

## DESGASTE ADHESIVO (SCUFFING) EN CAMISAS DE CILINDROS Y AROS DE PISTÓN DE MOTORES DIESEL LENTOS DE DOS TIEMPOS

EN ESTE TRABAJO SE DESCRIBE EL DESGASTE ADHESIVO (SCUFFING) QUE REPRESENTA LA MÁS SEVERA DE LAS AGRESIONES A LA QUE SE VEN EXPUESTOS AROS DE PISTÓN Y CAMISAS DE CILINDRO DE MOTORES DIESEL LENTOS DE DOS TIEMPOS APLICADOS A LA GENERACIÓN ELÉCTRICA, AL QUEMAR COMBUSTIBLES DE BAJO CONTENIDO EN AZUFRE. AL AFECTAR SIMULTÁNEAMENTE, A ESTOS DOS ELEMENTOS BÁSICOS DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN, REPERCUTE NEGATIVAMENTE TANTO EN LA CONTINUIDAD DEL SERVICIO DEL MOTOR, COMO EN LOS COSTES ASOCIADOS A LA RESTITUCIÓN DE LAS CONDICIONES NOMINALES DE TRABAJO.

LUIS CONDE CID

FRANCISCO FERNÁNDEZ VACAS

MIGUEL MARTÍNEZ MELGAREJO

ADHESIVE WEAR, KNOWN UNDER ITS MORE FAMILIAR ENGLISH NAME SCUFFING IS DESCRIBED IN THIS CONTRIBUTION. FOCUS WILL BE MADE ON SCUFFING AFFECTING CYLINDER LINERS AND PISTON RINGS OF TWO-STROKES CYCLE LOW SPEED DIESELS ENGINES APPLIED TO ELECTRICITY GENERATION, BURNING LOW-SULPHUR HEAVY FUEL OIL. SCUFFING IS THE MOST SEVERE TYPE OF WEAR TO WHICH PISTON RINGS AND CYLINDER LINERS ARE EXPOSED BECAUSE TWO MAIN BASIC COMPONENTS ARE IMPAIRED SIMULTANEOUSLY. AVAILABILITY TO KEEP THE ENGINE SAFELY RUNNING IS NO MORE POSSIBLE AND EXTREMELY HIGH REPARATION COSTS ARE RELATED TO GET THE NOMINAL SERVICE CONDITION AGAIN.

### INTRODUCCIÓN

A finales del siglo XIX el Dr. Rudolf Diesel enfrentó, a un tiempo, el desarrollo de una tecnología desconocida y la requerida por las máquinas térmicas de la época, con las siguientes condiciones de contorno:

- Diseño y construcción de un sistema de inyección de combustible de alta presión con suficiente precisión para crear, controlar e inyectar una determinada cantidad de combustible, cíclicamente.
- Diseño y construcción de una cámara de combustión que permitiera la obtención de mejores relaciones de potencia y rendimiento.
- La cámara de combustión así diseñada había de ser estancada bajo unas condiciones de presión de

compresión mayores que las usuales de acuerdo al estado de los avances tecnológicos de la época.

- La fricción de los componentes sometidos a tales presiones debía ser mínima.
- Diseño y construcción del más sencillo sistema de conexiones para las líneas de combustible de alimentación del nuevo motor.

Se presentaba, pues, un complejo problema tribológico formulado junto con las bases de diseño de uno de los inventos que ha revolucionado el pasado siglo XX: el motor de combustión interna alternativo (MCIA) en cualquiera de sus configuraciones, ya sea como motor de encendido provocado (MEP) o como motor de encendido por compresión (MEC). Una adecuada colaboración, aunque no siempre exenta de sinsabores, entre el

diseñador del motor y el suministrador del lubricante a lo largo de décadas ha logrado conseguir que el scuffing de camisas de cilindros y aros de pistón sea, sin embargo, un problema poco frecuente, apareciendo en casos en que la potencia específica ha crecido de forma considerable o como consecuencia de cambios, a veces radicales, de las condiciones de operación. Más recientemente, un grupo de usuarios ha dejado oír su voz ante instituciones autorizadas –CIMAC cuenta con un “User Group” ante el que se ha presentado información sobre severos incidentes- describiendo episodios de scuffing tanto en motores marinos, como en sus equivalentes en instalaciones estacionarias aplicados a la generación de electricidad. A pesar de la dilatada vida del problema, sólo unas pocas respuestas definitivas se han podido encontrar. Un mejor conocimiento de las circunstancias de iniciación de scuffing es un atractivo reto que es necesario afrontar con firmeza, pero con la certeza de su complejidad y extensión.

#### **INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE AZUFRE EN EL COMBUSTIBLE**

El cuidado del medio ambiente requiere el control de las emisiones de SOx procedentes de los gases de escape de instalaciones terrestres y de grandes buques. La IMO (International Maritime Organization) ha propuesto limitar a un 5 % en peso el porcentaje de azufre a nivel global y a 1.5 % en determinadas zonas especiales. En la Comunidad Canaria, esta limitación se mantiene desde hace más de cinco años en el 1 % en peso.

Las solicitaciones térmicas y mecánicas de los motores diesel lentos de 2T se han visto incrementadas en gran medida por la presión de los usuarios para disponer de mejores rendimientos, manteniendo la posibilidad de quemar combustibles

residuales. Además, se ha empezado a advertir la aparición de residuos en forma de lacas oscuras en el interior de las camisas de cilindros, y observado fallos severos ligados a la utilización de combustibles de bajo contenido en azufre, inicialmente tenidos como menos agresivos para el motor, que han ocasionado desgastes excesivos.

En función de estas condiciones de contorno, aparece la necesidad de analizar las anomalías causadas por el contenido de azufre y establecer qué acciones correctoras implantar.

#### **Anomalías causadas por la utilización de combustibles con alto contenido en azufre:**

- Desgaste corrosivo en las zonas de baja temperatura de los pistones y camisas de cilindros. El azufre contenido en el combustible origina la formación de  $H_2SO_4$  en las zonas subenfriadas de las camisas de cilindros. La creciente presión de trabajo de los motores actuales facilita que se alcance el punto de rocío de las especies corrosivas que no pueden ser neutralizadas por la reserva alcalina del aceite de lubricación. La utilización del denominado fuel BIA (bajo contenido en azufre;  $S < 1\%$ ) ha significado un decrecimiento muy significativo de este tipo de desgaste.

- Deposición de lacas negras en las zonas internas de las camisas de cilindros.

- Desgaste corrosivo por alta temperatura en las válvulas de escape, asientos de válvulas y zonas del pistón directamente expuestas a la combustión.

- Contaminación medioambiental por SOx.

#### **Anomalías causadas por la utilización de combustibles con bajo contenido en azufre:**

- Scuffing de camisas de cilindros o excesivo desgaste de aros de pistón y camisas. Este fenómeno puede ser

reconocido por la presencia de estrías ásperas uniformemente distribuidas a lo largo de las superficies que lo sufren. En situaciones críticas, el scuffing llega a producir la microsoldadura del material ocasionando arrastre de material. El scuffing está asociado a la presencia de zonas expuestas a alta temperatura, resultado del colapso de la película de lubricante. (foto 1)



Algunas de las teorías que tratan de explicar la aparición de este fenómeno son:

#### Exceso de basicidad en la cámara de combustión

Ante una excesiva capacidad de neutralización del lubricante de cilindros, bien por un alto BN del aceite o por alto BT, la reserva alcalina basada en aditivos de carbonato cálcico que no encuentran suficiente ácido sulfúrico para combinarse, forma depósitos en la corona del pistón, espacio comprendido entre la primera ranura y la cara del pistón expuesta a combustión, en forma de cenizas de muy alta dureza.

Estas cenizas se adhieren a la corona del pistón ocasionando un ligero desgaste abrasivo de las camisas del cilindro que permite cada vez mayor acumulación de cenizas de alta dureza. Estas cenizas presentan una gran avidéz por la absorción del lubricante, lo que lleva a un insuficiente reparto del

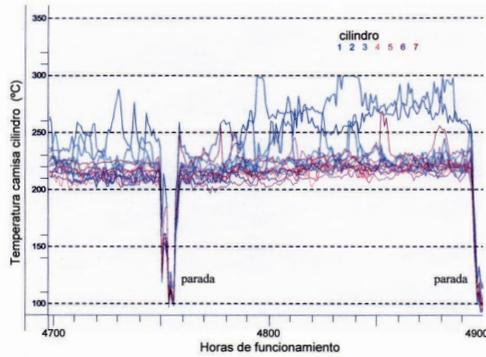
mismo, así como al bruñido de la camisa, con lo que el lubricante perderá opciones de encontrar pequeñas imperfecciones donde depositarse para cumplir su función.

La acción correctora más eficaz hasta el momento ha sido reducir el BN del lubricante, si bien no se ha mostrado como una solución definitiva.

#### Insuficiente entorno corrosivo

Recientes estudios han demostrado que la presencia de un entorno corrosivo debido a la actividad de los ácidos formados en el proceso de oxidación de los aceites bases, puede contribuir a la reducción del riesgo de scuffing. Como posible explicación, se supone que la actividad de los ácidos que contribuyen a minimizar el riesgo de scuffing es similar a la de los aditivos anti-scuffing comúnmente usados en lubricantes para engranajes, cojinetes u otras aplicaciones industriales.

La oxidación contribuye a un incremento en la viscosidad del lubricante, por lo que las investigaciones realizadas han tomado la viscosidad cinemática como variable independiente. De esta forma, se ha comparado el comportamiento de un mismo aceite base mezclado con productos de alta viscosidad, sin oxidación, con el comportamiento de dicho aceite sin aditivar en condiciones oxidadas. Se ha podido comprobar que mientras que el incremento de viscosidad puede tener un efecto reductor en la aparición de scuffing, su influencia es mucho menor que la derivada de la presencia de ácidos carboxílicos procedentes de la oxidación. Aunque este proceso no es bien conocido en la actualidad, se piensa que la mejora es debida a la deposición de los ácidos carboxílicos sobre los intersticios de las superficies sometidas a fricción. Sin embargo, estos ácidos incrementan el riesgo de corrosión, promueven la degeneración de las propiedades de los aditivos y



**FIGURA 1:** EL INCREMENTO DE TEMPERATURA EN DETERMINADOS CILINDROS, CON SEVERAS OSCILACIONES RESPECTO A SUS VALORES INICIALES, INDICAN QUE SE HA PRODUCIDO UN COLAPSO EN LA PELÍCULA DEL LUBRICANTE, POR LO QUE ENTRAN EN CONTACTO ZONAS DE LOS AROS DEL PISTÓN CON LA CAMISA DEL CILINDRO, CON LA POSIBLE APARICIÓN DEL SCUFFING.

estimulan la producción de residuos de alto peso molecular en forma de lodos.

En suma, puede concluirse que la tolerancia de un cierto ambiente corrosivo que lleve a la eliminación, supuestamente controlada, de las interfases sometidas a fricción no es el mejor procedimiento para reducir los episodios de scuffing en motores de altas solicitaciones termo-mecánicas.

#### Influencia de la duración del frente de llama

El centro de desarrollo de Shell en Amsterdam en colaboración con la prestigiosa firma Ricardo & Co. han investigado hace unos años este fenómeno utilizando una cámara de combustión sin turbulencia, similar a la utilizada en motores de 2T.

La filmación del proceso de combustión puso de manifiesto grandes diferencias en las características del frente de llama. Determinados combustibles residuales producían un frente de llama de muy corta duración, mientras que otros, también combustibles residuales pero de bajo contenido en azufre según la procedencia del crudo origen, mantenían una duración del frente de llama superior en varios casos a la correspondiente a combustibles más ligeros.

El significado de estas observaciones no ha sido suficientemente aclarado, dando paso a más preguntas

que respuestas. La transmisión de calor de las últimas fases del frente de llama es probablemente menor que en el caso de combustibles ligeros, pero de actividad suficiente para quemar, o al menos degradar la película de lubricante en caso de que el frente de llama alcance las paredes de la camisa.

Es necesario eliminar los perniciosos efectos de la alta temperatura de cilindros, especialmente cuando son ocasionados por la combustión de combustibles de bajo contenido de azufre.

#### SISTEMAS DE DIAGNOSIS PARA LA DETECCIÓN DE SCUFFING

Monitorizar la temperatura de metal de la camisa es la mejor herramienta para la detección del inicio de un proceso de scuffing. En el gráfico adjunto (Fig. 1) se reproducen los resultados del proceso mencionado, donde se observa con toda nitidez cómo se produce un incremento de temperatura acompañado de una severa oscilación respecto a su valor medio inicial. Este comportamiento de la temperatura del metal de la camisa indica que se ha producido el colapso de película del lubricante, entrando en contacto zonas de los aros de pistón con la superficie interior de la camisa, provocando el inicio de un proceso de scuffing

Otro sistema para detectar que un proceso de scuffing se está iniciando es la medición del desgaste del primer aro del pistón. Este tipo de sistemas, desarrollados por Wärtsilä NSD Switzerland Ltd., han contribuido a detectar con anticipación el inicio de los procesos de scuffing, permitiendo reducir el alcance de los daños producidos. Sin embargo, su concepción de funcionamiento, ya que ha de producirse el daño para que sea detectado, no protege al usuario de motores de 2T de sufrir este tipo de daños.

**ENUNCIADO DE CASOS Y ACCIONES REALIZADAS**

En los once motores de dos tiempos aplicados a la generación de energía eléctrica en plantas estacionarias en los que se ha seguido la aparición de daños por scuffing, la secuencia ha sido la siguiente:

**1.** Entrada en funcionamiento consumiendo un tipo de combustible según el emplazamiento cuyos requisitos generales se concretan en dos tipos de combustibles:



FOTO 2: CABEZA PISTÓN TRAS PROCESO SCUFFING. SE OBSERVAN RESTOS DE CENIZAS EN CORONA DE Y PASO DE RESIDUOS DE COMBUSTIÓN POR DERRAJO DEL ARO.

- Combustible fueloil residual de 180 cSt, porcentaje de azufre < 2.7 %
- Combustible fueloil residual de 380 cSt, porcentaje de azufre < 2.7 %

**2.** Por requerimientos medio-ambientales se pasa a consumir un combustible residual denominado BIA (bajo índice de azufre), en el que se limitó el porcentaje de azufre a valores inferiores a la unidad, manteniendo casi invariables



FOTO 3: DURANTE EL PROCESO DE SCUFFING SE HA PRODUCIDO EL COLAPSO DE LOS AROS EN SUS RANURAS.

el resto de parámetros. Inicialmente, también se conservó el tipo de lubricante de cilindros.

**3.** Tras un corto periodo de operación en estas condiciones, en los dos tipos de motores afectados, modelos B&W 10L67GBE y NSD 9RTA76 se presentaron episodios de scuffing de diferente severidad. (fotos 2 y 3). Como consecuencia, y sobre la base del análisis de las causas de aparición del scuffing

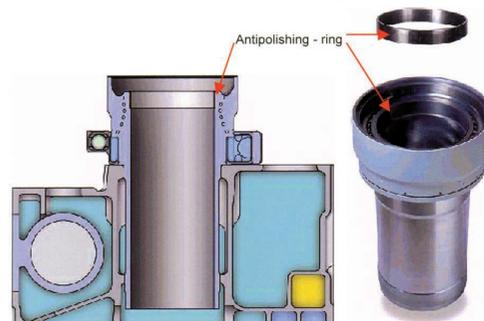


FIGURA 2: LA PARTE SUPERIOR DE LA CAMISA DEL CILINDRO SE EQUIPA CON UN ARO DE GRAN DUREZA, (ANTIPOLISHING-RING) PARA CONTROLAR Y MANTENER LOS DEPÓSITOS DE CARBÓN FORMADOS EN LA CABEZA DEL PISTÓN, DENTRO DE UN ESPESOR SUFICIENTEMENTE PEQUEÑO PARA PREVENIR CUALQUIER CONTACTO ENTRE LA CAMISA Y LOS DEPÓSITOS, EN CUALQUIER POSICIÓN DEL PISTÓN.

y de los sistemas de diagnóstico, se decide llevar a cabo en dichos motores las siguientes acciones:

**1.** Lubricantes de cilindros.

- Se han ensayado diversos tipos de lubricante hasta encontrar el mejor acuerdo entre basicidad, capacidad de neutralización, detergencia y dispersancia de los residuos de combustión. La solución de compromiso se basa en la utilización de lubricantes de 30 BN, ya que aportan suficiente detergencia y dispersancia, aunque la limitación de la capacidad de neutralización acorta la vida útil de aros de pistón y camisas de cilindros.

**2.** Elementos de la cámara de combustión.

- Modificación de la geometría de la parte superior de la camisa del cilindro, instalando un elemento de eliminación de residuos sólidos abrasivos. (Fig. 2)



4. Se ha iniciado la transformación de la cámara de combustión de los motores tipo WNSD 9RTA76, para permitir utilizar lubricantes de alta basicidad y poder detergente-dispersante, eliminar la deposición de cenizas en zonas del pistón y mantener una temperatura controlada de las camisas de cilindros en todo el recorrido útil de trabajo (fotos 4 y 5). Sólo con la adopción simultánea de medidas correctoras de tipo físico-químico y mecánico puede garantizarse un funcionamiento libre de scuffing, así como la restitución de las condiciones técnico-económicas de operación de motores de 2T quemando combustibles de bajo contenido en azufre.

#### BIOGRAFÍAS

##### LUIS CONDE CID

Doctor Ingeniero Industrial por la ULPGC, es Profesor Titular de Universidad del Dpto. de Ingeniería de Procesos, impartiendo docencia en el área de Máquinas y Motores Térmicos. Su línea de investigación abarca la renovación de carga de los motores de combustión interna y sus efectos contaminantes, sobre los que ha publicado diversos artículos en colaboración con el CEANI (ULPGC) y el grupo de MT de la ESII de Sevilla.

##### Dirección:

Dpto. de Ingeniería de Procesos.  
ULPGC  
Campus Universitario de Tafira  
e-mail: lconde@dip.ulpgc.es

##### FRANCISCO FERNANDEZ VACAS

Ingeniero Industrial, especialidad Técnicas Energéticas por la UPM. Realiza los estudios de doctorado en el Dpto. de Ingeniería de Procesos de la ULPGC. En la actualidad es coordinador de mantenimiento de motores diésel en la Subdirección de Producción UNELCO-ENDESA en Canarias.

##### Dirección:

UNIÓN ELÉCTRICA DE CANARIAS  
GENERACIÓN, S.A.  
Subdirección de Producción. Servicios

centrales de mantenimiento.  
Avda. José Ramírez Bethencourt, 22  
35004 Las Palmas de Gran Canaria.  
Tel.: 928 309 948 /Fax: 928 309 986  
e-mail: ffernandez@unelco.es

##### MIGUEL J. MARTINEZ MELGAREJO

Doctor Ingeniero de Minas es Catedrático de Universidad con docencia en Máquinas Eléctricas y Centrales Eléctricas.

Fue Director Técnico de Unión Eléctrica de Canarias S.A. durante 27 años, dirigiendo la construcción de la mayoría de las Centrales Eléctricas de las Islas Canarias.

Fue becario en Inglaterra por la Confederación de Industrias Británicas especializándose en: Reactores Nucleares, Turbinas y Generadores de Vapor, Alternadores, Interruptores y Transformadores de Potencia.

Trabaja en la línea de investigación en relación con el Análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia.

#### BIBLIOGRAFÍA

**COOK, S.J. (2001):** *Prevention of scuffing in 2-stroke crosshead marine diesel engines.* CIMAC Congress, Hamburg, pags. 1412-1417

**LIM, K. y LIDDY, J.J.P. (2000):** *Cylinder oils positioning for the future.* Marine Propulsion Conference, Amsterdam.

**PETERON, M.B. y WINER, W.O. (1982):** *Wear control handbook. Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication.* ASME, New York, pag.1182.

**SAYLES, R.S. (2000):** *A case study of cylinder liner wear in relation to varnish films in a large long stroke marine diesel engine.* SAE Paper 2000-01-1783.

**SCHENK, C., HENGEVELD, J. Y AABO, K. (2000):** *The role of temperature and pressure in wear processes in low speed diesel engines.* ISME Tokyo.

**WILSON, K. (1998):** *Cilindre liner scuffing in 2-strokes low speed engines as experienced by users WG members and others.* CIMAC Congress, Copenhagen.