
Tema A2: Materiales: Ingeniería de Superficies

"Resistencia al desgaste adhesivo de recubrimientos NiCrFeBSi obtenidos por proyección térmica por flama"

¹Arturo Barba P., ¹Eduardo Garduño, ²Raúl Valdez N.¹, Rafael González P.¹, Javier Cervantes¹, Alba Covelo V.¹, Miguel A. Hernández G.¹.

¹Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) Departamento de Ingeniería de Diseño y Manufactura. División de Ingeniería Mecánica e Industrial. Facultad de Ingeniería. UNAM. 2o Nivel Edificio "T" (Bernardo Quintana). Circuito Exterior. Ciudad Universitaria. Coyoacan, 04510 CDMX.
²Departamento de Ingeniería Mecatrónica. Tecnológico de Monterrey. Campus Ciudad de México.
arbapin5@gmail.com, eduardogar@yahoo.com, raulvaldez@hotmail.com, rafael.parra@yandex.com, acovelov@gmail.com, mahg22@yahoo.com

RESUMEN

En este trabajo se reúnen resultados provenientes de la evaluación de un recubrimiento NiCrFeBSi sobre un acero de bajo carbono obtenido a través de un proceso de proyección térmica por flama. Los recubrimientos se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido, microanálisis, rugosidad y ensayos de desgaste adhesivo tipo pin on disc empleando diversas cargas y velocidades. Los resultados encontrados muestran una mejora en general en la resistencia al desgaste adhesivo y se indican las condiciones más apropiadas en las que dichos revestimientos pueden funcionar adecuadamente.

Palabras Clave: Resistencia al desgaste, Recubrimientos adhesivos, proyección térmica.

ABSTRACT

In this work, results are presented from the evaluation of a NiCrFeBSi coatings on a low carbon steel obtained through a flame thermal spray process. The coatings were characterized by scanning electron microscopy, microanalysis, roughness and pin on disc type wear tests using different loads and speeds. The results found show a general improvement in the wear resistance and the most appropriate conditions are indicated in which coatings can function properly.

Keywords: Wear resistance, Adhesive coatings, flame thermal spray.

1. Introducción

Los procesos de proyección térmica constituyen un grupo de tecnologías de amplio potencial de aplicaciones en diversas ramas de la ingeniería y aunque su desarrollo en México es aún incipiente, es claro que ha venido creciendo su uso en nuestro país. Una de las técnicas que se pueden emplear, la llamada proyección térmica por flama, utiliza una combustión producida por una mezcla oxígeno – acetileno, en una pistola en la que se funden los materiales a proyectar y son impulsados posteriormente, con ayuda de una corriente gaseosa. Con esta tecnología se pueden obtener recubrimientos con muy variadas composiciones que incluyen combinaciones de metales, diversos

materiales cerámicos e incluso polímeros y materiales compuestos [1].

El equipo utilizado para tal fin es, de entre las opciones disponibles en proyección térmica, el más económico. Sin embargo, es frecuente encontrar que los revestimientos que se pueden obtener no presentan el grado de adherencia deseado con el sustrato y también es común observar que muestran algún nivel importante de porosidad.

En razón de que, en muchas ocasiones, los revestimientos que se intenta elaborar se aplicarán como medio para mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste, especialmente en el caso del recubrimiento NiCrBSi y NiCrFeBSi, las limitaciones anteriores afectarán, sin duda,

estas características y harán menos eficiente la respuesta del depósito logrado.

Por tanto, para este tipo de recubrimientos, una preocupación es la de buscar formas de reducir esta problemática y para ello se han recomendado acciones tales como aplicar una operación de sellado de dichos poros, vía en la cual se han empleado diversas sustancias, por ejemplo, vapor de agua. Incluso, se ha utilizado la opción de re fundir y re solidificar el revestimiento usando fuentes de energía tales como la refusión con flama, con radiación láser [2], lo cual ha permitido mejorar ambas limitaciones (porosidad y adherencia), aunque, en su contra, presentan algunos inconvenientes como su elevado costo o la inhomogeneidad en el calentamiento para asegurar resultados uniformes, especialmente en el caso de la flama.

En forma más específica, ha sido del interés de la industria y de un número importante de investigadores el desarrollo y empleo de recubrimientos de base níquel para aplicaciones a temperaturas relativamente elevadas, en función de sus propiedades de resistencia a la corrosión y al desgaste. En particular se han publicado varios trabajos sobre la combinación NiCrBSi. Así, por ejemplo, en [1], esos recubrimientos se sometieron a una refusión por medio de flama y radiación láser lo que provoca, en función de las diferentes condiciones de enfriamiento, diversas morfologías y fases similares lo que conlleva a un comportamiento semejante en desgaste. En [2, 3]; se resalta el efecto y la importancia del tratamiento térmico posterior como vía para refundir y refinar la microestructura y la mejora que puede conseguir con la adición de partículas duras como las de WC para aplicaciones de desgaste adhesivo. Por su parte Guilemany et al [4]; proponen, luego de evaluar el comportamiento en desgaste de recubrimientos NiCrBSi obtenidos mediante proyección térmica por flama, plasma atmosférico (APS) y alta velocidad (HVOF), que se presentan diferentes mecanismos de desgaste para los diversos procesos, destacando la adhesión como mecanismo principal y en menor medida abrasión y delaminación e incluso, bajo ciertas condiciones, se pueden presentar fenómenos de disolución del recubrimiento.

Por otro lado, en [7], se presentan resultados favorables a la obtención de estos revestimientos NiCrBSi mediante flama respecto al uso de plasma y en [9] se propone que, a bajas cargas, en condiciones de desgaste, el mecanismo básico es de oxidación superficial, en tanto a altas temperaturas predominan la adhesión y la oxidación.

En [11,13], se destaca la importancia de un control de la porosidad a través, en un caso de una adecuada refusión y en el otro, asociado a la determinación de las mejores condiciones de proceso, para conseguir recubrimientos con la menor porosidad posible, lo que incide en la obtención también de las más adecuadas propiedades mecánicas.

En este trabajo, un recubrimiento semejante, NiCrFeBSi, se evalúa en cuanto a su resistencia al desgaste adhesivo mediante un ensayo tipo pin on disc (espiga sobre disco), utilizando diferentes cargas y velocidades y, a partir de los resultados encontrados, se proponen las ventajas y limitaciones de este tipo de recubrimientos para sus consecuentes aplicaciones.

2. Desarrollo

Los recubrimientos por proyección térmica por flama se realizaron sobre un acero de bajo carbono AISI 1018 empleando una pistola Sulzer Metco modelo 5P II usando un compresor de 5 HP y una presión de 180 psi, luego de proceder a un granallado con polvo de Al_2O_3 . Usando un rugosímetro Mitutoyo Surfptest 402 se obtuvo, en 5 diferentes zonas de las piezas, la rugosidad de las muestras promedio luego de haber sido granalladas con las partículas de óxido de aluminio, con el fin de asegurar un apropiado nivel de rugosidad que permita una adecuada adherencia de la capa NiCrFeBSi generada mediante proyección térmica por flama. La rugosidad promedio obtenida fue de 11 micrómetros. Adicionalmente, las piezas se sometieron a una etapa de limpieza con tricloroetileno.

Las muestras fueron precalentadas a 180 °C, durante 10 minutos y proyectadas térmicamente durante 60 y 120 segundos, empleando una velocidad de 150 cm/min con un polvo constituido de una combinación NiCr10Fe2.5B2.5Si2.5 colocado en la pistola, a una distancia de 25-35 cm. Las piezas recubiertas con los diversos sistemas de recubrimiento se montaron en baquelita usando una montadora Buehler Modelo 30-5143 y fueron lijadas empleando lijas de 180 a 1000 y pulidas con alúmina de 3 y 0.5 μm . Posteriormente, las muestras revestidas y preparadas se observaron en un microscopio electrónico de barrido Philips XL20, que cuenta con una microsonda con la cual se llevó a cabo el microanálisis de los diversos recubrimientos evaluados. Las imágenes se obtuvieron empleando electrones retrodispersados.

Para realizar las pruebas de desgaste se utilizó una máquina para estudios de tribología Cygnus II pin on disk. Las velocidades utilizadas fueron 470 y 900 rpm y las cargas empleadas 150, 300 y 600 gramos, a temperatura ambiente y sin lubricación. Se colocaron piezas recubiertas y no recubiertas por triplicado (en función de las características de la máquina), siguiendo las directrices de la norma ASTM G99. Se empleó un disco de acero para herramientas AISI D2 templado y revenido como superficie de contacto para las probetas a ensayar. Las piezas sometidas a desgaste se pesaron en una balanza Ohaus de sensibilidad 0.0001g cada 60 segundos con el fin de determinar la pérdida de peso experimentada por cada una de las piezas evaluadas.

3. Resultados

En la figura 1 se puede observar una vista lateral de un recubrimiento NiCrFeBSi obtenido mediante proyección térmica por flama, con un espesor de 1.2 mm. Destaca la presencia de algún nivel de porosidad y una buena adherencia.

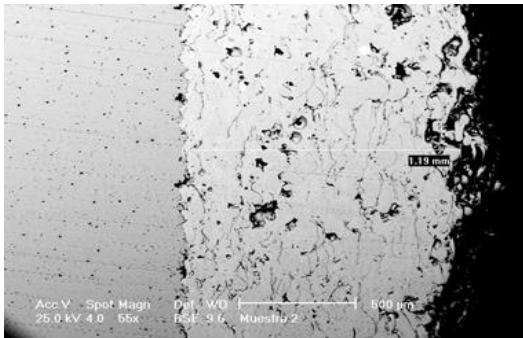


Figura 1.- Imagen de microscopía electrónica de barrido de una capa de recubrimiento NiCrFeBSi sobre un acero AISI 1018. Se observa algún grado de porosidad y una buena adherencia. Electrones retrodispersados. 55X.

En la figura 2 se presenta una vista superior del mismo recubrimiento mostrado en la figura 1. Se observa la morfología irregular y con aspecto rugoso de la capa de revestimiento, mostrándose también partículas esféricas y otras secciones aplanadas provenientes de procesos de fusión y solidificación total o parcial.

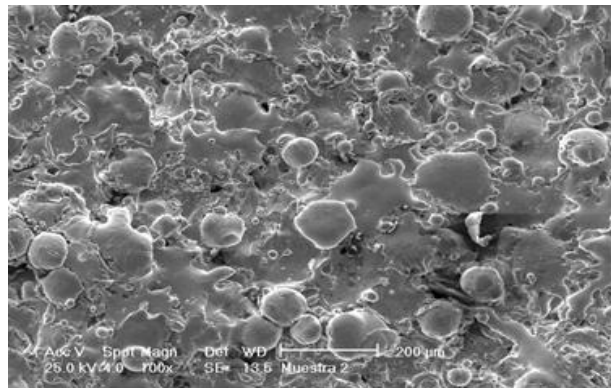


Figura 2.- Imagen de microscopía electrónica de barrido de un recubrimiento NiCrFeBSi producida mediante proyección térmica por flama en vista superior mostrando la presencia de partículas esféricas y aplanadas producto de fenómenos de solidificación parcial o total del propio proceso. 100X Electrones secundarios.

La figura 3 muestra el espectro generado por la microsonda en el que se puede evidenciar la presencia en el recubrimiento de base de níquel y la presencia de los componentes como Cr, Fe y Si en el revestimiento.

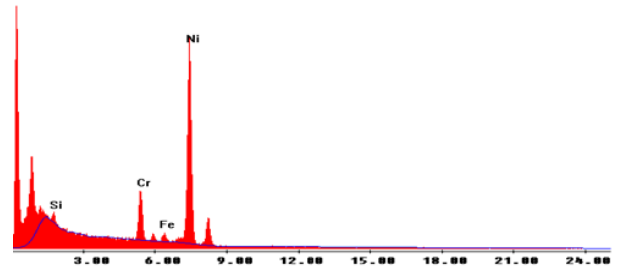


Figura 3.- Espectro del recubrimiento NiCrFeBSi con el que se corrobora la composición mayoritaria en níquel y con cantidades menores de otros componentes.

La figura 4 muestra la comparación de la pérdida de peso, luego del ensayo de desgaste adhesivo realizado a 470 rpm y con una carga de 150 g, del acero 1018 sin recubrir y la figura 5 del propio acero recubierto con la combinación NiCrFeBSi. La pérdida de peso en la pieza revestida es un orden de magnitud menor respecto a la pieza sin recubrir.

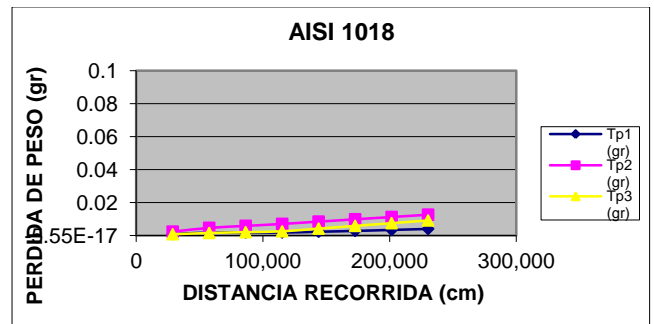


Figura 4.- Pérdida en peso para un acero AISI 1018 sin recubrir luego de ensayo de desgaste adhesivo a 470 rpm y con 150 g de carga.

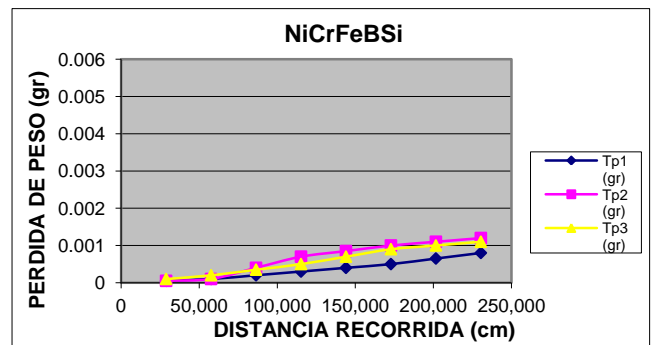


Figura 5.- Pérdida en peso para un acero AISI 1018 revestido con NiCrFeBSi luego de ensayo de desgaste adhesivo a 470 rpm y con 150 g de carga.

La figura 6 presenta la pérdida de peso de las muestras de acero sin recubrir y la figura 7 las recubiertas en condiciones de ensayo de desgaste adhesivo de 470 rpm y 300 g de carga.

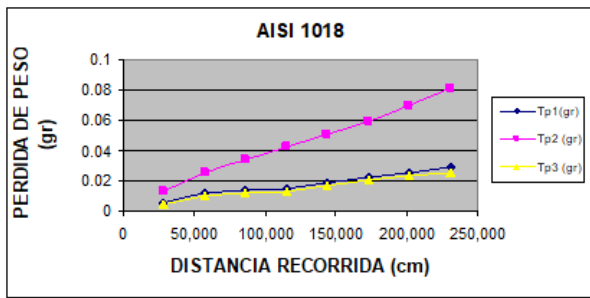


Figura 6.- Pérdida en peso para un acero AISI1018 sin recubrir luego de ensayo de desgaste adhesivo a 470 rpm y con 300 g de carga.

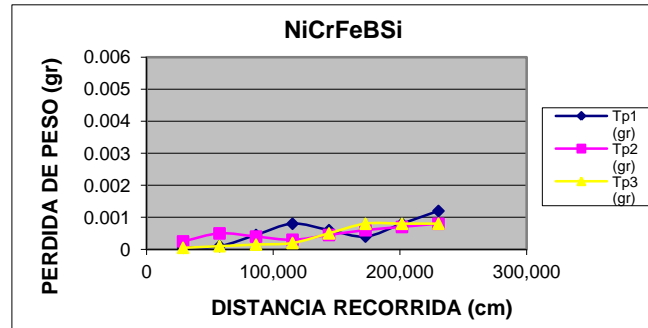


Figura 9.- Pérdida en peso para un acero AISI 1018 revestido con NiCrFeBSi luego del ensayo de desgaste adhesivo a 470 rpm y con 600 g de carga.

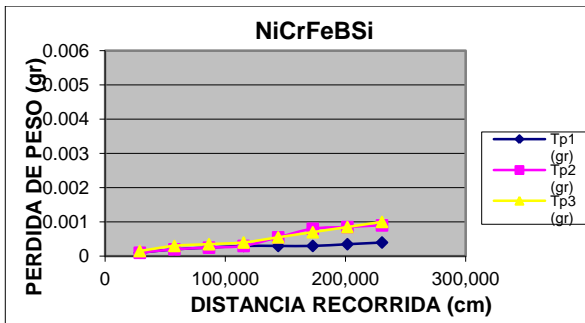


Figura 7.- Pérdida en peso para un acero AISI 1018 revestido con NiCrFeBSi luego de ensayo de desgaste adhesivo a 470 rpm y con 300 g de carga.

La tendencia mostrada es semejante a la que se observa en la figura 4, con un aumento significativo de material desgastado y con diferencias similares en lo relativo al positivo efecto del recubrimiento para disminuir el desgaste del acero.

Semejante situación se puede observar en la figura 8, producto del ensayo de desgaste de acero AISI 1018 sin revestir y la figura 9 del acero recubierto, realizado a 470 rpm y 600 g de carga, presentándose muy pequeños cambios respecto a lo encontrado usando 300 g de carga. La pérdida de peso es ligeramente mayor que en el caso de 300 g, bajo las mismas condiciones de velocidad y para las tres cargas evaluadas a 470 rpm, el recubrimiento disminuye sensiblemente la pérdida de material y por tanto, incrementa la resistencia al desgaste del acero recubierto.

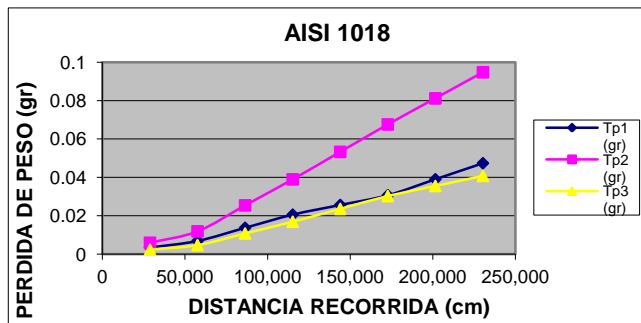


Figura 8.- Pérdida en peso para un acero AISI1018 sin recubrir y luego del ensayo de desgaste adhesivo a 470 rpm y con 600 g de carga.

Cuando se comparan la pérdida en peso del acero 1018 sin recubrir, empleando una carga de 150 g y variando la velocidad del ensayo se observa un ligero incremento de la cantidad en gramos perdida durante el ensayo y aunque el recubrimiento también genera una disminución importante del material perdido, la pérdida de peso es ligeramente mayor para la pieza recubierta con NiCrFeBSi ensayada a 900 rpm, respecto a la probada a 470 rpm, como se puede corroborar en la figura 10 que corresponde a probeta sin recubrir y en la figura 11 de la probeta con revestimiento.

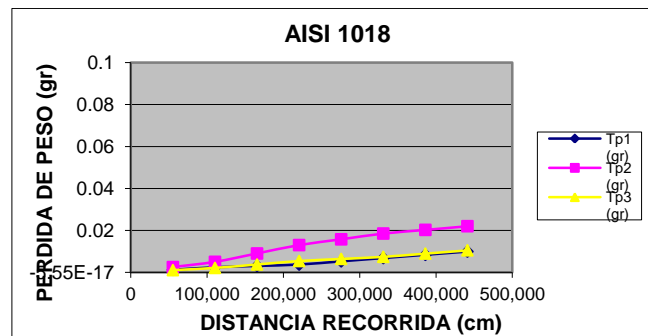


Figura 10.- Pérdida en peso para un acero AISI 1018 sin recubrir luego del ensayo de desgaste adhesivo a 900 rpm y con 150 g de carga.

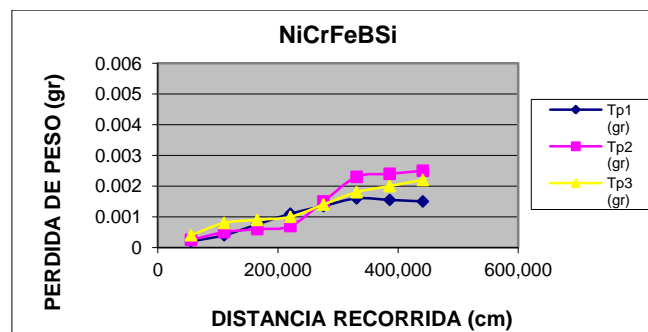


Figura 11.- Pérdida en peso para un acero AISI 1018 revestido con NiCrFeBSi luego del ensayo de desgaste adhesivo a 900 rpm y con 150 g de carga.

En relación con lo mostrado en las figuras 12 y 13, (900 rpm y 300 g), se puede señalar un muy ligero aumento de la cantidad de material perdido luego del ensayo de desgaste adhesivo, respecto a lo observado en la figuras 10 y 11 (900 rpm y 150 g), tanto en el caso del material sin

revestir como en el del recubierto por proyección térmica por flama.

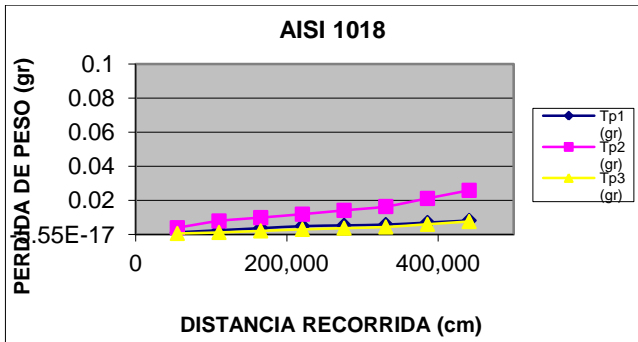


Figura 12.- Pérdida en peso para un acero AISI 1018 sin recubrir luego del ensayo de desgaste adhesivo a 900 rpm, con 300 g de carga.

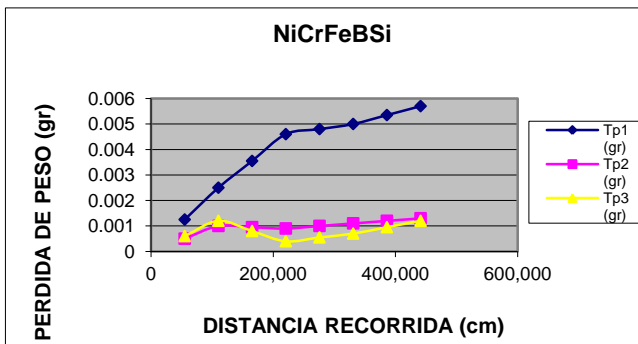


Figura 13.- Pérdida en peso para un acero AISI1018 revestido con NiCrFeBSi luego del ensayo de desgaste adhesivo a 900 rpm, con 300 g de carga.

En la figuras 14 y 15 se comparan la pérdida en peso de un acero 1018 sin recubrir y una revestida con una capa de NiCrFeBSi luego de un ensayo de desgaste adhesivo a 900 rpm y con 600 g de carga. Respecto a lo acontecido con las cargas menores (150 y 300 g), la tendencia mostrada es semejante con una pérdida ligeramente mayor que la reflejada en las figuras 10, 11,12 y 13.

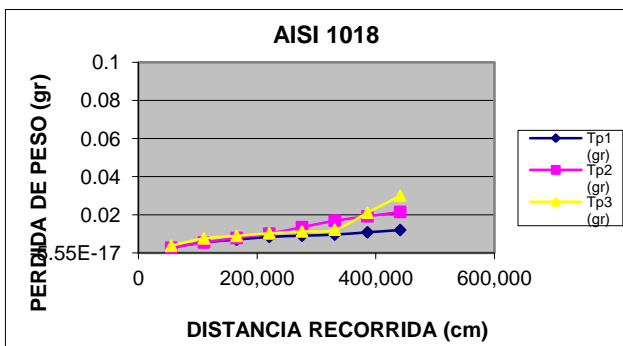


Figura 14.- Pérdida en peso para un acero AISI 1018 sin recubrir luego del ensayo de desgaste adhesivo a 900 rpm, con 600 g de carga.

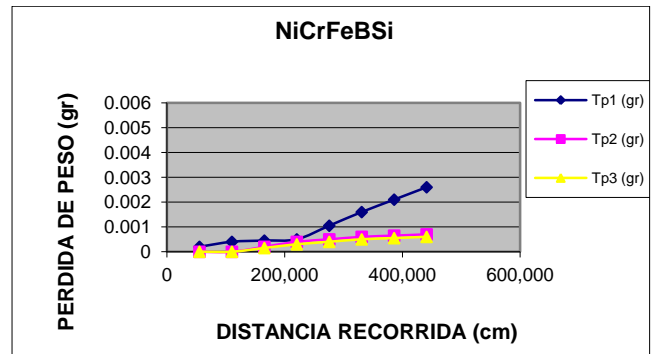


Figura 15.- Pérdida en peso para un acero AISI1018 revestido con NiCrFeBSi luego del ensayo de desgaste adhesivo a 900 rpm, con 600 g de carga.

El efecto de la velocidad del ensayo, pues, como se puede percibir, queda evidenciado que la pérdida de peso para las piezas sometidas a una mayor velocidad es también mayor aunque en una magnitud ligera.

Las figuras 16 y 17 ilustran el aspecto y la morfología del recubrimiento antes y después del ensayo de desgaste y como se puede observar en la figura 16 destaca el hecho de un recubrimiento con una buena densidad de partículas de tipo esférico en la superficie y alguna evidencia de porosidad en tanto en la figura 17 aparece como se ha modificado la topografía del revestimiento luego de realizado el ensayo de desgaste adhesivo. Las partículas se han aplastado pero, en una visión general de la capa de NiCrFeBSi ésta conserva un aspecto apropiado sin un daño de gran magnitud, lo que si ocurre cuando se compara con el comportamiento del acero de bajo carbono 1018 sometido al mismo ensayo.

En relación con los posibles mecanismos de desgaste involucrados se contempla que se trate de un conjunto de opciones que involucran mecanismos de adhesión y, en algunos casos y de poca monta, de mecanismos de abrasión.

Una revisión general de los resultados mostrados permite corroborar la capacidad de los recubrimientos NiCrFeBSi generados por proyección térmica por flama como una vía para incrementar la resistencia al desgaste de estos aceros de bajo costo mediante un proceso también de costo atractivo, lo que puede alargar su vida útil y aumentar sus posibilidades de aplicación en otros campos.

Resulta adecuado señalar la conveniencia de ampliar esta caracterización en futuros trabajos, incrementando la carga aplicada en los ensayos, aplicando diversos procesos de refusión del recubrimiento con diferentes formas de calentamiento y asimismo realizar en otra etapa, evaluaciones a mayores temperaturas. Resulta también necesario el evaluar el comportamiento en condiciones de corrosión de estas capas a fin de obtener una panorámica

más completa de su comportamiento y sus opciones de aplicación

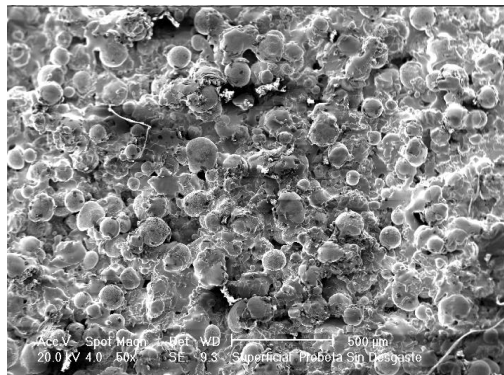


Figura 16.- Imagen de microscopía electrónica de barrido que muestra una vista superior de un recubrimiento NiCrFeBSi sobre acero AISI 1018 obtenido por técnicas de proyección térmica por flama. La morfología permite destacar partículas esféricas que cubren de manera general la superficie del sustrato, producto de procesos de solidificación parcial o total de las partículas del polvo que han sido proyectadas. 50X electrones secundarios.

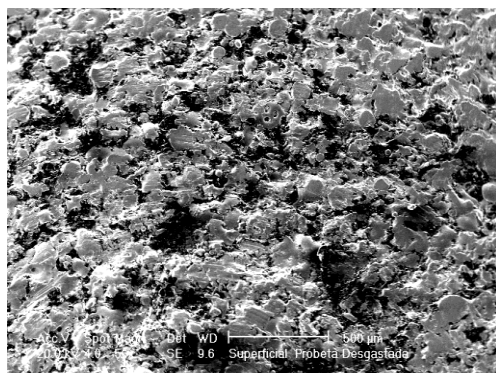


Figura 17.- Imagen de microscopía electrónica de barrido que muestra una vista superior de un recubrimiento NiCrFeBSi sobre acero AISI 1018 obtenido por técnicas de proyección térmica por flama. La morfología permite destacar como se han "aplastado" las partículas, como producto de los fenómenos ocurridos durante el ensayo de desgaste. En general el recubrimiento conserva en muy buena medida, su integridad y no se perciben grandes surcos. Imagen de electrones secundarios.

4. Conclusiones

Los recubrimientos NiCrFeBSi sobre un acero de bajo carbono, generados por tecnologías de proyección térmica por flama, mostraron, bajo las condiciones de carga y velocidad aplicados en el ensayo de desgaste adhesivo de este trabajo, una clara mejoría y en, términos generales, constituyen una muy buena alternativa para aplicaciones donde se presenten condiciones de desgaste adhesivo.

A medida que se aumenta la carga aplicada es mayor también la cantidad de material perdido situación que no se observa tan acusada en relación con la velocidad del ensayo. En un siguiente trabajo deberán ampliarse las condiciones del ensayo incrementando la carga aplicada, a fin de poder tener una idea más amplia de los alcances de este recubrimiento y

esta tecnología como mecanismo para incrementar la resistencia al desgaste y la vida útil de este acero.

Agradecimientos

Investigación realizada gracias al Programa UNAM PAPIIT IT101318

Referencias

- [1] R. González, M.A. García, I. Peñuelas, M. Cadenas, M. Fernández, A. Hernández, D. Felgueroso. "Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different process". *Wear* **263** (2007) p. 619-624
- [2] R. Vijande, J.M. Cuetos, J.L. Cortizo, E. Rodríguez, A. Noriega. "Desgaste Lubricado de recubrimientos NiCrBSi refundidos parcialmente por láser" *Revista de Metalurgia*. **45** (2) (2009) p. 114-123
- [3] M. Rodríguez, I. Moreno, C. Bilbao. "Resistencia al Desgaste de Recubrimientos tipo Cermet depositados por HVOF con tratamiento térmico posterior". *Revista de la Facultad de Ingeniería de la UCV*. **22**, 4 (2007) p. 25-35.
- [4] J. M. Miguel, J. Guilemany, S. Vizcaino. "Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different process". *Tribology International* **36** (2003). p. 181-187.
- [5] C. Navas. "Recubrimientos NiCrBSi resistentes a la corrosión y al desgaste". Tesis Doctorado. Universidad de Granada, 2007.
- [6] J. Rodríguez, A. Martín, R. Fernández. J. Fernández. "An experimental study of wear performance of NiCrBSi coatings thermal spray coatings". *Wear* **255** (2003) p. 950-955
- [7] E. Fernández, M. Cadenas, R. González, C. Navas, R. Fernández, J. de Damborenea. "Wear behavior of laser clad NiCrBSi coating" *Wear* **259** (2005). 870-875.
- [8] A. Molnar, G. Buza, A. Balogh. "Hardness Test and microstructure Analysis of NiCrBSi sprayed, laser remelting coatings. *Production and Processes and Systems*. **6** (2013), 1 p. 35-46.
- [9] Z. Bergant, J. Grum. Porosity evaluation of flame sprayed and heat treated nickel based coatings using image analysis. *Image Analysis and stereology*.(2011) **30**, 1 p. 53-62
- [10] L. Bourithis, L. G. Papadimitriou. Three body abrasion wear of low carbon steel modified surfaces. *Wear*, (2005) **258** pp. 1775-1786.
- [11] Q. Li, G., Song, Y. Zhang, Y. Microstructure and dry sliding wear behavior of laser clad Nickel base alloy coating with the addition of SiC. *Wear*, (2003). **254**; pp. 222-229.
- [12] F.Otsubo H. Era K. Kishitake. Structure and phases in nickel-base self-fluxing alloy coating containing high chromium and boron. *Journal of Thermal Spray Technology* (2000) ;**9**(1):107-113.}
- [13] S. Houdková, E. Smazalova, M. Vostrak, J. Schubert.

"Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies". *Surface and Coatings Technology*.(2014), **253**, p. 14-26.

[14] R. Rachidi, B. Elkihel, F. Delaunois, V. Vitry, D. Deschuyteneer. "Anti-Wear Performance of NiCrBSi/NiCrBSi-WC Coatings Produced by Flame Thermal Spraying Process". *13ème Congrès de Mécanique 11 - 14 Avril 2017*. Marruecos.

[15] N. Serres, F. Hiawka, S. Costil, C. Langlade, F. Machi. "Microstructures of Metallic NiCrBSi Coatings Manufactured via Hybrid Plasma Spray and In Situ Laser Remelting Process". *Journal of Thermal Spray Technology*, ASM International/Springer, (2011), **20** (1-2), pp.336-343.

[16] Q. Zeng, Q., J. Sun, J., W. Emori, et al. "Corrosion Behavior of Thermally Sprayed NiCrBSi Coating on 16MnR Low-Alloy Steel in KOH Solution" *Journal of Materials Engineering and Performance* (2016) **25**: 1773. doi:10.1007/s11665-016-2012-9

[17] D. Chaliampalias, G. Vourlias, S. Skolianos, E. K. Polychroniadis, F. Stergioudis, "Surface Microstructure of NiCrBSi Coatings Deposited by Flame Spray and Evaluation of the Oxidation Resistance", *Solid State Phenomena* (2010), **163**, pp. 51-54.

[18] M. Karimi, H. Salimijazi, and M. Golozar. "Effects of remelting processes on porosity of NiCrBSi flame sprayed coatings". *Surface Engineering* (2016) **32**, 3, 238-243.

[19] H. Arabi, S. Rastegari, V. Ramezani and Z. Valefi. "Influence of Heat Treatment Parameters, Temperature and Time, on Wear and Microhardness of NiCrBSi Flame Sprayed Coatings Applied on CK45 Substrates". *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*. (2013), **10**, 2, p. 1-10

[20] S. Özel. "Microstructure and Mechanical Properties of HVOF Sprayed WC-Co/NiCrBSi, Cr₃C₂ Coatings on Al Alloys". *Materials Testing*: (2013). **55**, No. 9, pp. 694-700.