

RESISTENCIA AL DESGASTE PARA RECUBRIMIENTOS DE CARBURO DE TUNGSTENO DEPOSITADOS SOBRE SUSTRATOS DE ACERO RÁPIDO POR MEDIO DE ROCIADO TÉRMICO

WEAR RESISTANCE FOR TUNGSTEN CARBIDE COATINGS DEPOSITED ON HIGH SPEED STEEL SUBSTRATES BY THERMAL SPRAYING

José Ricardo Sandoval García¹, Carlos Mauricio Moreno Téllez², Sandra Marcela Acuña Rodríguez³

¹Ingeniero Electromecánico, Candidato a Magister, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Integridad y Evaluación de Materiales, Tunja, Colombia. jose.sandoval04@uptc.edu.co.

²Doctorado en ingeniería Metalúrgica, director, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Integridad y Evaluación de Materiales, Tunja, Colombia.

³Magíster en metalurgia y ciencia de los materiales, Asesora, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Integridad y Evaluación de Materiales, Tunja, Colombia.

Email: jose.sandoval04@uptc.edu.co

Recibido: 03/11/2021

Aceptado: 15/12/2021

Cite this article as: J. Sandoval, C. Moreno y S. Acuña, "Resistencia Al Desgaste Para Recubrimientos De Carburo De Tungsteno Depositados Sobre Sustratos De Acero Rápido Por Medio De Rociado Térmico.", Prospectiva, Vol 20, N° 1, 2022.

<http://doi.org/10.15665/rp.v20i1.2841>

RESUMEN.

Para esta investigación se realizó el depósito de recubrimientos de carburo de tungsteno, por medio de la técnica de rociado térmico con llama oxiacetilénica sobre sustratos de acero rápido, con el objetivo de mejorar la resistencia al desgaste. Para el depósito se utilizó como sustrato un acero rápido y como recubrimiento polvos comerciales de carburo de tungsteno referencia "Eutalloy 10112", los cuales se caracterizaron para identificar: composición, microestructura, propiedades y comportamiento térmico. El depósito del recubrimiento se realizó con un equipo "CastoDyn DS 8000", llama oxidante y una distancia de proyección de 140 mm, para posteriormente analizar aspectos como morfología, espesor y porosidad por medio de microscopía electrónica de barrido, adhesión con un ensayo de "pull off", composición con una difracción de rayos X y dureza con un micro-durómetro con indentador tipo "Vickers". Para evaluar la resistencia del recubrimiento, se realizaron pruebas tribológicas por medio de un equipo de "pin on disk", los parámetros implementados en el ensayo fueron cargas de 15 N y 20 N, para unas distancias de recorrido de 500 m y 300 m.

Palabras clave: Aceros rápidos, Carburos de tungsteno, Rociado térmico, Resistencia al desgaste.

ABSTRACT.

For this research, the tungsten carbide coatings were deposited by the thermal spraying technique with an oxyacetylene flame on high-speed steel substrates, in order to improve wear resistance. For the deposit, a high-speed steel was used as a substrate and as a coating commercial tungsten carbide powders reference Eutalloy 10112, which were characterized to identify: composition, microstructure, properties and thermal behavior. The coating was deposited with a CastoDyn DS 8000 equipment, oxidizing flame and projection distance of 140 mm, to analyze aspects such as morphology, thickness and porosity by scanning electron microscopy, adhesion with a pull off test, composition with an X-ray diffraction and hardness with a Vickers-type indenter micro-durometer. To evaluate the resistance of the coating, tribological tests were carried out by pin on disk equipment, the parameters implemented in the test were: 15 N and 20 N for travel distances of 500 m and 300 m.

Keywords: High-speed steel, Thermal spraying, Tungsten carbide, Wear resistance.

1. Introducción

Las herramientas de corte de acero rápido (“High speed Steel”), utilizadas por primera vez en el año 1900, son herramientas que se diseñaron para el mecanizado en la industria, versátiles, reutilizables y de bajo costo [1,2]. Una de las problemáticas más comunes que presentan estos materiales en servicio, se debe a las grandes velocidades de operación, que conllevan un aumento de temperatura sobre la superficie de la herramienta [3]. Para el mecanizado de alta velocidad, en el cual las temperaturas que se generan sobre las superficies de la herramienta pueden llegar hasta los 800°C, los aceros rápidos no cumplen con los requerimientos, pues tienden a fallar a partir de los 600°C, perdiendo dureza y disminuyendo su resistencia al desgaste; es así que su implementación ha tendido a la baja, debido a la aparición de materiales más modernos y eficaces, convirtiendo la mejora de propiedades de estos aceros, en objeto de estudio constante [1,3,4]. Existen diversidad de formas para lograr mejora de propiedades en herramientas de corte, una de las técnicas más utilizadas a nivel industrial son los recubrimientos, ya sean de tipo metálico y/o cerámico [5,6]; entre las técnicas más conocidas se encuentran la deposición de vapor ya sea de forma química o física, implantación de iones, recubrimiento por difusión, electrodeposición y rociado térmico [1]. El rociado térmico es una técnica en la que por medio de una fuente de calor (llama oxiacetilénica), se funde un material de aporte en forma de alambre o polvos, realizando un rociado a presión sobre la superficie de la pieza a proteger, formando un recubrimiento constante sobre esta [1,7]. El carburo de tungsteno se implementa en gran variedad de aplicaciones a nivel industrial, debido a su elevada dureza a altas temperaturas, buena conductividad térmica y baja dilatación térmica, varias investigaciones realizadas en 2018[5,6,8], muestran la gran versatilidad del WC como material de ingeniería.

2. Metodología

Se realizó una caracterización de las materias primas, previo al depósito del recubrimiento. El sustrato de acero rápido se analizó para composición con una espectrometría de emisión por chispa, la microestructura por medio de una microscopía óptica y dureza con una nanoindentación con indentador tipo Vickers. Los polvos metalúrgicos para recubrimiento de referencia “Eutalloy 10112”, se analizaron para composición, con una difracción de rayos X y un análisis de electrones retrodispersados, el comportamiento térmico por medio de una termogravimetría, así como también morfología y tamaño de partícula con una microscopía electrónica de barrido y una difracción laser. El depósito del

recubrimiento se realizó con un equipo de rociado térmico con llama oxiacetilénica, de referencia “CastoDyn DS 8000” [9], los parámetros del proceso se muestran en la tabla 1

Tabla 1. Parámetros de operación depósito del recubrimiento (Coating deposit operating parameters)

PARÁMETROS EQUIPO DE ROCIADO TÉRMICO	VALOR
Temperatura de precalentamiento	300 °C- 400C°
Numero de pasadas precalentamiento	4
Velocidad del plato dosificador	5 rpm.
Distancia de proyección	140 mm
Velocidad de avance	3 mm/s
Presión de aire	0,6 Bar
Presión de oxígeno	4 Bar
Presión de acetileno	0,7 Bar
Presión de nitrógeno	1,37 Bar
Caudal de aire	4 ± 0,16 L/min
Caudal de oxígeno llama oxidante	16,67 L/min
Caudal de acetileno llama oxidante	15,83 L/min
Caudal nitrógeno	5 L/min
Numero de pasadas con recubrimiento	4

Elaboración de los autores

Terminado el proceso de depósito del recubrimiento este se caracterizó, para establecer la calidad del mismo, por medio del microscopio electrónico de barrido se observó la morfología y el espesor del depósito, un análisis de nanoindentación para la dureza y con un ensayo de adhesión por “pull off” el esfuerzo de desprendimiento; también se estudió la composición a través de un análisis de electrones retrodispersados. La evaluación tribológica para análisis del desgaste, se realizó con un equipo de “pin on disk”, los parámetros establecidos para el ensayo se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros equipo de tribología. (Tribology equipment parameters.)

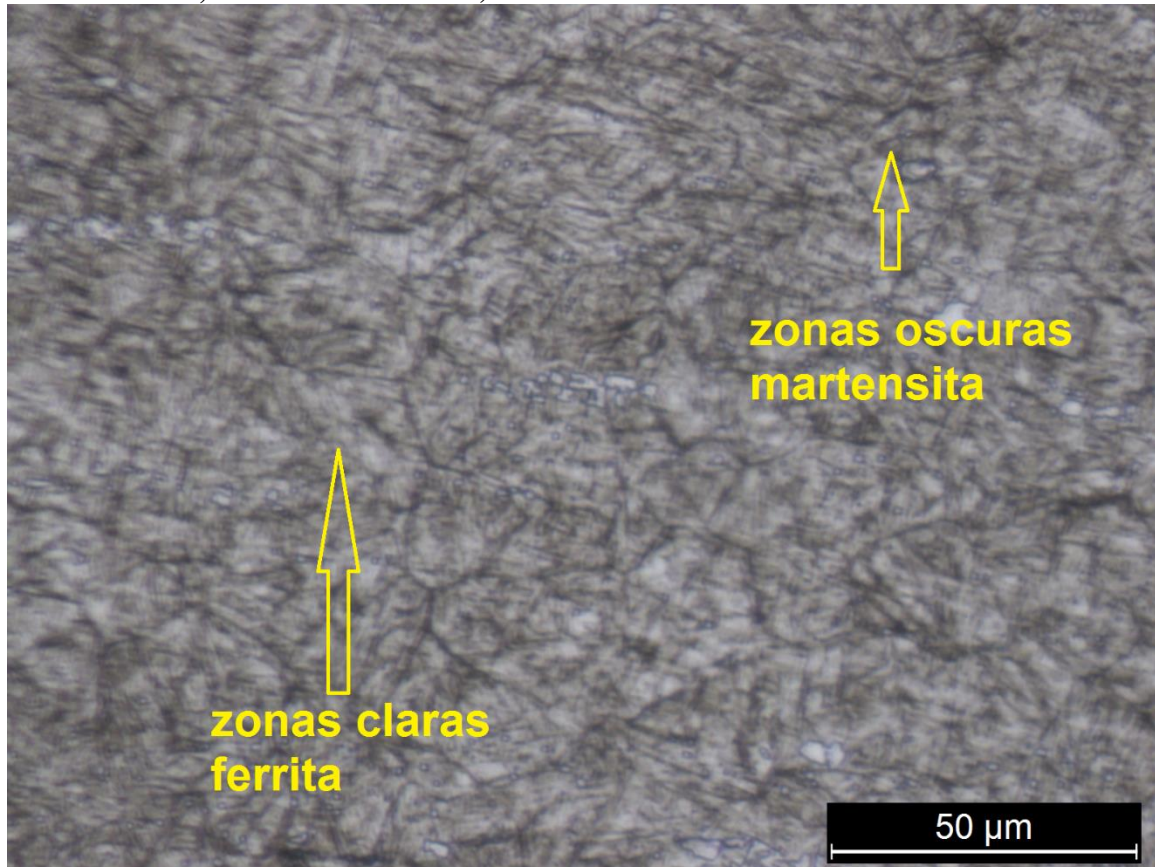
PARÁMETROS “PIN ON DISK”	VALOR
Fabricante Tribómetro (“pin on disk”)	Microtest
Tipo de Indentador	Esfera Acero
Diámetro del indentador	6mm
Carga	15N - 20N
Distancia recorrida	500 m - 300 m
Velocidad porta muestras	100 rpm
Duración del ensayo	2 a 3 horas
Radio de desgaste	4 mm - 5mm

Elaboración de los autores

3. Resultados y discusión

La microscopía óptica realizada sobre los aceros rápidos, reveló una microestructura de tipo Martensítica, donde se observa la presencia dos fases, la primera martensita que corresponde a las regiones oscuras de la microestructura, y segundo ferrita que corresponde regiones más claras[2,4], las zonas mencionadas se muestran en la figura 1.

Figura 1. Microestructura Aceros rápidos, estructura martensítica. (High speed steels Microstructure, martensitic structure)

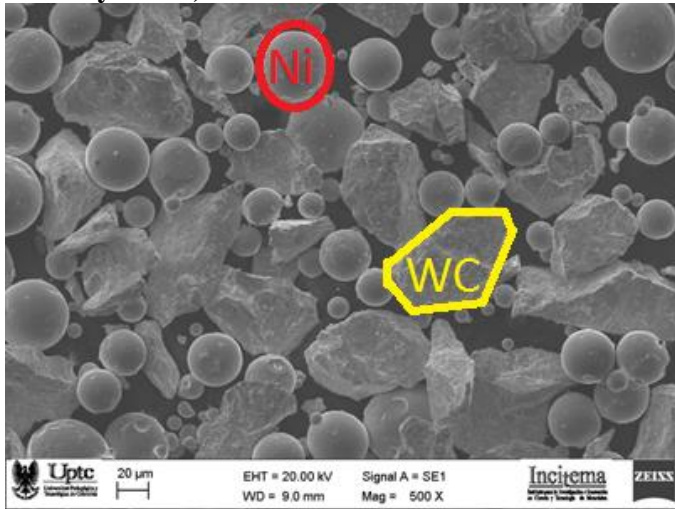


Elaboración de los autores.

La nanoindentación mostro la dureza del acero rápido, con un promedio de las mediciones de 780 “Vickers”(63HRc), valor cercano a lo establecido por diferentes referentes literarios[1,10], con valores de entre 60 y 63 HRc. La composición del sustrato obtenida por medio de la espectrometría de emisión por chispa, mostro elementos como hierro, carbono, silicio, cromo, vanadio, molibdeno y tungsteno, con porcentajes muy cercanos a los establecidos por la norma ASM[11], clasificandolo así como un acero rápido tipo M.

Para los polvos metalúrgicos de referencia “Eutalloy 10112”, se encontró dos tipos de morfologías que se muestran en la figura 2, cada una asociada a sus dos principales componentes, el níquel señalado en rojo y carburo de tungsteno señalado en amarillo[12]. Cabe mencionar que las partículas esféricas de níquel son características de este tipo de polvos metalúrgicos pues funcionan como aglutinantes metálicos para los carburos de tungsteno[3], por otro lado la morfología del carburo de tungsteno corresponde a monocristales, producidos por la reducción directa de mineral de tungsteno[11]. El análisis de electrones retrodispersados, permitió constatar la composición de las principales morfologías encontradas y la difracción de rayos x, identificar otros componentes de los polvos para depósito, como el tungsteno, cromo y diferentes formas de hierro.

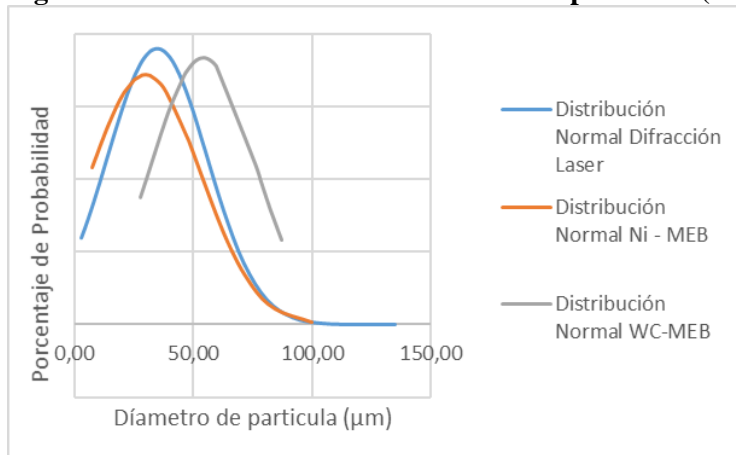
Figura 2. Morfología Polvos metalúrgicos Eutalloy 10112. (Morphology Metallurgical powders Eutalloy 10112)



Elaboración de los autores.

El tamaño de partícula para los polvos metalúrgicos Eutalloy 10112, se hizo de dos formas, por medio de el microscopio electrónico de barrido se tomó mediciones directas de las dos morfologías encontradas en la figura 2, y se halló en ambos casos el diámetro representativo. En el caso del carburo de tungsteno se obtuvo un tamaño promedio de partícula de $65,54 \mu\text{m}$, con una desviación estándar de $31,2 \mu\text{m}$. y para el níquel un promedio de $29,94 \mu\text{m}$ con una desviación estándar de $23,21 \mu\text{m}$. La medición de partícula por medio de una difracción láser con un equipo MASTERSIZER 3000, dio como resultado un diámetro representativo de $34,9 \mu\text{m}$, con una desviación estándar de $21 \mu\text{m}$. Cabe mencionar que la necesidad de los ensayos radica en el hecho de que la difracción láser, puede ser un método más exacto para medición de tamaño de partícula, sin embargo, no hace una distinción para los diferentes tipos de morfologías que poseen los polvos metalúrgicos Eutalloy 10112, registrando así una medición generalizada de todos los tamaños presentes. Para analizar lo previamente dicho se realizó las distribuciones normales de probabilidad para los tamaños de partícula, obtenidos por las diferentes técnicas implementadas, los resultados se muestran en la figura 3.

Figura 3. Resultados medición de tamaño de partícula. (Particle size measurement results)



Elaboración de los autores.

La curva azul observada en la figura 3, correspondiente al tamaño de partícula por medio de difracción laser, posee unos valores maximos y minimos, que incluyen los valores tanto de la curva naranja como los de la curva gris, dando a entender lo previamente mencionado respecto a la tecnica de caracterización.

El análisis morfológico posterior al depósito del recubrimiento, se realizó con un corte transversal de la muestra, que por medio del microscopio electronico de barrido, mostró un depósito uniforme, con tres zonas que se señalan en la figura 4, en la zona inferior el sustrato de Acero rápido, en el medio el recubrimiento de carburo de tungsteno y en la zona superior partículas de Níquel que no se fusionaron; para el análisis del espesor, se realizaron varias mediciones a largo de la zona del recubrimiento, y el promedio fue de 1,2 mm

Figura 4. Morfología recubrimiento por medio de microscopio electrónico de barrido. (Coating morphology by scanning electron microscope)



Elaboración de los autores.

La microscopia también muestra el carburo de tungsteno, señalado en color verde en la figura 4, con la misma morfología previa al depósito, además se observa una distribución uniforme a lo largo del depósito. Para analizar la composición del depósito se realizó análisis de electrones retrodispersados, corroborando que las zonas blancas señaladas en la figura 4, corresponden a carburo de tungsteno, otros elementos como el níquel ya no son identificables dado su cambio de estado durante la fusión, también permitió comprobar que la composición del material sin fusionar es principalmente hierro y níquel.

El ensayo de nanoindentación mostro un valor promedio de dureza de 740 “Vickers” (62 HRC) valor muy cercano al establecido por el fabricante [12]. Durante los ensayos de “pull off”, se implementó un “Dolly” de 20mm de diámetro y un probador de adhesión autoalineable tipo V según lo establecido por la norma ASTM D4541[13], las mediciones del esfuerzo de desprendimiento mostraron valores de entre 3 y 4 MPa para separar los “Dollys”, presentando gran homogeneidad, además en todos los casos, se presentó falla de tipo adhesivo entre sustrato y recubrimiento [13], como se observa en la figura 5.

Figura 5. Falla adhesiva entre sustrato y recubrimiento por "pull off". (Adhesive failure between substrate and coating by "pull off")



Elaboración de los autores.

La evaluación tribológica sobre el recubrimiento empezó con el cálculo del coeficiente de desgaste, obteniendo inicialmente el volumen de desgaste, lo que se logró utilizando el valor de pérdida de masa obtenido después de cada ensayo de "pin on disk", según lo establecido por la norma ASTM G99 [14] y la densidad esperada de 12.8 g/cm³ según el catálogo del fabricante [12]. Con este valor de volumen de desgaste se procedió a encontrar el coeficiente de desgaste por medio de la ecuación 1 de Archard. Los resultados se presentan en la tabla 3.

Ecuación 1. Ecuación de Archard para coeficiente de desgaste. (Archard equation for wear coefficient) [15]

$$K = \frac{V_d}{S \cdot W}$$

Donde V_d es el volumen de desgaste (m³), W la carga normal aplicada (N) y S el desplazamiento total acumulado (m)[15].

Tabla 3. Tabla de cálculos Tribología. (Tribology calculation table)

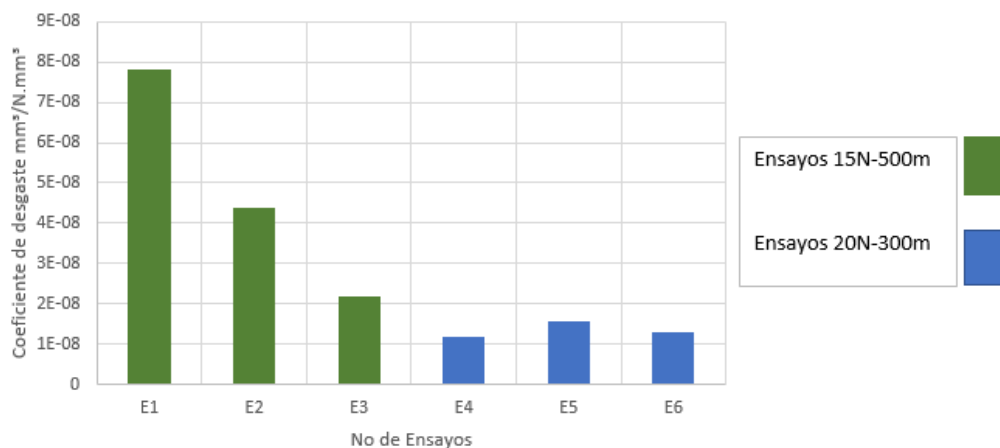
No	W (N)	S (m)	PÉRDIDA DE MASA (g)	VOLUMEN DESGASTE Vd (mm ³)	COEFICIENTE DE FRICCIÓN	COEFICIENTE DE DESGASTE K (mm ³ /N.mm)
E1	15	500	0,0075	0,58594	0,43 - 0,56	7,8125E-08
E2	15	500	0,0042	0,32813	0,41 - 0,55	4,375E-08
E3	15	500	0,0021	0,16406	0,46 - 0,55	2,1875E-08
E4	20	300	0,0009	0,07031	0,50 - 0,57	1,17188E-08
E5	20	300	0,0012	0,09375	0,55 - 0,61	1,5625E-08
E6	20	300	0,001	0,07813	0,57 - 0,62	1,30208E-08

Elaboración de los autores

Los ensayos de tribología para las cargas de 15 N y distancia de 300 m, mostraron variaciones entre 0,41 y 0,56 para coeficiente de fricción y entre 2E-8 y 7E-8 mm³/N.mm para coeficiente de desgaste, mientras que para las cargas de 20 N y distancia de 500 m se observó variaciones entre 0,5 y 0,62 para

fricción y un valor casi constante de $1\text{E-}8$ para desgaste, mostrando así que las curvas de fricción lograron estabilidad en menos tiempo, para la carga de 20 N que para la carga de 15N. Cabe resaltar que el coeficiente de desgaste presentado para el depósito tiende a ser bajo por la alta dureza del recubrimiento y como se menciona y demuestra en investigaciones como la realizada Coureaux[16], el desgaste tribológico para carburos cementados se establece con valores entre $5\text{E-}8$ y $10\text{E-}8 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm}$, valores cercanos a los obtenidos en la investigación. Los resultados de la tabla 3 se muestran en la figura 6 para un análisis gráfico más detallado.

Figura 6. Coeficientes de desgaste Ensayos tribología. (Wear coefficients Tribology tests)



Elaboración de los autores

4. Conclusiones

- La caracterización del sustrato de acero rápido permite clasificarlo como tipo M (base molibdeno) y la microestructura martensítica encontrada es característica de aceros con tratamientos térmicos como el temple y el revenido, utilizados comúnmente para aumento de dureza[2].
- La caracterización de los polvos metalúrgicos “Eutalloy 10112”, permitió evidenciar el alto porcentaje de carburos de tungsteno en la composición por encima del 50%, además de su tamaño de partícula, su estabilidad a altas temperaturas y dos principales tipos de morfología, por un lado granos esferoidales correspondientes al níquel y otras de grano anguloso correspondiente al carburo de tungsteno[6,12].
- La caracterización del recubrimiento, permitió verificar la eficiencia en el depósito de los polvos Eutalloy 10112, por medio de rociado térmico con llama oxiacetilénica, esto teniendo en cuenta que cumplió con casi todos los estándares de calidad establecidos por el fabricante, como fue la dureza con un valor 63 Hrc, morfología (tamaño de partícula entre $10\mu\text{m}$ y $100\mu\text{m}$) y composición (principal 60 % carburos y aglutinante níquel).
- El recubrimiento presentó un buen comportamiento en los ensayos tribológicos con las cargas establecidas, sin embargo, se pudo analizar que, a mayores cargas, la estabilidad en la curva de fricción se lograba en menos distancia de recorrido, pasando de 500 m para la carga de 15N a 300 m para la carga de 20 N; además a mayor carga se ve una notable disminución del coeficiente de desgaste y menos variabilidad en los datos obtenidos [4,15].

5. Referencias

- [1]. S. Kalpakjian, S., S. R Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico, Pearson Educación, 2008, pp 613-721.
- [2]. D. E. Castillo Gutiérrez, “Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos”, *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 26 (3), 430-339,2018.
- [3]. M. P Groover, *Fundamentals of modern manufacturing*. Estados Unidos, JOHN WILEY & SONS, INC.2007, pp 507-600
- [4]. Y. Qiu, “Improvement of tribological performance of CrN coating via multilayering with VN”, *Surface & Coatings Technology*, 231, 357–363,2013
- [5]. V. Chayauski, “Characteristics of ZrC/Ni-UDD coatings for a tungsten carbide cutting tool”, *Applied Surface Science*, 446, 18–26,2018.
- [6]. T. S. Kumar, “Comparative evaluation of performances of TiAlN, AlCrN, TiAlN/AlCrN coated carbide cutting tools and uncoated carbide cutting tools on turning Inconel 825 alloy using Grey Relational Analysis”, *Sensors and Actuators A: Physical*, 279, 331–342.2018.
- [7]. J. A. Morales Torres, J. J. Olaya Flórez, “Una aproximación a la tecnología de proyección térmica”, *Avances Investigación en Ingeniería*, 9 (2), 60-71,2012.
- [8]. R. J Wood, S Herd, M. R Thakare, “A critical review of the tribocorrosion of cemented and thermal sprayed tungsten carbide”, *Tribology International*, 119, 491-509.2018.
- [9]. Castolin Eutectic, “Manual CastoDyn DS 8000”, manual de funcionamiento, España,Castolin España, pp 1-37.
- [10]. J. A. Schey, *Procesos de manufactura*. México, Mcgraw-hill/interamericana editores, 2002, pp. 637-750.
- [11]. ASM Vol 16, *Metals Handbook. Machining*. Ohio, Metals Park, 1990, pp. 100-150.
- [12]. Castolin Eutectic, “Eutalloy Thermal Spray Alloys”, Milwaukee,Eutectic Corporation, pp. 1-8.
- [13]. ASTM D4541, *Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers*.United States. West Conshohocken,pp.1-13.
- [14]. ASTM G99, *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus1*. United States. West Conshohocken,pp.1-6.
- [15]. J. Archard, “Contact and Rubbing of Flat Surface”. *Journal of Applied Physics*,(No 24), 982.1953.
- [16]. D. M. Coureaux, “Influencia de la microestructura en el comportamiento tribológico de carburos cementados (WC-Co) borados”, *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 23 (2), 259-268.2015.