

RECUBRIMIENTOS SELECTIVOS ELECTRODEPOSITADOS DE NÍQUEL NEGRO NANOESTRUCTURADO PARA APLICACIONES EN COLECTORES SOLARES DE CANAL PARABÓLICO

NANOSTRUCTURED BLACK NICKEL ELECTRODEPOSITED SELECTIVE COATINGS FOR APPLICATIONS IN PARABOLIC TROUGH COLLECTORS

Lizama-Tzec F.I.^{1*}, Manterola-Villanueva G.², García-Valladares O.², Cetina-Dorantes M.¹, Herrera-Zamora D.M.², Pérez-Rábago C. A.², Oskam G.¹, Rodríguez-Gattorno G.¹

¹ Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV-IPN, Mérida, Yucatán. 97310, México.

² Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM).
Temixco, Morelos 62580, México

*flizama@cinvestav.mx

RESUMEN

La energía solar se convierte directamente en energía térmica a través de colectores solares de canal parabólico (PTC) los cuales usan tubos de cobre como receptores en el foco de la parábola. El tubo de cobre es revestido de un recubrimiento selectivo para mejorar la eficiencia. En este trabajo se prepararon recubrimientos selectivos a base de níquel negro nanoestructurado sobre tubos de cobre, por la técnica de electrodeposición y tubos recubiertos con pintura selectiva por el método de pulverización. El objetivo fue comparar la eficiencia de los tubos bajo luz solar concentrada y luego caracterizarlos por diversas técnicas. La caracterización por diversas técnicas fue hecha para adicionalmente determinar los efectos de

la luz solar concentrada en el recubrimiento de níquel negro. Los tubos fueron 2.10 m de largo y 1.9 cm de diámetro. Se caracterizó el recubrimiento selectivo del tubo antes y después de los ciclos térmicos de operación bajo luz solar concentrada. Para el estudio los tubos fueron cortados. Las técnicas de caracterización utilizadas fueron difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido (MBE), espectroscopía de reflectancia UV-Vis-NIR y FTIR. Los resultados de reflectancia, MBE y difracción de rayos X muestran que los recubrimientos de níquel negro no se afectaron durante los ciclos térmicos.

Palabras clave: Energía Solar; Colector de Canal Parabólico; Electrodeposición; Níquel Negro.

ABSTRACT

Solar energy is converted directly into thermal energy through parabolic trough solar collectors (PTC) which use copper tubes as receivers at the focus of the parabola. The copper tube is coated with a selective coating to improve efficiency. In this work, selective coatings based on nanostructured black nickel on copper tubes were prepared by the electrodeposition technique, and tubes coated with selective paint by the spraying method. The aim was to compare the efficiency of the tubes under concentrated sunlight and then characterize the covered tubes by various techniques. The characterization by various techniques was made to additionally determine the effects of concentrated sunlight on the black nickel coating. The tubes were 2.10 m long and 1.9 cm in diameter. The selective coating of the tube before and after the thermal cycles of operation under concentrated sunlight was characterized. For the study the tubes were cut. The characterization techniques used were X-ray diffraction, scanning electron microscopy (SEM), UV-Vis-NIR and FTIR reflectance spectroscopy. The results of reflectance, SEM, and X-ray show that the black nickel coatings were not affected during the thermal cycles.

Keywords: Solar Energy, Parabolic trough collector, Electrodeposition, Black Nickel.

INTRODUCCIÓN

La dependencia de los combustibles fósiles a nivel mundial es grande, sin embargo, se espera que la transición hacia la independencia energética de los combustibles fósiles se acelere en los próximos años utilizando fuentes renovables. La energía solar se consigue convertir directamente en energía térmica a través de colectores de canal parabólico (PTC) [1]. El PTC consiste en un espejo concentrador de forma parabólica que refleja la radiación solar directa sobre un tubo receptor ubicado en la línea focal de la parábola. La radiación solar concentrada en el exterior del tubo calienta el fluido que circula por su interior, convirtiendo la radiación solar en energía térmica. La eficiencia del colector depende de las propiedades ópticas y térmicas del tubo receptor, comúnmente, el tubo receptor de un PTC es de acero inoxidable (SS) y está rodeado de vidrio transparente para reducir las pérdidas de calor. Sobre el tubo de SS se deposita un revestimiento selectivo de alta absorción solar y baja emitancia térmica para mejorar el desempeño. Para facilitar la fabricación, el

tubo de SS pudiera ser sustituido por cobre. Actualmente algunos recubrimientos selectivos comerciales son depositados por técnicas de vacío las cuales son difíciles y costosos de escalar [2–4]. Los tubos comerciales para concentración solar utilizan vacío entre el tubo receptor y el vidrio protector, lo cual los hace costosos y difíciles de mantener, sin embargo, para un rango de temperatura entre 100-200 °C, el vacío entre el tubo receptor y el vidrio pudiera no ser necesario [5,6]. Existe una demanda de este tipo de sistemas principalmente por la industria que requiere calentamiento de agua o algún fluido en el rango de temperatura de 100-200 °C [7]. El níquel negro es un material tipo cermet que se deposita electroquímicamente con buenas propiedades de absorción solar y baja emitancia térmica el cual se usa en aplicaciones termosolares sin concentración solar [8–11]. El recubrimiento selectivo basado en níquel negro pudiera ser usado en aplicaciones de concentración solar debido a que se obtiene por electrodeposición, que es una técnica robusta de bajo costo, además que el níquel negro es estable en el rango de temperatura de 100-200 °C [11]. Algunos sistemas comerciales para

concentración solar usan tubos receptores recubiertos con pintura negra selectiva la cual reemite mucho del calor generado hacia el exterior, bajando la eficiencia. Estas pinturas son caras y requieren un paso de curado para poder adherirse mejor al sustrato. En este trabajo reportamos en la preparación de recubrimientos selectivos nanoestructurados a base de níquel negro electrodepositado sobre tubos receptores de cobre con el objetivo de comparar su desempeño con tubos de cobre recubiertos de pintura selectiva. De manera adicional se caracterizaron los tubos luego de ser expuestos a la luz solar concentrada por diversas técnicas con el fin de investigar los efectos de luz concentrada sobre el níquel negro.

METODOLOGÍA

En el desarrollo de esta investigación se adoptó una metodología experimental la cual implica observar el efecto en la eficiencia del colector solar por el tipo de recubrimiento utilizado en el tubo receptor y adicionalmente el efecto de la luz solar concentrada sobre los recubrimientos electrodepositados.

Los tubos fueron lavados con agua suave y jabón de laboratorio (Alconox) para

posteriormente ser tratados con varias aplicaciones de Isopropanol. Seguido fueron pulidos con alúmina de 1 μm , 300 nm y 50 nm de tamaño de partícula (Buehler), inmediatamente los tubos fueron enjuagados y sellados para poder ser sumergidos en las soluciones para electrodeposición. Los tubos fueron activados con una solución de HCl 1 M y posterior enjuagados antes del proceso de electrodeposición.

El electrodeposición fue hecho con un potencióstato/galvanostato Gamry Reference 3000 acoplado a un Booster. El recubrimiento selectivo consta de una película reflectora de infrarrojo basada en níquel (Ni) y otra de níquel negro (NN) con la función de absorber el espectro solar. La película de Ni se depositó de una solución de 0.3 M de $\text{Ni}(\text{SO}_4)$, 0.1 M de NaCl y 0.3 M de H_3BO_3 a densidad de corriente de -10 mA/cm^2 a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y pH 4. El NN fue depositado de una solución 0.2 M de NiCl_2 y 0.5 M de NaCl usando una densidad de corriente de -1.2 mA/cm^2 por 60 s y luego otra de -3 mA/cm^2 por 180 s, a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y pH 6. Los tubos de cobre fueron de 2.10 m de largo y 1.9 cm de diámetro. Luego de la síntesis los tubos receptores fueron ubicados en el eje focal del espejo parabólico dentro de un tubo de

borosilicato para medir el desempeño. El espejo parabólico fue 2 m de largo con 1 m de apertura. El espejo estaba acoplado a un sistema de seguimiento solar de un eje.

Las pruebas fueron realizadas de acuerdo con las normas, tanto la mexicana (NMX-ES-001 NORMEX 2010) como la internacional (ISO-9806:2017). A manera de resumen y de acuerdo con el sistema en estudio se tienen los siguientes parámetros de funcionamiento requeridos. Flujo de agua: $2.60 \text{ kg/min} \pm 1\%$, Temperatura entrada: $T_{in} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, T_{in} : (30,60,90), Temperatura salida: $T_o \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, Irradiancia global: $I \geq 800 \text{ W/m}^2$. Las pruebas de los tubos fueron realizadas en condiciones exteriores en Temixco Morelos en el Instituto de Energías Renovables de UNAM.

Luego de los ciclos térmicos, los tubos fueron retirados del tubo de borosilicato del colector y se cortaron de tamaño adecuado para posteriores análisis. Se cortaron tres secciones de 6 cm, una en la parte media y las otras dos en los extremos de los tubos. La finalidad de tomar 3 zonas diferentes de análisis fue determinar si la morfología y las propiedades ópticas fueron similares a lo

largo del tubo. Para la caracterización de las muestras, estas fueron aplanadas evitando afectar la superficie del níquel negro que analizaría. El aplanado consiste en hacer un corte en la parte frontal del tubo con un disco de diamante a muy baja velocidad, luego las secciones cortadas se estiraron manualmente y se colocaron sobre los platos de una prensa manual. Se aplicó una fuerza de 20 MPa para aplanar las muestras evitando que la parte a analizar se ubique sobre los platos de la prensa. Para comparar el desempeño de los tubos electrodepositados, una pintura negra comercial (solkote) estable en el rango de temperatura a evaluar, fue aplicada por pulverizado con una compresora, a un tubo de cobre de similares características a los electrodepositados y fueron caracterizados bajo las mismas condiciones de luz concentrada.

Las técnicas de caracterización utilizadas para las muestras de los tubos fueron difracción de rayos X (DRX) utilizando un equipo SIEMENS D-5000, microscopía electrónica de barrido (MBE) utilizando un microscopio de barrido electrónico de emisión de campo FESEM; JEOL JSM-7600F y la espectroscopía de reflectancia UV-Vis-NIR mediante un espectrofotómetro Avantes, modelo

Avaspec 2048, con rango de longitud de onda de 0.3 a 2.5 μm y un espectrofotómetro infrarrojo Avantes, modelo Avaspec-Nir 256-2.5, ambos equipos con esfera de integración Avantes, modelo 50-Ls-HAL. El espectro de reflectancia en el rango de 2.5 a 15 μm fue hecho con un espectrofotómetro infrarrojo de transformada de Fourier Perkin Elmer, Frontier NIR/MIR equipado con esfera de integración y estándar de referencia de oro. Mediante la técnica de reflectancia se determinaron los valores de absorptancia solar α y emitancia térmica ε de acuerdo a lo reportado en la literatura [12] pesando el espectro de reflectancia respecto al espectro solar y el espectro de radiación del cuerpo negro a 100 °C. La absorptancia solar y la emitancia térmica indican el porcentaje de energía solar absorbida y energía térmica emitida, respectivamente, se pudieron calcular mediante las siguientes relaciones:

$$\alpha = \frac{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} [1-R(\lambda)] P_{sol}(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3\mu\text{m}}^{2.5\mu\text{m}} P_{sol}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\int_{2.5\mu\text{m}}^{15\mu\text{m}} [1-R(\lambda)] P_B(\lambda) d\lambda}{\int_{2.5\mu\text{m}}^{15\mu\text{m}} P_B(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

$$P_B(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1]} \quad (3)$$

considerando $c_1 = 3.743 \times 10^{-16} \text{ W m}^2$ and $c_2 = 1.4387 \times 10^{-2} \text{ m K}$.

RESULTADOS Y DISCUSION

La Figura 1 muestra el transiente de voltaje relacionado con el proceso galvanostático del recubrimiento de los tubos de cobre. La línea negra muestra la curva obtenida para el proceso de electrodeposición de níquel. De la gráfica se aprecia que el proceso de nucleación de níquel ocurre en menos de 1 s, este comportamiento es típicamente observado en los procesos de electrodeposición de metales. Posteriormente pudo observarse el crecimiento de la película, la cual se lleva de manera continua luego de 10 s cuando todos los núcleos ya coalescieron y el voltaje se comporta casi de manera constante. En la gráfica se encuentra la reacción considerada, etiquetada con el número 1 dentro la **Figura 1**. La línea azul muestra el proceso de nucleación y crecimiento para la película de níquel negro sobre el níquel previamente electrodepositado de la cual puede verse que el proceso de nucleación es más lento, tarda aproximadamente 2 s, luego el voltaje se comporta casi constante lo cual indica que la película crece. En el caso del NN en la gráfica se observa que se llevan

a cabo tres reacciones electroquímicas simultáneamente, etiquetadas como 2, 3 y 4. Relacionado a lo anterior debido a que el proceso de electrodeposición de NN implica la cogeneración de Ni metal y Ni(OH)₂ en la superficie del sustrato (níquel metálico), es de esperarse que la película sea más resistiva lo cual se refleja con el incremento de la pendiente durante el proceso de crecimiento de la película. De manera paralela la generación de OH⁻ en la superficie causa que el pH sea básico lo que a su vez ocasiona que el Ni(OH)₂ se oxide y genere NiOOH coexistiendo las 2 especies en la superficie del níquel negro, lo anterior es de acuerdo según lo reportado en la literatura y nuestras observaciones experimentales [13].

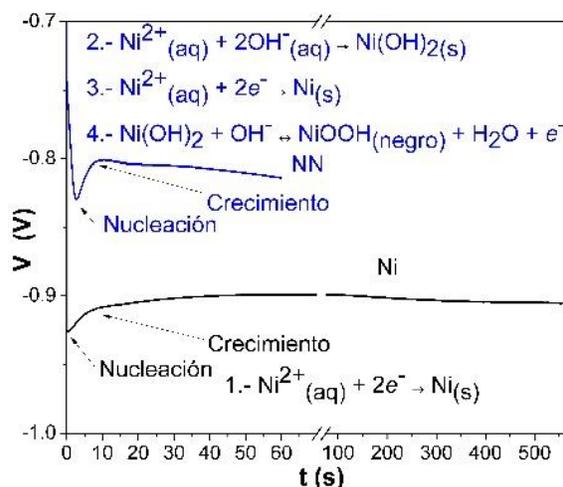


Figura 1. Transientes galvanostáticos para el proceso de electrodeposición de níquel y níquel negro sobre tubos de cobre.

La **Figura 2** muestra las imágenes de MBE obtenidas sobre la superficie de níquel negro antes, A y B, después de los ciclos térmicos. Se observa morfología de hojas orientadas hacia el sustrato. De manera adicional se distinguen agregados esféricos nanoestructurados los cuales conforman las hojas. Se advierte que existen espacios y poros entre las hojas que ayudan al atrapamiento de la luz. En el caso de la imagen B se observa que no existe cambio luego del ciclo térmico lo cual indica que el recubrimiento no se afectó. Las morfologías obtenidas concuerdan a los reportados en la literatura por Estrella-Gutiérrez y colaboradores, en donde se discute el efecto de tratamientos térmicos sobre las propiedades ópticas del níquel negro electrodepositado [14]. La misma morfología fue observada en las 3 muestras de los tubos.

La **Figura 3** muestra los patrones de difracción de rayos X para secciones de los tubos con y sin ser expuestos a los ciclos térmicos. Las reflexiones esperadas para NiO, Ni y Cu concuerdan con los patrones de referencia de la base de datos PDF 071-1179, 004-0850 y 004-0836 respectivamente.

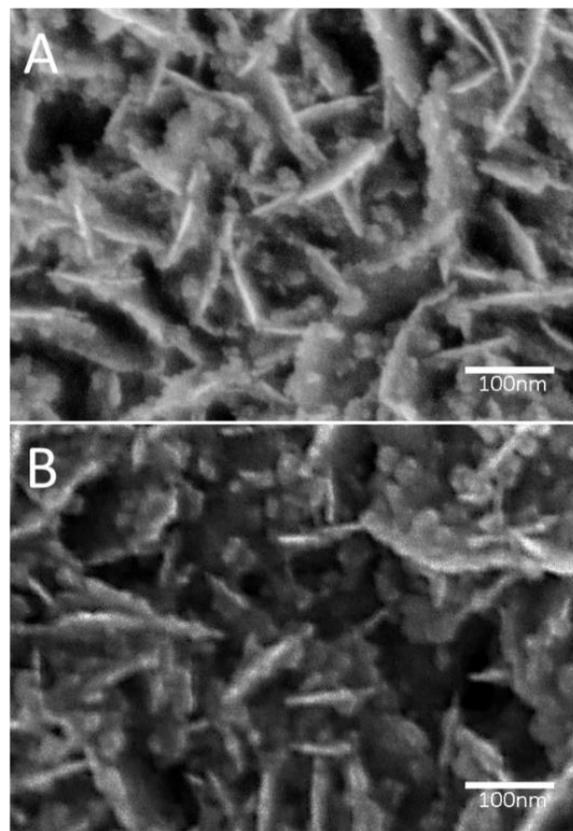


Figura 2. Imágenes de MBE del recubrimiento de NN sobre el tubo de cobre A antes y B después de los ciclos térmicos.

De los patrones de difracción se nota que en ambos casos solo existe reflexiones para Ni y Cu lo que indica que durante los ciclos térmicos el NiO no se forma o que es amorfo. Para el plano (111) del Cu y (200) del NiO existe traslape en los patrones de referencia, sin embargo, para poder detectar cristales de NiO habría que llevar los tubos a 300 °C durante los ciclos térmicos, que es la temperatura reportada para la cristalización de Ni(OH)₂ a NiO [15]. De la anterior observación también se infiere que el NiO no se forma luego de

sacar el tubo de la solución y ser expuesto al aire, el $\text{Ni}(\text{OH})_2$ y el NiOOH se depositan amorfos además que los picos para Ni metálico en el níquel negro se traslapa con los del níquel brillante depositado debajo. Los anteriores resultados verifican las especies formadas durante el proceso de electrodeposición según las ecuaciones químicas planteadas en la Figura 1 además que el NN es un material adecuado para aplicaciones de concentración solar en el rango de temperatura 100-200 °C.

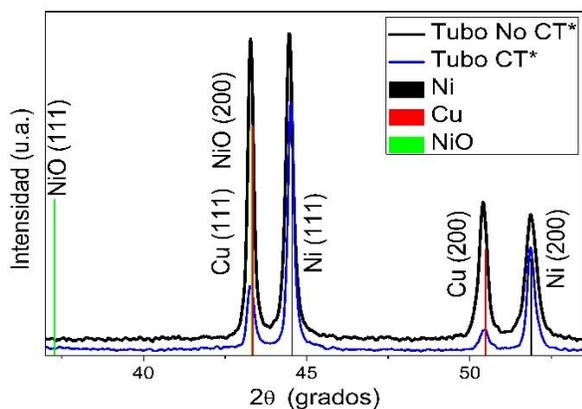


Figura 3. Patrones de difracción de rayos X de secciones de tubos antes y después de los ciclos térmicos (CT*).

La **Figura 4** muestra los espectros de reflectancia para las tres secciones de tubos. La absorbancia solar y emitancia térmica fueron calculados según las ecuaciones 1, 2 y 3 de los resultados de reflectancia de acuerdo con lo reportado en la literatura, obteniendo valores similares a lo reportado [16]. La

absorbancia solar fue de 90 % y la emitancia térmica 9 % para muestra no tratada en los ciclos, siendo valores adecuados para la aplicación en colectores de canal parabólico según los trabajos encontrados en la literatura [17]. En el caso de las muestras usada en el ciclo térmico, una disminución de la absorción solar en 1% y aumento en emitancia del 1% fue observado. El anterior cambio en las propiedades puede ser atribuido a variaciones en el proceso de preparación de la muestra y no a cambios en el recubrimiento ya que la temperatura máxima alcanzada fue 180 °C. En ambos casos se aprecian los espectros sobrepuestos y similares que fueron tomados en 3 puntos distintos a lo largo del tubo. Se aprecian espectros parecidos antes y después de los ciclos térmicos, lo cual indica que los tubos no sufrieron cambio en sus propiedades ópticas mostrando el mismo comportamiento espectral. Los anteriores resultados concuerdan a lo reportado por Lira-Cantú y colaboradores respecto a la temperatura de estabilidad del NN [18]. Las dos gráficas de la **Figura 4** muestran una imagen insertada que permite observar el aspecto del recubrimiento de níquel negro antes y después de los ciclos

térmicos. Es posible notar que no hay cambios y que existen patrones verticales relacionados al aplanado de las secciones de los tubos.

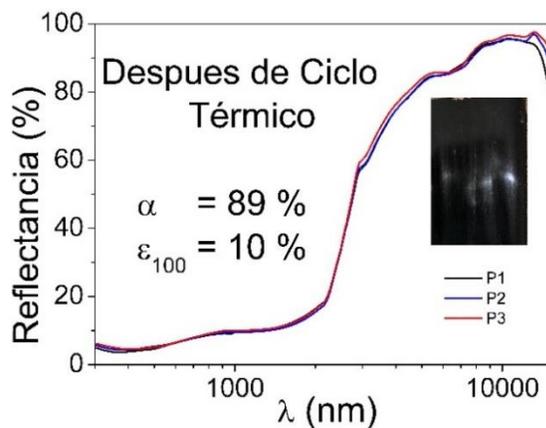
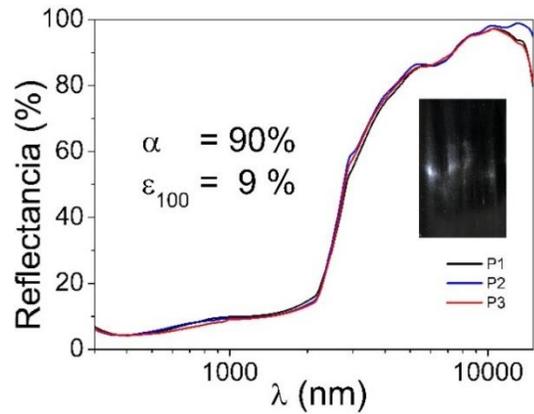


Figura 4. Espectros de reflectancia para secciones de tubos antes y después de los ciclos térmicos. Los patrones fueron tomados en distintas secciones a lo largo del tubo.

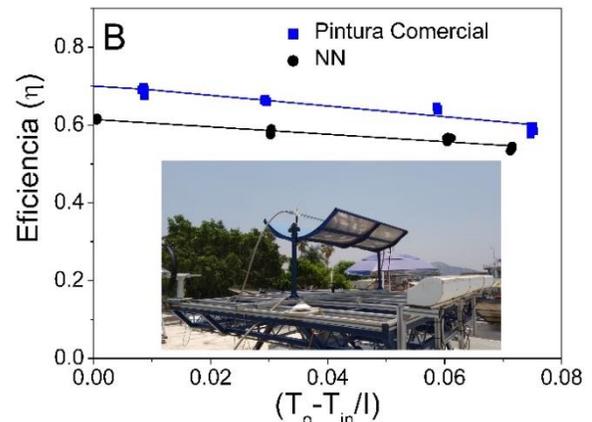
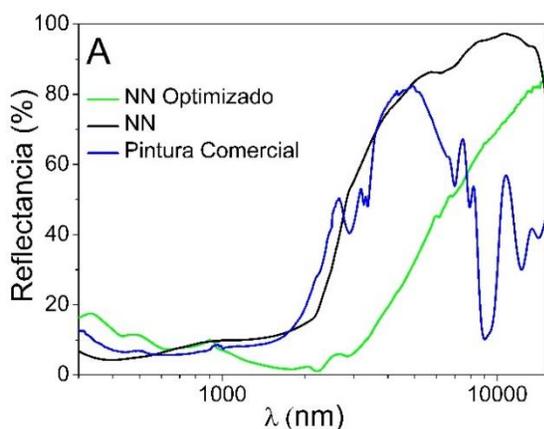


Figura 5. A, comparación de curvas de reflectancia de los recubrimientos selectivos utilizados en los receptores. B,

Eficiencia térmica instantánea medida para tubos receptores, se muestra una imagen insertada del concentrador solar parabólico con un tubo con NN posicionado para su caracterización en condiciones exteriores.

La **Figura 5A** muestra la comparación de los espectros de reflectancia para pintura comercial y NN de tubos utilizados para obtener la gráfica de Eficiencia instantánea 5B. Según la **Tabla 1**, la absorptancia solar y emitancia de la pintura comercial son mayores que para el NN. De estos valores puede intuirse que el tubo con recubrimiento selectivo de NN debería mostrar una curva de eficiencia mayor, ya que las pérdidas por emitancia son mucho menores en el NN. Sin embargo, se encontró el comportamiento inverso, es decir la pintura comercial mostró una

curva de eficiencia más alta. Estos resultados llevan a inferir que para los tubos receptores la absorción solar es más significativa que la emitancia térmica debido a que los tubos no están al vacío. De los resultados anteriores se procedió a electrodepositar tubos con el recubrimiento selectivo con la propiedad de absorción solar optimizada (incrementada). Se logro incrementar la absorción solar sin incrementar en gran medida el valor de la emitancia. El mejoramiento de las propiedades se logró incrementando el pH de la solución a 6.7 La Figura 5A muestra el espectro de reflectancia para NN optimizado y de la **Tabla 1** podemos ver que la absorción solar fue mayor que la pintura comercial y la emitancia térmica fue menor. De los valores ópticos obtenidos de los recubrimientos selectivos podemos intuir que la curva de eficiencia para estos nuevos tubos debería ser mayor que la pintura comercial, lo cual es actualmente un trabajo en desarrollo.

	α (%)	ε 100 °C (%)
NN	90	9
Pintura	92	57
Comercial		
NN	94	28
Optimizado		

Tabla 1. Valores ópticos calculados para las reflectancias medidas en la Figura 5A.

En la Figura 5B se muestran las curvas de eficiencia que fueron calculadas según la ecuación 4:

$$\eta = \frac{mC_p(T_o - T_{in})}{IA} = \frac{Q_u}{IA} \quad (4)$$

donde:

m es el flujo de la masa de agua (kg s⁻¹).

C_p es la capacidad calorífica del agua (J kg⁻¹ °C⁻¹).

I es la irradiancia solar (W m⁻²).

A es el área de apertura (m²).

T_o es la temperatura del agua a la salida del tubo colector.

T_{in} es la temperatura de entrada del agua al tubo receptor.

Puede verse que los puntos experimentales obtenidos durante la caracterización para cada tipo de recubrimiento se ajustan a una regresión lineal con un valor del coeficiente de determinación R² mayor a 0.999 lo cual indica que existe correlación lineal entre la eficiencia de los tubos con la temperatura. Las ecuaciones obtenidas son:

$$Y = -0.95x + 0.61 \text{ para niquel negro } y$$

$$Y = -1.37x + 0.70 \text{ para la pintura.}$$

Los cortes en el eje Y indican la eficiencia instantánea máxima que fue alcanzada

por el colector. La mayor eficiencia fue para el colector con el tubo receptor pintado debido a la mayor absorción solar. De la comparación de las pendientes para ambas ecuaciones se nota que la mayor fue para la pintura, indicando que el tubo con el recubrimiento de níquel negro tiene las menores pérdidas. Lo anterior se debe a la menor emisivancia térmica del recubrimiento de níquel negro. De estos resultados puede concluirse que la absorción solar es el principal parámetro que determina la eficiencia de estos sistemas y que la emisivancia es un factor secundario debido a que el espacio anular entre el tubo receptor y el tubo de vidrio no se encuentra al vacío.

La **Figura 6** muestra imágenes de los tubos luego de ser recubiertos de Ni y NN con propiedades ópticas mejoradas, los cuales serán probados en colectores de canal parabólico. En ambos casos se aprecia que los tubos fueron recubiertos de manera homogénea durante el proceso electroquímico con lo cual se demuestra la facilidad de escalamiento de la técnica hacia sustratos de tamaño real que serán aplicados a prototipos.

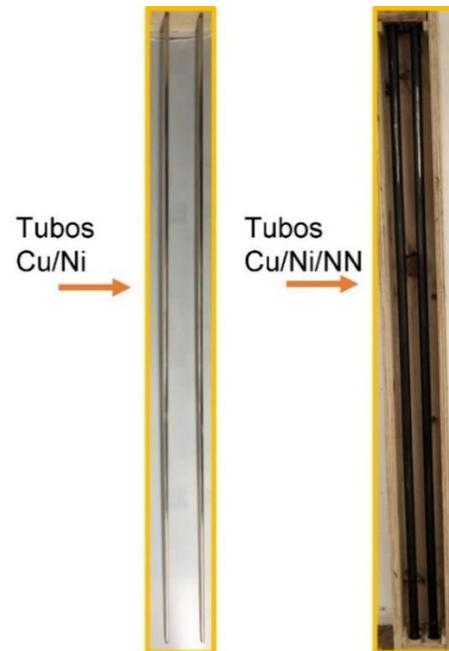


Figura 6. Imagen de 2 tubos recién depositados con níquel-níquel negro.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se compararon los resultados de caracterización de la eficiencia instantánea de dos tipos de tubos receptores, de los resultados se determinó que la absorción solar fue el parámetro que determina el desempeño de los tubos, siendo la pintura la que mayor absorción solar mostró en las curvas de reflectancia. De MBE se concluye que el recubrimiento selectivo fue obtenido con una morfología nanoestructurada la cual favorece las propiedades ópticas de absorción solar.

De los resultados de reflectancia antes y después de ciclos térmicos se puede concluir que el recubrimiento selectivo electrodepositado fue adecuado para ser usado en colectores de canal parabólico debido a que no cambian. Los resultados de rayos X mostraron que en el recubrimiento absorbedor no cristaliza el NiO durante los ciclos térmicos. Sumado a lo anterior se determinó que la metodología de síntesis permitió obtener recubrimientos homogéneos a lo largo de los tubos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a CONAHCYT por el financiamiento bajo el “Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar” CEMIESOL P-81. Francisco Ivan Lizama-Tzec agradece a CONAHCYT por la beca postdoctoral número 3095721 bajo el marco “Estancias posdoctorales por México”.

REFERENCIAS

[1] C. Atkinson, C.L. Sansom, H.J. Almond, C.P. Shaw, Coatings for concentrating solar systems - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 45 (2015) 113–122. doi:10.1016/j.rser.2015.01.015.

- [2] E. Céspedes, M. Wirz, J.A. Sánchez-García, L. Alvarez-Fraga, R. Escobar-Galindo, C. Prieto, Novel Mo-Si₃N₄ based selective coating for high temperature concentrating solar power applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 122 (2014) 217–225. doi:10.1016/j.solmat.2013.12.005.
- [3] S. Müller, F. Giovannetti, R. Reineke-Koch, O. Kastner, B. Hafner, Simulation study on the efficiency of thermochromic absorber coatings for solar thermal flat-plate collectors, *Solar Energy*. 188 (2019) 865–874. doi:10.1016/j.solener.2019.06.064.
- [4] G. Wackelgard, Ewa; Hultmark, Industrially sputtered solar absorber surface, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 54 (1998) 165–170. doi:DOI: 10.1016/S0927-0248(98)00067-1.
- [5] E.Z. Moya, Parabolic-trough concentrating solar power (CSP) systems, *Concentrating Solar Power Technology*. (2012) 197–239. doi:10.1533/9780857096173.2.197.
- [6] W. Fuqiang, C. Ziming, T. Jianyu, Y. Yuan, S. Yong, L. Linhua, Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 79 (2017) 1314–1328. doi:10.1016/j.rser.2017.05.174.

- [7] A.A. Sagade, N.N. Shinde, P.S. Patil, Effect of receiver temperature on performance evaluation of silver coated selective surface compound parabolic reflector with top glass cover, *Energy Procedia*. 48 (2014) 212–222. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.026.
- [8] F.I. Lizama-Tzec, D.M. Herrera-Zamora, O. Arés-Muzio, V.H. Gómez-Espinoza, I. Santos-González, M. Cetina-Dorantes, A.G. Vega-Poot, O. García-Valladares, G. Oskam, Electrodeposition of selective coatings based on black nickel for flat-plate solar water heaters, *Solar Energy*. 194 (2019) 302–310. doi:10.1016/j.solener.2019.10.066
- [9] S. Pratesi, M. De Lucia, M. Meucci, E. Sani, Structural and optical properties of copper-coated substrates for solar thermal absorbers, *Superlattices and Microstructures*. 98 (2016) 342–350. doi:10.1016/j.spmi.2016.08.031.
- [10] M. Koltun, G. Gukhman, a. Gavrilina, Stable selective coating “black nickel” for solar collector surfaces, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 33 (1994) 41–44. doi:10.1016/0927-0248(94)90287-9.
- [11] S. John, Electrodeposition of nickel black solar absorber coatings, *Metal Finishing*. 95 (1997) 84–86. doi:10.1016/S0026-0576(97)88982-9.
- [12] F. Cao, K. McEnaney, G. Chen, Z. Ren, A review of cermet-based spectrally selective solar absorbers, *Energy and Environmental Science*. 7 (2014) 1615–1627. doi:10.1039/c3ee43825b.
- [13] F.I. Lizama-Tzec, J.D. Macías, M.A. Estrella-Gutiérrez, A.C. Cahue-López, O. Arés, R. de Coss, J.J. Alvarado-Gil, G. Oskam, Electrodeposition and characterization of nanostructured black nickel selective absorber coatings for solar – thermal energy conversion, *J. Mater Sci: Mater Electron*. 26 (2015) 5553–5561. doi:10.1007/s10854-014-2195-5.
- [14] M.A. Estrella-Gutiérrez, F.I. Lizama-Tzec, O. Arés-Muzio, G. Oskam, Influence of a metallic nickel interlayer on the performance of solar absorber coatings based on black nickel electrodeposited onto copper, *Electrochimica Acta*. 213 (2016) 460–468. doi:10.1016/j.electacta.2016.07.125.
- [15] J. Min, J. Liu, M. Lei, W. Wang, Y. Lu, L. Yang, Q. Yang, G. Liu, N. Su, Self-Assembly of Parallely Aligned NiO Hierarchical Nanostructures with Ultrathin Nanosheet Subunits for Electrochemical Supercapacitor Applications, *ACS Applied Materials & Interfaces*. 8 (2016) 780–791. doi:10.1021/acsami.5b09997.
- [16] B.P. Kafle, B. Basnet, B. Timalisina, A. Deo, T.N. Malla, N. Acharya, A. Adhikari, Optical, structural and thermal performances of black

nickel selective coatings for solar thermal collectors, *Solar Energy*. 234 (2022) 262–274. doi:10.1016/j.solener.2022.01.042

[17] C.E. Kennedy, Review of Mid- to High- Temperature Solar Selective Absorber Materials Review of Mid- to High- Temperature Solar Selective Absorber Materials, National Renewable Energy Laboratory. (2002).

[18] M. Lira-Cantú, A. Morales Sabio, A. Brustenga, P. Gómez-Romero, Electrochemical deposition of black nickel solar absorber coatings on stainless steel AISI316L for thermal solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 87 (2005) 685–694. doi:10.1016/j.solmat.2004.07.045.