

Variaciones microestructurales de un acero microaleado expuesto a altas temperaturas*

Eider Mora Terrero

emterrero@mecanica.ismm.edu.cu

Tomás Fernández Columbié

tfernandez@ismm.edu.cu

Instituto Superior Minero Metalúrgico

Yurileysis Reyes Galindo

yuri@cdemoa.une.cu

Osmar Ochoa Matos

oochoa@ctefelton.une.cu

Empresa Termoeléctrica de Felton (Cuba).

Resumen: Se analizaron las variaciones microestructurales de un acero microaleado empleado en la fabricación de las válvulas de admisión y escape de un motor de combustión interna, las cuales han sufrido transformación debido a la temperatura de trabajo. Para dicho análisis se seleccionó una válvula sin estar expuesta a condiciones de trabajo y válvulas (una de admisión y otra de escape) retirada de servicio, que fueron seccionadas en diferentes partes como en la cabeza de la válvula, la parte inferior y superior del vástago, así como el centro del mismo. Se determinó que para 400 °C, temperatura de trabajo de la válvula de admisión, no existe transformación de fases en el acero y aunque la válvula de escape debe trabajar a 700 °C, ocurren transformaciones en la estructura que predice que, por las deformaciones en la red cristalina, esta temperatura está por encima de los 850 °C por la presencia de la martensita y la sorbita, con un incremento de la dureza de hasta 450 HV en el vástago retirado de servicio.

Palabras clave: válvula de admisión; válvula de escape; microestructura; vástago.

* Recibido: 4 febrero 2018/ Aceptado: 13 agosto 2018

Variations microstructural of a steel exposed micro alloyed to high temperatures

Abstract: The variations microestructurales of a steel micro alloy used in the production of the admission valves and escape of an engine of internal combustion is analyzed, which have suffered transformation due to the work temperature. For this analysis a valve was selected without being exposed to work conditions and valves (one of admission and another of escape) retreat of service that they were cut in different parts like in the head of the valve, the inferior part and superior of the offspring, as well as the centre of the same one. It was determined that it stops 400 °C, temperature of work of the admission valve, transformation of phases it doesn't exist in the steel and although the escape valve should work to 700 °C, it exists transformations in the structure that predicts that, for the deformations in the crystalline net, this temperature is above the 850 °C for the presence of the martensite and the sorbit, with an increment of the hardness of up to 450 HV in the retired offspring of service.

Key words: admission valve; escape valve; microstructure; offspring.

Introducción

Los materiales sometidos a tensiones repetidas o fluctuantes fallan a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la misma falla bajo una carga constante. Por ende, esta falla suele ocurrir a un menor nivel de tensiones que el límite elástico del material. El deterioro se manifiesta a través de la formación de grietas en la superficie del componente que se propagan a través de este hasta que la sección remanente intacta es incapaz de sostener los esfuerzos impuestos y se produce la fractura súbita (Smith, Watson & Topper, 1970).

Según Aráujo y Nowell (2002), el daño que se sufre durante el proceso de fatiga es acumulativo y generalmente irre recuperable, debido a que los períodos de descanso no producen ninguna recuperación medible. La velocidad de la grieta depende del material y de las condiciones ambientales. El último objetivo de las teorías y modelos de degradación de los materiales sometidos a cargas cíclicas es obtener una aproximación racional de la vida de un elemento estructural. Es decir, un valor esperado del tiempo, durante el cual este elemento cumplirá con la función para el que ha sido concebido.

Plantean Dinda y Kujawski (2004) que cuando, a lo largo del servicio del componente, cualquiera de ellas disminuya, colocándose por debajo de unos valores admisibles, se habrá llegado al fin de su vida útil. De todas formas, el estudio de la degradación de un material podría generalizarse al seguimiento de la evolución de cualquier otra característica, sea o no estructural, aunque esta no es una práctica demasiado habitual.

Zhang, Kelly y Gates (2003) se enfocaron en el efecto del esfuerzo medio a altas temperaturas en condiciones de fatiga de un acero SAE 1045. Como consecuencia de la disminución brusca de la amplitud de deformación plástica, un máximo de la vida cíclica podría ser observado a una temperatura cercana a la de 325 °C en las pruebas cuyos esfuerzos medios varían desde -80 MPa hasta 60 MPa, mostraron que un esfuerzo medio positivo generalmente aumenta la amplitud de deformación plástica y reduce el número de ciclos al cual el material falla y viceversa.

Moreno y otros investigadores (2005) estudiaron el comportamiento a fatiga de aceros de bajo carbono; comprobaron que la resistencia a la fatiga y el límite de fatiga incrementan a medida que aumenta el porcentaje de carbono. Además, se observó la superficie de fractura de las muestras rotas de fatiga por microscopía electrónica de

barrido; se determinó que el mecanismo de fractura es mixto por coalescencia de cavidades con presencia de hoyuelos y facetas de clivaje, con presencia de grietas primarias y secundarias.

Johansson y Olsson (2000) afirman que los aceros al cromo se deforman bien en caliente, se mecanizan y son adecuados para endurecimientos parciales o por inducción. Los aceros con cierto contenido de carbono y cromo forman carburos de gran resistencia al desgaste, con porcentajes hasta de 5,5 %, confiere al acero propiedades de conservar la dureza del revenido, aun a elevadas temperaturas.

Refieren algunos especialistas (Chungen, 1999; Hussainova & Schade, 2008) que los recubrimientos de carburos de cromo (cromo-hierro), generalmente, poseen una menor capacidad de resistir la acción de diferentes medios agresivos que los carburos formados por otros elementos químicos (titanio, vanadio). Esta situación ha motivado que, como alternativa, se haya desarrollado una tendencia a la aleación de las capas de carburos de cromo con elementos tales como boro, vanadio, titanio, circonio y silicio.

El objetivo del trabajo es establecer el comportamiento microestructural de un acero microaleado del tipo AISI 4140 empleado en la fabricación de válvulas de admisión y escape de motores de combustión interna.

Desarrollo experimental

Composición química de los materiales

La composición química del acero microaleado se determinó mediante análisis espectral, para ello se utilizó un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En la Tabla 1 se muestra la composición química.

Tabla 1. Composición química del acero microaleado, en %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
0,43	0,8	0,3	0,04	0,04	1,0	0,3	0,3

La composición química determinada se corresponde con el acero microaleado del tipo AISI 4140 donde, en correspondencia con los elementos presentes, el níquel y el manganeso tienden a ampliar el campo austenítico. En cambio, el cromo, disminuye el

campo austenítico y favorece la formación de estructuras férricas. El manganeso y, en menor proporción, el cromo y níquel aumentan la templabilidad de los aceros. El níquel y el manganeso propenden a bajar los puntos críticos. El cromo tiende a elevar los puntos críticos en aceros de alto contenido en carbono y a bajarlo en los de bajo contenido. Cuando se encuentran varios elementos aleados en el mismo acero sus influencias se suman si son de mismo signo o se restan si son de signo contrario.

Defectos en las válvulas de admisión y escape

En la Figura 1 se muestran los defectos de las válvulas de admisión y escape, perteneciente al motor de combustión interna.

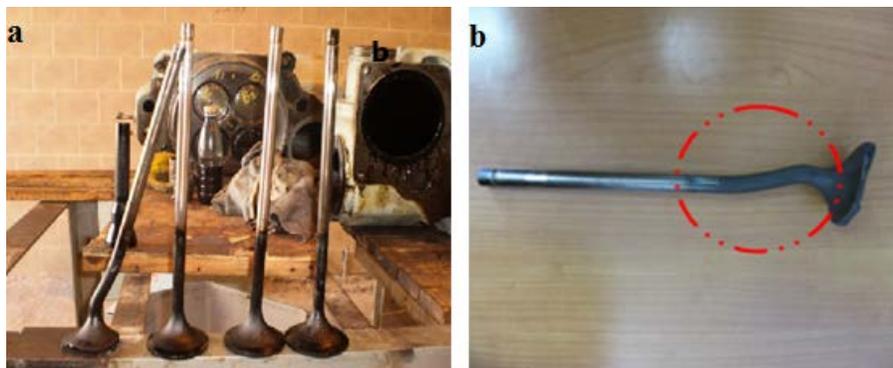


Figura 1. Defectos en las válvulas del MCI. a) admisión y b) escape.

Los vástagos, cuando el motor está en funcionamiento, presentan una diferencia de temperatura entre sus dos extremos, ya que el lado que está en contacto con la cabeza de la válvula estará más caliente, sobre todo en los vástagos de las válvulas de escape; lo anterior provoca averías en las mismas producto de las altas temperaturas de los gases a la salida del cilindro. Entre las especificaciones de una válvula está su límite de soportar el calor, las de admisión generalmente tienen un límite menor (aproximadamente uno 400 °C) que las de escape (unos 700 °C), ya que estas últimas resisten una temperatura más elevada por los gases calientes que son expulsados de la combustión.

Microestructura de las muestras patrón

Las válvulas deben poseer características térmicas para soportar temperaturas elevadas y químicas para evitar la corrosión, causada por la misma combustión de la cámara. Este tipo de corrosión por calor se denomina habitualmente termocorrosión y las válvulas que

no son refrigeradas de forma adecuada acortan su vida útil rápidamente. El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón de las diferentes partes de las válvulas; se consideró el vástago, la cabeza de la válvula y la interfase del vástago. En la Figura 2 se muestran las estructuras obtenidas.

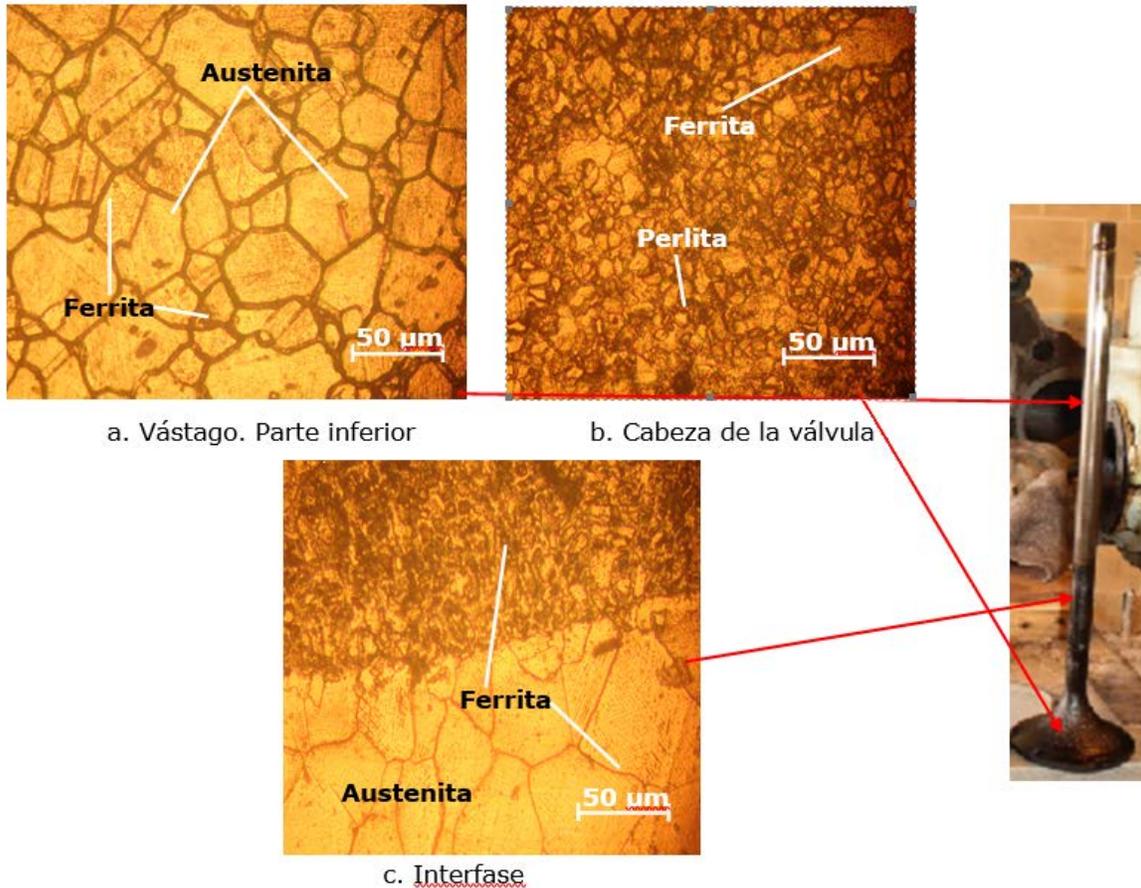


Figura 2. Estructuras obtenidas de la muestra patrón.

En la parte inferior del vástago (Figura 2a) se observa la estructura típica de un acero austenítico, una matriz austenítica, de granos con líneas rectas y la presencia de la ferrita en bordes de granos. La parte correspondiente a la cabeza de la válvula (Figura 2b) es la estructura de un acero microaleado, con estructura de ferrita y perlita, distribuidas en la matriz, la ferrita de forma equiaxial y la perlita intragranular y la interfase (Figura 2c) muestra características de ambas partes de la válvula.

Según la estructura de la interfase, la válvula del motor de combustión interna está compuesto por dos materiales, por lo que estas válvulas son denominadas con pastillas soldadas; en estos tipos de válvulas se recurre a la soldadura de una pastilla sobre el

extremo del vástago de las mismas, fabricadas en aceros inoxidable (no templables) con el fin de que resistan al desgaste y los impactos. A dicha pastilla se le realiza un endurecimiento para mejorar sus propiedades mecánicas.

Preparación metalográfica de la probeta

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: desbaste, pulido, desengrasado y lavado (ASTM E 3-95 y NC 10-56: 86). En el desbaste se emplearon papeles abrasivos del tipo No. 400, 600 y 800 (ASTM E 3-95). Para el acabado se utilizó un paño de fieltro grueso, se usó como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

Una vez pulidas las muestras se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro, se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono (Cl_4C) para evitar cualquier vestigio de grasa y pasta de pulir. Se aplicó el ataque por inmersión de las muestras durante 5 s con el reactivo nital al 4 % (mezcla de 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) y 100 mL de alcohol etanol (ASTM E-262 Practice A). Para el ataque de la parte inferior del vástago se empleó el agua regia al 10 %. Mezcla de 10 mL de ácido nítrico (HNO_3) y 30 mL de ácido clorhídrico a temperatura ambiente y durante 5 min. El análisis empleado para la medición de la dureza fue el Vickers, con tres mediciones realizadas aleatoriamente en la superficie de las muestras.

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca NOVEL, dotado de una cámara instalada mediante el hardware que refleja la fotografía en el computador, en la cual se encuentra un programa analizador de imágenes tomadas desde la cámara donde se evalúan las fases, tamaño del grano, inclusiones, afectaciones en los granos; en la misma se elabora un reporte técnico con estas características.

Resultados y discusión

Comportamiento microestructural de la válvula de admisión

Se observó el comportamiento microestructural de la válvula de admisión y la de escape. Se realizó el análisis según las partes por las cuales están estructuradas las mismas. Se analizaron primeramente las microestructuras obtenidas en la válvula de admisión; para ello se consideró que, según el funcionamiento de ellas, no deben

presentar problemas graves en lo que respecta a los materiales ya que, si bien están expuestas al calor de la combustión, están por el contrario bien refrigeradas por la corriente de aire que circula en torno suyo cuando están abiertas (Figura 3). El análisis fue luego de retirada de servicio.

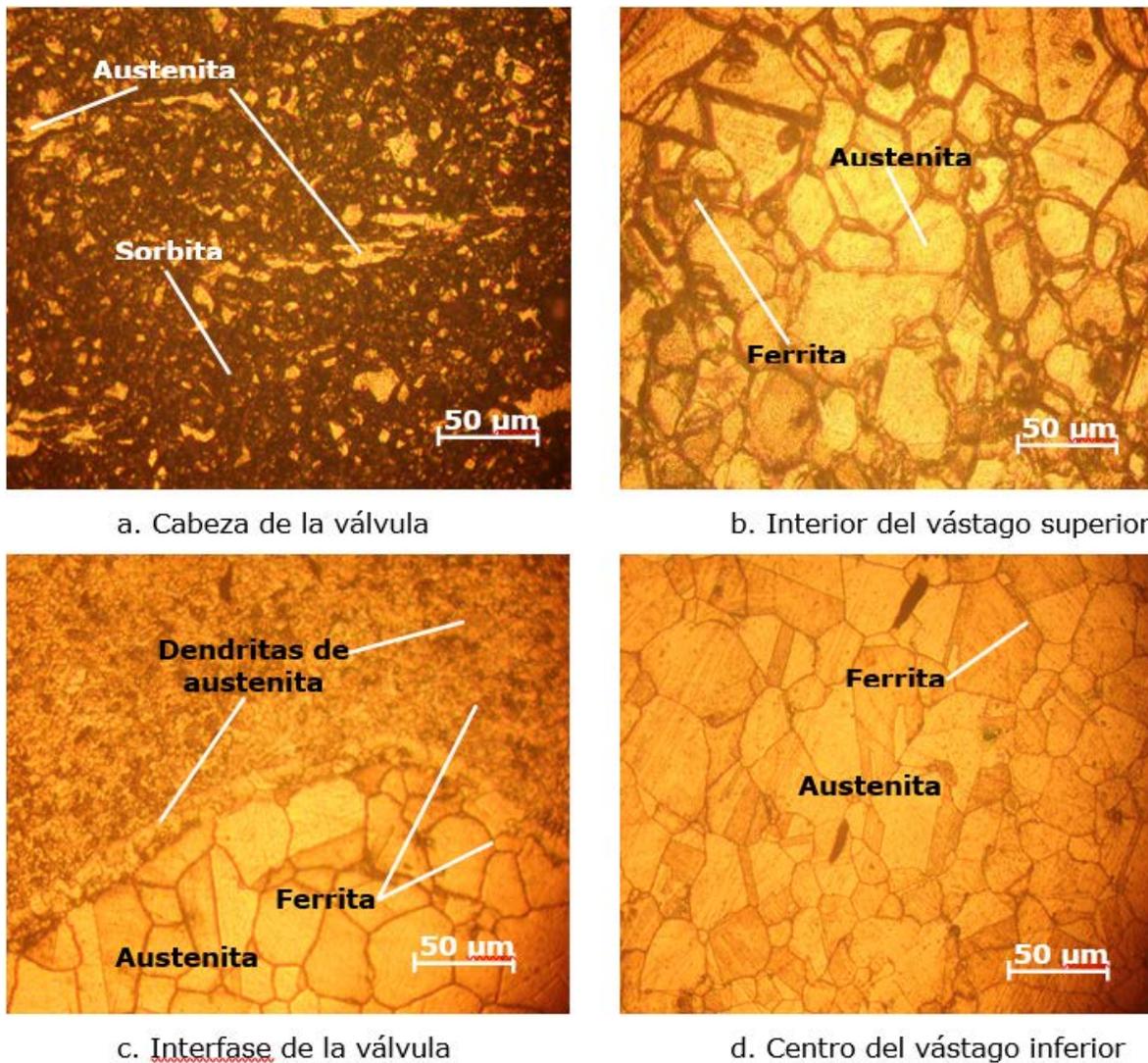


Figura 3. Comportamiento microestructural de la válvula de admisión.

Las microestructuras obtenidas en el comportamiento microestructural de la válvula de admisión tienen similitud con las microestructuras obtenidas con las muestras patrón. El comportamiento obtenido se debe a la temperatura de trabajo de las mismas, estas válvulas de admisión trabajan en el MCI, en temperaturas de 400 °C, rango donde los aceros no sufren transformaciones de fases, aunque se puede observar que en la

microestructuras obtenida en la cabeza de la válvula (Figura 3a) existe cambios en la morfología.

En la Figura 3a se distingue la formación de la sorbita en la estructura, así como la de austenita distribuida en esta matriz. Esta estructura se forma por transformación isotérmica de la austenita a temperaturas comprendidas entre 600 °C y 650 °C, es decir, enfriando rápidamente la austenita, que deberá estar a temperaturas por encima de la crítica superior, hasta una temperatura comprendida 600 °C y 650 °C y manteniéndola a esta temperatura constante hasta su total transformación en sorbita, según Callister (2000).

También se produce la sorbita cuando se enfría la austenita a velocidad bastante inferior a la crítica de temple. Por eso aparece en los aceros forjados y laminados, en los cuales la velocidad de enfriamiento no es lo suficientemente rápida ni para el temple, o sea, para la formación de la martensita, ni aun para la formación de troostita y tampoco es lo suficientemente lenta para la formación de perlita.

La formación de la estructura sorbita, presumiblemente está asociado a las fluctuaciones de temperaturas durante el proceso de trabajo del motor. Las válvulas trabajan a 400 °C con enfriamiento; el incremento de la temperatura más el sistema de enfriamiento pueden provocar la aparición de esta estructura en la cabeza de la válvula.

Aunque no existen transformaciones en las otras estructuras, sin embargo, para temperaturas mayores de 450 °C, en estos aceros, este tratamiento eleva el límite elástico, el ablandamiento y la recristalización. Si el acero es trabajado en frío se calienta a temperaturas entre 550 °C y 900 °C y tiene lugar la precipitación de carburos de cromo, tanto dentro como alrededor de los granos, con el consiguiente riesgo de corrosión intercrystalina.

Comportamiento microestructural de la válvula de escape

Las válvulas de escape funcionan a temperaturas mucho más elevadas que las de admisión, en lugar de estar refrigeradas por aire frío, sufren la acción de los gases de escape calientes. La temperatura en esta zona es de aproximadamente 700 °C y deben resistir una temperatura más elevada por los gases calientes que son expulsados de la combustión (Figura 4).

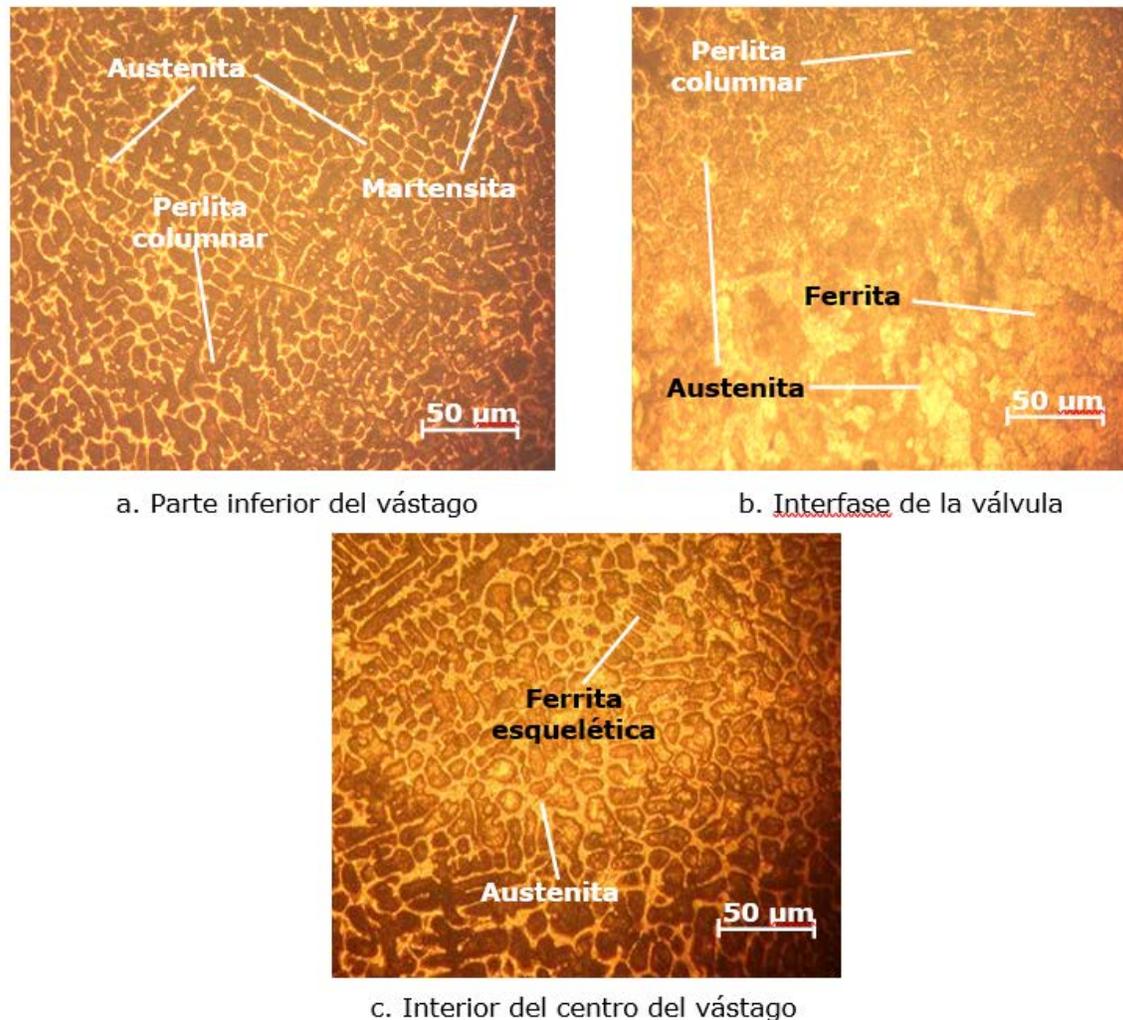


Figura 4. Comportamiento obtenido en las diferentes partes de la válvula de escape, luego de retirada de servicio.

En el bimetálico, que es la parte inferior del vástago (Figura 4a), se observa una estructura dendrítica o de perlita columnar, herencia de un proceso de transformación. Puede percibirse que el interior de las dendritas está formado por agujas de austenita sin transformar; en los contornos de las dendritas, áreas de tonalidad mucho más clara, están formados por martensita.

La microestructura de la Figura 4b, que se corresponde con la interfase, muestra un tamaño de grano refinado; presenta una red de ferrita que rodea a los granos de austenita en la parte del bimetálico y en la parte del acero AISI 4140 (parte superior) se obtuvo la perlita columnar con la presencia de austenita intragranular. En el centro del vástago la estructura es consistente con la presencia de la ferrita esquelética y la austenita

entre la ferrita, transformación que ocurre al calentar la perlita a temperaturas por debajo de 700 °C, durante tiempo prolongados.

En el análisis efectuado se ha podido observar cambios en las estructuras correspondientes a la válvula de admisión, hipotéticamente, el caso que se analiza, no debían obtenerse microestructuras con cambios significativos si se parte del hecho que estas válvulas trabajan a temperaturas de 700 °C y los aceros al cromo soportan hasta 850 °C sin que se produzcan cambios o transformaciones en su morfología, criterios que han sido expuestos por Callister (2000) y Guliaev (1983). Lo anterior demuestra que, en el sistema de trabajo del MCI, ha existido un rango de temperatura mayor al que puede trabajar este tipo de acero.

Comportamiento microestructural del vástago de la válvula

El recubrimiento tiene la función principal de disminuir el coeficiente de rozamiento entre el vástago y la guía y almacenar entre sus microfisuras pequeñas cantidades de lubricante. Esto permite un mejor funcionamiento y aumenta la vida útil de los vástagos y las guías. La Figura 5 se corresponde con las microestructuras del vástago de la válvula.

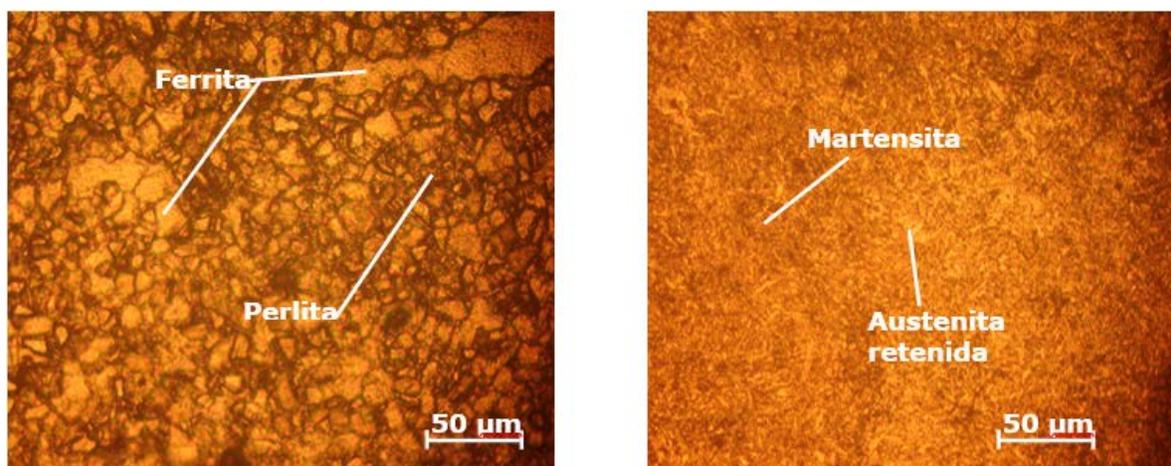


Figura 5. a) Muestra patrón del vástago b) Vástago retirado de servicio.

Estructura de ferrita–perlita (Figura 5a), que muestra tamaño de grano pequeño, producto del sometimiento de un proceso de conformación. Por otro lado, en la Figura 5b se puede apreciar una estructura de martensita, la cual es alcanzada en los aceros luego de un tratamiento por encima de la temperatura de transformación. En la Figura 5b se resaltan las agujas de martensita sobre un fondo de austenita residual (hay muy

poca austenita residual), muestra de una solidificación en el acero, lo primero que solidificó en el interior de las dendritas, era menos rico en elementos de aleación; en dicha figura los contornos de las dendritas son más ricos en elementos de aleación y, por consiguiente, presenten mayor templabilidad.

Análisis de la dureza

Se determinó la dureza en las válvulas, para ello se tuvieron en cuenta las diferentes zonas analizadas. Las mediciones se hicieron en la zona superficial de cada una de las probetas. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2. Resultados de la dureza

Válvula de admisión	HV
Cabeza de la válvula	440
Interior del vástago superior	225
Interfase	245
Centro del vástago inferior	220
Válvula de escape	HV
Inferior del vástago	325
Interfase de la válvula	320
Interior del centro del vástago	310
Vástago de la válvula	HV
Vástago retirado de servicio	450

Según los resultados obtenidos de las diferentes durezas, en las diferentes zonas, en la válvula de escape esta se incrementa en relación a la válvula de admisión, obteniéndose una dureza de 450 HV. Las variaciones en las durezas están asociadas a los cambios que ocurren en las válvulas, de acuerdo con las temperaturas de trabajo.

Conclusiones

En los motores de combustión interna (MCI) las válvulas de admisión y escape están diseñadas, según el material de fabricación, para trabajar, las primeras a una temperatura de 400 °C con enfriamiento y las segunda a 700 °C, ya que estas últimas resisten una temperatura más elevada por los gases calientes que son expulsados de la combustión.

Se determinó en el análisis microestructural que existen transformaciones de fases que van desde la transformación austeno–ferrita, con presencia de sorbita en la válvula de admisión, así como la presencia de la martensita, tanto en la válvula de escape, como en el vástago de la válvula; transformaciones que ocurren cuando el acero está sometido a temperatura por encima de los 850 °C.

En las zonas analizadas existen variaciones en la dureza, las cuales van desde 220 HV en el centro del vástago inferior, hasta 440 HV en la cabeza de la válvula en la de admisión, en la de escape es desde 310 HV hasta 325 HV, siendo mayor esta propiedad en el vástago retirado de servicio que alcanza una dureza de 450 HV.

Referencias bibliográficas

ARÁUJO, J. & NOWELL, D. 2002. The effect of rapidly varying contact stress fields on fretting fatigue. *International Journal of Fatigue* 24(7): 763-775.

CALLISTER, W. 2000. *Materials Science and Engineering. An Introduction*. Fifth Ed. John Wiley & Sons, Inc., 8195 p.

CHUNGEN, Z. 1999. Deposition of aluminise and chromium–modified aluminise coatings on TiAl alloys using the allied activate pack cementation method. *Chinese Journal of Aeronautics* 12(1): 24-32.

DINDA, S. & KUJAWSKI, D. 2004. Correlation and prediction of fatigue crack growth for different ratios using parameters. *Engineering Fracture Mechanics* 71(12): 1779-1790.

GULIAEV, A. 1983. *Metalografía*. Tomo 2. Editorial Mir, Moscú.

HUSSAINOVA, I. & SCHADE, K. 2008. Correlation between solid particle erosion of cermets and particle impact dynamics. *Tribology International* 41(14): 323-330.

JOHANSSON, B. & OLSSON, A. 2000. Current design practice and research on stainless steel structures in Sweden. *Journal of Constructional Research* 54(21): 3-29.

MORENO, F.; WILMAN, J.; SALAZAR, C. & LAURA, A. 2005. Evaluación del comportamiento mecánico a la fatiga en aceros AISI 4340 y AISI 4140 tratados térmicamente con recocidos y normalizados. *Revista Ingeniería UC* 12(1): 40-45.

SMITH, K.; WATSON, P. & TOPPER, T. 1970. A stress-strain functions for the fatigue of metals. *Journal of Materials* 5(4): 767-778.

ZHANG, M.; KELLY, P. & GATES, J. 2003. The effect of heat treatment on the toughness, hardness and microstructure of low carbon white cast irons. *Journal of Materials Science* 36(15): 3865-3875.