

Efecto del sustrato en las propiedades de recubrimientos de Zn-Al depositados por proyección térmica sobre fundición nodular, aceros generados por manufactura aditiva y ABS

Effect of substrate on the properties of Zn-Al coatings deposited by thermal spraying on ductile iron, additive manufacturing steel and ABS

Dayi G. Agredo-Díaz^a, Nicolas Ortiz-Godoy^a, Arturo Barba-Pingarrón^b, Jesús R. González-Parra^b, Raúl G. Valdez-Navarro^b, Jhon J. Olaya-Florez^a

^aUniversidad Nacional de Colombia-sede Bogotá-Facultad de Ingeniería-Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica-Bogotá, Colombia

^bUniversidad Nacional Autónoma de México-Facultad de Ingeniería-División de Ingeniería Mecánica e Industrial-Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA), Ciudad de México, México

Abstract:

This research presents the results on the effects of the deposition of a Zn-Al alloy on ductile iron, additive manufacturing steel, and ABS substrates, these coatings were obtained by flame thermal spray. Elemental composition characterizations were performed by atomic emission spectroscopy and spectroscopy dispersive energy, morphological using scanning electron microscopy, structural by X-ray diffraction, of roughness in the substrate with a Mitutoyo SJ 310 roughness tester and interferometry with white light, the adhesion was evaluated by means of the pull-off test. The results obtained show that the coatings do not undergo changes in their crystalline structure and elemental composition with respect to the precursor material, they also have good homogeneity and a good interface, obtaining an average value of maximum adhesion strength close to 900 N for ABS. A directly proportional relationship was found between the surface roughness generated in the substrate with the adhesion of the coating, as the roughness increases, the adhesion of the coating improves.

Keywords:

Ductile iron; Additive manufacturing steel; ABS; Roughness; Adhesion strength

Resumen:

Esta investigación presenta los resultados de la deposición de una aleación de Zn-Al sobre diversos sustratos con diferente rugosidad (fundición nodular, acero producido por manufactura aditiva y ABS). Estos recubrimientos fueron obtenidos mediante proyección térmica por flama. Se realizaron caracterizaciones de composición elemental mediante espectroscopia de emisión atómica y espectroscopia dispersiva de energía de rayos X, morfológica mediante microscopia electrónica de barrido, estructural mediante difracción de rayos X, de rugosidad en el sustrato con un rugosímetro Mitutoyo SJ 310 e interferometría con luz blanca, se evaluó la adhesión mediante el ensayo de pull-off. Los resultados obtenidos evidencian que los recubrimientos no sufren cambios en su estructura cristalina y composición elemental respecto al material precursor, también tienen buena homogeneidad y una buena interfaz, obteniendo un valor promedio de fuerza máxima de adherencia cercana a los 900N para el ABS. Se encontró una relación directamente proporcional entre la rugosidad superficial generada en el sustrato con la adherencia del recubrimiento, a medida que la rugosidad aumenta la adherencia del recubrimiento mejora.

Palabras Clave:

Fundición nodular; Acero por manufactura aditiva; ABS; Rugosidad; Fuerza de adherencia

Autor para la correspondencia: dgagredod@unal.edu.co

Correos electrónicos: dgagredod@unal.edu.co (D.G. Agredo-Díaz), nortizg@unal.edu.co (N. Ortiz-Godoy), arbapin5@gmail.com (A. Barba-Pingarrón), rafael.parra@yandex.com (J. R. González-Parra), raulvaldez@hotmail.com (R. G. Valdez-Navarro), jjolayaf@unal.edu.co (Jhon J. Olaya-Florez).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2830-3022> (D.G. Agredo-Díaz), <http://orcid.org/0000-0003-4468-4603> (N. Ortiz-Godoy), <http://orcid.org/0000-0001-7285-9429> (A. Barba-Pingarrón), <http://orcid.org/0000-0002-6337-2931> (J. R. González-Parra), <http://orcid.org/0000-0002-3217-9266> (R. G. Valdez-Navarro), <http://orcid.org/0000-0002-4866-4792> (Jhon J. Olaya-Florez).

Fecha de recepción: 29/06/2020, Fecha de aceptación: 06/08/2020, Fecha de publicación: 05/10/2020

<https://doi.org/10.29057/aactm.v7i7.6192>



1. Introducción

La fundición nodular o fundición dúctil se obtiene a partir de la fundición gris, mediante un proceso térmico y un proceso de inoculación con una sustancia rica en Mg. Las fundiciones nodulares tienen un amplio campo de aplicaciones, principalmente en la industria automotriz, debido a su versatilidad en cuanto al diseño de piezas de ingeniería y también a su menor densidad en comparación con aceros y su competitiva relación resistencia/densidad respecto a otros metales y aleaciones [1]. Su principal característica microestructural es la presencia de nódulos de grafito embebidos en una matriz ferrítico-perlítica [2], lo cual le otorga mayor resistencia a la tracción y mayor tenacidad comparado con la fundición gris [3], sin embargo, este material tiene una baja resistencia a la corrosión, lo cual puede ser mejorado mediante diferentes tratamientos superficiales [4]. Una de las técnicas que se emplea para este fin es la de proyección térmica por flama, en la cual se funde el material de aporte (alambre o polvo) mediante una llama de gas combustible acetileno-oxígeno, y luego se atomiza mediante aire comprimido proyectándolo al sustrato [5]. En las investigaciones realizadas por Agredo y colaboradores [6], se evidencia un aumento considerable de la resistencia a la corrosión del sustrato de fundición nodular con un recubrimiento Zn-Al mediante la técnica de proyección térmica con flama.

Por otro lado, recientemente se han desarrollado tecnologías para elaborar piezas metálicas de ingeniería a través de procesos de manufactura aditiva (AM) las cuales son fabricadas mediante la adición de capas del metal, partiendo de un modelo tridimensional en software CAD, siendo los materiales metálicos más utilizados, los empleados por la industria aeroespacial, automotriz y en la medicina, estos son: los aceros inoxidables, aleaciones de aluminio y aleaciones de titanio [7]. Este proceso es muy novedoso y eficiente en términos de obtener piezas complejas en corto tiempo con propiedades mecánicas cercanas a las obtenidas por otros métodos convencionales, aunque en algunos casos se pueden presentar grietas o porosidades, lo cual genera una disminución significativa de las propiedades mecánicas y en la resistencia a la corrosión [8]. Esta tecnología se encuentra en constante desarrollo [9] y además se han venido desarrollando investigaciones, como los estudios llevados a cabo por Agredo et al. [10], en donde se aplica un recubrimiento de Ni-P mediante niquelado químico sobre una pieza de acero obtenido mediante un proceso de manufactura aditiva. En esa investigación se logró mejorar su resistencia a la corrosión, mediante la deposición de un recubrimiento amorfo, estable, con buena adherencia y baja porosidad.

Otro material muy explorado y considerado como polímero de ingeniería es el ABS (Acrylonitrile-Butadiene Styrene), se conoce por ser un polímero de baja densidad y altas prestaciones mecánicas [11], por esta razón se ha convertido en un material de utilidad en las industrias aeroespacial, automotriz, electrónica y textil [12]. Actualmente, se continúa realizando estudios para

metalizar estos materiales poliméricos con el propósito de aumentar la dureza superficial, la conducción eléctrica y térmica, así como el desarrollo de escudos electromagnéticos [13]. Una de las técnicas más utilizada para depositar recubrimientos sobre polímeros es la Proyección Fría (Cold Spray) [14], ya que estos materiales sufren degradación a altas temperaturas [15], sin embargo, se están explorando otras técnicas como la proyección térmica con flama. En este trabajo se ha logrado recubrir este material polimérico sin el empleo de agentes químicos en la etapa de preparación superficial con esta técnica de costo bastante menor que el de la Proyección Fría.

El objetivo de esta investigación es mostrar el efecto de la condición superficial de diferentes sustratos en las características de un recubrimiento Zn-Al depositado mediante la tecnología de proyección térmica.

2. Materiales y métodos

Este estudio se ha realizado con tres sustratos diferentes, una fundición nodular grado 2, (las características de estas fundiciones son mostradas en [6]), un acero de bajo carbono producido por manufactura aditiva, el cual se ha reportado previamente en [10] y un sustrato polimérico de ABS (Acriló nitrilo butadieno estireno) inyectado en una máquina Demag ErgoTech Pro 50-270, con dimensiones de 33x19x3 mm. La composición elemental del acero y la fundición nodular se obtuvieron utilizando espectrometría de emisión atómica.

La superficie de los sustratos se preparó mediante granallado con partículas de SiO₂ de morfología irregular con un tamaño promedio de partícula de 1 mm. La distancia de bombardeo de la pistola a los sustratos fue de 20 cm con un tiempo de 5 minutos. Una vez realizada la preparación superficial se midió la rugosidad por dos métodos; un primer método se basa en la medición de la rugosidad a nivel de un plano usando un equipo Mitutoyo SJ 310, (en este caso se valoró el parámetro rugosidad promedio Ra), y un segundo método por interferometría de luz blanca que valora la rugosidad en un área de la muestra (S_a), para este caso se usó un equipo Bruker counter GTK aplicando un filtro gaussiano con un cut off de 0.8 mm.

Se depositó una aleación de Zn-Al mediante la técnica de proyección térmica por flama con alambre. Para ello se usó una pistola Sulzer Metco Wire jet-96 con una distancia de proyección de 20 cm, normal a la superficie, la velocidad de consumo del alambre fue de 0.0342 m/s. Los parámetros de proyección utilizados se muestran en la Tabla 1 y se informan en la investigación llevada a cabo por Agredo y colaboradores [6], estos parámetros se consideran, a partir de resultados previos, adecuados para generar una buena combinación de adherencia y propiedades mecánicas de los recubrimientos. La fuerza de adhesión se determinó usando el equipo Elcometer 106 Pull-Off Adhesion Tester bajo el estándar ISO 4624 [16].

Tabla 1. Parámetros experimentales del Proceso de Proyección Térmica por flama.

Gas	Presión (Pa)	Flujo (m ³ /s)
Oxígeno	206.843x10 ³	43.26x10 ⁻⁵
Acetileno	103.421x10 ³	23.59x10 ⁻⁵
Aire Comprimido	482.633x10 ³	

La morfología se caracterizó usando microscopía electrónica de barrido (SEM) en un microscopio electrónico Philips XL 20 para los sustratos metálicos y en un microscopio Vega3 Tescan para el recubrimiento depositado sobre el sustrato orgánico. La composición elemental de los recubrimientos se determinó usando una microsonda Bruker XFlash 410-M. La caracterización estructural se llevó a cabo mediante difracción de rayos X (DRX) en un difractor PANalytical X Pert Pro en configuración Bragg Brentano con un ánodo de Co, usando un $K\alpha = 1.789 \text{ \AA}$, una corriente de 40 mA y un voltaje de 40 kV.

3. Resultados y Discusión

Las tablas 2 y 3 muestran la composición elemental de la fundición nodular y del acero de bajo carbono producido por manufactura aditiva, respectivamente. El primer material fue obtenido bajo las condiciones presentadas en la referencia [6] y corresponde a una fundición nodular grado 2 de matriz ferrítico-perlítica, la dureza original de este material esta del orden de los 312 HV. El acero producido por manufactura aditiva presenta bajo contenido de carbono (0.084% en peso) y un alto contenido de Mn (1.401% en peso), las características de obtención de este acero, sus propiedades microestructurales y mecánicas se describen en la referencia [10], es de resaltar que sus propiedades varían capa a capa, sin embargo, en este material reporta una dureza global de 156 HV en su sección transversal.

Tabla 2. Composición elemental de la fundición nodular. % en peso.

Fe	C	Si	Mn	P
92.700	3.606	2.505	0.521	0.017

Tabla 3. Composición elemental del acero de bajo carbono producido por manufactura aditiva. % en peso.

Fe	C	Mn	Si	Cu	Ni	Mo	Cr
97.591	0.084	1.401	0.808	0.052	0.013	0.015	0.012

Después de aplicar el proceso de granallado todos los materiales se sometieron a una medición de su rugosidad. En la figura 1 se muestran los perfiles de rugosidad medidos con el rugosímetro Mitutoyo SJ 310, en tanto en la figura 2 se presenta lo obtenido por interferometría de luz blanca.

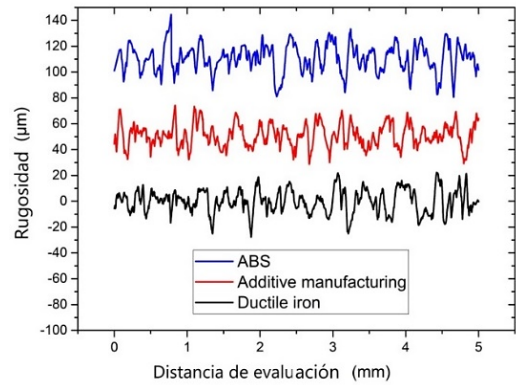


Figura 1. Perfiles de rugosidad de las muestras preparadas. Medición por el rugosímetro Mitutoyo SJ-310.

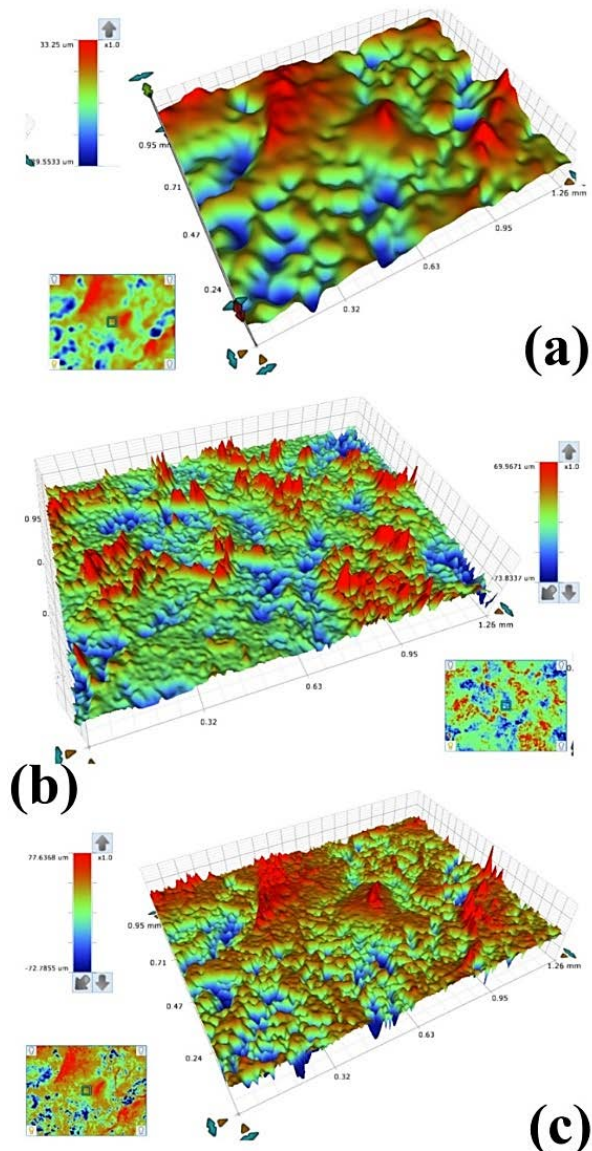


Figura 2. Superficie de las muestras preparadas. Medición por interferometría. (a) Fundición nodular, (b) Acero de bajo carbono de Manufactura aditiva, (c) ABS.

Tal como se observa en las figuras 1 y 2 La fundición nodular muestra un valor de $R_a=7.219 \mu\text{m}$ y un valor de $S_a=7.502 \mu\text{m}$, esto significa variación de 3.77% del rugosímetro con respecto a lo medido por el interferómetro. El acero por manufactura aditiva presenta un valor de $R_a=7.022 \mu\text{m}$ y un $S_a=7.075 \mu\text{m}$, lo que se traduce en una variación del 0.74%. Por otro lado, el ABS arroja un valor de $R_a=8.439 \mu\text{m}$ con un $S_a=7.759 \mu\text{m}$, lo que significa un 8.76% de variación del rugosímetro con respecto a lo medido por interferometría. Estos resultados son congruentes para el tiempo de exposición en que se generó la preparación de las muestras y fueron los requeridos para obtener un buen anclaje de los recubrimientos [17].

La figura 3 muestra las secciones transversales de los recubrimientos obtenidos sobre cada uno de los sustratos. Para la fundición nodular se logró un espesor de $168.13 \pm 19.64 \mu\text{m}$, el acero por manufactura aditiva presenta un valor de $120.36 \pm 7.09 \mu\text{m}$ y para el ABS se consigue un espesor de $93.07 \pm 20.64 \mu\text{m}$. A nivel global todos los recubrimientos presentan una buena unión con el sustrato, condición que se muestra en la interfaz entre recubrimiento y el material. En el depósito sobre fundición nodular es donde se consigue la mayor homogeneidad con la menor cantidad de defectos, sin embargo, esto no se logró para el recubrimiento sobre ABS, donde se evidencia algo de porosidad y una superficie bastante irregular, recubrimientos con características similares son estudiados en las referencias [18], [19].

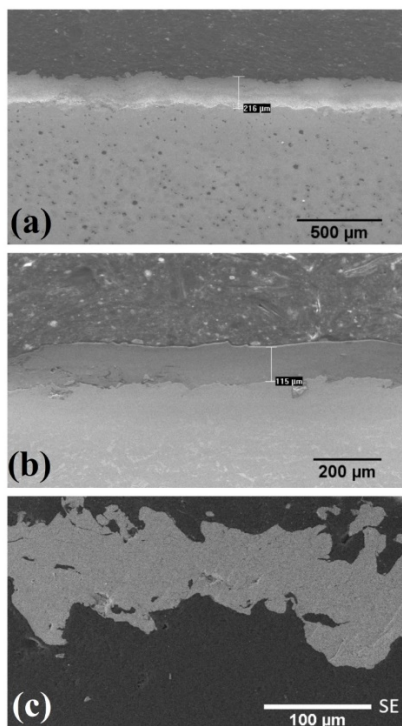


Figura 3. Sección transversal de los recubrimientos. (a) Recubrimiento sobre fundición nodular, (b) Recubrimiento sobre manufactura aditiva, (c) Recubrimiento sobre ABS.

Un análisis de EDS sobre la sección transversal del recubrimiento ha permitido determinar la composición semicuantitativa de los mismos, este análisis es producto de 15 mediciones aleatorias. La figura 4 permite evidenciar la aparición de picos de Zn y Al, esto muestra que no hay variabilidad en la composición, ni que se han introducido materiales extraños luego del proceso de solidificación de los recubrimientos, se obtiene un $79.20 \pm 2.18 \%$ en peso de Zn y un $20.80 \pm 2.80\%$ en peso de Al, estos resultados son similares a los obtenidos por Valdez y colaboradores [20].

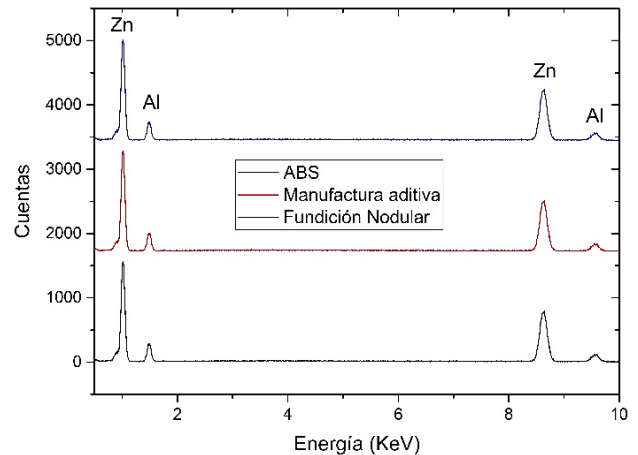


Figura 4. Composición semicuantitativa por EDS de los recubrimientos depositados sobre los diferentes sustratos.

La figura 5 muestra el patrón de difracción de rayos X para los recubrimientos estudiados, se evidencia la formación de una fase de Zn con estructura cristalina hexagonal y grupo espacial P63/mmc (194) conforme al patrón de referencia ICSD 96-901-1600, la orientación de mayor intensidad es la (011) y la orientación de menor intensidad es la (013), a su vez se presenta una fase de Al con estructura cristalina cúbica y grupo espacial Fm3m (225) según el patrón de referencia ICSD 01-089-2837, se obtiene un porcentaje de fase de 83% para el Zn y de 17% para el Al, esta fase presenta un máximo de intensidad en (111) y mínimo de intensidad en el plano (220), estos resultados permitieron determinar que no se han formado óxidos en los recubrimientos y validan la pureza de los mismos [21–23].

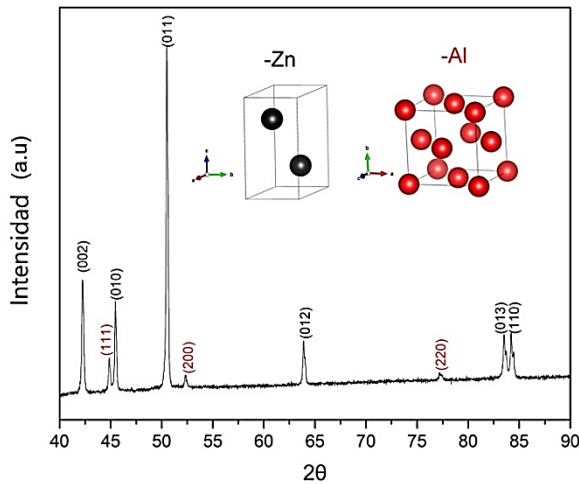


Figura 5. Patrón de difracción para los recubrimientos de Zn-Al, sobre los diversos sustratos.

Por otra parte, la caracterización mecánica mediante los ensayos de adherencia ha permitido validar lo discutido en las imágenes de la sección transversal de los recubrimientos, aquí se tiene una clara correlación con la rugosidad medida previa a la deposición. La figura 6 muestra un diagrama barras con el promedio de la fuerza de adherencia de cada uno de los recubrimientos y se identifica el mecanismo de falla de cada uno. Para el recubrimiento sobre la fundición nodular y el acero proveniente de manufactura aditiva, se presenta una falla cohesiva, este tipo de falla es ideal en estos recubrimientos ya que se presenta una ruptura entre las partículas del recubrimiento, quedando el sustrato con una porción adherida a toda la superficie [6], mientras que para el polímero recubierto se presenta una falla de tipo adhesivo/cohesivo con predominancia adhesiva [24]. Si bien este tipo de fallas no son deseables ya que dejan una alta área descubierta del sustrato, este depósito logró la máxima fuerza de adherencia, reportando un valor de 889.79 ± 35.73 N.

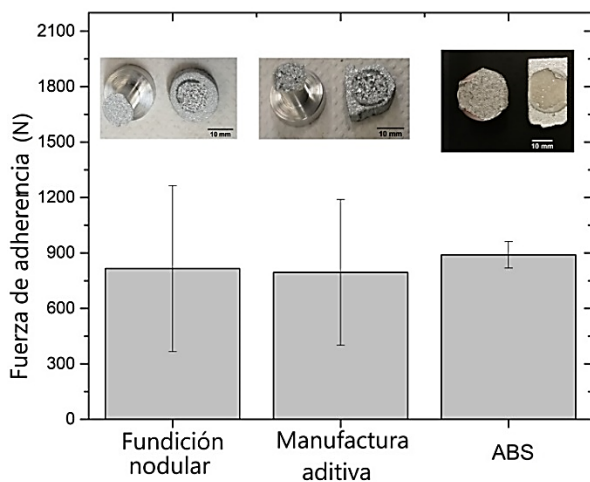


Figura 6. Fuerzas de adherencia para los recubrimientos sobre fundición nodular, manufactura aditiva y ABS.

En la figura 7 se percibe la correlación de la fuerza de adherencia con respecto al valor de rugosidad. Cada material evidencia un valor de rugosidad distinto, lo cual está en función de las propiedades de cada sustrato, el menor valor de rugosidad es obtenido para el acero por manufactura aditiva y el mayor está dado para el material polimérico, en este caso a medida que el valor de rugosidad aumenta, el valor de la fuerza de adherencia crece, esto se favorece debido a que existe una mayor condición de irregularidades en la superficie del material, lo cual propicia un mayor anclaje del recubrimiento hacia el sustrato, esto mismo es evidenciado en la imagen de SEM del polímero, el cual tiene mayor adherencia, aquí se tiene una mayor profundidad de las irregularidades que propician una mejor unión del recubrimiento con el sustrato [25,26], sin embargo, se presenta una falla mixta, la cual no es lo ideal. La figura 7 exhibe el comportamiento descrito anteriormente.

Los recubrimientos depositados sobre los sustratos metálicos evidencian una falla cohesiva, la cual es generada por la buena unión mecánica y metalúrgica en la interfaz recubrimiento/sustrato, por otro lado, el ABS recubierto presenta una falla de predominancia adhesiva, esta está ligada a que la unión solo es de tipo mecánico del recubrimiento hacia el sustrato, y es debida a la diferente naturaleza de los dos materiales [27].

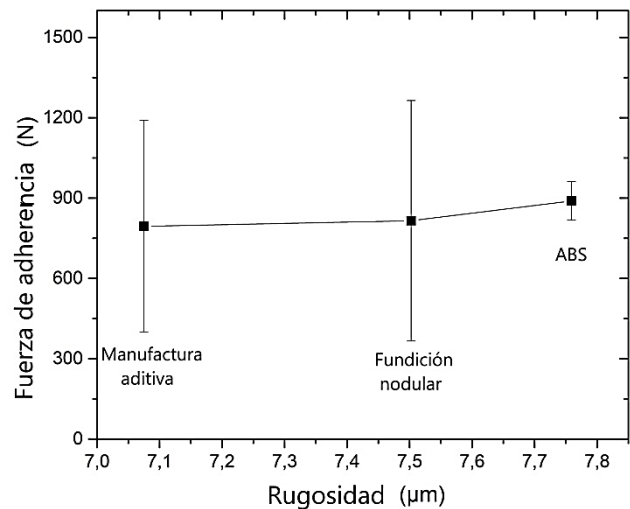


Figura 7. Fuerza de adherencia como función de la rugosidad de los diferentes sustratos recubiertos con Zn-Al mediante proyección térmica por flama.

Conclusiones

En ninguno de los recubrimientos Zn-Al sobre los diferentes sustratos, se generan cambios de composición elemental ni modificaciones estructurales, respecto a los materiales precursores.

Cada sustrato evidencia un valor de rugosidad diferente, el mayor valor esta dado en el ABS y el menor valor en el acero por manufactura aditiva, a medida que el valor de rugosidad aumenta en el sustrato se favorece un mejor anclaje de los recubrimientos y su fuerza de adherencia crece. Para el caso de los recubrimientos sobre sustratos metálicos muy seguramente se ha generado algún nivel de unión metalúrgica lo que genera una falla de tipo cohesivo.

La fundición nodular y el acero presentan fallas de tipo cohesivo, mientras que el polímero presenta una falla de tipo adhesivo/cohesivo con predominancia adhesiva, este último material presenta una fuerza de adherencia del orden de los 890 N.

Todos los recubrimientos presentan una buena unión en la interfaz material-recubrimiento y buena homogeneidad del recubrimiento con pocos defectos, siendo la fundición nodular la que mejor aspecto presenta

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de instituciones como la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) en cabeza del profesor Cesar Armando Ortiz Otalora por su ayuda con los ensayos de difracción de rayos X.

A la Universidad Nacional de Colombia por la prestación de sus laboratorios y el fomento a la investigación científica.

Los autores del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, agradecen a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, por el apoyo brindado a través de los Proyectos PAPIIT IT101318 Desarrollo de Tecnologías de Superficie para la Optimización de Componentes y Sistemas y PAPIIME PE100218 Programa para la Actualización y Mejora de la Enseñanza y Aprendizaje de Temas de Materiales, Manufactura e Ingeniería de Superficies a estudiantes de Ingeniería

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

[1] P.B. Chikali, V.D. Shinde, Analysis of machinability in ductile iron casting, *Mater. Today Proc.* 27 (2019) 584–588. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.064>.

[2] ASTM International, Standard Specification for Ductile Iron Castings, *Current.* 83 (2019) 4–9. <https://doi.org/10.1520/A0842-11A.2>.

[3] S.H. Avner, *Introduction To Physical Metallurgy* Second Edition, McGraw Hill, 1974.

[4] O.J. Akinribide, S.O. Akinwamide, O.O. Ajibola, B.A. Obadele, S.O. oluwagbenga Olusunle, P.A. Olubambi, Corrosion behavior of ductile and austempered ductile cast iron in 0.01M and 0.05M NaCl Environments.,

Procedia Manuf. 30 (2019) 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.024>.

[5] S. Yin, J. Cizek, X. Suo, W. li, H. Liao, *Thermal Spray Technology, Adv. Mater. Sci. Eng.* 2019 (2019) 1–2. <https://doi.org/10.1155/2019/8654764>.

[6] D.G. Agredo Diaz, N. Ortiz Godoy, R. Valdez Navarro, A. Barba Pingarrón, J.J. Olaya Flórez, J.R. González Parra, A. Covelo Villar, M.A. Hernández Gallegos, Caracterización electroquímica de recubrimientos Zn-Al sobre fundición nodular grado 2, obtenidos por proyección térmica por flama con alambre, *Av. Investig. En Ing.* 17 (2020). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.5747>.

[7] J.J.C Cervantes, L.H Ruiz, A.P Balderas, R.R Hernández, F.V Martínez, A.G. Sánchez, J.C Rodríguez, J.L.R Espinoza, Desarrollo de un proceso de manufactura aditiva (AM) de metal y determinación de propiedades de las piezas obtenidas. Memoria XXIV Congreso Internacional Anual Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. (2018) 20-27. <http://somim.org.mx/memorias/>

[8] D. Jia, F. Li, Y. Zhang, 3D-printing process design of lattice compressor impeller based on residual stress and deformation, *Sci. Rep.* 10 (2020) 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57131-1>.

[9] T. Duda, L.V. Raghavan, 3D Metal Printing Technology, *IFAC-PapersOnLine.* 49 (2016) 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111>.

[10] D.G. Agredo Diaz, A. Barba Pingarrón, J.J. Olaya Florez, J.R. González Parra, J. Cervantes Cabello, I. Angarita Moncaleano, A. Covelo Villar, M.Á. Hernández Gallegos, Effect of a Ni-P coating on the corrosion resistance of an additive manufacturing carbon steel immersed in a 0.1 M NaCl solution, *Mater. Lett.* 275 (2020) 128159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128159>

[11] O. Meincke, D. Kaempfer, H. Weickmann, C. Friedrich, M. Vathauer, H. Warth, Mechanical properties and electrical conductivity of carbon-nanotube polyamide-6 and its blends with acrylonitrile/butadiene/styrene, *Polymer (Guildf).* 45 (2004) 739–748. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2003.12.013>.

[12] A.M. Donald, E.J. Kramer, Plastic deformation mechanisms in poly(acrylonitrile-butadiene styrene) [ABS], *J. Mater. Sci.* 17 (1982) 1765–1772. <https://doi.org/10.1007/BF00540805>.

[13] A. Viscusi, M. Durante, A. Astarita, L. Boccarusso, L. Carrino, A.S. Perna, Experimental Evaluation of Metallic Coating on Polymer by Cold Spray, *Procedia Manuf.* 47 (2020) 761–765. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.232>.

[14] P.C. King, A.J. Poole, S. Horne, R. de Nys, S. Gulizia, M.Z. Jahedi, Embedment of copper particles into polymers by cold spray, *Surf. Coatings Technol.* 216 (2013) 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.023>.

[15] B.E. Tiganis, S. Burn, P. Davis, A.J. Hill, Thermal degradation of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blends, *Polym. Degrad. Stab.* 76 (2002) 425–434. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00045-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00045-9).

[16] I.S. Organization, ISO 4624 Pull-off test for adhesion, (2003) 15.

[17] K.H.S. Silva, J.R. Carneiro, R.S. Coelho, H. Pinto, P. Brito, Influence of shot peening on residual stresses and tribological behavior of cast and austempered ductile iron, *Wear.* 440–441 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203099>.

[18] J. Sun, Q.G. Fu, T. Li, G.P. Zhang, R.M. Yuan, Oxidation behavior of thermally sprayed Mo-Si based composite: Effect of metastable phase, porosity and residual stress, *J. Alloys Compd.* 776 (2019) 712–721. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.309>.

[19] B. Lv, X. Fan, D. Li, T.J. Wang, Towards enhanced sintering resistance: Air-plasma-sprayed thermal barrier coating system with porosity gradient, *J. Eur. Ceram. Soc.* 38 (2018) 1946–1956. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.008>.

[20] R. Valdez, A. Barba, M. Trujillo, R. González, A. Covelo, A. Miguel, J.L. Romero, E. Ramos, D.G. Agredo Diaz, J.J. Olaya, Obtención de recubrimientos Zn-Al sobre ABS, mediante proyección térmica por flama, sin el uso de procesos químicos de acondicionamiento superficial, SOMI. (2019) 1–11. <http://www.iim.unam.mx/unidadmorelia/>.

[21] K. Wang, S. Wang, T. Xiong, D. Wen, G. Wang, W. Liu, H. Du, Properties of Zn-Al-Mg-TiO₂ coating prepared by cold spraying, *Surf. Coatings Technol.* 387 (2020) 125549. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125549>.

- [22] H.L. Yao, Z.H. Yi, C. Yao, M.X. Zhang, H.T. Wang, S. Bin Li, X.B. Bai, Q.Y. Chen, G.C. Ji, Improved corrosion resistance of AZ91D magnesium alloy coated by novel cold-sprayed Zn-HA/Zn double-layer coatings, *Ceram. Int.* 46 (2020) 7687–7693. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.271>.
- [23] H. Wu, L. Zhang, C. Liu, Y. Mai, Y. Zhang, X. Jie, Deposition of Zn-G/Al composite coating with excellent cathodic protection on low-carbon steel by low-pressure cold spraying, *J. Alloys Compd.* 821 (2020) 153483. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153483>.
- [24] B.C. White, W.A. Story, L.N. Brewer, J.B. Jordon, Fracture mechanics methods for evaluating the adhesion of cold spray deposits, *Eng. Fract. Mech.* 205 (2019) 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.009>.
- [25] S. Singh, H. Singh, S. Chaudhary, R.K. Buddu, Effect of substrate surface roughness on properties of cold-sprayed copper coatings on SS316L steel, *Surf. Coatings Technol.* 389 (2020) 125619. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125619>.
- [26] M. Amirafshar, M. Rafieazad, X. Duan, A. Nasiri, Fabrication and Coating Adhesion Study of Superhydrophobic Stainless Steel Surfaces: the Effect of Substrate Surface Roughness, *Surfaces and Interfaces.* 20 (2020) 100526. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100526>.
- [27] J. Morales Torres, J.J. Olaya Flores, H.F. Rojas Molano, Una aproximación a la tecnología de proyección térmica, *Av. Investig. En Ing.* 9 (2012) 60–71.