

# **Mecanismo habitual del desgaste de válvulas de escape en motores de dos tiempos**

*Dr. Ing. Holger Fellmann, Director del depto. de Reparaciones de motores de dos tiempos; Märkisches Werk GmbH*

*Thomas Groß, Director del depto. de Desarrollo; Märkisches Werk GmbH*

*Torsten Ludwig, Director del depto. Comercial; Märkisches Werk GmbH.*

## **RESUMEN**

Los modernos componentes de válvulas de escape en motores de dos tiempos, especialmente el vástago de la válvula de escape, funcionan cada vez con mayor frecuencia en condiciones de carga límites. El conjunto del sistema de escape representa una parte del motor que soporta un coste importante, y que precisa de mucha revisión. Por ello, se hace evidente la necesidad de optimizar los periodos de revisiones, así como realizar el trabajo que sea necesario de forma correcta. Se trata de reducir los costes de funcionamiento a lo largo de un periodo de varios años mediante un programa de revisiones de gran calidad.

La experiencia en el campo de las reparaciones ha demostrado que diferentes tipos de válvulas de escape en motores de dos tiempos presentan diversos efectos debidos al desgaste, todos ellos identificables. En este documento se presenta la descripción y el análisis de estos efectos, y se dan soluciones a los mismos. Algunas de estas soluciones ya se aplican en el mercado, mientras que otros desarrollos novedosos están en fase de pruebas y ensayos.

## **Introducción**

La demanda del mercado de grandes buques portacontenedores, de hasta 8.500 TEU, así como de petroleros, sigue mostrando un crecimiento significativo. Esta demanda de más buques también afecta al sistema de propulsión, donde se están utilizando motores de dos tiempos con válvulas de escape. El número de motores de explosión crece continuamente desde que el diseño básico del motor diesel se supo fiable, con una buena relación calidad precio y con grandes periodos de funcionamiento. Durante la pasada década, los fabricantes de motores también se centraron en mejoras permanentes en el diseño, aumentando el rendimiento del motor y minimizando la contaminación.

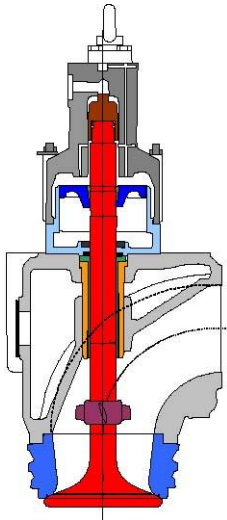
El aumento de la potencia de salida por cilindro del motor es consecuencia de un mayor rendimiento y de una mayor presión de explosión. Desde el punto de vista termodinámico, la temperatura de combustión aumentará con el aumento de presión. Cada vez más, las modernas válvulas de escape, especialmente los vástagos de válvula, operan en condiciones límites de carga. Con las presiones de explosión cerca de 150 bar, y mayores, el lado inferior del vástago de la válvula de escape alcanza temperaturas de aproximadamente 650°C.

El segmento de mercado de Märkisches Werk GmbH (MWH) es desarrollar y fabricar componentes de escape para grandes motores diesel de dos y cuatro tiempos. MWH ha revisado fabricantes de motores y usuarios por todo el mundo con componentes de culatas de cilindros durante más de cincuenta años. Durante los últimos quince años MWH se ha centrado en mejorar y optimizar la carga de gas y la respuesta de la válvula de escape para motores de dos tiempos. El conocimiento obtenido como desarrollador y fabricante de componentes de culatas de cilindros, junto con la experiencia de refabricar válvulas de escape, ha llevado a MWH a alargar la vida útil de los componentes y a prolongar el tiempo entre revisiones del motor.

## Válvula de escape de motores de dos tiempos.

Este documento se centra en motores de dos tiempos con válvulas de escape, diseñados por los siguientes fabricantes de motores: MAN-B&W (serie MC), Wärtsilä-Sulzer (serie RTA) y Mitsubishi (serie UEC). Actualmente, hay una población de unos 8.000 motores MC, 2.000 motores RTA y 500 motores UEC funcionando en todo el mundo. El diseño de las válvulas de escape de los tres fabricantes de motores difiere en detalles, pero, en general, la función es la misma, véase figura-01.

Los principales componentes de MC, RTA y UEC son:



- Transmisión de válvula o actuador hidráulico
- Cilindro de aire
- Alojamiento de válvula
- Guía de válvula
- Vástago de válvula
- Pieza de fondo o anillo de asiento

Figura 01. Componentes principales de una válvula de escape.

El vástago de una válvula de escape puede estar fabricado en diferentes materiales. Los vástagos estándar de válvula se fabrican en acero resistente al calor y tienen una zona de asiento con la cara endurecida. Estos vástagos se están usando en todos los motores UEC y en parte de los motores MC. Los vástagos Nimonic de válvula se fabrican en un material basado en el níquel con muy buenas propiedades mecánicas, y se están utilizando en todos los motores RTA y en parte de los motores MC.

Todos los vástagos de válvula de escape están provistos de un dispositivo que gira la válvula. Mientras los motores UEC están equipados con un dispositivo hidráulico, los vástagos de válvula de motores MC y RTA llevan instalada una rueda de aletas (con buje), la cual utiliza el gas de escape para hacer girar el vástago de válvula.

### El significado de ahorrar dinero

Nadie ahorra dinero con una reparación barata o mal realizada. Una buena reparación, llamémosla una re-fabricación, sustituye una pieza vieja por una nueva. Como veremos más adelante, existen procedimientos especiales para hacer más una refabricación, que sólo una reparación. Por ejemplo, puede fabricar un vástago de válvula con propiedades similares al Nimonic a partir de un vástago estándar de válvula, si usa el procedimiento correcto y tiene conocimientos para ello.

### Mecanismo habitual del desgaste de válvulas de escape en motores de dos tiempos

Se han de considerar algunas condiciones de funcionamiento, como la calidad del combustible, pues están ahí. Es un hecho real que un combustible pobre aumenta el desgaste de los componentes. Además, el combustible barato lleva a reducir la vida útil de los componentes. El desgaste de los componentes de válvula de escape normalmente se debe al mecanismo siguiente:

## Adherencia y desgaste por abrasión

La adherencia y el desgaste por abrasión aparecen muy a menudo en la zona de estanqueidad del vástago de la válvula MC muy cromado, (véase la figura 02). Normalmente, el límite de este diámetro de vástago se alcanza transcurridas 12.000 - 18.000 horas. Los vástagos de válvula de MC con revestimiento de vástago HVOF, así como vástagos de válvula de RTA y de UEC con vástagos muy cromados, alcanzan un TBO (tiempo entre revisiones, *time between overhaul*) de 24.000 – 36.000 horas.



Figura 02

Adherencia física y desgaste por abrasión de un vástago de válvula muy cromado (de tipo MC tras 15.000 horas)

Gracias a las favorables propiedades de lubricación del permanente flujo de aceite de lubricación del sistema hidráulico, el pistón y el revestimiento de la transmisión de la válvula y del cilindro de aire muestran únicamente una adherencia y un desgaste por abrasión, mínimos. Esto lleva a un TBO de más de 72.000 horas para motores de tipo MC, RTA y UEC.

## Formación de depósitos y marcas de dientes

Los depósitos formados sobre una válvula de escape proceden de la reacción de los contaminantes que lleva el combustible y el aceite de lubricación durante la combustión, así como de la reacción de los productos de combustión con el material de la válvula. El azufre, vanadio y sodio del combustible se oxida durante el proceso de combustión. Los productos sólidos de la combustión, las partículas de escorias y las partículas duras de  $Al_2O_3$  y  $SiO_2$  (productos catalíticos de síntesis) se someten a presión en el interior del asiento de válvula, formando dientes (NANDA 2003).

La probabilidad y la intensidad de las marcas de dientes están directamente relacionadas con la combinación del asiento de vástago de válvula y de la pieza inferior. En los tipos RTA y UEC la dureza del material de asiento es de unos 400 HV para el vástago de válvula y para la pieza inferior; la dureza de los tipos MC es de unos 400 HV para el asiento del vástago de válvula y de unos 500 HV para el asiento de la pieza inferior.

La presión de asiento y la velocidad de sellado también son factores importantes en las marcas de dientes. El tipo MC tiene una presión de asiento ( $> 700$  bar) mayor que la de los tipos UEC y RTA (de aproximadamente 550 bar). Normalmente, 550 bar da una buena estanqueidad y poco desgaste. (KINGSTON-JONES, THOMAS, RAD-CLIFF 1990).

El tipo MC presenta, junto con alta presión de asiento y más dureza de asiento para la pieza inferior, la probabilidad e intensidad de marcas de dientes mayores, con un TBO de 6.000-18.000 horas

(véase la figura 03). Los asientos de los tipos RTA y UEC requieren revisiones tras 12.000 - 36.000 horas.



*Figura 03: Las marcas de dientes normales del asiento de válvula (tipo MC60 Nimonic tras 8.300 horas)*

En función del diseño de la guía de válvula, su diámetro interno mostrará la formación de más o menos depósitos. El gas de escape se introduce en la tolerancia entre el vástago del vástago de válvula y el diámetro interno de la guía de válvula, lo que permite la formación de depósitos dentro de la guía (véase la figura 04). Por ello, los tipos MC necesitan una sustitución de la guía de válvula entre 6.000 - 8.000 horas para minimizar el riesgo de que el vástago de válvula se quede pegado a la guía.

La guía de válvula de los tipos UEC y RTA mostrará los mismos depósitos, pero después de un periodo mucho mayor (el TBO es de 24.000 a 36.000 horas).

Para desmontar las válvulas de escape, normalmente se necesita energía hidráulica para sacar el vástago de válvula de la guía de válvula. En algunos casos, la guía de válvula se ha pegado de tal forma que ésta se rompe durante la operación (véase la figura 04a y 04b).



*Figura 04a: rotura de la guía de válvula durante el desmontaje del vástago de válvula.*



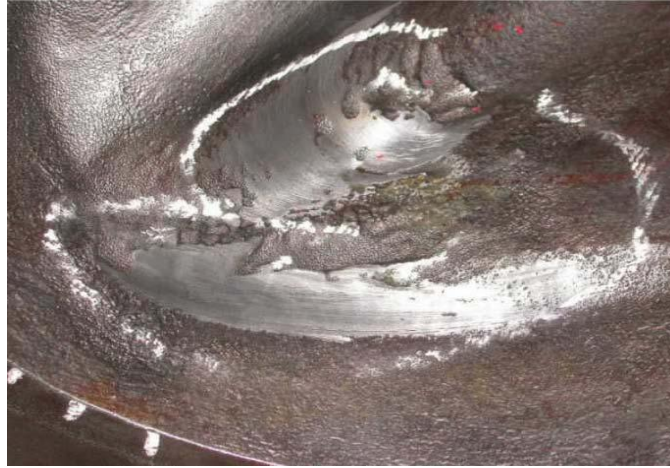
*Figura 04b: depósitos típicos en el diámetro interno de la guía de válvula (tipo MC70 tras 8.200 horas)*

## **Corrosión por baja temperatura**

El combustible pesado contiene una gran cantidad de azufre (hasta un 5%). Si existe una superficie expuesta donde la temperatura esté por debajo del punto de rocío del ácido sulfúrico, el ácido se condensa y puede atacar las superficies de metal. Si se condensa una gran cantidad de ácido sulfúrico concentrado, puede atacar el alojamiento de la válvula, la pieza de fondo, la guía de



válvula y el vástago del vástago de válvula. El ácido sulfúrico tiene un efecto extremadamente corrosivo sobre el hierro fundido (BEHRENS, GROTH 1990). Prácticamente todos los componentes del canal de gas de escape muestran alguna corrosión por baja temperatura (véase las figuras 05, 06 y 07).



*Figura 05: corrosión por baja temperatura del alojamiento de válvula (tipo MC 43.700 horas)*



*Figura 06: corrosión por baja temperatura de la pieza de fondo (tipo RTA tras 28.420 horas)*



*Figura 07: corrosión por baja temperatura (ataque con corrosión crateriforme) por debajo del radio de cabeza del vástago de válvula (MC60-estándar / 22.700 horas)*

## **Corrosión por alta temperatura**

En motores de combustible pesado, la corrosión por alta temperatura se debe a la presencia de azufre, vanadio y sodio en el combustible. El vanadio y el sodio están presentes en combustibles pesados en proporciones que llegan, respectivamente, a las 600 p.p.m. y 200 p.p.m. (ISO 8217, 2003). Estos pueden formar sodio-vanadil-vanadatos en diferentes estructuras durante el proceso de combustión. Estas sales semi-líquidas, pegajosas, de bajo punto de fusión junto con gases que contienen óxido de azufre, son la causa fundamental de corrosión debido al tránsito de sus oxígenos (HESSE 1981, BLUDSZUWEIT 2000).

Debido a los procesos físicos mencionados anteriormente, se puede describir el siguiente mecanismo de desgaste. Los depósitos duros de sal sobre las superficies del asiento de la válvula llevan a marcas de dientes causadas por cada carrera de cierre del vástago. Esto puede ocasionar cruciales microcanales de gas, los cuales crecen con el tiempo (NANDA, 2003). Debido a la alta temperatura, los depósitos de sal alcanzan su punto de fusión y, a continuación, comienza la “corrosión de guijarro” (véase la figura 08) en el asiento y, al final, aparece el escape de gas por un mal asiento de las válvulas (UMLAND 1975, RITZKOPF 1975). Resultado: se ha de reparar toda la válvula de escape.



*Figura 08: el aspecto de la “corrosión de guijarro” del fallo del vástago de válvula debido a corrosión por alta temperatura (tipo estándar MC60)*

La parte inferior del vástago de válvula casi siempre está operativa en la zona crítica de corrosión por alta temperatura, que se vio como “corrosión de guijarro”. La velocidad de desgaste está entre 0,2 - 1,0 mm / 1.000 horas, en función del material de la válvula y del tipo de motor. El límite para la re-fabricación únicamente se alcanza después de 12 mm. Esto lleva a un TBO de unas 12.000 - 60.000 horas. La figura 09 muestra micro cortes de Nimonic con corrosión por alta temperatura.

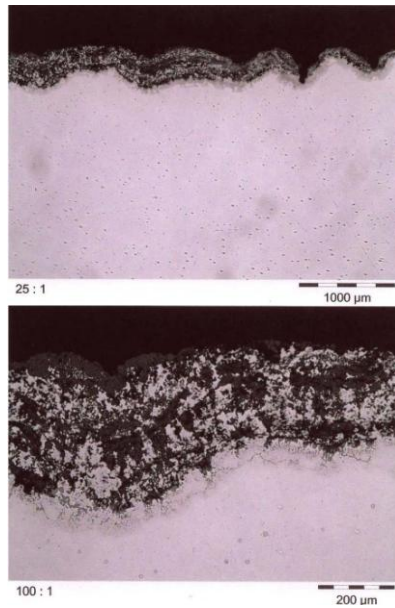


Figura 09: microcortes de Nimonic con corrosión por alta temperatura.

### Fatiga por un número pequeño de ciclos

El vástago de válvula es el componente que experimenta la máxima tensión térmica. La mayor parte de los problemas de fatiga están documentados en los vástagos de válvula. La figura 10 muestra una distribución típica de calor en una cabeza de válvula Nimonic.

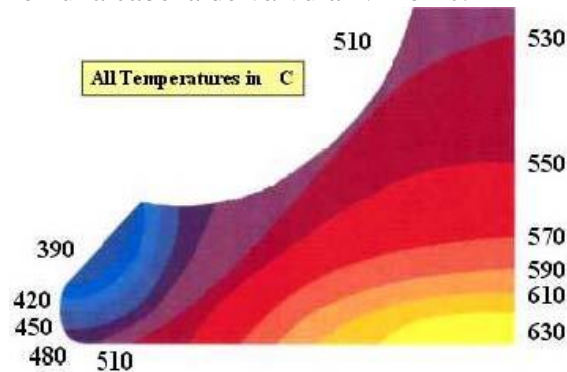


Figura 10: distribución habitual de temperaturas en una cabeza de válvula de escape Nimonic

La máxima tensión térmica tiene lugar durante el periodo de calentamiento. En este periodo, la temperatura en el centro de la parte inferior de la válvula y en el asiento alcanza la máxima diferencia. En condiciones normales de funcionamiento, la distribución de temperatura es mucho menor. La carga mecánica del vástago de válvula es casi constante entre el calentamiento y el funcionamiento normal, véase la figura 11.

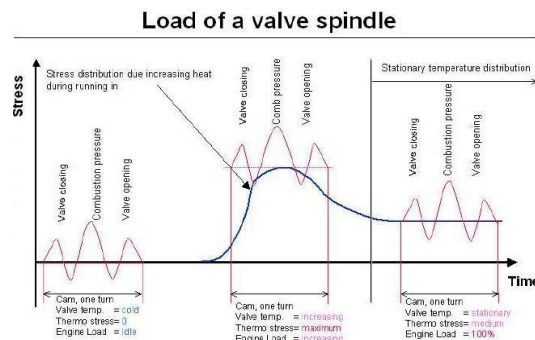


Figura 11: carga mecánica y térmica en función de la marcha durante el funcionamiento estacionario

Los conos de válvula RTA están sujetos a las más altas temperaturas de funcionamiento. Los conos de motores MC y UEC se diseñaron para temperaturas más bajas y propiedades mecánicas no tan exigentes.

Aunque los vástagos de válvula estándar tienen desventajas en relación con la corrosión por alta y baja temperatura, no tienen las ventajas relativas a la fatiga por un número pequeño de ciclos. Las desventajas de los conos estándar de válvula raramente ocasionarán fallos catastróficos. La calidad de la reparación se puede medir comparando los TBO. El diseño de conos de válvula normalmente tiene en cuenta la combinación de carga mecánica y térmica del motor. Pero, la adición de tensión residual, ocasionada por un forjado, una soldadura o un tratamiento térmico no profesional durante el proceso de fabricación, puede ser crítica. Además, las reparaciones no profesionales, incluyendo soldadura y tratamiento térmico, pueden añadir tensión residual adicional, que lleve a fallos catastróficos. En particular, los vástagos de válvula Nimonic requieren soldadura y tratamiento térmico excelentes. Existen dos razones típicas para los fallos. Una es una grieta que comienza por debajo del radio de la cabeza. Una vez que las micro grietas tengan una longitud crítica, la velocidad del crecimiento de la grieta aumenta. Sigue un fallo catastrófico, con partes de la válvula cayendo en la cámara de combustión (véase la figura 12 y 13).



*Figura 12: fallo catastrófico de un vástago reparado de válvula (RTA72 tipo Nimonic, 740 horas después de la reparación)*

*Figura 13: macro corte por el centro de una cabeza de válvula (RTA62 tipo Nimonic, 6.430 horas tras la reparación).*



La segunda causa de fallo es: el inicio de micro grietas en el diámetro externo de la parte inferior de la válvula. Tras alcanzar la zona de asiento se crean fugas de gases de escape por mal asiento y el vástago de válvula se destruye (véase la figura 14).





Figura 14: fallo de un vástago de válvula (RTA84 tipo Nimonic, 5.270 horas tras la reparación).

### **Procedimientos para reducir los costes de funcionamiento**

Desde la re-fabricación hasta proporcionar revisiones correctas – hay varias formas de reducir los costes globales de funcionamiento para motores diesel de dos tiempos.

Una es poner el énfasis en revisiones del conjunto de gran calidad para asegurar que los motores funcionan fiable y eficazmente. Otro punto de atención sería mejorar el ajuste de los motores en funcionamiento. Esto se puede realizar mediante sistemas móviles de diagnóstico y desarrollos técnicos.

### **Refabricación cualificada**

MWH utiliza la palabra “re-fabricación” en lugar de “reparación” o “reacondicionamiento” con el fin de distinguir su proceso controlado, de los típicos procedimientos de reacondicionamiento disponibles en el mercado. Si los usuarios de motores quieren optimizar los servicios que reciben, tienen que trabajar con socios fiables. Estos socios deben realizar los diferentes procedimientos de refabricación con el mismo cuidado y precisión que el fabricante. La solución es tener todos los componentes del motor reparados únicamente por centros homologados que tengan conocimientos de producción y una larga experiencia en todos los campos de la refabricación.

La válvula de escape para motores de dos tiempos es un sistema complejo. Cualquier actividad de revisión afecta a todos los componentes (por ejemplo, el vástago de válvula, la pieza de fondo, el alojamiento de válvula). En lo que sigue, nos centraremos en el componente más sensible – el vástago de válvula.

### **Vástagos estándar de válvula**

Hay montones de empresas que proporcionan revisiones y reparaciones para conos estándar de válvula. Si el cliente no tiene ningún deseo de alargar la vida útil o de optimizar el componente para el futuro, hay un número incontable de empresas que puede hacer la reparación.

### **Conos de válvula Nimonic**

Al observar los conos de válvula Nimonic de mayor coste, la situación cambia completamente. Solo algunas empresas son competentes a la hora de realizar reparaciones en vástagos de válvula Nimonic. Lo más frecuente es que el usuario del motor quiera tener su vástago de válvula Nimonic reparado, debido al valioso material. Para refabricar Nimonic, se precisa un “saber hacer” muy especial. El efecto habitual del desgaste en Nimonic 80A es fatiga por un pequeño número de ciclos. La grieta se desarrolla en la zona de máxima tensión debido al daño ocasionado en la micro estructura por el procedimiento de soldadura o por un tratamiento térmico posterior insuficiente. Una reparación inadecuada lleva a fallos fatales al caer pequeñas partes del vástago en la cámara de combustión.

## Procedimiento Nimalike

Nimalike es el procedimiento estrella de los procedimientos de re-fabricación. MWH es uno de los fabricantes y centros de reparaciones líderes que son capaces de trabajar con Nimalike. Nimalike se usa de dos formas: para alargar el tiempo de vida de un vástago de válvula estándar hasta una vida útil similar al Nimonic, o para refabricar vástagos de válvula Nimonic de una forma que lleve a la condición de “cercano al nuevo” tras el procedimiento (véanse las figuras 15 a/b).



Figura 15 a/b: vástago de Nimalike antes y después de la refabricación.

La competencia para realizar este procedimiento de re-fabricación es una combinación de larga experiencia en este campo y de tecnología de fabricación. La experiencia está asociada con mejoras continuas en los procesos de fabricación y un I+D intensivo en los campos de la metalurgia y de los procedimientos de soldadura (véase la figura 16).



Figura 16: soldadura PTA

## Revisión: sistemas móviles de diagnóstico

Siempre que sean necesarios diagnósticos a bordo, significa una gran inversión en dinero y tiempo. Normalmente, el análisis online es muy complicado y sólo es para grandes instalaciones.

Por esta razón, el MWH proporciona el “Sistema de medida de fugas”, un sistema móvil de diagnóstico que es capaz de detectar fugas en la culata del cilindro para impedir fallos fatales de un motor en marcha. El principio se basa en medir ultrasonidos usando un sensor sencillo y robusto (WEHNER, ALBERT 2001).

Con un sistema de medidas tan compacto como este, el usuario del motor es susceptible de averiguar en qué estado se encuentra el motor y cuando se han de adoptar las siguientes acciones relativas a la revisión.

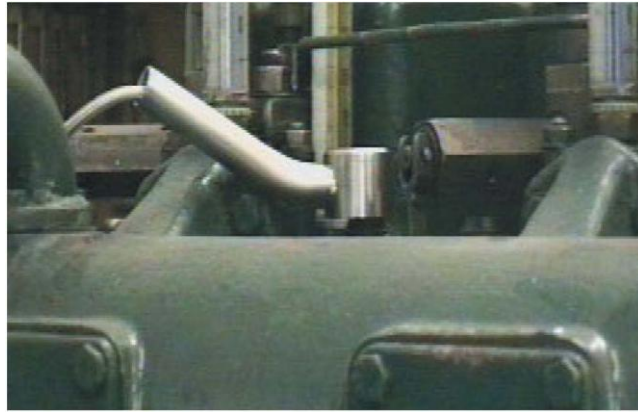


Figura 17: sistema de medida de fugas a bordo, durante el uso

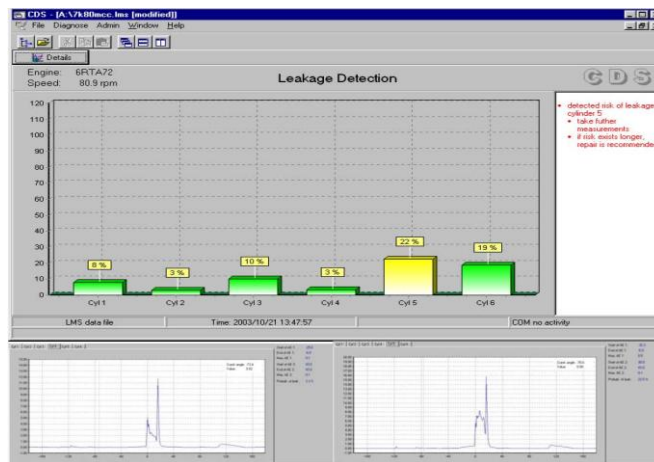


Figura 18: la documentación del resultado de la detección de fugas y el ajuste/retraso de ignición

### Rotador de válvula de motor de dos tiempos (Turnomat)

En 1983, MWH desarrolló y patentó el rotador de válvula Turnomat para motores diesel de cuatro tiempos. Desde entonces, innumerables motores llevan instalado el Turnomat® y los TBO se han ampliado. Veinte años más tarde, MWH ha desarrollado un rotador de válvula para válvulas de gases de escape para motores de dos tiempos que responde mucho mejor que las ruedas de paletas. La idea de nuestros ingenieros era la de ampliar el TBO de las válvulas de escape de motores de dos tiempos de tipo MC, de 6.000 a 18.000 horas.

El rotador de válvula fuerza un giro de válvula preciso y fiable al cerrar la válvula. El principio de Turnomat® es sencillo y sorprendentemente eficaz: el movimiento de rotación forzado crea una energía de rotación determinada para la válvula en el instante de tomar asiento. Esto ocasiona el deseado efecto de pulido, retirando los depósitos de combustión entre el vástago de válvula y el asiento de válvula y, al mismo tiempo, optimiza el intercambio de calor hasta el asiento de la válvula del enfriador.

El giro también induce una distribución equilibrada de temperatura por toda la cabeza de la válvula, reduciendo, de este modo, la tensión térmica inducida. Se están realizando los primeros ensayos de campo con un motor MC70. Las inspecciones han demostrado que el Turnomat® funciona tal y como fue diseñado (véase la figura 19).



Figura 19: el anillo de asiento y el vástago de válvula no muestran marcas después de unas 1.000 horas.

## Sumario.

Las potencias nominales de los modernos motores de dos tiempos con válvulas de escape han aumentado significativamente, paralelamente al deterioro en la calidad del combustible. Las válvulas de escape operan a cargas térmicas cada vez mayores y en entornos cada vez más corrosivos. Utilizando como base nuestra propia experiencia en revisiones durante la última década, investigamos y estudiamos los mecanismos habituales del desgaste de válvulas de escape en motores MC, RTA y UEC. En el accionador de válvula, botella de aire y vástago de válvula, encontramos adherencia y desgaste por abrasión. La formación de depósitos en las guías reduce la rotación del vástago de la válvula y se traduce en carga térmica no simétrica. Los depósitos y las marcas de dientes formadas sobre el asiento del vástago de válvula pueden ocasionar microcanales de gas, que crecerán con el tiempo. La “corrosión de guijarro” se inicia en el asiento y, al final, termina por crear fugas de gas en el asiento.

Al utilizar el novedoso desarrollo de Turnomat para dos tiempos, se puede reducir mucho la formación crítica de depósitos entre el vástago de válvula y el asiento. La realización de pruebas de campo también ha demostrado las ventajas de Turnomat al impedir que se pegue el vástago de válvula a la guía.

Prácticamente todos los componentes del canal de gases de escape entran en contacto con ácido sulfúrico procedente de la condensación del gas de escape (corrosión por baja temperatura). Además, la parte inferior del vástago de válvula está sometida a la “corrosión de guijarro” (corrosión por alta temperatura) con una velocidad de desgaste de 0,2 - 1,0 mm / 1.000 horas.

Los conos estándar de válvula pueden ser actualizados con el procedimiento *Nimalike* para conseguir una vida útil similar al Nimonic. Los procedimientos usados para refabricar los vástagos de válvula Nimonic (incluyendo soldadura y tratamiento térmico) son críticos para impedir la fatiga por un pequeño número de ciclos. Una reparación inadecuada lleva a un fallo catastrófico. Aunque los vástagos estándar de válvula tienen desventajas en relación con la corrosión por baja y alta temperatura, tienen ventajas respecto de la fatiga por un pequeño número de ciclos.

## Bibliografía

- S. K. NANDA "Exhaust valve failure under residual fuel operation" Journal of Marine Design and Operations, No.B2 (2003)
- M. G. KINGSTON-JONES, J. R. THOMAS, S. RADCLIFF "Review of operating experience with current valve materials" Diesel engine combustion chamber materials for heavy fuel operation DTI/Industrie Valve Project p.15-28 (1990)
- R. BEHRENS, K. GROTH "Problems caused by burning heavy fuels in diesel en-gines" Diesel engine combustion chamber materials for heavy fuel operation DTI/Industrie Valve Project p.29-38 (1990)
- A. HESSE "Beitrag zur Verhinderung der Hochtemperaturkorrosi-on an Auslassventilen von Dieselmotoren bei der Verbrennung von Mischkraftstoffen. Dissertation Universität Hannover (1981)
- S. BLUDSZUWEIT, H. J. JUNGMICHEL, B. BUCH-HOLZ, K. PRESCHER, H. G. BÜNGER „Mechanisms of high temperature corrosion in turbo-chargers of modern four-stroke marine engines“ Motor Ship Conference Amsterdam (2000)
- M. RITZKOPF "Untersuchungen von Korrosionserscheinungen an Bau-teilen in Dieselmotoren" Dissertation Universität Münster (1975)
- F. UMLAND, M. RITZKOPF "Ventilkorrosion in Dieselmotoren:Teil 1 " MTZ-Motortechnische Zeitung, 36. H7/8 p.191-195 (1975)
- K. WEHNER, W. ALBERT "Erkennung von Undichtigkeiten des Brennraumes von Dieselmotoren" Beiträge des IBZ 9 p.97-110 (2991)