un tubo de acero en el *sputtering* coaxial desarrollado en nuestro grupo. En ella puede observarse la homogeneidad del recubrimiento.

Dentro del proyecto actualmente en marcha se estudia la posibilidad de realizar depósitos aún más densos

mediante la técnica denominada HIPIMS (*High-Power Impulse Magnetron Sputtering*) con magnetrones cilíndricos coaxiales en tubos de diversos diámetros y de gran longitud.

CONCLUSIONES

El Laboratorio de Materiales del Instituto de Fusión es un laboratorio conjunto concebido y creado fundamentalmente por investigadores de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y de la empresa Nano4Energy. Dicho laboratorio se encuentra situado en el Instituto de Fusión Nuclear (bajo acuerdo de colaboración con el Departamento de Ingeniería Nuclear) de la Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid (ETSII).

El objetivo principal de este laboratorio es “diseñar” recubrimientos y/o películas delgadas que posean aquellas propiedades demandadas por industrias de distintos sectores y muy en particular por la industria nuclear. Así como el desarrollo de la instrumentación necesaria para recubrir superficies no planas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a todos los miembros del Departamento de Ingeniería Nuclear, encabezados por su director Prof. Eduardo Gallego, por su ayuda y positiva disposición para el buen fin de este laboratorio, que beneficiará a la actividad tanto docente como investigadora.

REFERENCIAS

- [1]. J. A. Thornton and J. A. Hoffman, J. Vac. Sci. Technol., 40 (1977), 164
- [2]. S. Berg, T. Nyberg, Thin Solid Films, 476 (2005) 215–230
- [3]. J. M. Albella, “áminas delgadas

y recubrimientos. Preparación, propiedades y aplicaciones”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, ISBN: 978-84-00-08166-9

- [4]. <http://www.nano4energy.eu>
- [5]. G. Ackland, Science 327 (2010) 1587
- [6]. M. Perlado et al. Proc. SPIE 8080 (2011) 80801Z
- [7]. B. Le Garrec et al. “Proc. SPIE 8080 (2011) 80801V
- [8]. <http://www.hiper-laser.org>
- [9]. <http://aries.ucsd.edu/ARIES/WDOCS/ARIES-IFE/SPECTRA/>
- [10]. J. Alvarez, D. Garoz, R. Gonzalez-Arrabal, A. Rivera and M. Perlado, Nucl. Fusion 51 (2011) 053019
- [11]. V. Barabash, M. Akiba, I. Mazul, M. Ulrickson and G. Vieder, J. Nucl. Mater. 233-237 (1996) 718-723
- [12]. S. Kajita, W. Sakaguchi, N. Ohno, N. Yoshida and T. Saeki, Nucl. Fusion 49 (2009) 095005
- [13]. J.R. Tesmer, M. Nastasi, “Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis”, Pittsburgh, PA, MRS, 1995
- [14]. L.K. Mansur, A.F. Rowcliffe, R.K. Nanstad, S.J. Zinkle, W.R. Corwin, R.E. Stoller, Jour. of Nuc. Mater. 329–333 (2004) 166–172
- [15]. Anklam T.M., Dunne M., Meier W.R., Powers S. and Simon, S. Fusion Sci. Technol. 60 (2011) 66–71.
- [16]. J. Pamela, A. Becoulet, D. Borba, J. L. Boutard, L. Horton and D. Maisonnier, Fus. Eng and Design 84 (2009) 194-204.
- [17]. S.J. Zinkle, N. M. G., Fusion Engineering and Design: 51-52, (2000) 55-71.■

En el próximo número de

especial

39

Nuclear España

REUNIÓN ANUAL
de la SNE

39 REUNIÓN ANUAL
REUIS
25-27 septiembre 2013
SOCIEDAD NUCLEAR ESPAÑOLA