

Resistencia al desgaste de recubrimientos de bronce al aluminio producidos con técnica de proyección térmica

Wear resistance of aluminum bronze coatings produced by thermal spray

Dayan-Carolina Cárdenas-Feria, Liz-Karen Herrera-Quintero, Jhon-Jairo Olaya-Florez

Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Dpto. de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá, Colombia
Correo electrónico: dccardenasf@unal.edu.co

Recibido: 17 de mayo de 2015 Aceptado: 25 de agosto de 2015

Resumen

Se estudió la resistencia al desgaste adhesivo de recubrimientos de bronce al aluminio depositados con la técnica de proyección térmica por llama sobre bronce fosforado SAE 62. Los recubrimientos fueron fabricados variando las presiones parciales de los gases de combustión, oxígeno y acetileno. El material utilizado fue caracterizado estructuralmente mediante difracción de rayos X (*X-ray diffraction*, XRD) y el estudio morfológico mediante microscopía electrónica de barrido (*Scanning electron microscopy*, SEM). La resistencia al desgaste adhesivo de los recubrimientos se determinó por medio del ensayo de bola sobre disco, utilizando

como bola una esférica de acero 100Cr6. Los resultados obtenidos permiten establecer que los recubrimientos proyectados con una presión de oxígeno de 78 psi y una presión de acetileno de 8 psi presentan la mejor resistencia al desgaste en comparación a los tratamientos producidos. El modo de falla de desgaste en los recubrimientos producidos es discutido en esta investigación.

Palabras clave: desgaste abrasivo y adhesivo, proyección térmica, recubrimientos.

Abstract

We studied the adhesive wear resistance of aluminum bronze coatings deposited by thermal spray on phosphor bronze SAE 62 substrates. The coatings were deposited by varying the partial pressures of the combustion gases: oxygen and acetylene. The structural characterization was made through X-ray diffraction (XRD) and the morphological analysis was performed by scanning electron microscopy (SEM). The adhesive wear resistance of the coatings was determined by the ball on disc test using a spherical

ball made of steel 100Cr6 and with a diameter of 6 mm. The results obtained show that the coating projected with an oxygen pressure of 78 psi and an acetylene pressure of 8 psi have the better wear resistance compared with the substrate and the others treatments deposited. Wear mechanisms for the coatings deposited are discussed in this research.

Key words: adhesive wear, coatings, flame spray.

Introducción

La ciencia e ingeniería de materiales está desarrollando materiales con arquitecturas en cuanto a composición química y microestructura, que permitan lograr en su superficie propiedades tribológicas adecuadas para ser utilizadas en la industria naval. Uno de estos materiales es el bronce al aluminio el cual es una aleación a base de cobre y el aluminio como elemento aleante permite aumentar la resistencia mecánica, al desgaste a la fatiga y a la corrosión [1-3]. Esta aleación se utiliza con frecuencia en la industria marina como recubrimiento para mejorar resistencia a la corrosión y al desgaste [2] de piezas industriales navales que se degradan en un corto tiempo de uso debido a los cambios de temperatura, presión y el medio marino. Algunas de las aplicaciones más importantes son engranes, coronas, placas de desgaste, bujes, cojinetes, cuñas, pernos, vástagos de bombas y tuberías.

Generalmente estos recubrimientos se depositan de forma adecuada y económica usando el sistema de proyección térmica por llama. Esta técnica se desarrolló en 1971 [3] y con el paso de los años ha tenido un amplio crecimiento, debido a la amplia variedad de materiales que se pueden depositar, su bajo costo y fácil aplicación sobre diferentes geometrías y tamaños. Esta técnica es conocida también como **Proceso en Frio** debido a que el crecimiento del recubrimiento se puede realizar con el sustrato a temperatura ambiente [6]. En este proceso el material de recubrimiento (en forma de polvo) es alimentado continuamente hacia la cámara de combustión en la pistola donde es fundido en una llama generada por una reacción exotérmica por la mezcla de gas comburente (oxígeno) y gas combustible (acetileno), además se utiliza aire comprimido a través de una boquilla para proyectar y acelerar las partículas del material del recubrimiento en forma de gotas semifundidas sobre el sustrato, donde se solidifican formando una capa en forma de lentejuelas. El sistema de llama está limitado para los materiales que se funden a temperaturas más altas que la proporcionada por la llama o para materiales que se descomponen durante el calentamiento [7]. Debido a la temperatura relativamente baja de la llama y las bajas la velocidad de proyección de la partícula, los recubrimientos obtenidos pueden presentar algunos defectos estructurales (poros, grietas, partículas sin fundir, falta de adherencia entre la capa y el sustrato y entre las diferentes partículas que conforman el recubrimiento) que pueden reducir su desempeño en algunas aplicaciones de ingeniería [8]. Sin embargo con un trabajo sistemático en los parámetros de depósito,

como las presiones de los precursores, se pueden producir recubrimientos de buena calidad en cuanto a adherencia y propiedades mecánicas que les permite ser aplicados en la industria naval, automotriz y aeronáutica.

El objetivo de esta investigación es estudiar la resistencia al desgaste adhesivo de recubrimientos de Cu-Al sobre sustratos de bronce obtenidos mediante proyección térmica con llama variando las presiones de los precursores oxígeno y acetileno.

Métodos y Materiales

El recubrimiento de bronce al aluminio (Cu+11% Al-Fe), comercialmente conocido como Proxon 21071[®], se depositó mediante un equipo de proyección térmica por combustión de oxígeno-acetileno, referencia Castolin DS 8000 de la marca comercial Eutectic-Castolin, variando las presiones de los gases de combustión (oxígeno y acetileno), tal como se presenta en la tabla 1. Se utilizó una distancia de proyección de 150 mm, con una presión de atomización de 15 psi, bajo las siguientes condiciones ambientales: temperatura máxima 18 °C, temperatura mínima 11 °C, humedad relativa 52 % y presión atmosférica: 1028,45 hPa en 3 probetas de bronce SAE 62 con las siguientes dimensiones: 25 mm de diámetro y 4 mm de espesor, previamente desengrasadas con isopropanol y sometidas a un proceso de limpieza mecánica con un flujo abrasivo de partículas de óxido de aluminio (Al₂O₃), en dos fases, primero con un tamaño de partícula fina de 100 μm y después con un tamaño de partícula gruesa entre 500 y 1000 μm, usando una presión de 100 psi, durante 10 segundos a una distancia de 150 mm, favoreciendo la eliminación de óxidos, grasas y demás impurezas. La rugosidad promedio sobre el sustrato fue aproximadamente de 10 μm que es la adecuada para garantizar una buena adherencia. Previo al depósito del recubrimiento, los sustratos fueron precalentados a 70 °C.

Tabla 1. Parámetros de proyección para la deposición de recubrimientos bronce al aluminio

Muestra	Presión de Acetileno (psi)	Presión de Oxígeno (psi)
M1	8	72
M2	8	75
M3	8	78
M4	10	72
M5	10	75
M6	10	78
M7	12	72
M8	12	75
M9	12	78

Se realizó la caracterización química del material de aporte Proxon 21071[®] y de los recubrimientos obtenidos por medio de espectroscopía de fluorescencia de rayos X, empleando el equipo MagixPro PW- 2440 Philips equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW y una sensibilidad de 200 ppm (0,02 %) en la detección de elementos metálicos pesados. El análisis fue semicuantitativo y se realizó con el software IQ, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra. La caracterización estructural se desarrolló mediante el equipo de difracción de rayos X con el equipo X-pertProPanalytical en el modo Bragg-Brentano. Los picos fueron hallados empleando el software OriginPro 9,0 y su descripción utilizando las cartas de la base de datos 2004 del software X-pertHighScore Plus. Las mediciones de XRD fueron realizadas con línea monocromática K α del cobre, longitud de onda de 1,540998 Å, intensidad de la corriente de 40 mA, una diferencia de potencial de 45 kV y un rango de barrido de 10° a 90° con tamaño de paso de 0,02° en modo continuo.

El análisis de la rugosidad superficial del sustrato y de los recubrimientos fue realizado con un microscopio laser con focal marca Zeiss referencia LSM 700 a 10X, 20X y 50X aumentos y la morfología de los recubrimientos depositados antes y después de ser sometidos al ensayo de bola sobre disco fue realizado con un microscopio electrónico de barrido FEI QUANTA 200 con un modo de operación de alto vacío (3 x 10⁻⁷ torr) y 30 Kv de voltaje. Fueron obtenidas imágenes desde los 50X hasta los 5000X aumentos, se realizaron micrografías en la superficie y en la sección transversal de los recubrimientos en el modo de electrones secundarios con el detector secundario Everhart-Thorney que permite destacar la morfología del material y retro-dispersados con un detector de estado sólido que destaca diferencias en composición con el fin de establecer microestructura, espesor de depósitos diferenciar recubrimientos y establecer morfología (partículas sin fundir, porosidades y vacíos).

Los ensayos de desgaste por adhesión se realizaron con las recomendaciones de la norma ASTM G99 [9], usando el tribómetro CETR-UMT-2-110. Este ensayo se realizó en seco con una bola esférica de 6 mm de diámetro fabricada de acero 100Cr6, aplicando una velocidad de 689 rev/seg, un tiempo de 30 min, una carga de 400 gr en dirección normal a la superficie del recubrimiento. Al inicio de la prueba la presión del contacto de

Hertz máxima, P_0 , era de 809,04 Mpa con un área de contacto de 0,0480 mm, suponiendo un módulo de Young, E , de 210 GPa y una relación de Poisson, ν de 0.3 para el de acero 100Cr6, así como $E = 110$ GPa y $\nu = 0,33$ para el recubrimiento. La presión de contacto y el radio de contacto se utilizaron para determinar el esfuerzo cortante máximo, T_{max} en 245,25 MPa y la profundidad máxima del esfuerzo cortante, z en 0,0231mm.

Resultados y Discusión

Análisis químico y estructural

Los resultados obtenidos del análisis químico por XRF del polvo de bronce al aluminio (Proxon 21071[®]) utilizado en la fabricación de los recubrimientos presentaron Cu con 90,97 %, Al con 6,3 %. Estos resultados indican principalmente la presencia de Cu con 90,9 %, Al con 6,38 % y Fe con 1,4 %. El Fe se adiciona para mejorar las propiedades mecánicas y disminuir el coeficiente de fricción, algunas veces, dan un color oxidado a la superficie del bronce, pero no tienen un efecto conocido sobre las velocidades de corrosión [10] y el Al se adiciona para mejorar la resistencia a la corrosión, la oxidación a altas temperaturas y ofrecer a la aleación una resistencia a la tracción entre 520 y 590 MPa, un alargamiento entre el 10 y el 14 % y mejorar las propiedades ante el desgaste abrasivo, le proporciona a la aleación la posibilidad de cambiar sus propiedades mediante tratamientos térmicos [11].

La figura 1 muestra el patrón de difracción de rayos X de los polvos utilizados para fabricar los recubrimientos, el cual se ajusta bien con el patrón de referencia 00-023-0005 que corresponde a una fase cubica centrada en el caras con estequiometria $AlCu_3$, en donde los átomos de aluminio están en los vértices del cubo y el cobre en el centro de las caras. En general se aprecia una orientación mixta con los siguientes picos de mayor intensidad: $26,347^\circ$ (1 1 1), $37,165^\circ$ (0 1 1), $40,284^\circ$ (2 0 2), $42,739^\circ$ (0 2 22), $44,810^\circ$ (1 2 10), $46,611$ (2 0 12), $73,000^\circ$ (0 4 2).

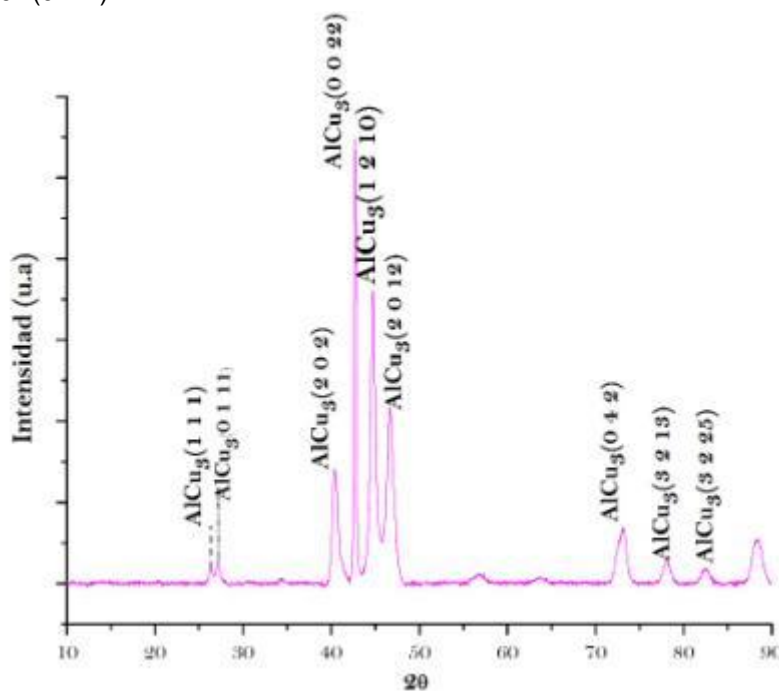


Fig. 1. Difracción de rayos x (XRD) del polvo (Proxon 21071[®]) de bronce al aluminio para recubrimiento

En la figura 2 se muestra un difractograma representativo para todos los recubrimientos proyectados por proyección térmica al variar las presiones parciales de los gases de la combustión oxígeno y acetileno ya que todos presentan coincidencias con los patrones de referencia 00-028-0005 de $AlCu_3$ en los picos $26,347^\circ$ (1 1 1), $37,165^\circ$ (0 1 1), $40,284^\circ$ (2 0 2), $42,739^\circ$ (0 2 22), $44,810^\circ$ (1 2 10), $46,611$ (2 0 12), $73,000^\circ$ (0 4 2), y con el patrón 03-065-70-47 de Cu_41Sn_{11} ; en los picos $31,2966^\circ$ (6 2 0), $42,9552^\circ$ (6 6 0), $49,9047^\circ$ (8 4 4), $73,2565^\circ$ (11 7 5).

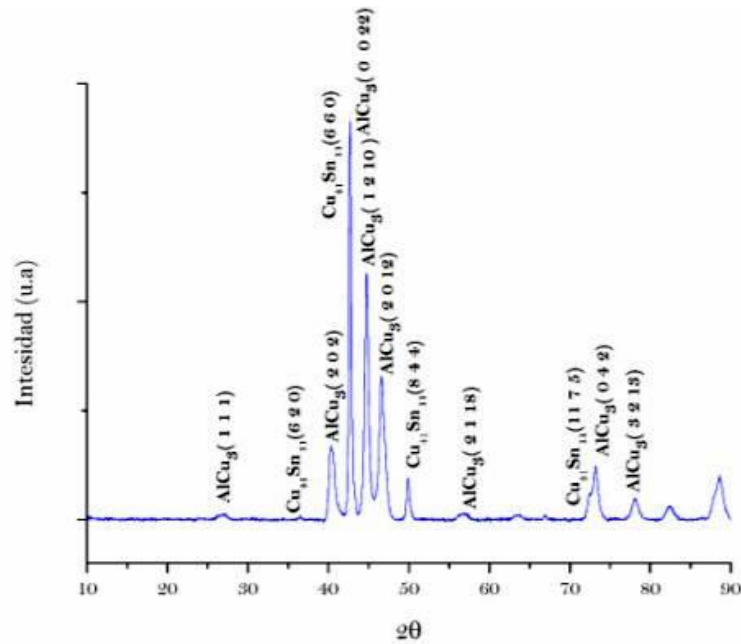


Fig. 2. Difracción de rayos x (XRD) del recubrimientos de bronce al aluminio depositados sobre sustratos de bronce SAE 62

Análisis Morfológico

En la figura 3 se muestra la imagen SEM del polvo de bronce al aluminio utilizado en la producción de los recubrimientos. Se puede observar que este material de aporte tiene una forma esférica uniforme con un tamaño de partícula promedio de aproximadamente entre 50 a 100 μm lo que favorece la reducción de defectos estructurales como partículas sin fundir y en caso de que estos se presenten sobre la superficie de abrasión su efecto sobre las condiciones de desgaste es bajo, ya que cada partícula de estas puede rodar sobre las superficies en contacto sin producir grandes daños [12].

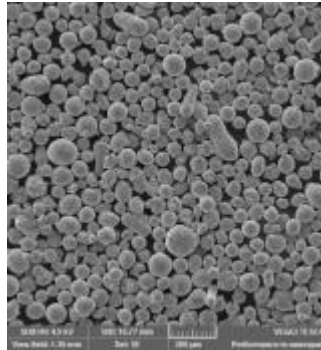


Fig. 3. Micrografía SEM del polvo de aporte Proxon 21071[®]

En la figura 4 se muestra la imagen SEM de la superficie del recubrimiento de bronce al aluminio producido con una presión de acetileno de 10 psi y una presión de oxígeno de 72 psi. Se observa una superficie con una combinación de partículas esféricas sin fundir, partículas fundidas en forma de *splats* (lentejuelas) con algunos poros en su interior o ente ellos, que generan una superficie rugosa con una rugosidad promedio de aproximadamente entre 12 a 17 μm .

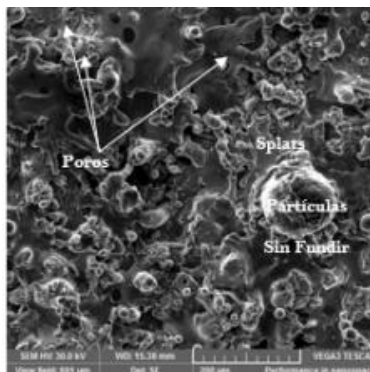


Fig. 4. Micrografía SEM. Morfología de Recubrimiento superficial (M4)

En forma representativa de la morfología en los recubrimientos, se presenta en la figura 5a la sección transversal del recubrimiento de bronce al aluminio producido con una presión de acetileno de 8 psi y oxígeno de 78 psi (muestra M3) y en la figura 5b el recubrimiento producido a una presión de acetileno de 12 psi y oxígeno de 72 psi (muestra M7) por microscopía óptica. En general todos los recubrimientos presentaron una estructura laminar construida por el apilamiento de partículas individuales en estado fundido o semi-fundido y algunos poros causados principalmente por el corto tiempo del material en la llama y la velocidad del enfriamiento [13]. El espesor promedio de los recubrimientos estuvo entre 250 μm y 450 μm .

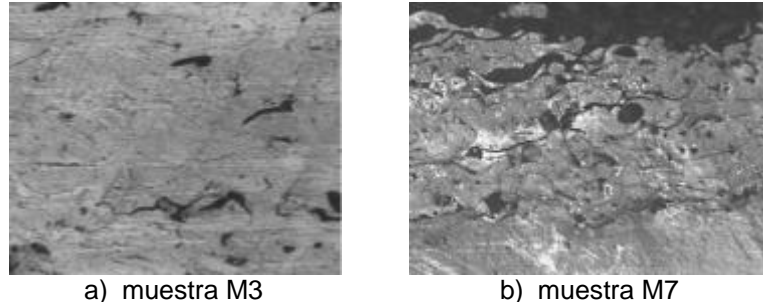


Fig. 5. Morfología de la sección transversal del recubrimiento de bronce a 500X

En general se pudo observar que los defectos típicos de estos recubrimientos como poros y partículas sin fundir disminuyeron con el aumento de la presión de oxígeno y la reducción de la presión de acetileno, así como una menor región contacto inter-laminar y ancho *splats*, obteniendo recubrimientos más homogéneos. Este comportamiento posiblemente se puede explicar por la formación de una llama pequeña y más caliente, considerando que los gases combustibles no tienen que extenderse tanto a la atmósfera para encontrar la cantidad necesaria de oxígeno, ni calentar tanto el gas inerte [20]. De esta forma se aumenta la energía cinética y térmica del proceso, logrando fundir la partícula e impactarla en el sustrato con una mayor velocidad.

Resistencia al desgaste

En la figura 6 se presentan los resultados del coeficiente de fricción del sustrato de bronce SAE 62, con respecto a un recubrimiento representativo de bronce al aluminio que corresponde a la muestra M3, producida con una presión de acetileno de 8 psi y una presión de oxígeno de 78 psi. Se puede observar en el inicio del ensayo que el sustrato presenta un aumento importante del coeficiente de fricción, que posiblemente se debe a la pronta deformación plástica de las asperezas, posteriormente sobre los 300 segundos del ensayo hay una estabilización del valor del COF con un valor promedio de 0,6. La muestra M3 presentó un ligero aumento del coeficiente de fricción al inicio del ensayo y después de 50 segundos se estabilizó con un valor promedio de 0,3. La figura 7 muestra los resultados de composición química sobre la pista de desgaste. En general se aprecia los principales elementos de la aleación, es decir, Cu, Al y Fe. El contenido de oxígeno varía dependiendo de la zona del análisis y generalmente reacciona químicamente para formar óxidos de los metales que componen la superficie del par tribológico. Estos resultados son coherentes con otras investigaciones [14], quienes explicaron sus resultados por la combinación del pulimiento de las asperezas y la formación de una película de óxido de hierro que actúa como una capa de lubricante sólido, disminuyendo así el coeficiente de fricción.

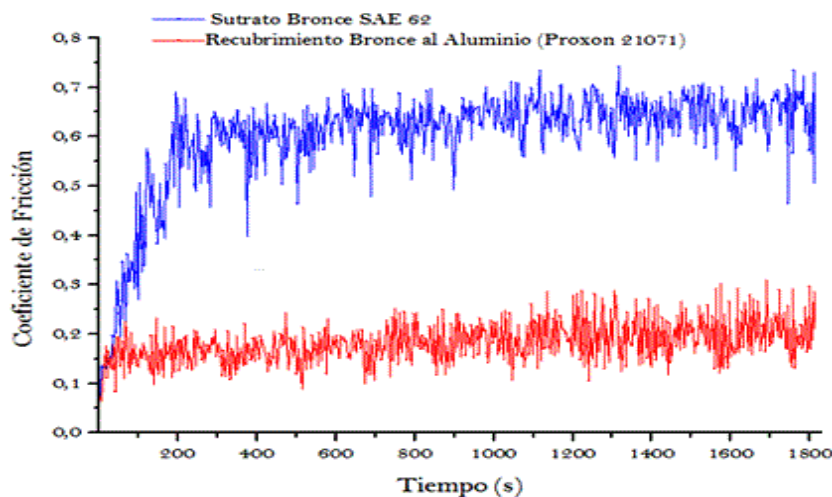


Fig. 6. Curvas de coeficiente de fricción para el sustrato de bronce SAE 62 y el recubrimiento de bronce al aluminio M3

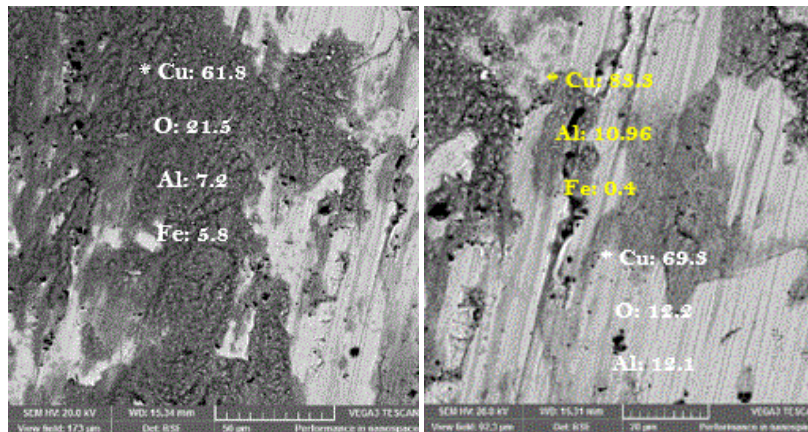


Fig. 7. Micrografía SEM de la muestra M3

La tabla 2 muestra el resultado promedio del coeficiente de fricción y porosidad de los recubrimientos producidos. Se puede apreciar que los valores oscilaron entre 0,18 y 0,33, sin embargo no se aprecia una tendencia clara en función de las presiones de los gases precursores (oxígeno y acetileno), siendo estos valores muy similares para cada par evaluado. Se puede observar que los coeficientes de fricción más altos corresponden a las muestras M7 y M8, alrededor del 0,33; estas muestras también presentaron el mayor porcentaje de porosidad, comportamiento que según investigaciones [15] se debe a la disminución del área real de contacto en el sistema bola- disco y, por consiguiente, un aumento en la presión real del trabajo. La muestra que presentó el menor coeficiente de fricción fue depositada con la mayor presión de oxígeno, 78 psi y una presión intermedia de acetileno 10 psi, M6 la cual fue de 0,1, los otros sistemas presentaron coeficientes de fricción con valores cercanos a 0,2.

Tabla 2. Promedio del coeficiente de fricción y porosidad obtenido para cada uno de los recubrimientos depositados

	% Porosidad	Coefficiente de Fricción	Desviación estándar (σ)
M1	10,0	0,289	0,010
M2	9,7	0,244	0,012
M3	8,9	0,295	0,021
M4	16,8	0,282	0,011
M5	16,0	0,288	0,010
M6	11,0	0,183	0,015
M7	24,0	0,332	0,021
M8	20,3	0,305	0,011
M9	17,3	0,289	0,010

Al final de los ensayos fue posible observar partículas de desgaste distribuidas alrededor de la pista de desgaste y de la zona de contacto del par tribológico. Para medir el ancho de las huellas de desgaste y tener una mejor apreciación de ella fue necesario remover estas partículas. Las muestras fueron limpiadas en ultrasonido durante 5 minutos con acetona, y con ayuda del microscopio óptico Leco 500 y un analizador de imágenes se midió el ancho de la pista de desgaste en 10 zonas diferentes para promediar y poder calcular el volumen removido y la tasa de desgaste.

En la figura 8 se muestra el resultado de la tasa de desgaste ($\text{mm}^3/\text{N.m}$); a partir de los datos obtenidos al medir el ancho de cada una de las pistas de desgaste en cada uno de los recubrimientos. Estos resultados indican que la muestra M3 presentó una buena resistencia al desgaste, con valores de $4,64 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ que corresponde al experimento depositado con una presión de acetileno de 8 psi y una presión de oxígeno de 78 psi. Las muestras M2, M1 y M6 muestran que la tasa de desgaste aumenta a medida que aumenta la presión de acetileno y disminuye la presión de oxígeno. Este comportamiento se debe posiblemente a que al bajar el nivel de energía utilizada en la fabricación de los recubrimientos, se generan estructuras con bajos valores de cohesión y un alto número de defectos, aumentando la tasa de desgaste; concordando con los resultados obtenidos al hacer el análisis de la morfología, en el cual la cantidad de poros y partículas sin fundir disminuyeron con el aumento de la presión de oxígeno y la reducción en la presión de acetileno (ver tabla 2).

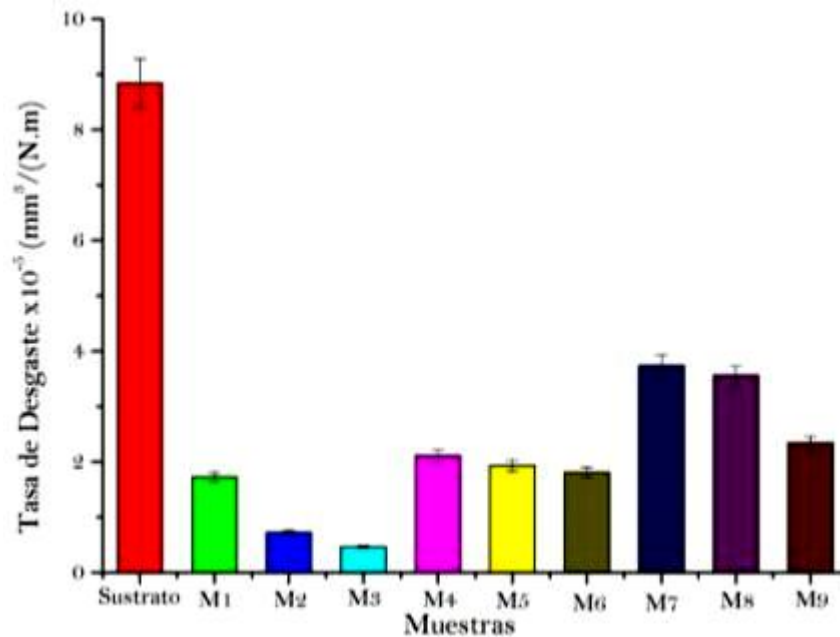


Fig. 8. Tasa de desgaste calculada después de 3630 m y 30 min

La figura 9 presenta la huella de desgaste de la muestra M3 mediante SEM. En general se logró observar zonas con textura pulida, deformación plástica superficial, agrietamiento y transporte de material, que concuerda bien con un modo de falla de desgaste adhesivo. Este mecanismo de desgaste es explicado en la literatura por una pérdida superficial de material, debido a la adhesión natural que se da entre las piezas, al entrar en contacto sus irregularidades superficiales y generarse enlaces químicos a pequeña escala [16]. El contacto de las dos superficies del ensayo causa un aplastamiento de las irregularidades por la presión normal aplicada, fractura de las irregularidades por la adhesión, deformación, transporte, redistribución del material fracturado en otras zonas de la superficie del recubrimiento y agrietamiento superficial [17]. En este sistema tribológico los fenómenos del mecanismo descrito se concentraron más en la superficie más blanda (recubrimiento), sin embargo en la superficie más dura (bola de acero) también se generó desgaste aunque en menor cantidad. Posiblemente durante el desarrollo de la prueba se favorece la nucleación, propagación de grietas y fractura superficial del recubrimiento por la adhesión que libera partículas del par tribológico, además se puede adicionar el fenómeno de abrasión al mecanismo de daño generando; desgastando el recubrimiento en forma de rayado [18].

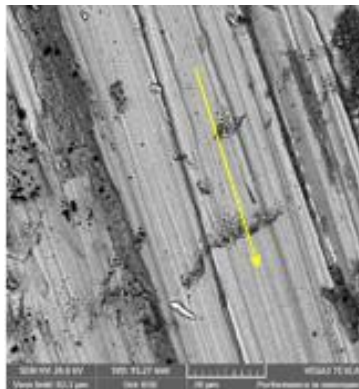


Fig. 9. Muestra 3. Micrografía SEM; Mecanismo de desgaste adhesivo/abrasivo

Conclusiones

Se lograron producir recubrimientos de bronce al aluminio con la de técnica de proyección térmica por llama, sobre sustratos bronce SAE 62 modificando la presión de los gases precursores de la combustión (oxígeno y acetileno), demostrando así la importancia de la selección de la presiones de trabajo en la calidad de los recubrimientos.

La microestructura de los recubrimientos de bronce al aluminio fue una estructura laminar con contenido de poros, micro grietas, partículas sin fundir y partículas semifundidas; la variación en las presiones de los gases de combustión afectó el contenido de las características anteriormente mencionadas, encontrando

recubrimientos con estructuras más homogéneas al aumentar la presión de oxígeno hasta 78 psi y disminuyendo la presión de acetileno hasta en 8 psi.

La morfología esférica del material de aporte (Proxon 21071) favorece la reducción de defectos estructurales como partículas sin fundir, y en caso de que estos se presenten sobre la superficie de abrasión su efecto sobre las condiciones de desgaste es bajo, ya que cada partícula de estas puede rodar sobre las superficies en contacto sin producir grandes daños. Se logró establecer que un recubrimiento más homogéneo presenta mejor resistencia al desgaste. Finalmente se logró observar que la tasa de desgaste fue menor en los recubrimientos que en el sustrato, indicando buenas propiedades para aplicaciones anti- desgaste.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de Colciencias a través del proyecto RC728-2011, Cotecmar y Proymet.

Al Ing. Miguel Méndez por su apoyo en la producción de los recubrimientos, al técnico Fredy Coronado por su apoyo en la caracterización óptica de las probetas con las técnicas de microscopía óptica y laser confocal.

Referencias

1. Antiquera J, Valencia E. Caracterización Microestructural y Propiedades Mecánicas de Recubrimientos por Metalizado. In: Congreso CONAMET/SAM, Asociación Argentina de Materiales; La Serena, Chile: 2004. p. ISBN DOI [Citado 15 de Septiembre de 2012] Disponible en: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/laserena/135.pdf>
2. Martínez G, Olaya J, Morales M. Recubrimientos depositados con la técnica de proyección térmica por llama sobre sustratos de piezas navales. Avances Investigación en Ingeniería. 2011;8(1):54-66. ISSN 1794-4956.
3. Cortés R. Aspersão Térmica. Curitiba PR, Brasil: Universidade Federal do Paraná; 2009. ISBN. DOI [Citado 16 de Mayo de 2014] Disponible en: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM734/AT%20P%F3s%202014/Apostila%20Aspers%E3o%20T%E9rmica%202009.pdf>
4. ASM International Handbook Committee. ASM Handbook Vol 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: ASM International. 1997.
5. Siegmann S, Abert C. Surface & Coatings Technology 100 years of thermal spray : About the inventor Max Ulrich Schoop. Superficie y Coatings Technology. 2013;220:3-13. ISSN 0257-8972.
6. Lopez E, Olaya J. Resistencia al desgaste de recubrimientos Fe-Nb-Cr-W, Nb, AISI 1020 y AISI 420 producidos por proyección térmica por arco eléctrico. Revista de Metalurgia. 2013;49:360-9. ISSN 0034-8970.
7. Monsalve M, Lopez E, Ageorges H, et al. Bioactivity and mechanical properties of bioactive glass coatings fabricated by flame spraying. Sufarceand Coatings Technology. 2015;268:142-6. ISSN 0257-8972.
8. Cortés P. Estudio de revestimientos de aluminio depositados por três procesos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha [Tesis Doctoral]. Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina; 1998. [Citado: 29 de Junio de 2013] Disponible en: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/78026>
9. American Society for Testing and Materials. ASTM International, Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM G99-90 Standard USA: American Society for Testing and Materials. 2010.
10. Toledo R. La Corrosión del Bronce y sus Aleaciones. Chile: Universidad de Antofagasta. Antofagasta; 2012. ISBN. DOI [Citado 3 de Septiembre de 2012] Disponible en: www.materiales-sam.org.ar/sitio/revista/TrabajoValcarce.pdf
11. Dimate L, Olaya J, Alfonso E. Corrosion resistance of Cu-Al coatings produced by thermil spray. Ingeniería e Investigación. 2012;32(1):18-23. ISSN 0120-5609.
12. Méndez L, Olaya J. Aproximación del método Taguchi para el estudio de recubrimientos de óxido de cromo aplicados por proyección térmica a la llama. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 2015;35:201-12. ISSN 0255-6952
13. Linspray A. Proyección Térmica de Superficies. Barcelona, España: Abello Linde S.A.; 2007. ISBN. DOI [Citado 26 Mayo de 2012] Disponible en: http://www.abellolinde.es/es/news_and_media/publications/index.html
14. West Arco. Soldadura y Metalizado por Proceso de Oxiacetileno. Bogotá, Colombia: West Arco; 2007. [Citado 28 mayo de 2012] Disponible en: <http://www.westarco.com/westarco/sp/educacion/procesos/oxiacetilena.cfm>.
15. Silveira F. Sinterização de Bronzeo Aluminio Seguido de Endurecimento por Precipitação Através de Envelhecimento Artificial [Tesis de Maestría]. Santa Catarina, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009. [Citado: 21 de Enero de 2013] Disponible en: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/17624>
16. Díaz J, Lafargue F. Comportamiento Friccional de Materiales de Cu-Sn. Tecnología Química. 2004;3:57-61. ISSN 2224-6185.
17. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Hoboken- Estados Unidos: Jhon Wiley y Sons Lta.; 2008. ISBN 978-0-471-49049-4.
18. Ghabchi A, Sampath S, K H, et al. Damage mechanisms and cracking behavior of thermal sprayed WC-Co Crocoating under scratch testing. Wear. 2014;313(1-2):97-105. ISSN 0043-1648