

ESTUDIO DE LA FATIGA EN LOS COMPONENTES DE UN MOTOR BICOMBUSTIBLE GASOLINA-GAS NATURAL COMPRIMIDO

JHON RAMIRO AGUDELO

Ingeniero Mecánico, PhD en Termoenergética, Universidad de Antioquia, Grupo GASURE.

CRISTIAN CAMILO VIÁFARA

Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Grupo de Tribología y Superficies.

JUAN FERNANDO BOTERO

Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

RESUMEN:

Se realizó un estudio del efecto que tiene el gas natural comprimido (GNC) en el proceso de combustión de los motores de encendido provocado (MEP), que resulta en un incremento de las temperaturas de operación de algunos de sus componentes. Se llevó a cabo un estudio experimental de caso con una válvula de escape de un motor bicomcombustible, por medio de ensayos de dureza y observación visual y metalográfica. La falla de la válvula es causada por la pérdida de resistencia del material, dada su inestabilidad cuando es sometida a altas temperaturas de operación. Esto es explicado por el crecimiento anormal de grano en su microestructura, observado en las micrografías tomadas del material de la válvula.

PALABRAS CLAVES: Gas natural comprimido (GNC), Motores de encendido provocado (MEP), Fatiga térmica, Crecimiento anormal de grano.

ABSTRACT:

A study of the effect of the compressed natural gas (CNG) on combustion process of spark ignition (SI) engines was made; that produces higher operating temperatures in its components. It was carried out an experimental case study with a bifuel SI engine exhaust valve, by means of hardness tests and visual and metallographic examination. The valve failure was caused by resistance loss of material, due to its instability when it is subjected to high operating temperatures. It is explained by the abnormal grain growth of microstructure, observed in the micrographics taken of valve material.

KEYWORDS: Compressed natural gas, Spark ignition engine (SI), Thermal fatigue, Abnormal growth grain.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha llevado a cabo una campaña para reducir el consumo energético mundial, que busca promover la conservación de los combustibles convencionales y disminuir los daños ambientales causados por las emisiones de sustancias nocivas durante la conversión de energía (Agudelo et al., 2000). En Colombia, el sector del transporte consume más de la tercera parte de la energía primaria, dependiendo a su vez casi en su totalidad de los derivados del petróleo. Por esta razón, el gobierno nacional ha impulsado recientemente la utilización del gas natural comprimido (GNC) en el sector transporte dentro de su programa de masificación de gas y diversificación energética, aprovechando las reservas que se tienen en el país (Amell y Agudelo, 2002).

Uno de los problemas que se han presentado en la campaña nacional para impulsar el uso de los motores a gas natural, ha sido la falla por fatiga térmica de algunos componentes del motor. Esto a causa de los cambios que se producen en el proceso de combustión, que llevan a mayores temperaturas de trabajo en tales componentes (Acevedo y Agudelo, 2002).

En este trabajo, se realiza un análisis del efecto del uso del gas natural sobre el incremento en la temperatura de operación de un motor de encendido provocado (MEP) en modo bicomcombustible. Para tal fin se ha tomado como ejemplo el análisis de falla de una válvula de escape, de un motor convertido de gasolina a GNC, para determinar la influencia de la fatiga térmica en su agrietamiento. Para lograr el objetivo se llevó a cabo una revisión teórica del proceso de combustión en un motor alimentado con gasolina y de la fatiga térmica en aleaciones metálicas. Además, se realizaron ensayos experimentales que consistieron en pruebas de dureza y observación visual y metalográfica de la válvula.

Combustión del GNC en un MEP

El uso del gas natural como combustible en los motores de combustión interna alternativos (MCIA) es viable tanto en los motores de encendido por compresión (MEC) como en los de encendido por provocado (MEP). Sin embargo, el metano (CH₄), constituyente principal del gas natural, limita su empleo principalmente a los MEP, ya que su estructura molecular posee una alta estabilidad que refleja una gran resistencia al encendido

por compresión (Yoseffi et al., 2000). Así, es preciso realizar un estudio del proceso de combustión de los MEP únicamente.

El proceso de combustión como tal, que constituye la transformación de la energía química del combustible en energía térmica, se lleva a cabo en una pequeña etapa, en la que el pistón se acerca y se aleja del punto muerto superior (PMS). Un análisis detallado de este proceso, lleva a diferenciar tres fases, las cuales se definen a continuación (Sasaki y Nakashima, 2000):

- Desarrollo de llama laminar o tiempo de retraso (10%).
- Etapa de quemado rápido (85%).
- Período de enfriamiento o de combustión controlada (5%).

La Figura 1 ilustra las tres fases en un gráfico de presión contra grados de giro del cigüeñal ($^{\circ}$ AC).

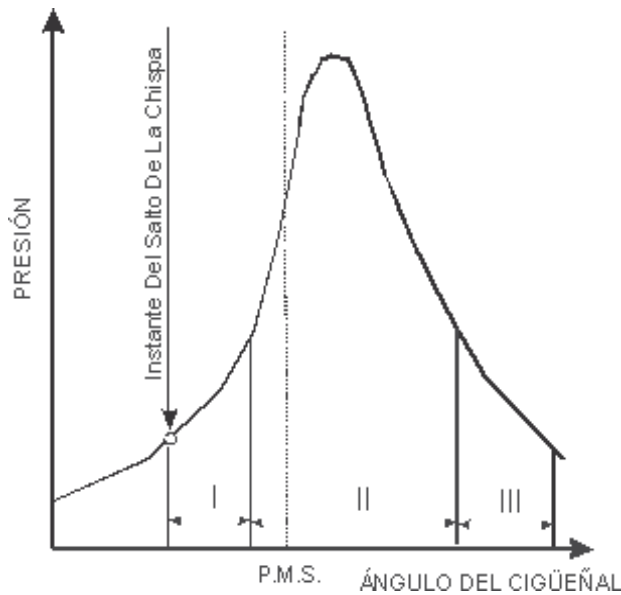


Figura 1. Variación de la presión con grados de giro del cigüeñal, donde se señalan las 3 etapas de la combustión (Jóvay y Máslov, 1978).

El tiempo de retraso se mide en $^{\circ}$ AC desde el momento en que salta la chispa hasta cuando la liberación de calor del combustible es suficiente para garantizar la inflamación completa de la mezcla. Durante la etapa de combustión rápida, la velocidad de reacción aumenta violentamente, presentándose la mayor proporción de mezcla quemada (aproximadamente 85%) (Heywood, 1988). Finalmente la etapa de combustión controlada se caracteriza por el quemado completo del combustible.

Cuando el combustible de un MEP diseñado para gasolina se reemplaza por GNC ocurren una serie de cambios en los parámetros de la combustión que afectan principalmente la primera fase, caracterizándose el GNC por tener un tiempo de retraso del orden del doble que la gasolina (Sasaki y Nakashima, 2000). Este parámetro es fundamental porque determina el avance correcto de la chispa. En un estudio de (Jones y Evans, 1985) se mostró que el GNC aún bajo condiciones de alta presión y temperatura mantiene su velocidad de combustión laminar del orden de la mitad que otros hidrocarburos similares a la gasolina, y que su

efecto no obstante ser muy notorio en la fase inicial de la combustión, se compensa a medida que entra la fase de combustión rápida, caracterizada por un elevado nivel de turbulencia. Este fenómeno provoca un desplazamiento en torno a 12° AC en el proceso, manteniendo aproximadamente constante la pendiente de la curva de fracción de combustible quemado, lo que implica una velocidad de combustión turbulenta similar en ambos combustibles.

Por otro lado, la composición química del GNC, hace necesario que se le suministre una mayor cantidad de energía para romper sus enlaces, lo cual está relacionado con la energía de encendido (Acevedo y Agudelo, 2002). Esta primera característica hace que el tiempo de retraso se eleve considerablemente y por tanto la combustión inicie en un momento desfavorable de presión y temperatura.

Otro cambio se debe al estado gaseoso del GNC que, a diferencia de los combustibles líquidos, no presenta calor latente de vaporización. La presencia de esta energía provoca una disminución en el calor a disipar del interior de la cámara, evitando así el sobrecalentamiento de las paredes de la cámara y de los demás componentes del motor (Kato et al., 1999). La vaporización de la gasolina en un MEP puede representar un enfriamiento promedio de 20° C en las temperaturas de operación de los componentes del motor (Heywood, 1988), situación que no ocurre con el GNC y que influye por tanto en el incremento de la temperatura de operación.

Los factores anteriores modifican el proceso de combustión al emplear como combustible el GNC en lugar de la gasolina; esto contribuye al aumento de la temperatura en los componentes del motor, lo cual ocasionar su falla por fatiga térmica.

Fatiga Térmica en motores a GNC

Las cargas cíclicas variantes producen fallas estructurales para valores de esfuerzos menores que para una falla bajo cargas estáticas. Este fenómeno conocido como fatiga se define como (ASTM): *el proceso de permanente y progresivo cambio estructural localizado, el cual ocurre en un punto del material sujeto a esfuerzos y deformaciones de amplitud variable, los cuales producen grietas que llevan a la falla total después de cierto número de ciclos.*

En el caso de la fatiga térmica, lo anterior se presenta debido sólo a la acción de variaciones cíclicas en temperatura sin la influencia de cargas externas. Esto es atribuido a los esfuerzos internos creados por la anisotropía de la expansión térmica. Sin embargo, en algunos componentes del motor las cargas externas también están presentes, resultando en una fatiga termomecánica; este es el caso de una válvula de escape.

Usualmente, ambos tipos de factores producen una acción conjunta (Oller et al., 2001):

- Los efectos térmicos son más complejos que los alcanzados bajo las propias cargas mecánicas.
- Producen una alteración en las propiedades del material, llevándolo a la activación o atenuación de los efectos de la fatiga.

De lo anterior se deduce que la fatiga termomecánica puede provocar modificaciones en la microestructura del material.

Estudio de caso: Falla de Válvula

Material

La válvula de escape analizada fue utilizada en un motor alimentado previamente con gasolina y luego con GNC en modo bicombustible. La válvula presenta una serie de grietas superficiales que se supone fueron promovidas por la fatiga térmica.

El análisis de composición química (Tabla 1) del material de la válvula se realizó con un microscopio electrónico de barrido.

Tabla 1. Composición química del material de la válvula (porcentaje en peso).

%Ni	%Cr	%Fe	%Ti	%Al
73.36	16.07	7.12	2.23	1.22

Ensayos de Dureza

En el primer ensayo se realizó una prueba de dureza Vickers (HV) (ASTM E-384, 1981), con una carga de 62.5 kgf, y tomando entre 3 y 5 datos para cada zona analizada de las válvulas. Esto último se hizo buscando un equilibrio entre el área disponible para tomar la dureza y la mayor confiabilidad de los resultados. La toma de durezas se efectuó en diferentes zonas de la válvula. Estas zonas fueron seleccionadas para conocer la uniformidad de la válvula con respecto a la microestructura, lo cual debe reflejarse en la dureza. En la figura 2 se muestra la ubicación de estas zonas en la válvula.

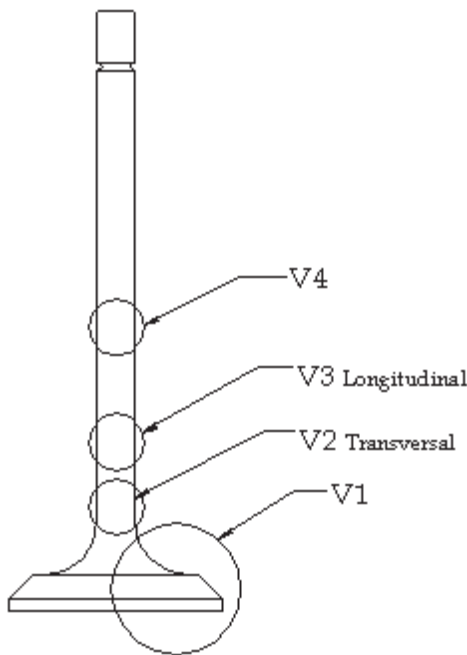


Figura 2. Zonas analizadas en las válvulas de escape.

Por otro lado, se tomó un perfil de durezas transversal a la cabeza de la válvula. Dada la pequeña área para tomar las durezas, no

fue posible aplicar la misma prueba de dureza anterior (Vickers); por lo tanto, los valores obtenidos no son comparables con los hallados en el primer ensayo. En este ensayo se realizó una prueba de durezas Brinell (HB) con una carga de 62.5 kgf.

El perfil de durezas fue obtenido para conocer la variación de la dureza a medida que se pasa de una superficie a otra, o sea, de la que está en contacto directo (superior) hasta la que lo está indirectamente (inferior) con los gases de escape en el motor. Estas superficies se observan en la figura 3, donde también se muestra el sentido en que fue tomado el perfil de durezas.

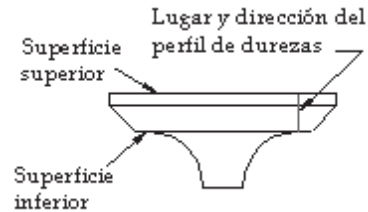


Figura 3. Dirección del perfil de durezas tomado en la cabeza de la válvula.

Observación Visual

La observación visual de la válvula se llevó a cabo por medio de un microscopio estereoscópico Leica GZ6, que trabaja en un intervalo de aumentos de 0.67x hasta 4x. Tal observación sirvió para ver la ubicación y el tamaño de grietas en la válvula de escape.

Observación Metalográfica

Para la observación metalográfica se utilizó un microscopio óptico Olympus PM3, junto a una cámara de video digital para adquirir las imágenes. La preparación de las probetas para esta observación consistió en un pulido mecánico convencional, hasta diamante de 2 micras. Luego, las probetas se atacaron con un reactivo químico llamado Kalling (Metals Handbook vol. 15, 1981), que resultó adecuado para revelar la microestructura del material de la válvula.

Para realizar un adecuado análisis metalográfico, se tomaron muestras de los diferentes lugares de la válvula donde se tomaron las durezas, para llevar a cabo una comparación entre ambos resultados.

RESULTADOS

Durezas

En la tabla 2 se pueden observar los valores de dureza obtenidos para las diferentes zonas de la válvula de escape.

Tabla 2. Dureza en diferentes zonas de la válvula de escape.

Muestra	Durezas (HV)
V1	352
V2	394
V3	445
V4	460

De estas durezas se puede concluir que hay una gran diferencia entre las microestructuras de diferentes lugares de la válvula. Precisamente, la dureza disminuye a medida que nos acercamos

a la cabeza de ésta; esto corresponde seguramente a un aumento de la temperatura de trabajo en este mismo sentido, que podría estar modificando las características microestructurales.

Por otro lado, se presenta una diferencia de durezas entre la muestra transversal (V2) y longitudinal (V3), aunque hay que tener en cuenta que esta última está más alejada de la cabeza de la válvula.

La muestra V4 presenta una mayor dureza que la de las otras muestras, reflejando que la temperatura de trabajo en este lugar no llevo a un cambio microestructural.

El perfil de durezas en la cabeza de la válvula es mostrado en la figura 4, donde se observa como a medida que se incrementa la distancia desde la superficie superior, va aumentando la dureza; pero luego, al acercarnos a la superficie interior la dureza comienza a disminuir. Lo anterior representa la heterogeneidad de la cabeza de la válvula en relación a la dureza, la cual está directamente relacionada con la microestructura del material. Por otro lado, hay que notar que la dureza de la zona cercana a la superficie inferior, que no está directamente expuesta a los gases de escape en el motor, es mayor que la zona próxima a la superficie superior. Esto es un indicativo de que la microestructura de esta última zona es afectada en mayor grado, probablemente a que está sometida a una mayor temperatura de trabajo.

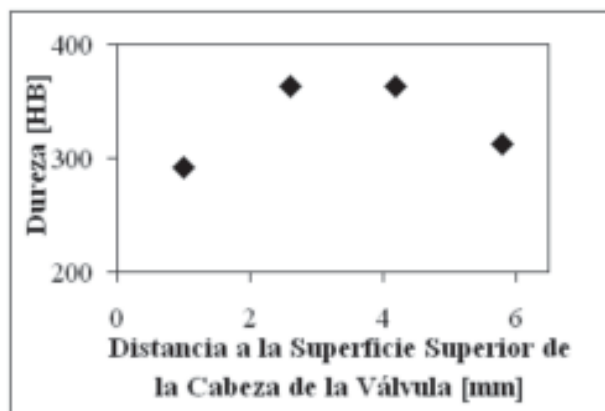


Figura 4. Perfil de durezas tomado en la cabeza de la válvula.

Observación visual

En la cabeza de la válvula se encontraron grietas distribuidas a lo largo de todo el perímetro y propagadas en dirección radial; en la figura 5 se muestra una de estas grietas.



Figura 5. Ubicación de las grietas en la cabeza de la válvula.

Como fuentes de la nucleación y propagación de estas grietas podrían tenerse 3 opciones: carga mecánica, corrosión y fatiga térmica.

La carga mecánica es producida por la presión máxima en la cámara de combustión, la cual puede variar entre 3 MPa y 6 MPa en los MEP (Heywood, 1988). Lo anterior sumado a la geometría de la válvula, da como resultado la distribución de esfuerzos mostrada en la figura 6.

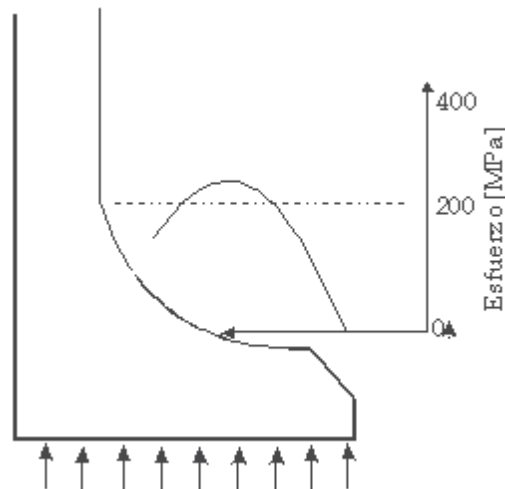


Figura 6. Distribución de esfuerzos en la cabeza de la válvula (Larson et al., 1987).

Por otra parte, a pesar de que al descubrir la superficie de la grieta se encontró un grado de corrosión similar al de la superficie de la cabeza de la válvula, no hay ningún indicio de una nucleación de grietas por acción química. Además, la distribución de las grietas hace pensar en una falla uniforme en la cabeza de la válvula y no en un fenómeno localizado como lo es la corrosión (ASM Handbook, 1987).

La fatiga térmica en la válvula se presenta por el calentamiento de ésta, por su contacto con los gases de escape, y su enfriamiento por medio del sistema de refrigeración. Esto sucede en cada ciclo, donde se produce un gradiente de temperatura en la válvula de aproximadamente 75oC (Sitkei, 1973); esto podría ser la causa del agrietamiento. Además, se ha planteado que la fatiga térmica produce una red de grietas finas en la superficie del material (Forest, 1982).

Así, sólo la carga mecánica o la fatiga térmica pueden ser la causa de la falla de la válvula. Por otro lado, de acuerdo con la concentración de esfuerzos en la cabeza de la válvula mostrada en la figura 7, las grietas se iniciaron en una zona donde existe una alta concentración de esfuerzos, y donde probablemente la nucleación de la grieta fue causada por una combinación de fatiga térmica y carga mecánica.

Por otra parte, no hay evidencia de desgaste en la cara de la válvula.

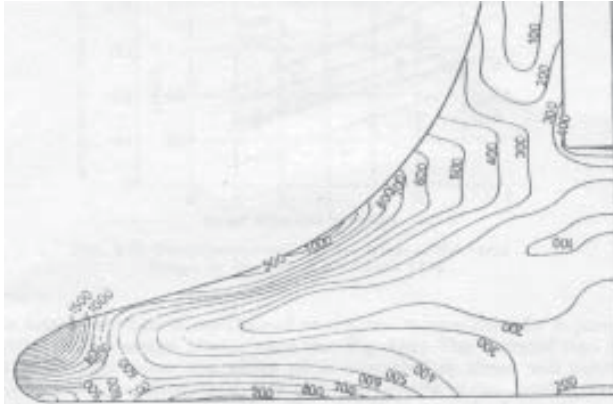


Figura 7. Concentración de esfuerzos en la cabeza de una válvula de escape (Sitkei, 1973).

Metalografía

En la figura 8 se observa la microestructura correspondiente a la cabeza de la válvula (V1), en la parte más cercana a la superficie expuesta directamente a los gases de escape (superficie superior), la cual presenta un grano de gran tamaño con respecto a los que están a su alrededor.

Esto es llamado crecimiento anormal del grano (Hu).

Toda la microestructura ubicada en la parte superior de la cabeza de la válvula, la cual seguramente soporta las temperaturas más altas de trabajo de toda la pieza, presenta igualmente este fenómeno.

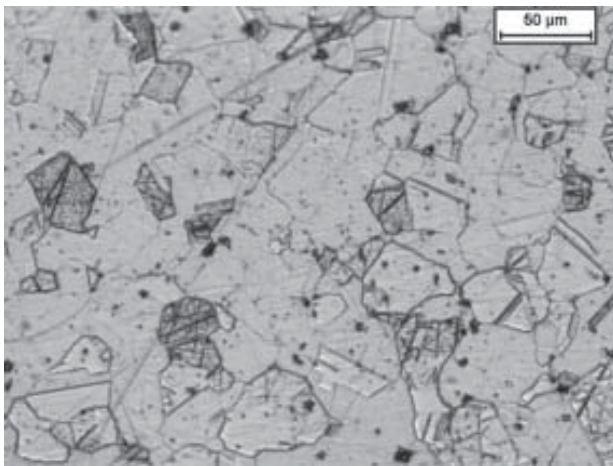


Figura 8. Microestructura de la muestra V1 cerca a la superficie superior.

Por otro lado, la microestructura de la parte central e inferior de la cabeza de la válvula presenta una estructura más homogénea, aunque mantiene un crecimiento anormal de grano en menor proporción. Esto se puede observar en la figura 9.

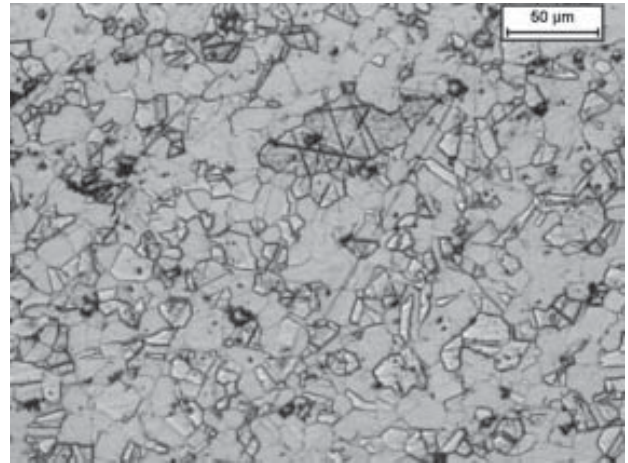


Figura 9. Microestructura de la muestra V1 cerca de la superficie inferior.

Lo anterior está en acuerdo con lo encontrado en el perfil de durezas realizado a la cabeza de la válvula, e igualmente sugiere que la mayor temperatura de desempeño en la zona cercana a la superficie superior de la válvula produce un mayor grado de modificación en la microestructura del material.

En las demás zonas de la válvula, V2, V3 y V4, no se observa este fenómeno tan claramente, seguramente por las menores temperaturas a las que están sometidas.

Por otro lado, la diferencia entre estas microestructuras se presenta entre los tamaños de grano, los cuales son menores entre más alejadas están las muestras de la cabeza de la válvula, produciendo así mayores durezas (Dieter, 1988). En la figura 10 se puede observar una micrografía de la muestra V4, en la cual la microestructura es más uniforme y fina que en las muestras anteriores.

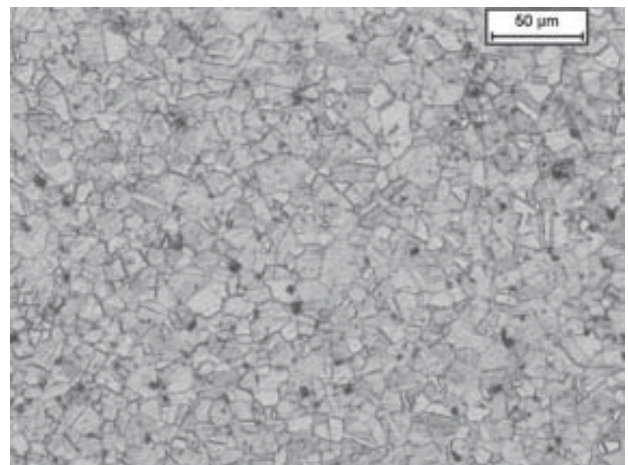


Figura 10. Microestructura de la muestra V4.

La diferencia de durezas entre las muestras V2 (transversal) y V3 (longitudinal), no se manifiesta claramente en sus microestructuras; sin embargo hay que notar que V3 fue tomada

de un lugar más alejado de la cabeza de la válvula, lo cual lleva a suponer una menor temperatura de desempeño.

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede definir que el agrietamiento observado en la superficie de la cabeza de la válvula es causado por la pérdida de resistencia del material al presentar un crecimiento de grano que, en este caso, es anormal. El crecimiento de grano anormal se presenta cuando, luego de que una microestructura ha alcanzado un tamaño de grano estable, se aumenta la temperatura por encima de un valor determinado y algunos granos crecen a una tasa mayor que la de sus granos vecinos (Verhoeven, 1987). Esto es precisamente lo que se observó en las micrografías presentadas anteriormente en las figuras 8 y 9.

Por lo tanto, la falla de la válvula de escape es producida por la inestabilidad térmica del material, debido a las altas temperaturas de operación que a su vez dependen del proceso de combustión en el motor alimentado con GNC y a su capacidad para remover el calor añadido durante el proceso. Se ha planteado que las temperaturas de operación de las válvulas de escape están en un intervalo de 600 a 800°C (Larson et al., 1987), para un motor alimentado con gasolina, por lo que es el caso del GNC estas temperaturas deben ser mayores.

El material de la válvula es una aleación con base en níquel (tabla 1) utilizada usualmente para aplicaciones a altas temperaturas, presentando un mejor comportamiento que los aceros inoxidable y de baja aleación (Metals Handbook vol. 3, 1981). Sin embargo, parece ser que el material no respondió a las exigencias dadas a la temperatura de trabajo de la válvula, determinadas por las condiciones de combustión en el motor.

Por otro lado, es importante resaltar que el fenómeno de la fatiga térmica, como fue descrito anteriormente, no parece tener alguna influencia en la falla de la válvula de escape, a menos que exista algún mecanismo por el cual los esfuerzos creados en el material activen el crecimiento anormal de grano.

La solución para evitar la falla de los componentes de los motores convertidos de gasolina a GNC, puede encontrarse en 2 tópicos: el proceso de combustión en el motor y el material de la válvula de escape.

En el primer caso es necesario reducir el tiempo de retraso y aumentar la velocidad de combustión, y así disminuir las temperaturas de operación de los componentes del motor. Para esto se requiere modificar algunos parámetros como el avance al encendido, la fuente y la energía de ignición, y la turbulencia de la mezcla (Amell y Agudelo, 2002).

Por otro lado, una mayor estabilidad térmica del material de la válvula de escape, puede ser alcanzada con la adición de algunos elementos aleantes como Molibdeno, Vanadio y Tungsteno (Metals Handbook vol. 3, 1981). Otra forma de mejorarla estabilidad térmica de la aleación es por medio de la optimización del tratamiento térmico, que consiste en mejorar el mecanismo de endurecimiento por precipitación de partículas finas. Por último, desde el punto de vista de las propiedades térmicas, es importante que el material presente una alta conductividad y un bajo coeficiente de expansión térmicas.

CONCLUSIONES

- El proceso de combustión en los motores convertidos de gasolina a GNC, experimenta algunos cambios que producen

mayores temperaturas de operación en los componentes del sistema.

- Las mayores temperaturas de operación en la válvula de escape originan un crecimiento anormal de grano en su microestructura, que se refleja en la pérdida de resistencia del material.

- La falla de la válvula de escape del motor en cuestión, es causada por la inestabilidad térmica del material a la temperatura de operación.

- Con la disminución del tiempo de retraso y de la etapa de quemado rápido, en el proceso de combustión de un motor alimentado con GNC, es posible bajar las temperaturas de operación en los componentes del motor.

- Una mayor estabilidad térmica de la microestructura de la válvula de escape, en una aleación de níquel, puede ser alcanzada con mayores contenidos de aleantes como Vanadio, Molibdeno y Tungsteno.

TRABAJO FUTURO

Es importante establecer, en una investigación futura, la influencia que tiene la fatiga térmica en el crecimiento anormal de grano, ó si sólo es un problema de la estabilidad térmica del material.

REFERENCIAS

ACEVEDO, C.A. y AGUDELO, J.R. Factores que inciden en la combustión de un motor operando con gas natural, Revista Gas Vehicular N°10 Agosto-Octubre, Bogotá (2002) p. 27-31.

AGUDELO, J.R., MUÑOZ, J. y TRUJILLO, L. Análisis de viabilidad técnico-económica de la conversión de vehículos a sistemas biocombustible gasolina-gas natural para el caso colombiano. En: Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Diciembre (2000), p. 35-42.

AMELL, A.A. y AGUDELO, J.R. El Gas Natural: ¿nuevo vector energético? En: Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Abril (2002), p. 36-48.

ASM Handbook, Corrosion, American Society for Metals (ASM), vol. 13, 9th Ed. (1987) p. 180-181.

ASTM (American Society For Testing Of Metals), E 384: Vickers Hardness of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Part 10 (1981) p. 316-326.

ASTM (American Society For Testing Of Metals), Standard Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and Statistical Analysis of Fatigue Data, ASTM Designation E, p. 206-72.

DIETER, G.E. Mechanical Metallurgy, McGraw Hill (1988) p. 189.

FOREST, P.G. Fatiga de los Metales, URMO (1982) p. 260-287.

HEYWOOD, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Co. (1988) p. 384-389.

HU, H. Recovery, Recrystallization & Grain Growth, En: U.S. Steel Research Laboratory, Monroeville, PA15146, p. 403.

JONES, A.L. y EVANS, R.L. Comparison of burning rates in a natural gas fueled spark ignition engine, En: Trans. Of the ASME, Vol 107. Oct. 1985 p 908-913.

JÓVAJ, M.S. Y MÁŠLOV, G.S. Motores de Automóvil, Editorial MIR, Moscú (1978) p. 163.

KATO, K. et al. Development of Engine for Natural Gas Vehicle, En: SAE Technical Paper, 1999.

LARSON, J.M., JENKINS, L.F., NARASIMHAN, S.L. y BELMORE, J.E. Engine Valves - Design and Material Evolution, En: Journal of Engineering for Gas Turbines & Power (1987), vol. 109, p. 355-61.

METALS HANDBOOK, Properties & Selection: Stainless Steels, Tools Materials & Special-Purpose Metals, American Society for Metals (ASM) vol. 3, 9th Ed., Metals Park, Ohio (1981) p. 204-206.

METALS HANDBOOK, Metallography and Microstructures, American Society for Metals (ASM), vol. 15, 9th Ed., Metals Park, Ohio (1981) p. 307.

OLLER, S., SALOMÓN, O. Y OÑATE, E. Thermo-mechanical fatigue analysis using generalized continuum damage mechanics for numerical methods in engineering, En: International Journal for Numerical Methods In Engineering, Int. J. Numer. Meth. Engng. (2001) p. 1.

SASAKI, H. y NAKASHIMA, K. New combustion system of a heated insulated natural gas engine with pre-chamber for hybrid vehicle". En: Memorias NGV 2000. Yokohama, Japón.

SITKEI, G. Heat transfer and thermal loading in internal combustion engines, Akadémiai Kiadó, Budapest (1973) p. 250-252. VERHOEVEN, J.D. Fundamentos de Metalurgia Física, Limusa (1987) p. 377.

YOSEFFI, D., BELMONT, M.R., ASHCROFT, S.J. y MACKELL, S.J. A comparison of the relative effects of fuel composition and ignition energy on the early stages of combustion in a natural gas spark ignition engine using simulation, En: Proc. Inst. Mech. Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering (2000), 214 (D), p. 383-393.