

**ESTUDIO DEL ARTE DE LOS RECUBRIMIENTOS DLC APLICADO EN LA
INDUSTRIA AUTOMOTRIZ
MONOGRAFÍA DE GRADO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
Facultad De Ingeniería Mecánica
BOGOTÁ**

**ESTUDIO DEL ARTE DE LOS RECUBRIMIENTOS DLC APLICADO EN LA
INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar para el título de
ingeniería mecánica**

**En la facultad de ingeniería Mecánica
Fundación Universitaria Los Libertadores**

Presentada por:

Jonathan Stiven Bermúdez Gil

Andrés Felipe Herrera Oviedo

Dirigida por:

PhD Ing. Williams Steve Hincapié Campos

Codirector:

Msc Jorge Armando Villalba Vidales

Bogotá D.C

2021.

RESUMEN	6
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN.....	7
JUSTIFICACIÓN	8
OBGETIVO GENERAL.....	9
METODOLOGÍA Y CRONOGRAMA	10
MARCO TEÓRICO	10
DIAMANTE TIPO CARBONO DLC.....	10
IMPORTANCIA Y APLICACIONES DE LAS PELICULAS DE DLC.....	11
TÉCNICAS DE CRECIMIENTO	11
La deposición en fase de vapor por método físico PVD	11
La deposición química de vapor CVD	12
Deposición química en fase vapor asistida por plasma (PACVD)	12
TRIBOLOGÍA.....	13
QUE ES LA LUBRICACIÓN.....	13
TIPOS DE LUBRICANTE	14
ESTADO DEL ARTE	14
EFFECTO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA SOBRE EL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE RECUBRIMIENTO DLC TEXTURIZADO DE MICRO SUPERFICIE	16

MECANISMOS DE REDUCCIÓN DE FRICCIÓN EN FUNDICIÓN DESLIZANTE CONTRA DLC: EFECTO DE ACEITE DE MOTOR DILUIDO CON BIOCOMBUSTIBLE (E85).....	17
INFLUENCIA DE LAS CAPAS INTERMEDIAS TI X SI Y TI X SI / A-SI: H EN LA ADHERENCIA DEL DIAMANTE COMO RECUBRIMIENTOS DE CARBONO	18
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE DELAMINACIÓN INDUCIDA POR EL DESGASTE PARA RECUBRIMIENTOS CON DLC COMPONENTES AUTOMOTRICES.....	19
MULTICAPAS DE CERÁMICA DLC PARA APLICACIONES DE AUTOMOCIÓN.....	20
MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LOS CONTACTOS DEL ÁRBOL DE LEVAS / TAQUÉ DEL CUCHARÓN DE AUTOMÓVILES MEDIANTE DLC RECUBRIMIENTOS - INFLUENCIA DEL ACEITE DEL MOTOR, LA TEMPERATURA Y LA VELOCIDAD DEL ÁRBOL DE LEVAS.	21
PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE LAS CERÁMICAS DE NITRURO DE SILICIO RECUBIERTAS CON DLC Y DLC-SI CONTRA ACERO INOXIDABLE 316L.....	22
DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS COMPONENTES DEL MOTOR REVESTIDOS CON DLC.....	23
INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA DE RECUBRIMIENTO DLC EN PASADORES DE PISTÓN Y EMPUJADORES DE CUBO.....	24
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS DE DLC PARA APLICACIONES DE MOTOR	25
ENSAYO DE DESGASTE POR IMPACTO DE PELÍCULAS DE CARBONO TIPO DIAMANTE PARA EMPUJADORES DE VÁLVULAS DE MOTOR.....	26
PÉRDIDAS POR FRICCIÓN Y DESGASTE REDUCIDOS POR EL RECUBRIMIENTO DLC DE LOS PASADORES DE PISTÓN.....	27
REACCIONES TRIBOLÓGICAS ENTRE ADITIVOS DE ACEITE Y RECUBRIMIENTOS DLC PARA APLICACIONES AUTOMOTRICES.....	28

COMPATIBILIDAD DE RECUBRIMIENTOS DLC CON ACEITES FORMULADOS	29
ANÁLISIS DE DESGASTE DE REVESTIMIENTO DLC EN ACEITE QUE CONTIENE MO-DTC	30
FUNCIONES DEL ACABADO SUPERFICIAL SIMILAR AL ESPEJO Y AROS DE PISTÓN REVESTIDOS CON DLC SOBRE EL AUMENTO DE LA RESISTENCIA AL RAYADO DE LAS CAMISAS DE CILINDROS DE HIERRO FUNDIDO.....	31
EFFECTO DE LA TEMPERATURA Y CONTRACARA SOBRE LA TRIBOLOGÍA RENDIMIENTO DE W-DLC EN UN SUSTRATO DE ACERO	32
ESTUDIOS TRIBOLÓGICOS DEL SEGMENTO DE PISTÓN AUTOMOTRIZ POR REVESTIMIENTO DE CARBONO TIPO DIAMANTE	33
Piezas con mayor perdida de desgaste en un motor	34
SÍNTESIS EN TABLA DE LOS ARTICLUOS ESTUDIADOS	35
ANÁLISIS DE LOS ARTICULOS	37
CONCLUSIONES.....	39
RECOMENDACIONES.....	39
REFERENCIAS	40

Resumen

El fin de este trabajo es contextualizar a los lectores, sobre la implementación del recubrimientos duros de diamante tipo carbono en los últimos 20 años en la industria automotriz, ya que con el tiempo se ha ido utilizando con mayor frecuencia en componentes de motores de combustión interna, específicamente en aquellas partes en las cuales se necesita mejorar sus propiedades tribológicas, estos recubrimientos fueron utilizados en varios proyectos en los cuales incluyeron diferentes técnicas de deposición, todo esto con el fin de poder evidenciar la importancia de la utilización los recubrimientos duros de diamante tipo carbono para esta industria en sus futuras investigaciones.

Palabras clave: recubrimiento, automotriz, motor

ABSTRACT

The purpose of this work is to contextualize readers, about the implementation of carbón like diamond hard coatings in the last 20 years in the automotive industry, since over time it has been used more frequently in components of internal combustion engines. , specifically in those parts in which it is necessary to improve their tribological properties, these coatings were used in several projects in which they included different deposition techniques, all this in order to demonstrate the importance of using hard coatings of diamond like carbon for this industry in future research.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo hace parte de un estudio en el cual diferentes industrias realizaron la implementación de un recubrimiento duro, mas conocidos por sus siglas en ingles DLC que significan Diamond like carbón, ya que posee excelentes propiedades mecánicas, térmicas y tribológicas y puede ser ejecutado en partes automotrices, con el objetivo de incrementar la vida útil de los componentes, y de esta manera disminuir el daño en las piezas que están mas afectadas por la fricción y el desgaste.

El aumento de la vida útil de los componentes del motor en la industria automotriz ha tomado un desarrollo importante a la hora de mejorar su durabilidad, ya que los materiales utilizados convencionalmente presentan inconvenientes en su rendimiento debido a su alto coeficiente de fricción y desgaste, el cual perjudica el funcionamiento del motor, ya que se debe hacer cambios de piezas que no logran llegar a cumplir su ciclo de vida. Una de las alternativas fue la implementación del recubrimiento tipo diamante DLC el cual sea incrementado en la industria automotriz, ya que se caracteriza por sus buenas propiedades tribológicas, generalmente bajo condiciones de fricción en seco mostrando una buena protección y adherencia para los componentes en los que este se aplica, mejorando así su vida útil.

JUSTIFICACIÓN

Los motivos que llevaron a investigar los efectos del uso de películas de DLC en la industria automotriz en los últimos 20 años, se centra en que este sector se encuentra expuesto a altos índices de falla en sus propiedades tribológicas, debido al mal cuidado de los componentes del motor y el uso inapropiado de lubricantes. Esta investigación pretende demostrar los beneficios que nos brinda este recubrimiento tipo DLC gracias a sus buenas propiedades, esta estudio sirve para que futuras investigaciones practicas tengan un punto de referencia para la aplicabilidad de los recubrimientos tipo diamante DLC.

OBJETIVO GENERAL

Hacer un estudio de los últimos 20 años de la aplicación del DLC en la industria automotriz.

OBJETIVO ESPECIFICO

- Crear un estudio del arte para futuras investigaciones del DLC para aplicaciones en la industria automotriz.
- Generar un informe para futuras investigación y aplicaciones del DLC en la industria automotriz.

METODOLOGÍA Y CRONOGRAMA

ACTIVIDAD	NUMERO DE MESES				
	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
Planteamiento del problema	X				
Objetivos	X				
Justificación	X				
Estado del arte y búsqueda de los artículos	X	X	X		
Selección de artículos y clasificación		X	X		
Análisis de información		X	X	X	
Discusión de resultados			X	X	X
Escritura del documento	X	X	X	X	X

MARCO TEÓRICO

DIAMANTE TIPO CARBONO DLC

Las siglas DLC (Diamond Like Carbón) es un tipo de recubrimiento fino logrado por diversas técnicas y aplicaciones las cuales poseen unas excelentes propiedades mecánicas, térmicas, electrónicas y ante el desgaste, el esfuerzo y la corrosión.

El carbono tipo diamante (DLC) es una forma meta estable de carbono amorfo con enlaces sp^3 significativos. Es un semiconductor con muy buena dureza mecánica superior a 20 GPa, inercia química y transparencia óptica. Esta revisión describirá los métodos de deposición, mecanismos de deposición, métodos de caracterización, técnicas usadas para la deposición del DLC y como las diferentes técnicas de caracterización usadas como la

fotoluminiscencia, espectroscopia de emisión de campo, rama entre otras para estudiar las diferentes propiedades que tienen los DLC. Otras aplicaciones de las películas de DLC las podemos encontrar en las protecciones de discos duros de almacenamiento magnéticos, ventanas ópticas y dispositivos micro electromecánicos. (Robertson, 2002) [1].

IMPORTANCIA Y APLICACIONES DE LAS PELICULAS DE DLC

Este recubrimiento ha tenido una importancia en la industria ya que posee un alto índice de dureza permitiendo aumentar la resistencia al desgaste y la reducción significativa de la fricción de los componentes, utilizando sus capas protectoras, haciendo que sea interesante en las aplicaciones, con el solo hecho de ser químicamente inerte y tener un bajo coeficiente de fricción cuando entra en contacto con la mayoría de los materiales.

En el área mecánica es destacado por sus propiedades tribológicas ya que se utiliza para recubrir herramientas de corte, trenes de válvulas y pistones. Muchas otras aplicaciones, que van desde bombas y compresores a protecciones para cojinetes y rodillos, y desde máquinas textiles a tecnología médica, y superficies expuestas al desgaste en general [2].

TÉCNICAS DE CRECIMIENTO

Esta son algunas de las técnicas de deposición más utilizadas en los recubrimientos tipo diamante.

La deposición en fase de vapor por método físico PVD

El PVD por sus siglas en inglés (Physical Vapor Deposition), es una tecnología respetuosa con el medio ambiente que engloba cualquier proceso de crecimiento de una película de recubrimiento en un ambiente de vacío, que implique la deposición de átomos o moléculas sobre un sustrato.

Dentro de una cámara de vacío, se vaporizan diferentes metales y semiconductores en estado sólido como titanio, silicio, grafito o aleaciones del mismo entre otros más además se pueden usar gases reactivos como los hidrocarburos mezclados con Ar para crecer los

DLC[26], y se condensan en la superficie del producto dándole el recubrimiento perseguido, ya sea decorativo con una amplia gama de colores como técnico facilitando una alta dureza, resistencia a la abrasión, ralladuras y corrosión.

El recubrimiento en vacío está sustituyendo los métodos de revestimiento tradicionales en muchas áreas de aplicación, como la galvánica. La flexibilidad de esta técnica permite revestir todo tipo de material independientemente de la forma, geometría y dimensiones [3].

La deposición química de vapor CVD

La deposición de vapor química CVD por sus siglas en inglés (Chemical Vapor Deposition) es un proceso para recubrir componentes de turbina de gas y protegerlos de la oxidación y la corrosión. Sulzer ofrece este servicio de recubrimiento para reducir la frecuencia de mantenimiento y también los costos de reemplazo de los componentes.

CVD es una tecnología de recubrimiento para la deposición de material en un sustrato, por ejemplo, para recubrir un componente de turbina de gas con un metal. El metal de recubrimiento se forma en el componente o cerca del mismo por descomposición térmica de un compuesto químico en el metal de recubrimiento. Los componentes de la turbina de gas tienen que ser muy resistentes a la corrosión y al desgaste. Esta tecnología refuerza sus operaciones y mejora la vida útil de su equipo [4].

Deposición química en fase vapor asistida por plasma (PACVD)

Deposición química en fase vapor asistida por plasma PACVD La técnica de (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) es una de las más utilizadas para generar recubrimientos DLC. Las películas se sintetizan en un plasma a baja presión a partir de precursores gaseosos que proveen hidrocarburos, gas hidrocarburo como metano o acetileno. En algunas ocasiones se debe poner una intercapa de Si:H-a para mejorar la adherencia como lo reportan diversas investigaciones [10]. Además de eso se puede utilizar una película delgada de carbono amorfo hidrogenado (a-C:H) depositado por la técnica (PACVD) utilizando una fuente DC pulsada siendo una magnífica opción como recubrimientos protectores debido a sus atractivas propiedades mecánicas y tribológicas [5], [27].

TRIBOLOGÍA

La tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación, comprendiendo la interacción de las superficies en movimiento relativo, en sistemas naturales y artificiales. Esto incluye el diseño de cojinetes y su lubricación.

La tribología no es una ciencia aislada, sino una tarea conjunta y multidisciplinaria donde los avances se hacen mediante esfuerzos colaborativos de investigadores de diversos campos como ingeniería mecánica, producción, ciencia e ingeniería de materiales, química e ingeniería química, física, matemáticas, ciencias biomédicas y de ingeniería, informática, y mucho más [6].

QUE ES LA LUBRICACIÓN

Por lubricante se entiende a toda aquella sustancia que con independencia de su estado físico, sólido, semisólido o líquido sirve para aminorar el efecto perjudicial del rozamiento en la durabilidad de dos superficies en contacto, de las cuales, al menos una de ellas está en movimiento. Los lubricantes se pueden presentar en diferentes estados físicos: sólidos o líquidos como el aceite.

Como se ha dicho, el uso de los aceites lubricantes en los motores de vehículos es de vital importancia al formar una película protectora sobre las piezas móviles del motor, que ayuda a reducir la fricción entre los distintos componentes, disminuyendo así el desgaste de las piezas y evitando pérdidas de potencia. Pero además de lubricar las piezas móviles, los aceites lubricantes para motor también cumplen una función limpiadora de las partes internas del motor, dado que contienen aditivos detergentes y dispersantes que van a impedir la formación de compuestos sólidos y depósitos de impurezas derivados de la combustión.

Otras de las funciones de los aceites lubricantes para motor es la de servir de inhibidores de la corrosión, dado que la película de aceite que se forma sobre las superficies metálicas impide su exposición al oxígeno, evitando así su oxidación que se acelera por las altas temperaturas que se alcanzan, salvaguardando así las partes internas del motor de la corrosión [7].

TIPOS DE LUBRICANTE

- Aceite de motor minerales.
- Aceite de motor semisintéticos.
- Aceite de motor sintético.

ESTADO DEL ARTE

Como este estudio se basa en las aplicaciones de los recubrimientos duros específicamente en los DLC en la industria automotriz se observara cuales son los componentes con más desgaste dentro de un motor, específicamente como lo muestra la figura 1^a los mecanismos de leva seguidor de levas, el mecanismo de manivela biela, la fricción entre los anillos del pistón y la camisa, el cigüeñal con los cojinetes y entre otros, son las partes del motor que sufren mas desgaste y esto se debe a los pares cinemáticos que se generan como lo explica Norton [29.]

Como se ve en la figura 1^b, tomada de [29] ,se observa los porcentajes de pérdida de potencia en un motor debido su fricción de acuerdo con la explicación anterior que es debido a los pares cinemáticos.

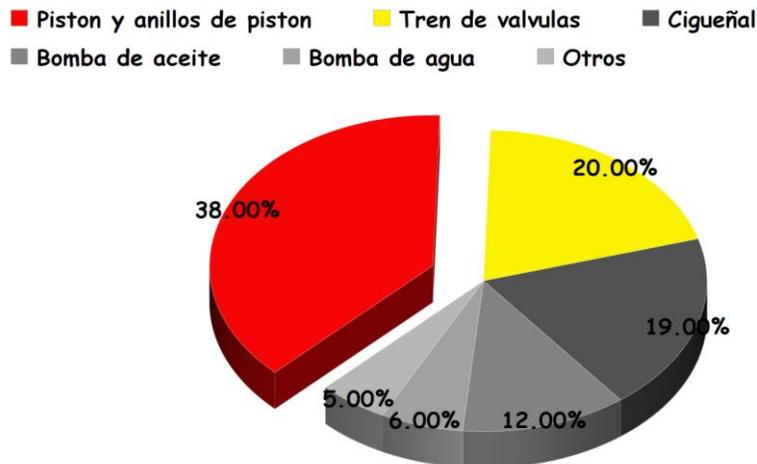


Figura 1^a Porcentajes de pérdida de potencia en dichos mecanismos.

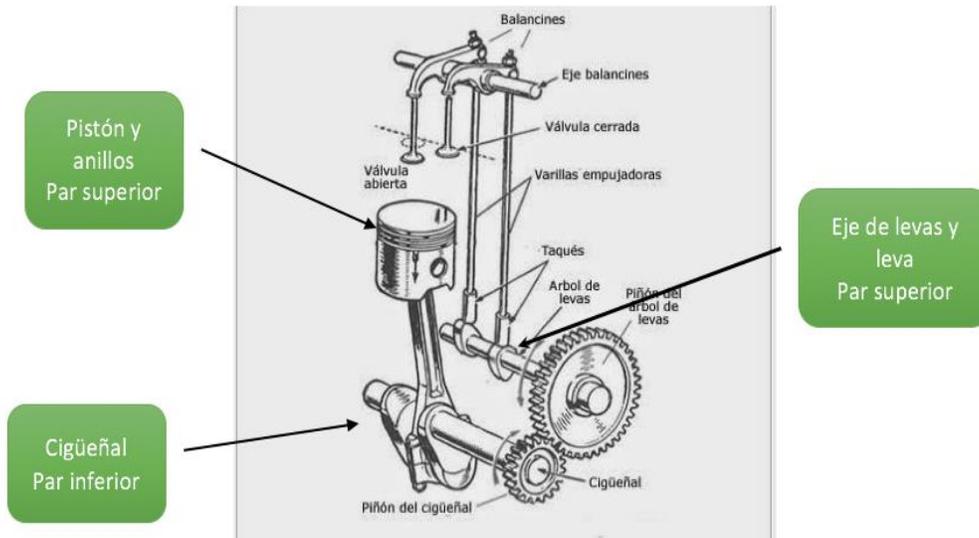


Figura 1^b Mecanismos con mas perdida de potencia en el motor.

La reducción se convierte en el factor clave para mejorar la temperatura de eficiencia de los motores de combustión interna (ICE). Como ejemplo de la ruptura de la fricción mecánica y pérdida, el sistema de pistón-cilindro ocupa la mayor proporción como que se muestra en la Fig.1^a, seguido del sistema de tren de válvulas, eje del cigüeñal y otros auxiliares[28].

En la figura 1^b podemos notar que el cigüeñal es una par inferior, por que esta encerrado entre los casquetes y tienen buena lubricación, en cambio los pares superiores corresponden al eje de levas con la leva, que es un punto que tiene contacto generando alta fricción y el pistón con los anillos, son una línea que genera mucho contacto en una superficie pequeña ocasionando un alto grado de fricción.

Efecto del cambio de temperatura sobre el comportamiento tribológico de recubrimiento DLC texturizado de micro superficie

En el presente artículo Arslan et al., estudiaron las texturas de la superficie y el carbono amorfo hidrogenado (aC:H) tipo diamante(DLC) se combinó para evaluar el rendimiento del recubrimiento a varias temperaturas en aceite. El recubrimiento se deposito mediante pulverización catódica con magnetrón hibrido sobre sustrato texturizado, fue utilizado en partes mecánicas como lo son los pistones, cilindros y sellos mecánicos.

Los resultados demostraron que el revestimiento funcionó de una mejor manera con una superficie texturizada a una temperatura mas baja reduciendo así el COF, la diferencia del recubrimiento texturizado se ve reflejada con el cambio de temperatura ya que con una temperatura mas alta tuvo un mayor cof ya que la película de aceite pierde su viscosidad y mejora el rendimiento frente a la resistencia del desgaste, determinaron la adherencia del recubrimiento utilizando la prueba C de Rockwell. Sin signos de revestimiento se observo una delaminación y espalación y con recubrimiento mostro una mayor adherencia.

La tasa de desgaste en DLC texturizados y no texturizados se afecta dependiendo la temperatura y estado de viscosidad del lubricante[8].

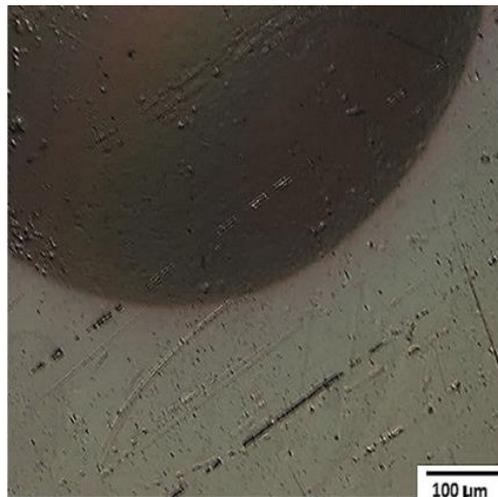


fig. Ensayo de adhesión de sangría Rockwell-C sobre sustrato revestido con DLC.[8]

Mecanismos de reducción de fricción en fundición deslizante contra DLC: Efecto de aceite de motor diluido con biocombustible (E85)

En el siguiente estudio de Banerji et al., se investiga las pérdidas de fricción durante la interacción entre el anillo de pistón y la camisa del cilindro. Se utiliza la técnica de pulverización catódica con magnetron desequilibrado para el recubrimiento de un anillo pistón con carbono hidrogenado similar al diamante (NH-DLC) y un anillo pistón sin recubrimiento. En las pruebas se utilizó un aceite SAE 5W 30 mezclado con aditivos a base de etanol y sin mezclar, para mejorar el rendimiento de la camisa, ya que al diluir aceite con biocombustibles en el motor durante el proceso y dependiendo la humedad mejoran el porcentaje de COF y desgaste.

En conclusión las tasas de desgaste a los 10 ciclos informan que independientemente del tipo de lubricante, el rendimiento tribológico se mejoró con el sistema CI/NH-DLC y muestra que el uso del NH-DLC en lugar de CI resultó beneficioso para reducir la fricción y el desgaste [9].

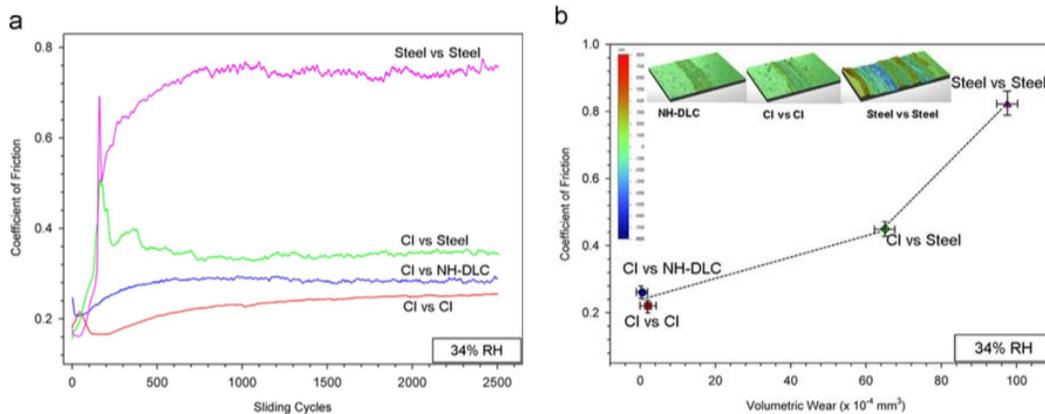


Fig. (a) Gráficos típicos de COF frente a ciclos deslizantes de CI probados contra NH-DLC, CI y acero para pruebas sin lubricar al 34% de HR. El gráfico de COF de la ejecución de acero contra el acero es el gráfico de COF también se muestra; (b) Gráfico de COF vs desgaste volumétrico para CI probado contra NH-DLC, CI y acero así como acero vs acero en 34% RH durante 5×10^3 ciclos. Valores de fricción y desgaste informados son promedios de tres pruebas. Las imágenes del perfil o metro óptico 3-D en el recuadro muestra las superficies de desgaste de CI / NH-DLC, CI / CI y tribopares de acero / acero.[9]

Influencia de las capas intermedias Ti_xSi y $Ti_xSi/a-Si:H$ en la adherencia del diamante como recubrimientos de carbono

En el presente artículo de Hincapié et al., se empleo el acero inoxidable AISI316L utilizado en la fabricación de partes automotrices, el DLC y las capas intermedias fueron depositadas mediante dos diferentes técnicas, la pulverización catódica con magnetrón RF desequilibrado y la técnica DC-PECVD con una pantalla activa.

De acuerdo con los resultados de las pruebas de XPS del recubrimiento Ti_xSi , se formaron diferentes tipos de encajes químicos y compuestos que afectaron la adherencia de la capa intermedia del sustrato y en comparación al recubrimiento $Ti_xSi/a-Si:H$ el cuál tiende a tener una mejor adherencia en el sustrato.

Con esta investigación se pudo notar la importancia de eliminar el oxido de la superficie del sustrato para mejora la adherencia del DLC [10].

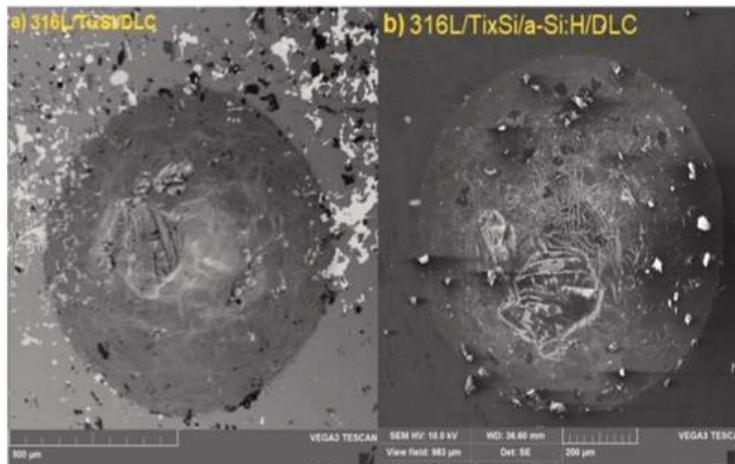


Fig. Micrografías de los ensayos de indentación: (a) Recubrimientos AISI 316 L / Ti_xSi / DLC y (b) AISI 316 L / $Ti_xSi/a-Si:H$ / DLC.[10]

Estudio experimental de delaminación inducida por el desgaste para recubrimientos con DLC componentes automotrices.

En la siguiente artículo de Choleridis et al., se investiga el desprendimiento inducido por el desgaste y la formación de ampollas en el recubrimiento de superficies lubricadas operadas a elevadas temperaturas, este recubrimiento fue empleado en piezas mecánicas como lo son los tren de válvulas disminuyendo el COF y en los pasadores de pistón se mejoró la protección contra el desgaste, mediante la técnica de pulverización catódica con magnetrón.

Después de las diferentes pruebas de adherencia a las que fueron sometidas las películas no revelan fallas adhesivas pero observaron una limitación del recubrimiento en condiciones severas presentado una delaminación del revestimiento generando así una propagación de grietas en la superficie.

En conclusión los recubrimientos con capas intermedias de adhesión han dado una fuerte limitación al uso del DLC y fallan en la mayoría de la aplicaciones industriales, desafortunadamente en este estudio se produjo desprendimiento y formación de ampollas en los recubrimientos [11].

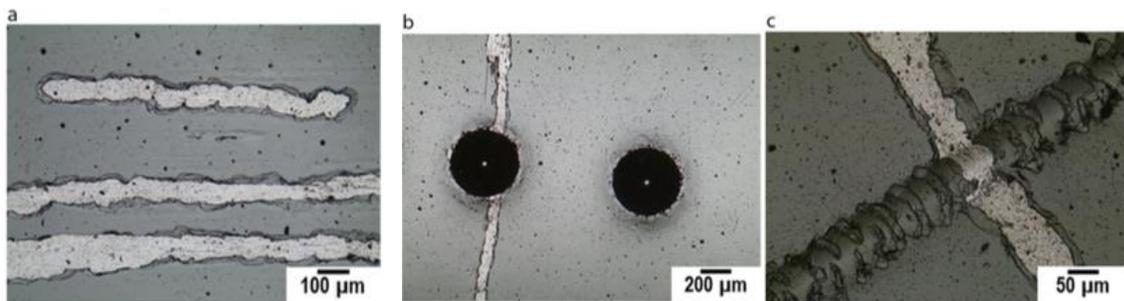


Fig. (a) Delaminación inducida por desgaste, (b, c) Ensayos de adherencia clásicos DLC acero M2 revestido. (a) Prueba de rayado: rastro de desgaste para 2 cargas diferentes (30 y 40 N). b Muesca de Rockwell en el revestimiento dañado. [11]

Multicapas de cerámica DLC para aplicaciones de automoción

En el siguiente estudio de Cruz et al., se utiliza una deposición del recubrimiento por multicapa, sobre sustratos de aleación de aluminio que se utilizan en partes de la industria automotriz ubicadas en el tren de válvulas superior en vehículos de alto rendimiento, mediante la pulverización catódica con magnetrón, este enfoque se realizó para aumentar la resistencia al desgaste de las aleaciones. Los resultados mostraron que las bicapas de titanio pueden mejorar la dureza que varía de 21,7 GPa a 27,8 GPa para el 25% y 5% DLC que contienen recubrimientos respectivamente, sin llegar a presentar ningún signo de agrietamiento durante las pruebas de nanoindentación, como resultado de estos hallazgos, la multicapa con el 10% de DLC resultó ser un mejor compromiso entre la alta dureza y la alta adherencia [12].

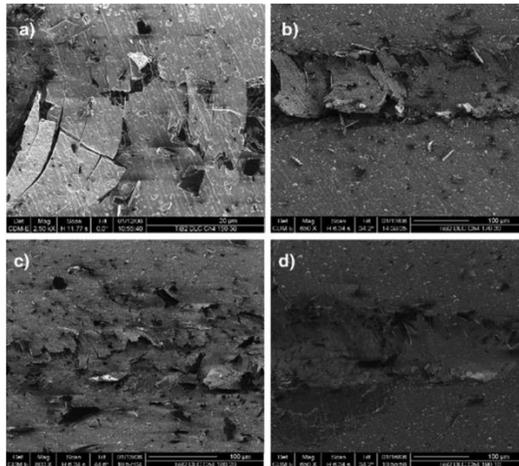


Fig. Micrografías de FIB de las pruebas de rayado: a) 25% de DLC con signos de agrietamiento por tracción a una carga de 10 N; b) 20% DLC donde es posible ver piezas de recubrimiento desprendidas del recubrimiento a una carga de 15 N; c) DLC al 10% cuando se produce agrietamiento en la multicapa que hace que los desechos se desprendan de la superficie con una carga de 10 N; d) 5% de DLC donde es posible ver el borde rayado con partes desprendidas de recubrimiento a una carga de 15 N [12].

Mejora de la eficiencia en los contactos del árbol de levas / taqué del cucharón de automóviles mediante DLC recubrimientos - influencia del aceite del motor, la temperatura y la velocidad del árbol de levas.

En el presente estudio de Dobrenizki et al., se utilizaron dos técnicas de deposición con magnetrón de media frecuencia pulverización catódica (mfMS) para el recubrimiento de aC: H: ZrC_g y la deposición química de vapor asistida por plasma (PACVD) para el recubrimiento aC: H: X, con el fin de mejorar las eficiencias tribológicas en el árbol de levas. Utilizando un banco de pruebas de fricción se midieron los resultados del empujador/leva, después de las diferentes pruebas notaron que entre mas velocidad tenga el árbol de leva tiende a reducir su fricción ya que se forma una película de lubricante, Por el lado del aceite del motor si este tiene temperaturas muy elevadas empieza perder su viscosidad incrementando los índices de fricción. De acuerdo con las pruebas de indentación de Rockwell la adherencia presento un buen comportamiento ya que no se agrieta ni se astilla. Con respecto al desgaste se puede atribuir a la rotación mecánica del empujador del cucharón, que también indican condiciones de lubricación mixta y limita con pequeños espesores de películas de lubricación, en conclusión se pudo demostrar que ambos recubrimientos tipo diamante DLC, aC: H: ZrC_g y aC: H: X tienden a reducir en coeficiente de fricción en el árbol de levas / taque dependiendo de las condiciones en las que se vea afectado, el tipo de lubricante y dependiendo el tipo de aditivo aplicado[13].

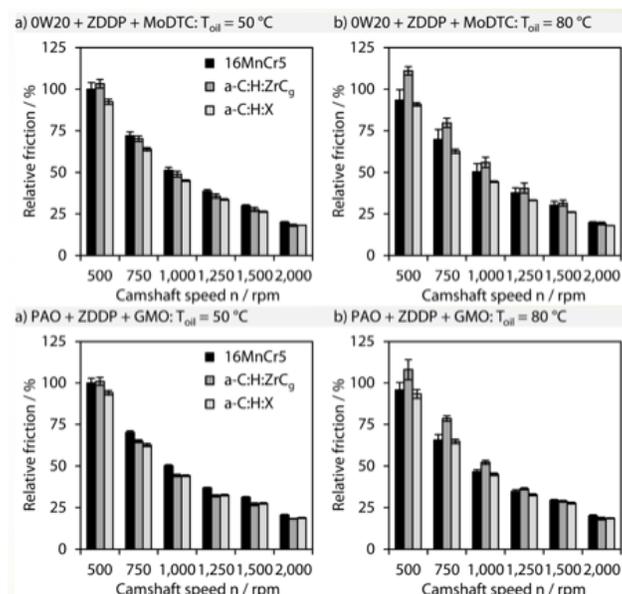


Fig. Comportamiento de fricción relativo en función de la velocidad del árbol de levas en un empujador / un banco de pruebas de fricción de leva en T aceite = 50 ° C (a) y T aceite = 80 ° C (b) bajo lubricación con 0W20 (+ ZDDP + Mo DTC).

Comportamiento de fricción relativo en función de la velocidad del árbol de levas en un empujador / un banco de pruebas de fricción de leva en T aceite = 50 ° C (a) y T aceite = 80 ° C (b) bajo lubricación con PAO (+ ZDDP + OMG) [13]

Propiedades tribológicas de las cerámicas de nitruro de silicio recubiertas con DLC y DLC-Si contra acero inoxidable 316L

En el presente artículo de Gomes et al., estudian dos clases de recubrimiento tipo diamante DLC uno puro y el otro con silicio (Si) contra las aleaciones de hierro utilizadas en piezas automotrices como guías de válvulas, engranajes de transmisión, cojinetes, rodamientos y bombas inyectoras etc. La técnica de plasma (PECVD) fue depositada por descarga luminiscente de radiofrecuencia convencional a partir de mezclas gaseosas de metano y silano.

Respecto a las pruebas experimentales se ve reflejado que el DLC puro alcanza un régimen de fricción estable y en el DLC-Si se ve una temprana delaminación sobre el sustrato mostrando poca resistencia al desgaste. Con respecto a sustrato con Si₃N₄ se utilizó con el objetivo de minimizar los problemas de adherencia que se encuentran habitualmente cuando se emplean algunos sustratos metálicos, obteniendo una respuesta tribológica mejorada [14].

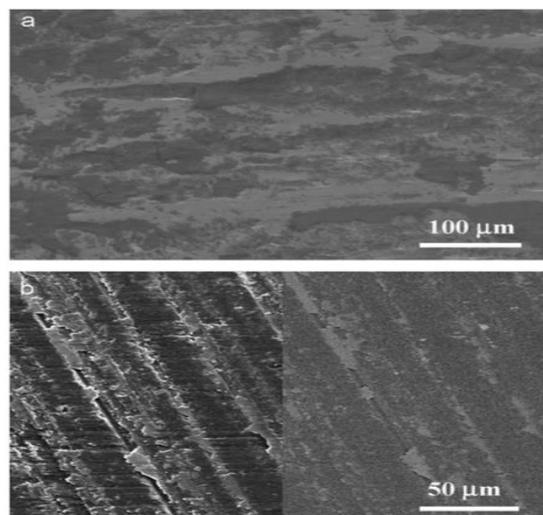


Fig. Micrografías SEM de las superficies desgastadas (la dirección de deslizamiento es horizontal de izquierda a derecha): (a) Pasador de acero 316L probado contra el DLC-Si disco de Si₃N₄ revestido y (b) disco de Si₃N₄ sin revestimiento

probado contra un pasador de acero 316L(izquierda: imagen de electrones secundarios; derecha: imagen de electrones retro dispersados) [14].

Descripción general de los componentes del motor revestidos con DLC

En el siguiente artículo de Cha & Erdemir et al., describen el comportamiento del recubrimiento tipo diamante DLC sobre sustratos aplicados en piezas automotrices. Los siguientes tipos de recubrimientos (carbono hidrogenado dopado con Si (aC: H: Si), hidrocarburo phous (WC / aC: H), carbono (aC: H) y el carbono amorfo tetraédrico (ta-C) fueron aplicados con las técnica de PECVD y el PVD en los anillos de pistón, el elevador de válvulas, los inyectores de combustible, los engranajes diferenciales, horquillas de motocicletas, la suspensión de vehículos de lujo y en un embrague de acoplamiento controlado.

Después de las pruebas realizadas a el pistón de aluminio revestido con DLC aplicando el granallado de tungsteno fino se obtienes mejores porcentajes de desgaste con respecto al pistón sin DLC.

En conclusión la aplicación de DLC sobre superficies deslizantes mejoraron la resistencia al desgaste y ayudo a reducir la fricción utilizando lubricantes ecológicos que son amigables para el medio ambiente [15].

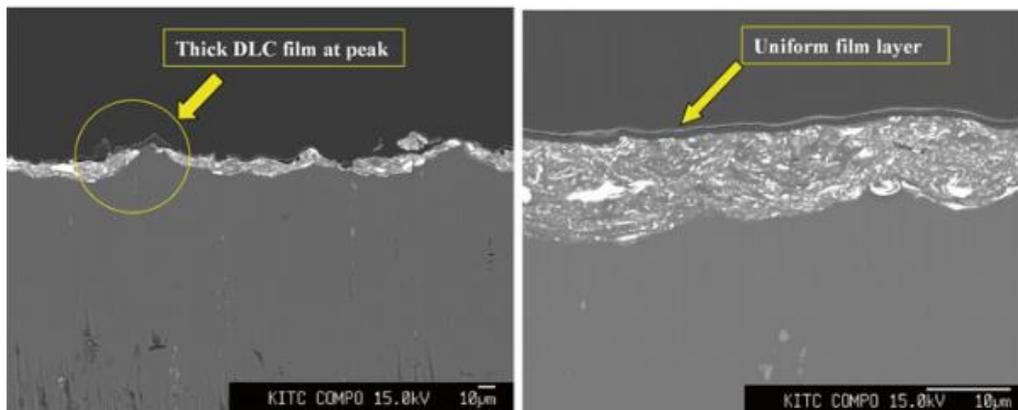


Fig. Comparación de recubrimientos DLC sobre sustrato de Al modificado [15].

Investigación de ingeniería de recubrimiento DLC en pasadores de pistón y empujadores de cubo

En el presente artículo de Kong et al., se utilizó el recubrimiento de tipo diamante DLC aplicado en la superficie de los pasadores del pistón y en los taques o empujadores en la culata del motor mediante la deposición de PECVD y dos capas intermedias depositadas con PVD.

Al realizar las pruebas sobre un empujador recubierto con DLC y uno estándar se pudo notar que el taque revestido tuvo un índice alto reduciendo la fricción del tren de válvulas, los componentes del motor mostraron una mejor evolución después de los ensayos realizados mostraron que el DLC reduce significativamente las tasas de desgaste al casi 10 veces en comparación con las superficies sin recubrimiento dando como resultado una buena resistencia al desgaste.

En conclusión la ayuda de los taqués pueden reducir la pérdida por fricción del tren de válvulas en un 29%, y los pasadores de pistón recubiertos con DLC pueden reducir la fricción del grupo de pistones en un 11% y basados en las pruebas del banco de durabilidad de motores los resultados muestran que el recubrimiento dlc presenta suficiente durabilidad y mejora el rendimiento de fricción y desgaste [16].

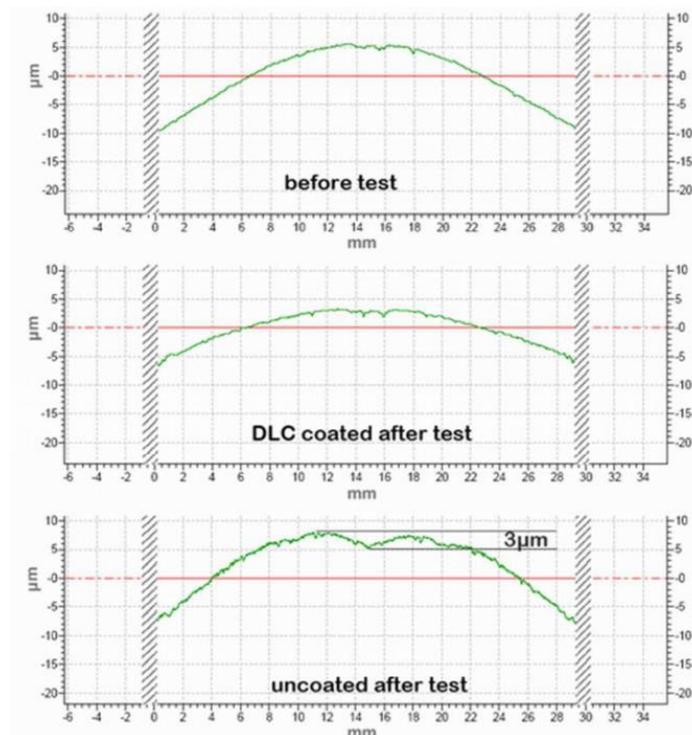


Fig. Perfiles de desgaste de la superficie de deslizamiento del pasador de pistón antes y después de la prueba de durabilidad: (a) pasadores de pistón sin recubrimiento (b) pasadores de pistón recubiertos con DLC [16]

Evaluación de las propiedades tribológicas de DLC para aplicaciones de motor

En el siguiente artículo de Lawes et al., se aplicaron recubrimientos tipo diamante DLC a los siguientes componentes del motor de un carro para mejorar su rendimiento (Pistón, empujador, árbol de levas, aros de pistón y buló, vástago y cabeza de válvula) los recubrimientos fueron aplicados en el sustrato (acero M2) pulidos antes de la deposición, utilizando la técnica CVD mejorado con plasma y otro depositado por PVD.

Se realizaron pruebas experimentales con nanoindentación, rayado y desgaste para demostrar que recubrimiento mostraba mejores resultados.

En la prueba experimental con nanoindentación se demostró que la técnica con CVD mejorada con plasma (aC:H) era mas rígida y tiene una mejor recuperación elástica de las muescas, proporcionando buenas propiedades de lubricación, frente al PVD (WC/C) que mostro una respuesta plástica con menos elasticidad.

En las pruebas de rayado el PVD (WC/C) falla a una carga critica dañando la espalación a gran escala.

En las pruebas de desgaste con cargas ligeras obtiene una mejor tasa de desgaste el PVD (WC/C) y con cargas mayores los dos recubrimientos muestran un desgaste considerable [17].

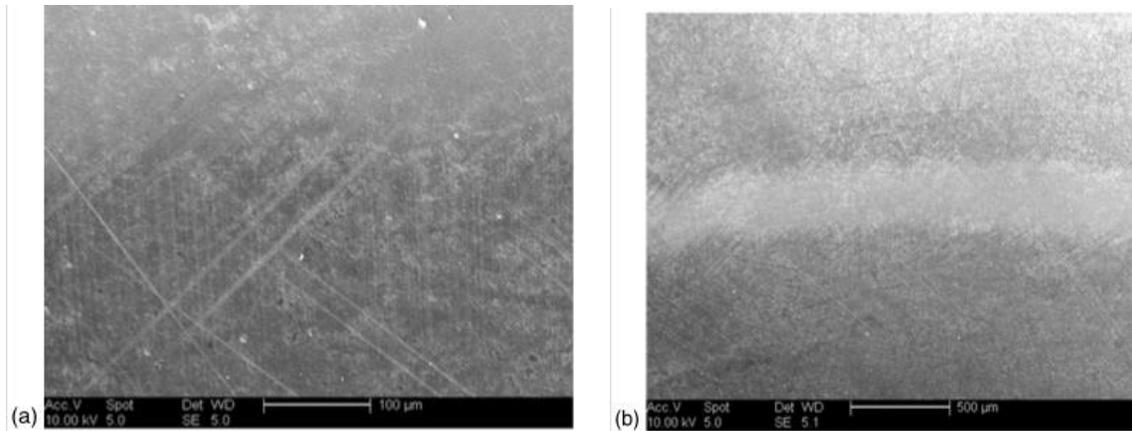


Fig. (a) Desgaste leve general del recubrimiento aC: H funcionamiento de la plataforma de prueba post-leva-taqué.
(b) Desgaste por raspado en el borde de aC: H muestra de funcionamiento del banco de pruebas post-leva-taqué [17].

Ensayo de desgaste por impacto de películas de carbono tipo diamante para empujadores de válvulas de motor

En el siguiente artículo de Lawes et al., consideran utilizar la tecnología del recubrimiento DLC para proporcionar un mejor rendimiento y brindarle una protección a la diferentes componentes del tren de válvulas esto con el fin de reducir las emisiones contaminantes y ahorrar combustible, este recubrimiento fue depositado utilizado la técnica de pulverización catódica magnetrón sobre inserciones de acero para herramientas (acero M2). Después de las diferentes pruebas de impacto en el tren de válvulas en sus diferentes posiciones dio como resultado que si se impacta directamente en la zona, muestra una mayor durabilidad del recubrimiento mientras que en las pruebas de impacto inclinado los recubrimiento se desgastan por el deslizamiento, mas cuando entran en contacto con los lubricantes del motor.

En conclusión las observaciones que obtuvieron con las pruebas de impacto en un ángulo inclinado con presencia de lubricante se ve afectado el recubrimiento es muy susceptible al desgaste en el tren de válvulas.

El DLC hidrogenado es mas susceptible a las cargas de impacto ya que se generan partículas de desgaste [18].

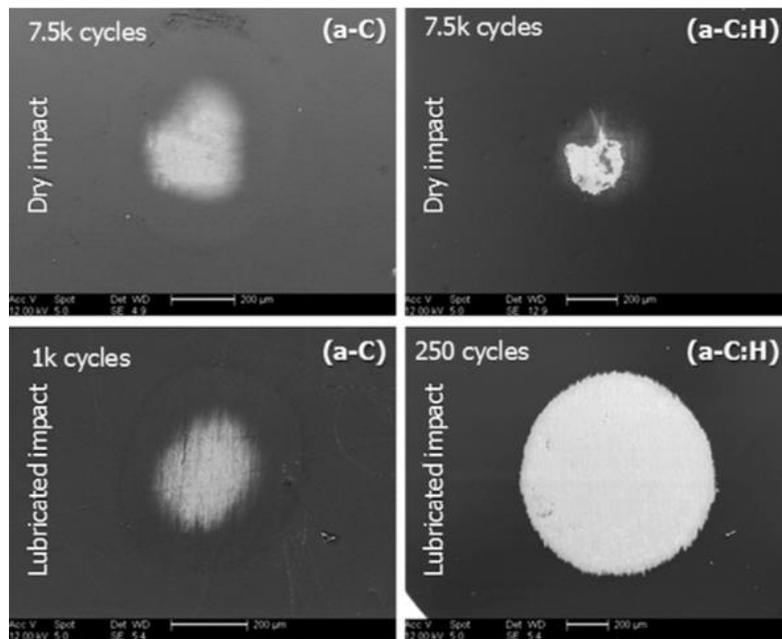


Fig. Micrografías de ejemplos de cicatrices de desgaste por impacto. Todos los ejemplos de pruebas de impacto realizadas a 15 ° de impacto. Cada imagen muestra la cantidad de impactos que generaron el desgaste junto con el tipo de recubrimiento y la presencia de lubricante [18].

Pérdidas por fricción y desgaste reducidos por el recubrimiento DLC de los pasadores de pistón

En el siguiente estudio de Morgenstern et al., se realizaron pruebas sobre diferentes materiales , aluminio, latón, acero que son utilizados para la fabricación de piezas mecánicas como lo son la biela(acero) los pistones (aleación de aluminio). Buje(latón), pasador del pistón (acero), estos materiales fueron recubiertos con DLC mediante la técnica del plasma mejorado con deposición química(PE-CVD), estos componentes fueron expuestos a pruebas de fricción y desgaste, la prueba de fricción dio como resultado que en los materiales de aluminio y acero disminuyo su COF y en el DLC con latón se produjo un alza en el porcentaje en estado seco y a temperaturas elevadas con lubricación mejor

el COF. De acuerdo a los componentes investigados se ve una mejoría en el área de desgaste cuando se aplica un recubrimiento DLC en el pasador del pistón estando en contacto directo con contrapartes de acero y aluminio por lo tanto la capa de DLC ofrece una gran ayuda para solucionar los problemas con los bujes en el pistón y los motores con alta potencia [19].

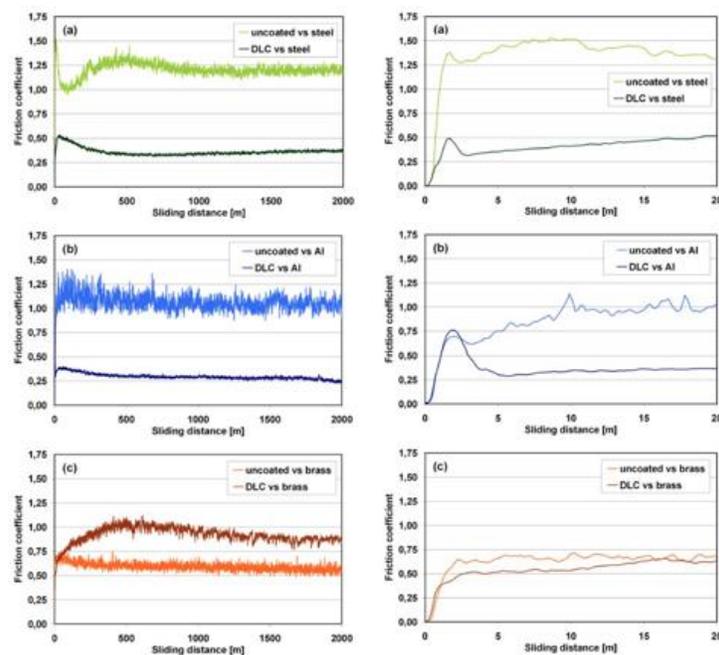


Fig. Comportamiento de fricción de DLC y sin recubrimiento en secciones de pasador de pistón recubiertas en función del deslizamiento distancia para diferentes materiales de contraparte en seco condición a temperatura ambiente. (a) acero; (B)Aluminio; (c) Latón [19].

Reacciones tribológicas entre aditivos de aceite y recubrimientos DLC para aplicaciones automotrices

La presente investigación de Bojan Podgornik & Vižintin et al., muestra la implementación del recubrimiento tipo diamante DLC dopado con tungsteno (W-DLC) y la utilización de lubricantes como el aceite puro poli-alfa-olefina (PAO) ya que tiene buena viscosidad y estabilidad térmica, todo con el resultado de poder mejorar el rendimiento del motor y la

transmisión . Los recubrimientos DLC fueron depositados por un plasma comercial CVD asistido (PACVD) utilizando una capa intermedia de Cr para mejorar la adhesión, se realizaron pruebas de fricción y desgaste utilizando un banco de prueba de alto voltaje, se puede observar que cuando el aceite se expuso a temperaturas elevadas condujo a una alta reducción de la fricción y el desgaste de la combinación acero (W-DLC).

En conclusión los aditivos utilizados en las pruebas tuvieron mejores resultados con respecto al recubrimiento W-DLC el cual mejoro considerablemente el desgaste y el coeficiente de fricción [20].

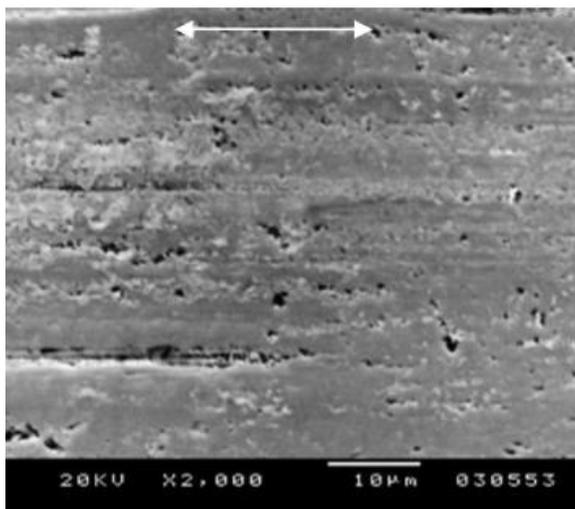


Fig. Micrografía SEM [20].

Compatibilidad de recubrimientos DLC con aceites formulados

En el presente estudio de B. Podgornik et al., se investigó el recubrimiento de carbono tipo diamante DLC con la implementación de aceites formulados, con el fin de mejorar la resistencia al desgaste y reducir la fricción en las bolas de acero de los rodamientos y discos de acero estos recubrimientos DLC fueron depositados por CVD asistido (PACVD). Los recubrimientos de DLC se probaron realizando pruebas de fricción y desgaste con

lubricantes al límite con un banco de pruebas de alta frecuencia, la utilización de aceites formulados condujeron a una reducción de fricción y los discos recubiertos con DLC no mostraron desgaste medible según las pruebas realizadas.

En conclusión el lubricante con base PAO es el que mejor ayuda al recubrimiento tipo diamante DLC cuando entra en contacto con la superficie mejorando su resistencia al desgaste y manteniendo una similar tasa de fricción y desgaste con respecto a otros tipos de aceites. B. Podgornik y colaboradores. La aplicación de recubrimientos DLC para sistemas de combustible podrían dar como resultado una fricción reducida y una protección mejorada de la superficie, dependiendo del recubrimiento DLC seleccionado y el lubricante involucrado [21].

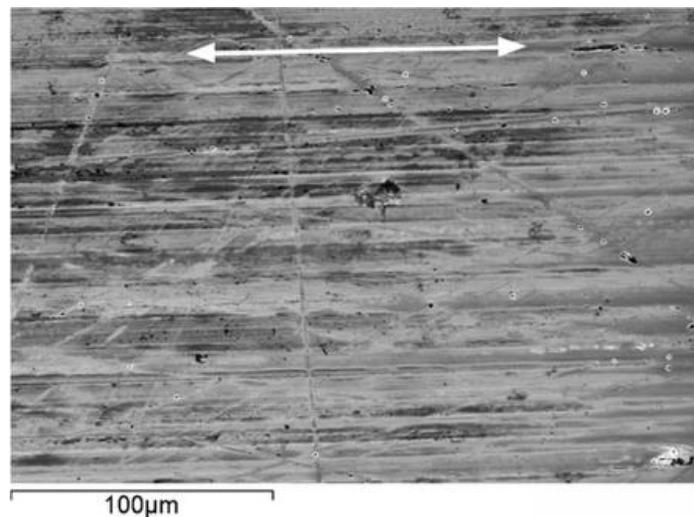


Fig. Superficie desgastada del disco recubierto con W-DLC después de 72000 ciclos de deslizamiento en aceite de la caja de cambios [21].

Análisis de desgaste de revestimiento DLC en aceite que contiene mo-dtc

La presente investigación de Shinyoshi et al., muestra la aplicación de recubrimiento de carbono tipo diamante (DLC), aplicado con la técnica de pulverización catódica con magnetron desequilibrado (PVD), técnica utilizada en el sustrato anillo: SAE 4620 utilizado para la industria automotriz. Para las pruebas de fricción y desgaste se midió por medio de

la nano indentación, al exponer el recubrimiento en un aceite base (5W-30) con aditivo Mo-DTC y un aceite base sin aditivo mostrando mayor debilidad después de su reacción, los resultados indicaron un mayor porcentaje de desgaste en el recubrimiento cuando el DLC interactúa y reacciona con el aceite base con aditivo y por el lado de la fricción tuvo un menor porcentaje con los dos tipos de aceite.

En conclusión el revestimiento de DLC que se pone en contacto con el aceite que contienen Mo-DTC tiende a desgastarse y en este caso la parte afectada son los anillos [22].

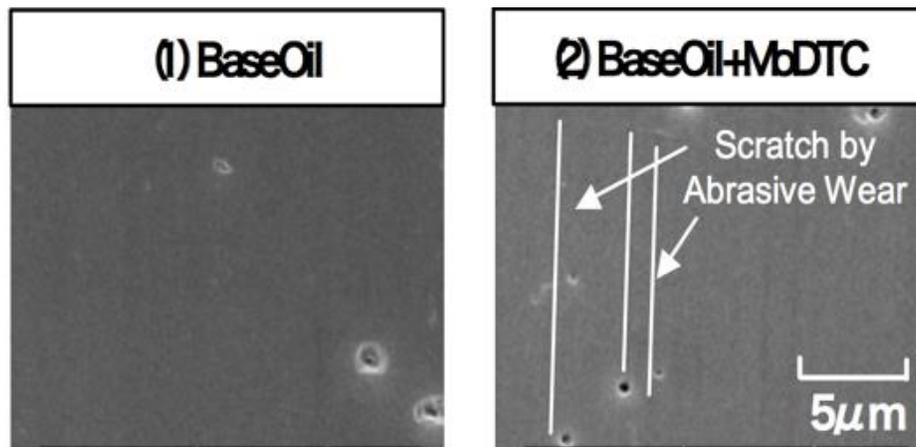


Fig. Imágenes SEM de la superficie deslizante [22].

Funciones del acabado superficial similar al espejo y aros de pistón revestidos con DLC sobre el aumento de la resistencia al rayado de las camisas de cilindros de hierro fundido

En el siguiente estudio de Tas et al., se considero la utilidad del recubrimiento tipo diamante DLC, para aumentar la resistencia al rayado y así poder disminuir el coeficiente de fricción en los anillos del pistón y en la camisa del cilindro, se realizaron experimentos de raspados diseñados para evaluar la durabilidad y resistencia del motor donde las superficies son mas propensas a la falta de lubricación. Este recubrimiento fue puesto a prueba con el

recubrimiento de CI y los mecanismos de fricción se compararon con un recubrimiento de nitruro de cromo CrN aplicados vía PVD.

Las tasas de desgaste medidas a 200 N (carga crítica) mostraron que para los recubrimientos CI rugosos y de acabado medio, el raspado había ya realizado (tasas de desgaste > 0,94 mm³/m) mientras que CI con acabado más suave los recubrimientos no mostraron raspaduras a 200 N (tasa de desgaste de 0,39 mm³/m). Después de los diferentes ensayos el DLC mostro una reducción significativa del desgaste y la fricción en comparación de la superficie recubierta con CrN [23].

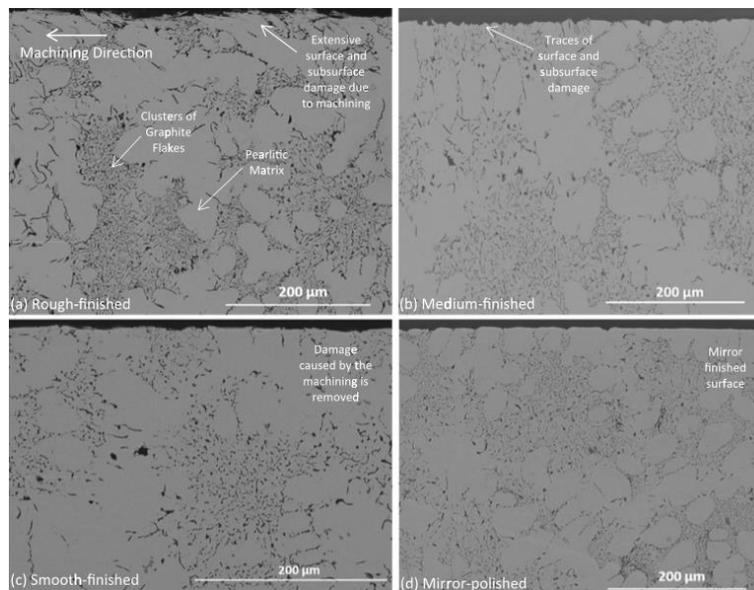


Fig. Imágenes SEM de electrones secundarios de las secciones transversales de los recubrimientos de CI; (a) Acabado rugoso (como se recibió), (b) Acabado medio, (c) Acabado liso, (d) Pulido espejo. El recubrimiento CI de acabado rugoso mostró un daño inicial debido al mecanizado. Todavía se observaron pequeñas cantidades de daño de mecanizado para muestras de acabado medio. Más al suavizar la superficie, se eliminan los restos de la superficie de mecanizado inicial y los daños del subsuelo para obtener muestras con acabado liso y pulido espejo [23].

Efecto de la temperatura y contracara sobre la tribología rendimiento de W-DLC en un sustrato de acero

En la presente investigación de Veverkova & Hainsworth et al., utilizaron un recubrimiento aC:H dopado con carburo de tungsteno (W DLC) depositado por la técnica de deposición física de vapor PVD sobre un sustrato de acero, el cual se utiliza para la construcción de

partes del motor en la industria automotriz con el fin de mejorar el consumo de combustible, la reducción de emisiones contaminantes y la durabilidad de los motores. Se le realizaron pruebas al W DLC evaluado por nanoidentación y pruebas de rayado a una temperatura de 400 C la cual hace que el DLC obtenga un mayor daño por rayado, un porcentaje más alto de fricción y desgaste.

Podemos concluir que el DLC en comparación al W DLC tiende a tener mejores propiedades con respecto a la contracara en condiciones de lubricación y sin lubricación , en conclusión pudieron notar que con el aumento de la temperatura, el coeficiente de desgaste aumento en todos los casos, y fue mayor para las cargas mas altas tanto para 10 como para 100 ciclos y en el caso de la adherencia no se noto perdida en el recubrimiento [24].

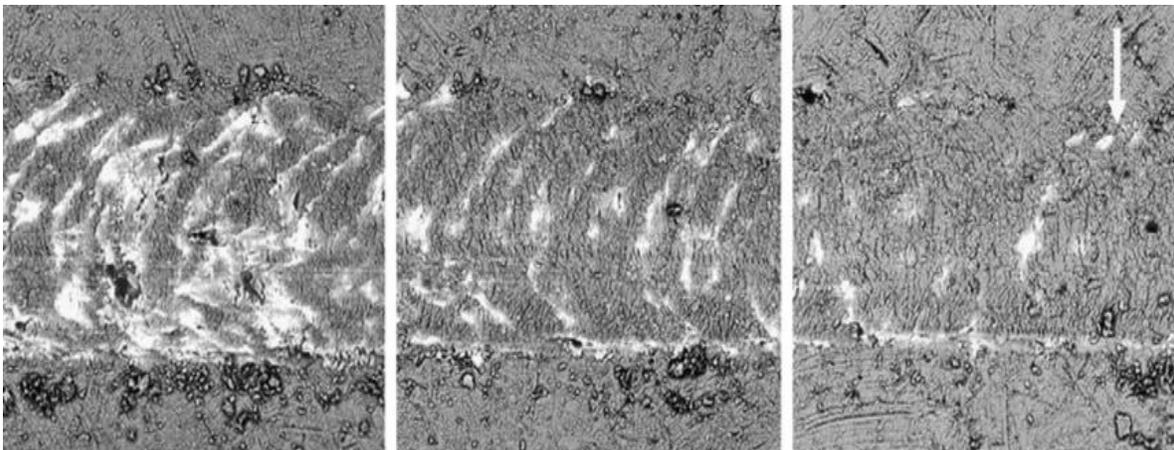


Fig. Micrografía ESEM de una pista de rayado típica que muestra el primer fallo del recubrimiento (marcado con la flecha), el siguiente fallo y el fallo completo del recubrimiento (rayado dirección es de derecha a izquierda).

Estudios tribológicos del segmento de pistón automotriz por revestimiento de carbono tipo diamante

En el presente artículo de Vinoth et al., emplearon el recubrimiento de carbono tipo diamante DLC, se utilizó para recubrir los anillos de pistón de un vehículo, utilizando el

método de pulverización catódica con magnetrón. Para poder medir sus propiedades frente al desgaste y el coeficiente de fricción se utilizó un tribómetro con el fin de tener una mejor precisión en los resultados, la prueba se realiza en esta parte ya que son las piezas con un alto índice de fricción ya que el movimiento del pistón es rápido y continuamente sometido a fluctuación térmica. Después de realizar las pruebas expuestas a diferentes voltajes, se pudo identificar que las muestras sin recubrimiento muestran un mayor índice de desgaste en comparación con las muestras que fueron recubiertas con DLC aplicando una capa intermedia para proteger el recubrimiento por delaminación ya que presentan una mejor adherencia y mejor uniformidad con las películas. Por lo tanto, el uso de este recubrimiento (DLC) ayuda a mejorar las condiciones y reduce el desgaste por fricción ayudando al mejor funcionamiento del motor[25].

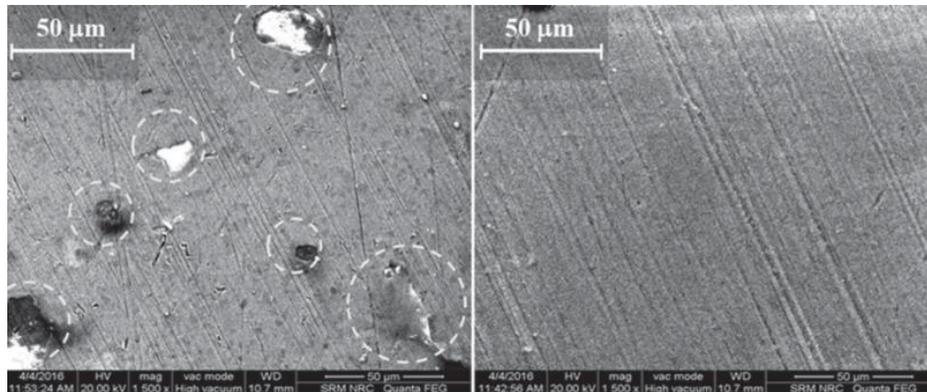


Fig. Imágenes SEM de DLC depositadas en un anillo de pistón con potencia de RF (a) 200, (b) 150 W[25]

Piezas con mayor pérdida de desgaste en un motor

Con respecto a los estudios realizados podemos notar en la fig. 1^a, el porcentaje de pérdida de fricción y desgaste que sufren algunos de los componentes mencionados en este trabajo, esto con el fin de apoyar futuras investigaciones las cuales buscan mejorar las propiedades tribológicas.

SÍNTESIS EN TABLA DE LOS ARTICLUOS ESTUDIADOS

AUTORES	PARTE RECUBIERTA	TÉCNICA	FUENTE/ GAS REACTIVO	ADHERENCIA	RESULTADO	# DE REF.
Ahmed Arslan, Haji Hasan Masjuki et al., (2015)	Pistones y cilindros	SPUTTERING	Argón y acetileno	Si aplica Prueba de Rockwell	Mayor adherencia, con respecto a la temperatura y la viscosidad del aceite.	8
A. Banerji , M.J. Lukitsch etal., (2016)	Anillos del pistón	SPUTTERING	Fuente de carbono	Si aplica	Se mejoro el rendimiento tribológico.	9
W.S. Hincapié C, J.M. Gutiérrez B et al., (2020)	acero inoxidable AISI316L	SPUTTERING Y DC-PECVD	Acetileno y Metano	Si aplica prueba de indentacion y rayado	Se mejora la adherencia	10
Antonios Choleridis, Sergio Sao-Joao et al., (2018)	Tren de válvulas y pasadores de pistón	SPUTTERING	acetileno	Si aplica prueba de rayado	Desprendimiento y formación de ampollas en los recubrimientos.	11
R. Cruz , J. Rao et al., (2006)	TREN DE VALVULAS	SPUTTERING	Argón y metano	Si aplica prueba de rayado	Mejoramiento de dureza y adherencia	12
L. Dobrenizki, S. Tremmel et al., (2016)	Árbol de levas	PACVD Y SPUTTERING	Argón y acetileno	Si aplica prueba de indentacion HF 1	Reducción de fricción	13

J.R. Gomes, S.S. Camargo Jr. et al., (2007)	Guías de válvulas y cojinetes	PECVD	Metano y silano	Si aplica prueba de rayado	Se minimizo los problemas de adherencia	14
Cha, S. C., & Erdemir, A. (2015).	Anillos del pistón y elevador de válvulas	PECVD Y SPUTTERING	Fuente carbono	N.A	Mejoraron la resistencia al desgaste	15
Xiaoli Kong , Jixiao Wang Et al (2016)	Pasadores de pistón y los taques	PECVD Y SPUTTERING	Fuente carbono	N.A	Reducieron la perdida de fricción	16
Lawes, S. D. A., Fitzpatrick, M. E. et al., (2007)	Pistón ,anillos, empujadores y árbol de levas	CVD Y SPUTTERING	Fuente de carbono	Si aplica prueba de rayado	Se mejora la tasa de desgaste	17
Lawes, S. D. A., Hainsworth, S. V. Et al (2010)	Tren de válvulas	SPUTTERING	Fuente de hidrogeno	N.A	Se afecta el recubrimiento y se genera desgaste.	18
Morgenstern, R., Kießling, W. Et al (2008)	Pistón, biela, bujes	PE-CVD	Etino	Si aplica prueba de indentacion HF 2	Mejoran el área de desgaste	19
Podgornik, Bojan, & Vižintin, J. (2005).	Acero (AISI 52100)	PACVD	Fuente de carbono	N.A	Se mejora el desgaste y el COF	20
Podgornik, B., Sedlaček, M., & Vižintin, J. (2008).	Acero (AISI 52100)	PACVD	Fuente de hidrogeno	N.A	Se mejora el desgaste y el COF. Dependiendo el adictivo	21
Shinyoshi, T., Fuwa, Y., & Ozaki, Y. (2007).	Anillos del pistón	SPUTTERING	Argón	N.A	Menor COF. Mayor desgaste con el adictivo Mo-DTC	22

Tas, M. O., Banerji, A. Et al (2017)	Anillos del pistón y camisa del cilindro	SPUTTERING	Fuente de hidrogeno	N.A	Reducción del desgaste y la fricción	23
Veverkova, J., & Hainsworth, S. V. (2008).	Taque de acero	SPUTTERING	Argón	Si aplica prueba de rayado	Aumento la tasa de desgaste	24
Vinoth, I. S., Detwal, S., Umasankar, V., & Sarma, A. (2019).	Anillos del pistón	SPUTTERING	Argón	N.A	Se reduce la fricción	25

ANÁLISIS DE LOS ARTICULOS

La mayoría de los artículos que estuvimos analizando se hicieron utilizando las técnica del DLC en PVD y CVD con sus respectivos gases reactivos, en este caso Ahmed Arslan y colaboradores utilizaron la técnica de sputtering para recubrir los pistones y cilindros de un motor a combustión interna, utilizando el Argón como gas reactivo notaron que la adherencia fue mayor con respecto a la temperatura y viscosidad del aceite, además Cruz y colaboradores obtuvieron resultados similares en la adherencia, al recubrir con argón y metano el tren de válvulas mejorando su adherencia y dureza. En un caso parecido Hincapié y colaboradores aplicaron una prueba de rayado y de indentación en el acero AISI 310L y recubrieron el sustrato utilizando la técnica de DC-PECVD con una fuente de metano como gas reactivo, pudieron mejorar la adherencia en el sustrato.

Por otra parte Dobrenzki y Tremmel recubrieron el árbol de levas mediante el PACVD con acetileno como gas reactivo reduciendo la fricción, y después de algunas pruebas de indentación catalogaron la adherencia como HF-1 (muy buena), esta misma prueba fue utilizada por Morgenstern y Kiebling quienes recubrieron los pistones, biela y bujes cambiando el gas reactivo por Etileno pero utilizando la misma técnica de deposición, en este caso la adherencia fue catalogada como HF-2 (buena).

Otros investigadores como Podgornik y Vižintin recubrieron en el 2005 el acero AISI 52100 mediante la técnica del PACVD utilizando una fuente de carbon, notaron que el desgaste de coeficiente mejoraron en varias proporciones, resultado que fue similar tres años después al realizar la misma prueba en el AISI 52100 pero utilizando una fuente de hidrogeno y añadiendo el adictivo PAO (poli alfa olefina), ya que este es el que mejora ayuda al recubrimiento cuando entra en contacto con la superficie mejorando su resistencia al desgaste. Además de ellos Lawes y Fitzpatrick en el 2007 utilizando la técnica de CVD y PVD recubrieron el árbol de levas, pistones y otras piezas del motor con una fuente de carbono viendo una mejor tasa de desgaste, resultado que no les favoreció tres años después ya que cambiaron el reactivo por una fuente de hidrogeno la cual afecto el recubrimiento y genero un desgaste importante, sin embargo no solo a ellos se les presentaron errores, Choleridis y colaboradores después de utilizar la técnica de sputtering y el argón como gas reactivo observaron un desprendimiento y una formación de ampollas en los recubrimientos realizados en en tren de válvulas.

Además de ellos Cha y Edermir recubrieron los anillos del pistón mediante la técnica de PECVD con una fuente de carbono como reactivo, no hubo adherencia pero si mejoraron la resistencia al desgaste, esa misma fuente fue utilizada por Xiaoli Kong y Jixiao Wang un año después, realizando el mismo proceso pero esta vez en los taques logrando reducir la perdida de fricción. Un proceso similar realizo Tas y colaboradores al recubrir los anillos de pistón utilizando una fuente hidrogenada como reactivo y Vinoth que también recubrió lo anillos pero cambio el reactivo utilizando argón, ambas investigaciones obtuvieron una reducción en la fricción después de las pruebas realizadas, algo que no sucedió en las pruebas de Shinyoshi y Veverkova quienes utilizaron la misma técnica de deposición y el mismo gas reactivo (Argón) pero la tasa de desgaste aumento para ambas investigaciones.

Por ultimo Gómez quien implemento la técnica de PECVD con metano y silano como gases reactivo, logro minimizar los problemas de adherencia en el sustrato al igual que Banerji que mejoro el rendimiento tribológico en los anillos del pistón pero utilizando una fuente de carbono como reactivo.

CONCLUSIONES

Se pudo reconocer cuales fueron los componentes del motor que tienden a sufrir mayor desgaste, y mediante la implementación de los recubrimientos tipo diamante DLC se pueden mejorar sus propiedades incrementando así su vida útil.

Se logro enriquecer el conocimiento para posteriores investigaciones y tomar este trabajo para futuras investigaciones ya que se habla de las diferentes técnicas de aplicación y caracterización usadas en los recubrimientos DLC.

Se pudo evidenciar un alto grado de importancia al incluir el uso de lubricantes ya que mejoran el estado del motor y la durabilidad de sus componentes.

Se puede concluir con los estudios que se emitieron que el método mas utilizado para la utilización del DLC, es el PVD o sputtering utilizando como gas reactivo el argón, el cual se prefiere para hacer los recubrimientos DLC en los motores de combustion interna utilizados en la industria automotriz.

Se puede aprovechar una opción mas para la deposición de las películas DLC, la técnica de CVD que utiliza como gas reactivo el metano o acetileno el cual muestra buenos resultados en el desgaste y la fricción.

RECOMENDACIONES

El trabajo se realizo utilizando antecedentes y artículos basados en la utilidad de los recubrimientos DLC en la industria automotriz, para poder mejorar su implementación, generando una iniciativa al momento de emprender soluciones en problemas similares y así enriquecer los conocimientos en futuras investigaciones.

Referencias

- [1] Robertson, J. (2002). Diamond-like amorphous carbón. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 37(4–6), 129–281. [https://doi.org/10.1016/s0927-796x\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/s0927-796x(02)00005-0)
- [2] Süss, M. Chairman, G.P (2015) Aplicaciones del DLC. Oerlikon balzers Argentina
Recuperado de <https://www.oerlikon.com/balzers/ar/es-mx/>
- [3] INVESTPLASMA. España recuperado de: <https://investplasma.com/>
- [4] Sulzer Management Ltd. SULZER. Suiza: recuperado de <https://www.sulzer.com/es-es/spain/shared/services/chemical-vapor-deposition-cvd>
- [5] Brühl, S. P., Dalibon, E. L., Pecina, J. N., Recubrimientos en base carbono tipo “dlc” características, propiedades y aplicaciones. Grupo de Ingeniería de Superficies - Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay recuperado de <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/4165/GIS-66.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] GGB. (2019). Tribología. GGB Bearing Technology. Estados Unidos. Recuperado de <https://www.ggbearings.com/es/tribou/tribologia>
- [7] Rodríguez, H., (2020). Ingemecánica: Lubricantes. España: recuperado de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn68.html>
- [8] Arslan, A., Masjuki, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Quazi, M. M., & Mosarof, M. H. (2016). Effect of change in temperature on the tribological performance of micro surface textured DLC coating. *Journal of Materials Research*, 31(13), 1837–1847. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.12>
- [9] Banerji, A., Lukitsch, M. J., & Alpas, A. T. (2016). Friction reduction mechanisms in cast iron sliding against DLC: Effect of biofuel (E85) diluted engine oil. *Wear*, 368–369, 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.09.001>
- [10] Hincapie C., W. S., Gutiérrez B., J. M., Trava-Airoldi, V. J., Olaya F., J. J., Alfonso, J. E., & Capote, G. (2020). Influence of the TixSi and TixSi/a-Si:H interlayers on adherence of diamond-like carbon coatings. *Diamond and Related Materials*, 109(May). <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108079>
- [11] Choleridis, A., Sao-Joao, S., Ben-Mohamed, J., Chern, D., Barnier, V., Kermouche, G., Heau, C., Leroy, M. A., Fontaine, J., Descartes, S., Donnet, C., & Klöcker, H. (2018). Experimental study of wear-induced delamination for DLC coated automotive components.

Surface and Coatings Technology, 352(June), 549–560.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.048>

[12] Cruz, R., Rao, J., Rose, T., Lawson, K., & Nicholls, J. R. (2006). DLC-ceramic multilayers for automotive applications. *Diamond and Related Materials*, 15(11-12 SPEC. ISS.), 2055–2060.
<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2006.07.006>

[13] Dobrenizki, L., Tremmel, S., Wartzack, S., Hoffmann, D. C., Brögelmann, T., Bobzin, K., Bagcivan, N., Musayev, Y., & Hosenfeldt, T. (2016). Efficiency improvement in automobile bucket tappet/camshaft contacts by DLC coatings – Influence of engine oil, temperature and camshaft speed. *Surface and Coatings Technology*, 308, 360–373.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.041>

[14] Gomes, J. R., Camargo, S. S., Simão, R. A., Carrapichano, J. M., Achete, C. A., & Silva, R. F. (2007). Tribological properties of silicon nitride ceramics coated with DLC and DLC-Si against 316L stainless steel. *Vacuum*, 81(11–12), 1448–1452.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2007.04.023>

[15] Cha, S. C., & Erdemir, A. (2015). Coating technology for vehicle applications. *Coating Technology for Vehicle Applications*, 1–240. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14771-0>

[16] Kong, X., Zhou, B., Wang, J., & Li, W. (2016). Engineering research of DLC coating in piston pins and bucket tappets. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68(5), 530–535.
<https://doi.org/10.1108/ILT-09-2015-0132>

[17] Lawes, S. D. A., Fitzpatrick, M. E., & Hainsworth, S. V. (2007). Evaluation of the tribological properties of DLC for engine applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(18), 5427–5437. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/18/S03>

[18] Lawes, S. D. A., Hainsworth, S. V., & Fitzpatrick, M. E. (2010). Impact wear testing of diamond-like carbon films for engine valve-tappet surfaces. *Wear*, 268(11–12), 1303–1308.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.02.011>

[19] Morgenstern, R., Kießling, W., & Reichstein, S. (2008). *ICES2008-1650*. 1–9.

[20] Podgornik, Bojan, & Vižintin, J. (2005). Tribological reactions between oil additives and DLC coatings for automotive applications. *Surface and Coatings Technology*, 200(5–6), 1982–1989.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.014>

[21] Podgornik, B., Sedlaček, M., & Vižintin, J. (2008). Compatibility of DLC coatings with formulated oils. *Tribology International*, 41(6), 564–570.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.12.004>

- [22] Shinyoshi, T., Fuwa, Y., & Ozaki, Y. (2007). Wear analysis of DLC coating in oil containing Mo-DTC. *SAE Technical Papers*, 956–960. <https://doi.org/10.4271/2007-01-1969>
- [23] Tas, M. O., Banerji, A., Lou, M., Lukitsch, M. J., & Alpas, A. T. (2017). Roles of mirror-like surface finish and DLC coated piston rings on increasing scuffing resistance of cast iron cylinder liners. *Wear*, 376–377, 1558–1569. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.110>
- [24] Veverkova, J., & Hainsworth, S. V. (2008). Effect of temperature and counterface on the tribological performance of W-DLC on a steel substrate. *Wear*, 264(7–8), 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.04.003>
- [25] Vinoth, I. S., Detwal, S., Umasankar, V., & Sarma, A. (2019). Tribological studies of automotive piston ring by diamond-like carbon coating. *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces*, 13(1), 31–38. <https://doi.org/10.1080/17515831.2019.1569852>
- [26] Sánchez, N. A., Rincón, C., Zambrano, G., Galindo, H., Prieto, P., & Mihara, Y. (2000). Characterization of diamond-like carbon (DLC) thin films prepared by r.f. magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 12(3), 247–250. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01090-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01090-7)
- [27] Vargas Barrera, C., Capote Rodríguez, G., & Gutiérrez Bernal, J. (2018). Deposición de películas de carbono amorfo hidrogenado usando la técnica DC-pulsada PACVD. *Scientia Et Technica*, 23(2), 293-299. <https://doi.org/10.22517/23447214.17651>
- [28] Mihara, Y. (2017). Research trend of friction loss reduction in internal combustion engines. *Tribology Online*, 12(3), 82–88. <https://doi.org/10.2474/trol.12.82>
- [29] Norton, R. (2009). *Diseño de Maquinaria 4 ed.*, Mc Graw Hill. <https://eltrasteroloco.files.wordpress.com/2017/03/disemaquinarrobertlnorton.pdf>
- [30] Cruz, C. (1999), *Árbol de levas*. [Figura]. Recuperado de <https://sites.google.com/a/ieselcano.es/motores/componentes-motor-ci/arbol-de-levas?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>