

Efecto de la radiación láser en recubrimientos base Níquel, obtenidos mediante Proyección Térmica por Flama, sobre un acero de bajo carbono

Application of laser radiation on Nickel-based coatings obtained by Flame Thermal Spray on low carbon steel

Raúl Valdez Navarro , Rafael González Parra , Helgi Waage Delgadillo , Alba Covelo Villar , Miguel Angel Hernández Gallegos , Arturo Barba Pingarrón .

^a Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México.

Resumen

En este trabajo, se presentan los resultados de recubrimientos base Níquel obtenidos mediante proyección térmica por flama, seguidos de la aplicación de radiación láser, empleando tres diferentes potencias y tres velocidades de barrido, sobre un acero de bajo carbono. Los revestimientos logrados fueron caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido y microanálisis, ensayos de microdureza, rugosidad y de polarización lineal, con el fin de caracterizar el efecto de la aplicación de la radiación láser en la resistencia a la corrosión de los recubrimientos en un medio salino. Con la aplicación de la radiación láser se consiguió una mejora de la resistencia a la corrosión, asociada, principalmente a la disminución de la porosidad y la mejora de la adherencia del recubrimiento generado mediante proyección térmica por flama.

Palabras Clave:

Proyección térmica por flama. Radiación láser. Recubrimiento base níquel. Resistencia a la corrosión. Acero de bajo carbono.

Abstract

This study presents the results from the deposition of Nickel-based coatings by flame thermal spray, followed by the application of laser radiation, under three different power and three scanning speeds, on low carbon steel. The achieved coatings were characterized by scanning electron microscopy and microanalysis, microhardness test, roughness tests and linear polarization, in order to assess the effect of the application of laser radiation on the corrosion resistance of flame thermal spray coatings, in a saline environment. With the application of laser radiation, an improvement in corrosion resistance was achieved, mainly associated with the decrease in the porosity and improvement of adherence of the coating generated by flame thermal spray technique.

Keywords:

Flame thermal spray. Laser radiation. Nickel-based coating. Corrosion resistance. Low carbon Steel

1. Introducción

Las técnicas de tratamiento superficial con láser se han empleado desde hace algunos años con muy buenos resultados, en muy variados campos (Jeyaprakash et al, 2020, Singh et al, 2023) orientados a conferir un mejor rendimiento de los materiales que fungen como sustratos, particularmente ante condiciones tales como desgaste o corrosión.

Las aplicaciones más comunes están asociadas a producir endurecimiento superficial, especialmente en el caso de materiales ferrosos (Sayed et al, 2017; Zhao et al, 2023), a generar recubrimientos a partir de la fusión de polvos (Janicki, 2017, Lisiecki et al, 2019, Poloczek et al, 2020; Rezayat, et al, 2023), lo que usualmente se conoce como *laser cladding* en inglés y a

conseguir formar aleaciones y combinaciones diversas entre las nuevas superficies y los sustratos (Janicki et al, 2017.; Jeyaprakash et al, 2019 Kotarska et al, 2021;) lo que comúnmente se denomina como *laser alloying*, en inglés.

Algunas posibilidades más recientes incluyen la utilización de radiación láser pulsante (Cua et al, 2021), el planteamiento de su uso como una tecnología verde (Zhong et al, 2022) ó su empleo para modificar materiales de interés para uso biomédico, como las aleaciones de magnesio (Zhang et al, 2022).

Derivado, en buena medida, del mayor conocimiento de la producción de la radiación y de su mejor control, el láser se ha convertido también en una fuente de energía importante en las diferentes tecnologías de Manufactura Aditiva (Gong et al, 2021, Gu et al, 2012).

*Autor para la correspondencia: arturo.barba@ingenieria.unam.edu

Correo electrónico: raulgvaldez@hotmail.com, rafael.parra@comunidad.unam.mx, helgi.waage@gmail.com, acovelo@comunidad.unam.mx, mahdz2010@comunidad.unam.mx, arturo.barba@ingenieria.unam.edu.

Por su parte, los recubrimientos obtenidos por proyección térmica por flama se usan con amplitud en la industria, en razón de su versatilidad, la relativa simplicidad del proceso y el bajo costo asociado a ella, comparado con otras tecnologías de proyección térmica. Sin embargo, los revestimientos producidos por estas técnicas, frecuentemente presentan deficiencias, tales como elevados niveles de porosidad y una baja adherencia, lo que ha limitado sus aplicaciones y de allí surge la búsqueda de alternativas para mejorar su calidad y así aumentar su rendimiento.

Entre esas opciones, el uso de la radiación láser, posterior a la obtención de los recubrimientos mediante proyección térmica por flama, se ha reportado como una posibilidad muy atractiva para conseguir mejoras importantes en las propiedades de los recubrimientos. En trabajos como los reportados por (Fenineche, 2008; Glanc et al, 2018, González et al 2007, Karimi et al, 2016, Panziera et al., 2020, Vuoristo et al, 2006, Yang et al 2022), se han empleado diferentes tecnologías de proyección térmica, tales como flama, plasma, alta velocidad, seguidas del uso de radiación láser e incluso también se ha utilizado como apoyo energético en los procesos conocidos como de Proyección en Frío (Cold Spray, por su denominación en inglés), (Olanami et al., 2014).

En términos generales, en todos esos trabajos, se reportan resultados favorables de esta combinación de tecnologías, siempre y cuando se logre un adecuado control de los parámetros tanto del proceso de proyección térmica como del empleo de la radiación láser. Los procesos de refusión y resolidificación que se generan al emplear la radiación láser, son la base para conseguir recubrimientos más compactos y de mayor adherencia y la comprensión de dichos procesos sigue siendo de marcado interés en las investigaciones alusivas al uso de estos dos procesos, de forma combinada.

En el presente trabajo se reportan los resultados de la combinación de un recubrimiento de base níquel, generado por un procedimiento de proyección térmica por flama, seguido de la aplicación de radiación láser, utilizando tres diferentes potencias y dos velocidades de barrido y su posterior caracterización para evaluar los efectos de la aplicación de este tipo de radiación en las características y propiedades de los revestimientos.

2. Desarrollo experimental.

Muestras de acero AISI 1018 (composición química típica se presenta en la Tabla I), de 25.4 mm de largo, 25.4 mm de ancho y 25.4 mm de espesor, se sometieron a una limpieza inicial con una solución comercial de tricloroetileno. Posteriormente, fueron granalladas empleando partículas de óxido de aluminio de 125 micrómetros de diámetro en promedio, realizando el proceso de granallado a una distancia de 15 cm. A continuación, las piezas se precalentaron a 300°C durante 10 minutos. El material utilizado para el recubrimiento por proyección térmica por flama, fue un polvo constituido por una combinación NiCrFeBSi de denominación comercial Metco 12C, cuya composición química se presenta en la Tabla II. Su punto de fusión es 1,388°C y el tamaño promedio de los polvos empleados es de 125 µm

Tabla I. Composición Química de Acero AISI 1018

Material	C	Mn	P	S	Fe
Acero AISI1018	0.15-0.20	0.6-0.9	0.04 Máximo	0.05 Máximo	Resto

Tabla II. Composición Química de Material empleado para la Proyección Térmica por Flama (12C)

Material	Cr	Fe	B	Si	C	Ni
12C	10	2.5	2.5	2.5	0.155	Resto

Las piezas se recubrieron utilizando una pistola Sulzer Metco modelo 5P II, acoplada a un brazo robótico, MOTOMAN que se puede manejar mediante control numérico. Los parámetros del proceso de proyección térmica por flama, se presentan en la Tabla III. El tiempo de proyección utilizado fue de 180 segundos.

Tabla III. Parámetros del Proceso de Proyección Térmica por Flama

Parámetro	Flujo O ₂ 10 ⁻⁶ m ³ /s	Flujo Acetileno 10 ⁻⁶ m ³ /s	Flujo Polvo 12C 10 ⁻³ Kg/s	Distancia proyección (cm)
Condición	472	258	2.52	25

El tratamiento con la radiación láser se llevó a cabo, posteriormente, con un equipo comercial de láser de diodos modelo DL0285, que cuenta con un sistema automatizado de tres ejes con una potencia máxima de 2800 W. El diámetro del haz fue de 2 mm y se usó nitrógeno como gas protector. Las diversas condiciones de procesamiento con radiación láser se presentan en la Tabla IV, en la que también se indica la denominación utilizada para identificar las diversas muestras.

Tabla IV. Parámetros del Post Tratamiento con Radiación Láser

Parámetro	A1	A2	A3
Potencia (W)	780	790	800
Velocidad (10 ⁻³ m/s)	10	15	20

Las piezas recubiertas con los diversos sistemas de recubrimiento utilizados se montaron en baquelita usando una montadora Buehler Modelo 30-5143 y fueron lijadas empleando lijas desde la 180 hasta la 1000 y fueron, a continuación, 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, en la cual se llevó a cabo el microanálisis de los diversos recubrimientos evaluados. Las imágenes se obtuvieron empleando electrones retrodispersados y secundarios. En este mismo equipo se efectuó la medición de los espesores de los recubrimientos realizándose 10 mediciones en diversas zonas de cada uno de los revestimientos, con el fin de obtener un promedio, tanto de las piezas con depósitos sólo de proyección térmica como de las posteriormente tratadas con radiación láser.

La microdureza se determinó usando el microdurómetro Vickers LeitzWetzlar modelo 8068 y se usaron 200 g de carga y 15 segundos de tiempo de aplicación de la carga, efectuándose 10 medidas en cada pieza recubierta. Respecto a la medición de la rugosidad, ésta se llevó a cabo en un equipo Mitutoyo SJ-310 realizándose 10 mediciones para cada probeta.

En relación con la valoración del comportamiento de corrosión, los ensayos de polarización lineal se efectuaron en una solución al 3.5%, en peso de cloruro de sodio, en una celda de 3 electrodos. El electrodo de referencia fue de calomel saturado, el contraelectrodo fue de platino y las piezas revestidas constituyeron el electrodo de trabajo. Se empleó un potencióstato ACM Instruments versión 5, conectado a una PC, usando el

software Sequencer. El periodo de estabilización fue de 2100 segundos. Las curvas de polarización se obtuvieron para cada una de las condiciones indicadas. (A1, A2 y A3).

3. Presentación y Discusión de Resultados.

La figura 1 muestra una foto de una muestra recubierta en la que se observa el aspecto de un recubrimiento Ni-Cr-Fe-B-Si, luego de haber efectuado el proceso de proyección térmica por flama sobre el sustrato de acero de bajo carbono AISI1018.



Figura 1: Foto de la superficie de una pieza recubierta con Ni-Cr-Fe-B-Si por un proceso de proyección térmica por flama, sobre la probeta A1 de un acero de bajo carbono AISI 1018.

Cuando se realiza la observación en microscopía electrónica de barrido en la sección transversal del propio revestimiento (Figura 2), resulta claro que el depósito, como usualmente se reporta con los recubrimientos obtenidos por esta técnica, presentan evidencias de porosidad y una adherencia limitada (Bergant et al, 2009, Gonzalez et al, 2007, Habib et al, 2022) producto, entre otros factores, de la baja velocidad de las partículas que viajan desde la pistola hasta la pieza a recubrir (del orden de 100 m/s) y que, consecuentemente, al presentar baja energía cinética, no logran buenos niveles de adherencia, que es, fundamentalmente, gobernada por una unión de tipo mecánico(Lombardi et al., 2013).

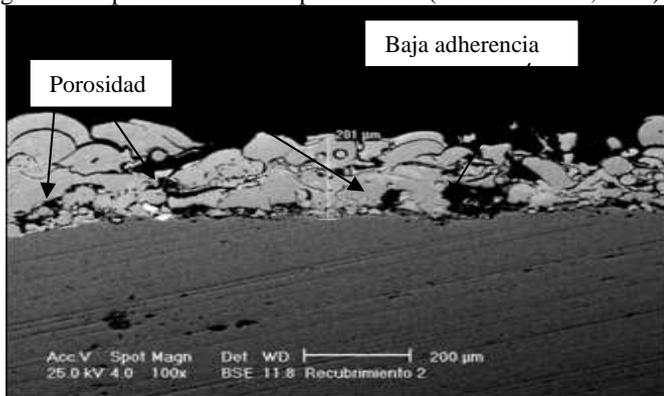


Figura 2: Imagen de microscopía electrónica de barrido de un recubrimiento Ni-Cr-Fe-B-Si obtenido por un proceso de proyección térmica por flama, sobre un acero AISI 1018 (Probeta A3). Se puede observar la presencia de porosidad y de zonas de baja adherencia. Electrones retrodispersados. 100X

En la Tabla V se presentan los valores de los espesores medidos de las diferentes muestras recubiertas y las posteriormente

sometidas a tratamientos con radiación láser. Las piezas señaladas como A1 mostraron el mayor espesor, seguidas de las A2 y las A3 y las muestras sólo recubiertas mediante proyección térmica por flama, resultaron, en términos generales, de un espesor homogéneo. En el caso de las piezas recubiertas y sometidas posteriormente a tratamientos con radiación láser, las variaciones de espesor promedio son relativamente pequeñas aunque, como se comentará más adelante, en realidad, los espesores de las piezas tratadas con láser, resultaron con diferencias entre las zonas de mayor y las de menor espesor, lo que se considera asociado a la manera en que tiene lugar el proceso de refusión y sobre todo el de enfriamiento y resolidificación de los revestimientos.

Tabla V. Espesores promedio de las muestras recubiertas y de las sometidas a Post tratamiento con radiación láser

Espesor (µm)	A1 (µm)	A2 (µm)	A3 (µm)
Recubiertas por P.T.	365	201	113
Recubiertas por P.T y tratadas con láser	417	228	158

En la figura 3 se puede observar el aspecto superficial de un recubrimiento NiCrFeBSi generado por proyección térmica por flama. En cuanto a la morfología de los recubrimientos, observada mediante microscopía electrónica de barrido, destaca la manera en que los *splats* se acomodan en la superficie del sustrato, cuando las gotas del material proyectado y fundido establecen contacto con el sustrato (acero 1018 en este caso) y se van enfriando y solidificando, dando como resultado diversas formas geométricas y la generación de espacios (poros) entre ellos, como también se reporta en (González et al, 2007).

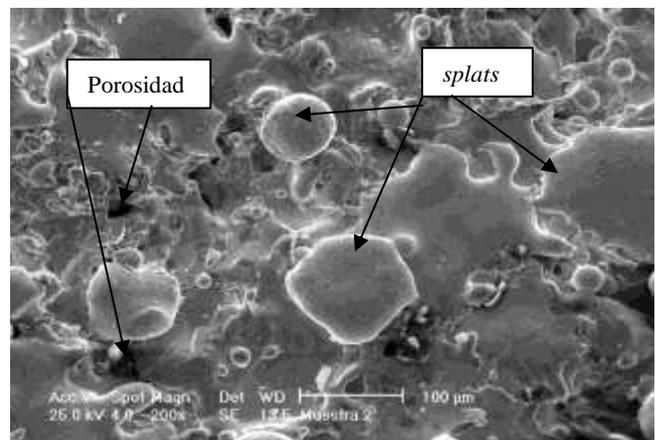


Figura 3: Aspecto superficial de un recubrimiento NiCrFeBSi obtenido por proyección térmica por flama, sobre un acero AISI 1018 (Probeta A1). Se distingue la morfología y acomodo de los *splats* obtenidos y la presencia de porosidad. Imagen de microscopía electrónica de barrido con electrones secundarios. 200X

En la figura 4 se presenta el espectro de un recubrimiento NiCrFeBSi producido mediante proyección térmica por flama que representa la composición química elemental del propio recubrimiento. El elemento mayoritario es el níquel y menores cantidades de Cr, Fe y Si, lo que corresponde con la composición química original del polvo comercial 12C empleado para generar los revestimientos. El que no aparece detectado el Boro obedece

a que el equipo utilizado no cuenta con la posibilidad de detectar un elemento tan ligero.

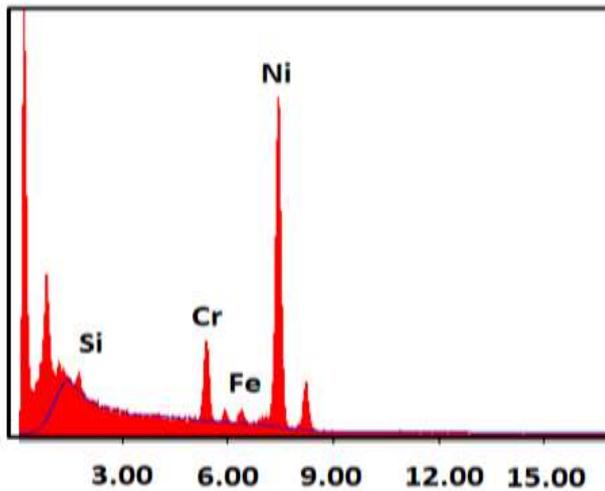


Figura 4: Espectro de un recubrimiento NiCrFeBSi generado mediante proyección térmica por flama, obtenido en la microsonda, evidenciando la presencia mayoritaria de níquel y, en menor medida, elementos tales como Cr, Fe y Si. (Probeta A2)

Por su parte, en la figura 5 se puede observar la sección transversal de un recubrimiento NiCrFeBSi producido mediante proyección térmica por flama, luego de ser tratado mediante radiación láser. Se puede observar que la porosidad se ha reducido sensiblemente hasta casi desaparecer y la adherencia ha mejorado de manera importante, lo que se puede evidenciar con la presencia de una clara interfase, bien definida, entre el sustrato y el revestimiento. A semejante conclusión han llegado también otros investigadores (González et al, 2007; Karimi et al, 2016). La apariencia superficial también permite realizar una primera interpretación de que el recubrimiento fue refundido y resolidificado. a altas velocidades, típicas de un calentamiento y enfriamiento proporcionado por una radiación láser, que puede alcanzar velocidades elevadas, especialmente de enfriamiento, del orden de $10^3 - 10^5$ °K/s (Das et al, 2018) y ello ha permitido generar una un enlace de tipo metalúrgico entre sustrato y recubrimiento, lo que conlleva una mayor adherencia y una microestructura mas homogénea, así como la disminución marcada de la porosidad, lo que coincide, adicionalmente, con resultados reportados previamente (González et al, 2007, Panziera et al, 2020).

Como se planteaba líneas arriba, la aplicación de la radiación láser provoca también, la aparición de diferencias de espesor entre diversas zonas de los recubrimientos tratados, como se puede observar en la propia figura 5. Lo anterior puede relacionarse con la manera en que la radiación láser, en función de los parámetros utilizados (velocidad de barrido, potencia del haz, orientación del haz respecto a la superficie, etc) transmite el calor y alcanza diferentes profundidades en los recubrimientos y ello se va reflejando en la manera en que se producen la refundición y la resolidificación del propio revestimiento.

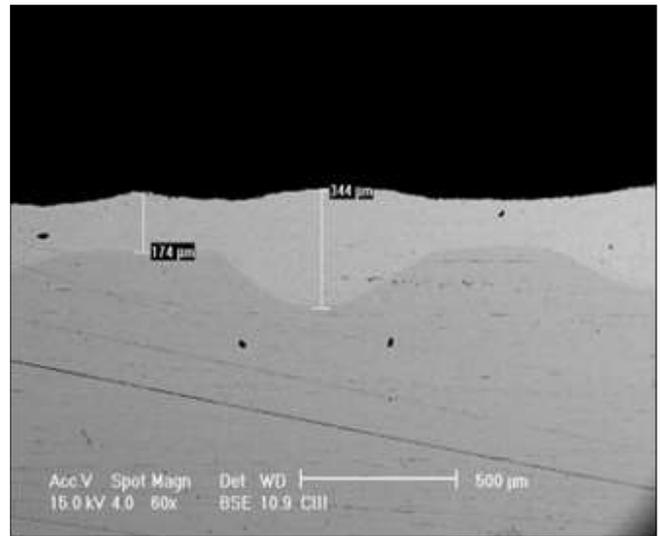


Figura 5: Imagen de microscopía electrónica de barrido de un recubrimiento NiCrFeBSi (Probeta A1), generado mediante proyección térmica por flama y con un postratamiento con radiación láser. La porosidad se ha reducido sensiblemente y se observa la evidencia de una interfase claramente definida entre recubrimiento y sustrato, producto de la generación de un enlace de tipo metalúrgico entre sustrato y recubrimiento, lo que se refleja en una mejora sustancial también, de la adherencia del revestimiento. Electrones retrodispersados. 60X.

En la figura 6, proveniente de la imagen superficial de un recubrimiento NiCrFeBSi obtenido mediante proyección térmica por flama y con posterior tratamiento con radiación láser se puede observar que se ha modificado la morfología del material depositado, tendiendo a presentar una forma esferoidal, lo que se puede asociar, precisamente, a las condiciones de un enfriamiento, que ocurre a elevadas velocidades y que coincide con lo reportado en otros trabajos (Karimi et al, 2016) y una poco relevante presencia de poros.

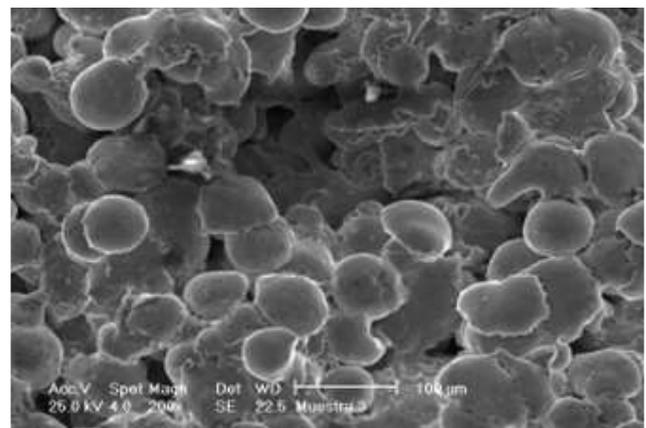


Figura 6: Imagen superficial de microscopía electrónica de barrido de en la que se puede observar la morfología de las partículas del recubrimiento NiCrFeBSi proveniente de proyección térmica por flama, después de aplicar la radiación láser, mostrando una tendencia a la esferoidización de las propias partículas. Electrones secundarios 200X. (probeta A1).

En cuanto a la microdureza, el valor original de la capa de revestimiento NiCrFeBSi, luego de ser depositadas por proyección térmica por flama, fue de 610 Vickers. Las microdurezas, después de aplicar la radiación láser, se presentan en la Tabla VI. Como se puede observar, los cambios en microdureza fueron poco significativos. Los resultados reportados

en otros trabajos son diversos al respecto y están en función, entre otros factores, de la composición del recubrimiento utilizado, el espesor de los propios revestimientos, la profundidad que pueda alcanzar la radiación láser, la potencia empleada, y la velocidad de barrido usada. (Gonzalez et al, 2007, Panziera et al, 2020, Das et al, 2018). En tal sentido, en este trabajo, bajo las condiciones experimentales seleccionadas y los espesores logrados, se considera que la penetración del haz láser fue limitada y, en razón de ello, no se produjeron modificaciones de relevancia en las fases originales de los recubrimientos y por ende, variaciones importantes en la microdureza.

Tabla VI. Microdurezas promedio de las muestras recubiertas y las sometidas a Post tratamiento con radiación láser

Microdureza Vickers 200	A1	A2	A3
Recubiertas por P.T.	610	610	610
Recubiertas por P.T y tratadas con láser	633	647	629

Los valores de rugosidad encontrados para las muestras tratadas (reportadas como Ra) fueron: 20.7 micrómetros, (A1) 27.5 micrómetros (A2) y 22.8 micrómetros (A3), con lo que se puede percibir que las diversas condiciones de aplicación de la radiación láser no generaron diferencias significativas entre ellas y que son valores, en promedio, ligeramente menores al valor de rugosidad de los revestimientos, antes de la aplicación de la radiación láser (31.2 micrómetros), lo cual se considera puede estar asociado a los procesos de refusión y resolidificación de los recubrimientos que ocurren durante el post procesamiento y que generan un recubrimiento más homogéneo y, por ende, una superficie menos "accidentada".

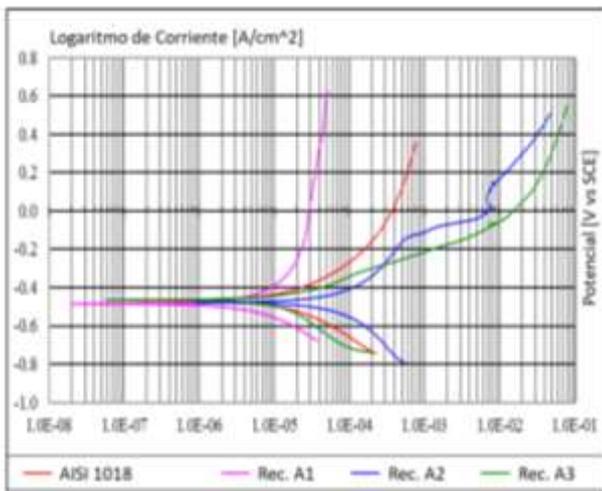


Figura 7: Curvas de polarización del acero sin revestimiento y de los diferentes recubrimientos NiCrFeBSi generados por proyección térmica y tratados posteriormente con radiación láser, bajo las diferentes condiciones de procesamiento.

La figura 7 refleja las curvas de polarización del acero AISI 1018 sin recubrimiento, y de las muestras del propio acero recubierto por proyección térmica y tratado posteriormente con radiación láser en las diversas condiciones indicadas en la Tabla IV. Se observa una disminución de la densidad de corriente respecto a la del acero original, especialmente en el acero tratado bajo la

condición denominada como A1, aunque también en el caso de la muestra A3 se observa este favorable resultado, que se considera asociado, principalmente, a la disminución, de la porosidad de los recubrimientos, lo que reduce las vías de acceso del medio corrosivo para continuar atacando al sustrato lo que se ve reflejado en una mejora de la resistencia a la corrosión de los recubrimientos.

Tabla VII. Comparativa de resultados de aplicación de combinación de Proyección Térmica por Flama y Refusión

Autor	Recubrimiento	Sustrato	Dureza	Porosidad	Adherencia
Habib et al 2022	NiCrFeBSi + Refusión flama	Acero Inox 304	↑	↓	↑
Bergant et al 2009	NiCrBSi + Refusión flama + atm.	Acero al C.	488 Hv ↑	↓	↑
Ruiz et al. 2020	NiCrBSiMo sin refusión	Acero al C	900-1250	↓ Control parámetros	↑ Control parámetros
Glez et al 2007	NiCrBSi refusión flama y láser	Fundición Gris	900 ↓	↓	↑
Karimi et al 2014	NiCrBSi refusión flama	Acero al C	↑	↓ 11 a 1.9%	↑

En la Tabla VII se presenta una comparativa de resultados de la aplicación combinada de procesos de proyección térmica por flama y refusión, mediante diferentes tecnologías reportadas en la literatura. Un resultado común a todos ellos es la mejora en la adherencia y la disminución de la porosidad. Esas características conseguidas coinciden con las logradas en este trabajo. La mejora en la adherencia, como se ha mencionado previamente, está asociada a que la unión entre recubrimiento y sustrato cambia de un mecanismo fundamentalmente mecánico, en el caso de las piezas recubiertas mediante proyección térmica por flama, a otro donde se logra un mecanismo de enlace metalúrgico entre capa y sustrato.

Otra modificación en la que hay consenso en los diferentes trabajos es el relativo a la disminución de la porosidad, llegando incluso a valores muy bajos, del orden del 2%, en el artículo de Karimi et al. 2014. La disminución es diversa en función de las condiciones de realización del post proceso, pero la refusión permite que el proceso de resolidificación produzca menores imperfecciones en el revestimiento y posibilite, por ejemplo, la mejora en resistencia a la corrosión encontrada en este trabajo.

En cuanto a la microdureza, los datos reportados varían en los diferentes trabajos. En (Gonzalez et al, 2007), por ejemplo, se reporta una ligera disminución luego del postproceso, en tanto en (Habib, 2022) se señala un aumento de la dureza. Conviene indicar algunos factores que pueden incidir en esta variación de resultados. Uno de ellos es que aunque el material a depositar se reporta como NiCrBSi en los varios artículos, la composición química de unos y otros no es la misma y como se menciona en alguno de ellos, por ejemplo, se requiere la presencia de un mínimo de algunos componentes para poder formar compuestos de alta dureza tipo boruros o carburos, como se señala en (Bergant

et al 2009), lo que, sin duda, incide en las diferencias en los valores finales de dureza indicados, luego de los tratamientos aplicados.

Un punto más a destacar es el reportado en el trabajo de (Ruiz et al, 2020) en el que se muestra como una adecuada selección y control de los parámetros del proceso de proyección térmica por flama, puede ser un inicio prometedor para conseguir un depósito de baja porosidad y con un postproceso con radiación láser se puede lograr un revestimiento de calidad. Esto, en síntesis, refleja la necesidad de un control adecuado tanto de la fase de obtención del revestimiento como de la fase de refundición, lo que, con muy buenas posibilidades, llevará a un sistema sustrato-recubrimiento de excelente comportamiento.

Un área poco estudiada en la literatura revisada es la relacionada con la modificación de la resistencia a la corrosión y esto se considera una aportación del presente trabajo. En un siguiente trabajo se planea medir con mayor exactitud la porosidad y la adherencia, (que en este trabajo sólo fueron estimadas mediante su observación en el microscopio electrónico de barrido) y relacionar estos resultados con la respuesta en condiciones de corrosión de los recubrimientos tratados con la combinación proyección térmica más procesamiento con láser.

4. Conclusiones.

Ha sido posible modificar los recubrimientos NiCrFeBSi generados mediante proyección térmica por flama, sobre un acero de bajo carbono, realizando un postratamiento empleando radiación láser, utilizando tres diferentes potencias y tres velocidades de barrido

La aplicación de la radiación láser provoca fenómenos de refundición y resolidificación a elevadas velocidades, especialmente de enfriamiento, lo que genera una modificación en el mecanismo de unión de sustrato y recubrimiento de una condición de una unión de tipo mecánico a la generación de un enlace metalúrgico entre capa y sustrato, lo que paralelamente conlleva la formación de una nueva condición de la microestructura más homogénea respecto a la proveniente del proceso de proyección térmica por flama.

La combinación de los dos procesos ha producido, relacionado con los fenómenos anteriores, la disminución de la porosidad, un incremento de la adherencia y un aumento, asociado a ello, de la resistencia a la corrosión de los revestimientos.

Bajo las condiciones experimentales empleadas en este trabajo, los recubrimientos tratados han mostrado un ligero aumento de la microdureza y una leve disminución de la rugosidad, respecto a su condición original, aunque en ambos casos, las diferencias no resultan significativas.

La experiencia mostrada por este trabajo corrobora lo reportado en la literatura en el sentido de que para lograr resultados favorables es necesario conseguir un buen control, tanto de los parámetros del proceso de proyección térmica por flama como de los correspondientes a la aplicación de radiación láser. En este caso, los mejores resultados logrados correspondieron a las condiciones de una potencia del láser de 780 W y una velocidad de barrido de la radiación de 10×10^{-3} m/s.

La alternativa de procesamiento planteada en este trabajo constituye una opción atractiva para dotar a los recubrimientos obtenidos por proyección térmica por flama (atractivos por su bajo costo, su simplicidad y versatilidad), de un mejorado rendimiento colaborando de esta forma a posibilitar mayores aplicaciones a nivel industrial para estas tecnologías.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Dirección de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), de la UNAM por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través del Proyecto PAPIIT IT101221. "Desarrollo de tecnologías alternativas de modificación de superficies para la mejora de materiales de potencial industrial"

Conflicto de intereses

Los autores de este trabajo manifiestan no tener conflicto de interés.

Referencias

- Al-Sayed S., Hussein, A. Nofal A., Hassab S., Elgazzar H. (2017). Characterization of a Laser Surface-Treated Martensitic Stainless Steel. *Materials* 10, 595; doi:10.3390/ma10060595
- Bergant Z.; Grum J. (2009). Quality Improvement of Flame Sprayed, Heat Treated, and Remelted NiCrBSi Coatings. *JTTEE5* 18:380–391. DOI: 10.1007/s11666-009-9304-7
- Cuao Moreu, C.A.; Maldonado Cortés, D.; Lara Banda, M.d.R.; García Sánchez, E.O.; Zambrano Robledo, P.; Hernández Rodríguez, M.A.L.(2021).. Surface, Chemical and Tribological Characterization of an ASTM F-1537 Cobalt Alloy Modified through an Ns-Pulse Laser. *Metals*, 11, 1719. <https://doi.org/10.3390/met11111719>
- Das B., Kumar A, Bandyopadhyay P. (2018). Online monitoring of laser remelting of plasma sprayed coatings to study the effect of cooling rate on residual stress and mechanical properties. *Ceramics International* 44, 7524–7534. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.152>.
- Fenineche N.; Cherigui M. (2008). Thermal Spraying Coatings Assisted by Laser Treatment. *AIP Conference Proceedings* 1047, 95–98. *Laser and Plasma Applications in Materials Science*, edited by E.-H. Amara, S. Boudjemai, and D. Doumaz. <https://doi.org/10.1063/1.2999976>
- Glanc A. et al (2018). Microstructure and tribological behavior of HVOF sprayed and laser treated CoCrTaAlCSiY coatings. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 461 01202.
- Gong N. et al (2023) Laser-treatment-induced surface integrity modifications of stainless steel. *Mater. Res. Express* 10 034002 DOI 10.1088/2053-1591/acbe93
- Gong G., Ye, J. Chi Y., Zhao Z., Wang Z., Xia G., Du X., Tian H., Yu H., Chen C. (2021). Research status of laser additive manufacturing for metal: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 855–884. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.050>.
- González R., Cadenas M., Fernández R., Cortizo J.R., Rodríguez E. (2007). Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser. *Wear*, 262, 3–4. 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.05.009>
- Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, *International Materials Reviews*, 57:3, 133–164, DOI: 10.1179/1743280411Y.0000000014
- Habib K., Cano D., Heredia J. et al. (2022). Effects of thermal spraying technique on the remelting behavior of NiCrBSi coatings. *Surface and Coatings Technology*, 444, 128669. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128669>
- Janicki, D. (2017). Fabrication of high chromium white iron surface layers on ductile cast iron substrate by laser surface alloying. *Stroj. Vestn. J. Mech. E.* 63, 705–714. DOI:10.5545/sv-jme.2017.4379
- Janicki, D. (2017). Laser cladding of Inconel 625-based composite coatings reinforced by porous chromium carbide particles. *Opt. Laser Technol.*, 94, 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.03.007>
- Jeyaprakash, N.; Yang, C.-H.; Duraiselvam, M.; Prabu, G. (2019) Microstructure and tribological evolution during laser alloying WC—12% Co and Cr₃C₂—25% NiCr powders on nodular iron surface. *Results Phys.* 12, 1610–1620. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.01.069>
- Jeyaprakash N, Yang C, Kumar D. (2020). Laser Surface Modification of Materials. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94439>.
- Karimi M, Salimijazi H, Golozar M. (2016) Effects of remelting processes on porosity of NiCrBSi flame sprayed coatings, *Surface Engineering*, 32:3, 238–243, DOI: 10.1179/1743294415Y.0000000107
- A. Kotarska., (2021). The Laser Alloying Process of Ductile Cast Iron Surface with Titanium. *Metals* 11, 282. <https://doi.org/10.3390/met11020282>

- Lisiecki, A.; Slizak, D.; Kukofka, A. (2019). Laser cladding of Co-based metallic powder at cryogenic conditions. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, 95, 20–31. DOI: 10.5604/01.3001.0013.7622
- Lombardi, A.N., Casteletti, L.C., Totten, G.E. (2013). Thermal Spray Technologies: An Overview. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_684
- Olakanmi, E.O., Doyoyo, M. Laser-Assisted Cold-Sprayed Corrosion- and Wear-Resistant Coatings: A Review. (2014). *J Therm Spray Tech* 23, 765–785. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0098-x>
- Panziera, R.C., de Oliveira, A.C.C., Pereira, M. et al. (2020). Study of the effects of the laser remelting process on the microstructure and properties of the WC–10Co–4Cr coating sprayed by HVOF. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42, 119. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-2201-1>
- Poloczek, T.; Kotarska, A. (2020). Effect of laser cladding parameters on structure properties of cobalt-based coatings. *IOP Conf. Ser.Mater. Sci. Eng.* 916, 012085. DOI 10.1088/1757-899X/916/1/012085
- Rezayat, M.; Aboutorabi Sani, A.; Talafi Noghani, M.; Saghafi Yazdi, M.; Taheri, M.; Moghanian, A.; Mohammadi, M.A.; Moradi, M.; Mateo Garcia, A.M.; Besharatloo, H.(2023). Effect of Lateral Laser-Cladding Process on the Corrosion Performance of Inconel 625. *Metals*, 13, 367. <https://doi.org/10.3390/met1302036>
- Ruiz-Luna,H., Méndez-Medrano K., Montoya M., Baltazar-Hernández V. (2020). Characterization of flame sprayed NiCrBSiMo coatings deposited with different spraying parameters. *Revista de Metalurgia* 56(2), 169. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.169>
- Singh, S.; Berndt C., ; Raman S...; Singh, H.(2023). Applications and Developments of Thermal Spray Coatings for the Iron and Steel Industry. *Materials.*, 16, 516.<https://doi.org/10.3390/ma16020516>
- Suutala J., Tuominen T, Vuoristo V. (2006). Laser-assisted spraying and laser treatment of thermally sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 201, 5. 1981-1987. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.042>
- Yang Z , Liang W , Miao Q., Ding Z., Huang B.. (2022). Hot corrosion behaviors of as sprayed and laser remelted YSZ thermal barrier coatings at 950°C. *Materia* 27, 3. DOI: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0052>
- Zhang S, Jiang J, Zou X, Liu N, Wang H, Yang L, Zhou H and Liang C (2022), Progress of laser surface treatment on magnesium alloy. *Front.Chem.*10:999630. doi: 10.3389/fchem.2022.999630.
- Zhao, K.; Yan, G.; Li, J.;Guo, W.; Gu, J.; Li, C. (2023). The Resistance to Wear and Thermal Cracking of Laser Surface Engineered P20 Steel.Coatings 13, 97. <https://doi.org/10.3390/coatings13010097>
- Zhong C., Backes G.,Johann L, Kittel J., Schopphoven T., Küppers W. (2022). Development of a novel green coating process with laser. *Scientific Reports* 12, 6314. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10351-4>