

ANÁLISIS TERMOESTRUCTURAL DE UN PISTÓN DE MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON RECUBRIMIENTO TÉRMICO

Erick Fournier Aldape¹, Oscar Tenango Pirin², Yahir de Jesús Mariaca Beltrán³ y Luis Alberto Rodríguez Picón⁴

Resumen – Los pistones de los motores de combustión son componentes que están expuestos a altos esfuerzos, producto del proceso de combustión. Una de las tecnologías usadas en los pistones para reducir los esfuerzos es el empleo de barreras térmicas protectoras, las cuales los protegen aislándolos de las altas temperaturas. En este trabajo, se realizaron análisis numéricos termomecánicos de un pistón de un motor de combustión interna empleando distintos materiales como barrera térmica. Los materiales estudiados fueron $ZrO_2-8\%Y_2O_3$, $La_2Zr_2O_7$ y $3Al_2O_3-2SiO_2$. Se empleó el método de elemento finito donde condiciones de carga de temperatura y presión fueron aplicadas al pistón. Los resultados se analizaron en términos de los campos de temperatura y esfuerzos de tensión-compresión de Von Mises. Los resultados permitieron determinar el desempeño de las TBCs e identificar la más viable para el pistón en términos de aislamiento térmico y generación de esfuerzos.

Palabras clave – pistón, barrera térmica protectora, elemento finito, esfuerzos termomecánicos

Introducción

Un motor de combustión interna tiene sus aplicaciones en diversos sectores como el transporte, agricultura, deportes, etc. Esto atrae la atención por parte de los investigadores para mejorar la eficiencia y rendimiento de estos motores (Dhomne & Mahalle, 2019). En motores modernos llega a forzar aún más su proceso de operación, causando así mayor esfuerzo térmico en sus componentes principales, principalmente en la cámara de combustión. El diseño, especialmente, el desarrollo del motor requiere la ejecución de evaluaciones exhaustivas, confiabilidad y rendimiento de los sistemas y piezas del motor incluidos el pistón (Spitsov, 2013).

Los pistones de los motores de combustión interna son sometidos a grandes cargas, tales como las presiones y temperaturas producidas por la combustión. Estas cargas provocan esfuerzos mecánicos y esfuerzos térmicos, los cuales dependen de parámetros como la distribución de temperatura, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad (módulo de Young), geometría y condiciones del refrigerante (Ghyadh et al., 2016). Para proteger los pistones de las cargas a las que son sometidos, una de las opciones es el empleo de barreras térmicas protectoras (TBCs por sus siglas en inglés).

Una barrera térmica protectora es un sistema de capas de recubrimiento de alta temperatura para proteger superficies de metales utilizados en turbinas de gas (Asmatulu, 2012). Una TBC está compuesta por cerámicos de baja conductividad térmica (TC), y una capa de enlace (BC) entre la capa cerámica (TC) y el sustrato, cuyo fin es incrementar la fuerza de adhesión (Yao et al., 2019).

En algunos pistones, el uso de estos recubrimientos ha permitido reducir las temperaturas del sustrato metálico donde hay una clara reducción comparado con pistones convencionales sin recubrimiento. La efectividad de las TBCs permiten que las piezas de un motor tengan más durabilidad y con ello mejorar su rendimiento estructural (Yao et al., 2019). Además, estas barreras protegen la base del metal ante fatigas térmicas (Venkadesan y Muthusamy, 2019), donde ocurren daños como agrietamiento, lo cual reduce la estabilidad y confiabilidad del motor (Yao et al., 2019). Por esta razón, el uso de TBCs permite incrementar la vida útil del pistón y le permite soportar mayores cargas por la variación de las condiciones de operación del motor.

¹ Erick Fournier Aldape es estudiante de Ingeniería en Sistemas Automotrices en la universidad Autónoma de Ciudad Juárez. al150378@alumnos.uacj.mx (autor correspondiente)

² Dr. Oscar Tenango Pirin es Profesor de Ingeniería en Sistemas Automotrices en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. oscar.tenango@uacj.mx

³ Dr. Yahir de Jesús Mariaca Beltrán es Profesor de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. yahir.mariaca@uacj.mx

⁴ Dr. Luis Alberto Rodríguez Picón es Profesor de Ingeniería Industrial y de Sistemas en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. luis.picon@uacj.mx

En este trabajo, se empleó el método de elemento finito (FEM por sus siglas en inglés) para realizar análisis termo-estructurales a un pistón de un motor de combustión interna con distintos recubrimientos térmicos. Se emplearon tres materiales distintos como TBC con espesor constante. Los materiales fueron evaluados tanto en su efecto en los esfuerzos y las temperaturas en la cabeza del pistón.

Descripción del método

Generación del modelo numérico

Los datos geométricos del pistón fueron obtenidos de Cioată et al. (2017). La geometría CAD del pistón fue hecha con el programa Solid Works y se muestra en la Figura 1a. La barrera térmica, colocada sobre la cabeza del pistón, está compuesta por el material cerámico (TC, por sus siglas en inglés) y la capa de enlace (BC, por sus siglas en inglés), los cuales se muestran en la Figura 1b, respectivamente. Los espesores usados fueron de 150 micras, 200 micras para la TC y la BC, respectivamente, y fueron definidos con base en otras investigaciones (Kumar et al., 2018). Algunas dimensiones del pistón se muestran en la Figura 1c. El pistón tiene un diámetro de 80mm con 8mm de grosor interno, y su altura total es de 70 mm.

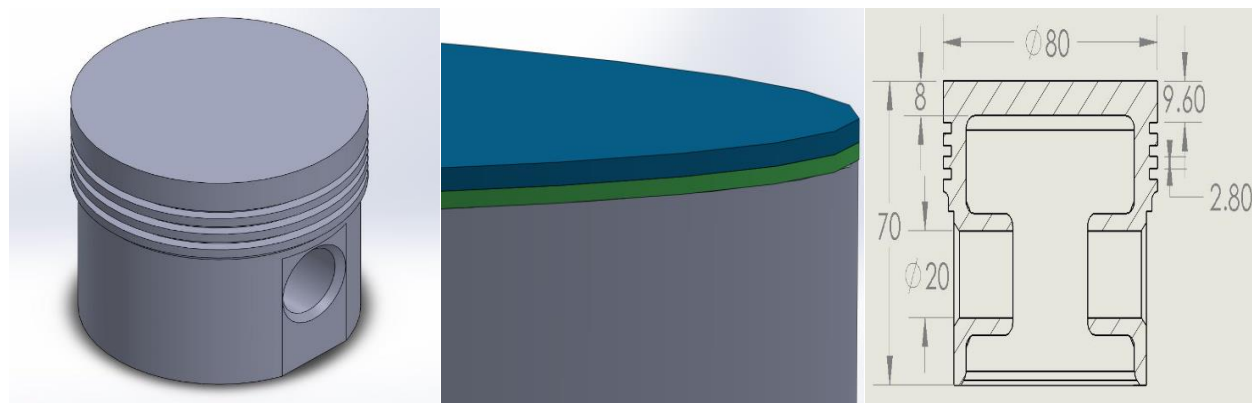


Figura 1. a) Geometría Pistón b) material cerámico y capa de enlace c) Vista sección de Pistón

El estudio numérico comprende cuatro casos distintos: tres con distintas TBCs y uno sin TBC. Los materiales usados como TC en las TBC fueron los cerámicos fueron $ZrO_2-8\%Y_2O_3$, $La_2Zr_2O_7$ y $3Al_2O_3-2SiO_2$, mientras que $NiCoCrAlY$ se usó como capa de enlace (BC) para los tres casos. Los cerámicos fueron seleccionados con base en su efectividad y bajas conductividades térmicas (Yao et al., 2019; Ghyadh et al., 2016; Karthickeyan, 2018). Mientras tanto, para el sustrato (pistón) se usó la aleación de aluminio a base de silicio (Cioată et al., 2017) para todos los casos. Las propiedades de cada uno de los materiales usados para las TBC se muestran en la Tabla 1, y las propiedades del material del sustrato son mostradas en la Tabla 2.

Tabla 1. Propiedades de las barreras térmicas (recubrimientos cerámicos)

Material	Módulo de Young (GPa)	Coficiente de Poisson	de Conductividad térmica (W/m ° C)	Coficiente de expansión térmica (1° C)
$NiCoCrAlY$	90	0.27	16.1	12×10^{-6}
$ZrO_2-8\%Y_2O_3$	205	0.25	2.12	11.5×10^{-6}
$3Al_2O_3-2SiO_2$	30	0.238	3.3	5.3×10^{-6}
$La_2Zr_2O_7$	237	0.28	1.5	9.7×10^{-6}

Tabla 2. Propiedades del material del pistón

Propiedad	Valor
Conductividad térmica	165 W/m °C
Coefficiente de expansión térmica	2.3 e10 ⁻⁵ 1/°C
Calor específico	875 J/Kg °C
Densidad	2770 Kg/m ³
Módulo de Young	7.1 e10 ⁴ MPa
Coefficiente de Poisson	0.34
Límite elástico	280 MPa
Esfuerzo último	310 MPa

Condiciones de frontera

Para probar la influencia de las TBCs en el pistón, primero se buscó replicar los resultados obtenidos por Cioatã et al. (2017). Por esta razón, las condiciones de frontera para el caso sin TBC fueron tomadas de dicha fuente. Las condiciones de frontera térmicas usadas para calcular la transferencia de calor se muestran en la Figura 2. En el interior y paredes laterales se usaron coeficientes de convección de 750 W/m² °C, mientras que para las caras externas se usaron un coeficiente de 2330 W/m² °C y una temperatura de 90° C. En la cara superior del pistón, donde se tiene contacto con los gases de combustión, se empleó una condición de flujo de calor de 1467.8 W. Para la transferencia de calor de la película de aceite entre el pistón y las paredes del cilindro, también se empleó un coeficiente de transferencia de calor por convección de 2330 W/m² °C y una temperatura de 90° C. Por otro lado, para los cálculos que incluyen las TBCs, se usaron las mismas condiciones de frontera mencionadas, y además se asignaron temperaturas en la superficie superior del pistón las cuales se obtuvieron de la resolución del caso sin TBC.

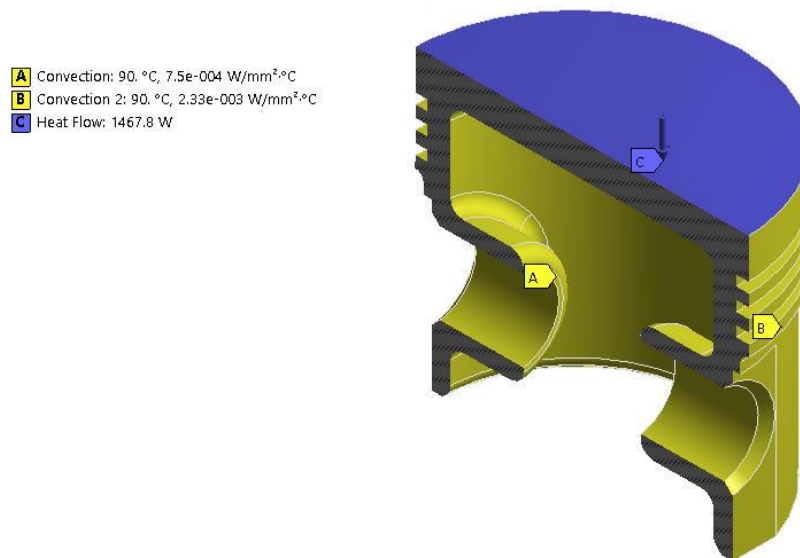


Figura 2. Condiciones de frontera aplicadas al pistón

Por otro lado, las cargas mecánicas incluyen tanto la presión como las restricciones. Se aplicó una presión de 6.5 MPa a la superficie superior de la cabeza del pistón simulando la presión ocasionada por la expansión de los gases de combustión. Para las restricciones, se colocaron fijaciones estáticas en los orificios de los pernos simulando la sujeción con la biela.

Características del mallado

Para realizar el mallado, el pistón y las TBCs se mallaron con parámetros distintos. Para el pistón se utilizó un tamaño de elemento de 0.6 mm y elementos tetraédricos. Mientras tanto, para las capas TC y BC de la barrera térmica se usó un tamaño de elemento de 0.01 mm, donde los elementos de ambas capas son de forma hexaédrica como se muestra en la Figura 3. Se obtuvieron 256,005 elementos para el BC, 341,340 elementos para el TC y 292,575 elementos en el sustrato. Entonces, el mallado de la geometría completa está conformado por 889,920 elementos. Una vez que se contó con el modelo numérico, se aplicó el método de elemento finito con cálculos estacionarios considerando a los materiales como isotrópicos y homogéneos.

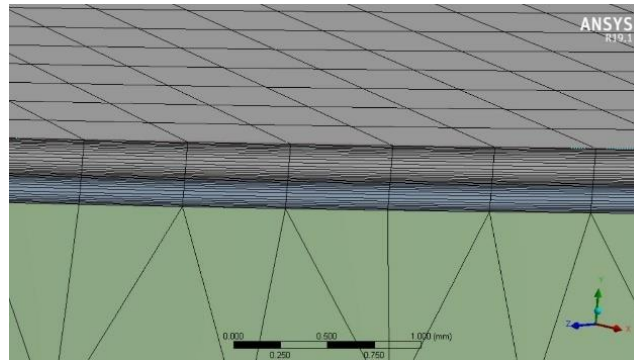


Figura 3. Mallado de recubrimientos cerámicos

Análisis de elemento finito del pistón sujeto a cargas combinadas: cargas térmicas y cargas mecánicas.

El análisis termo estructural se llevó a cabo usando el programa comercial Ansys Workbench. Primero se calcularon los campos de temperatura usando las cargas térmicas. Después, dichos campos se usaron como carga, en conjunto con las restricciones, para realizar el cálculo estructural.

Resultados

En esta sección se presentan los resultados de esfuerzo y temperatura para los distintos casos. La Figura 4 muestra los resultados de temperatura obtenidos para el caso sin recubrimiento. La temperatura más alta de 209.04°C, Figura 4a, se desarrollaron en el centro de la parte superior del pistón, y después disminuyen en dirección hacia los bordes. Mientras que las más bajas fueron de 92.3°C situadas en la parte inferior de la falda del pistón. En cuanto a los esfuerzos, estos se presentan mediante los esfuerzos de Von Mises. El esfuerzo más alto fue de 221.64 MPa localizado en el orificio del perno, como se muestra en la Figura 4b, ocasionado principalmente por las restricciones a las elongaciones térmicas en esa zona.

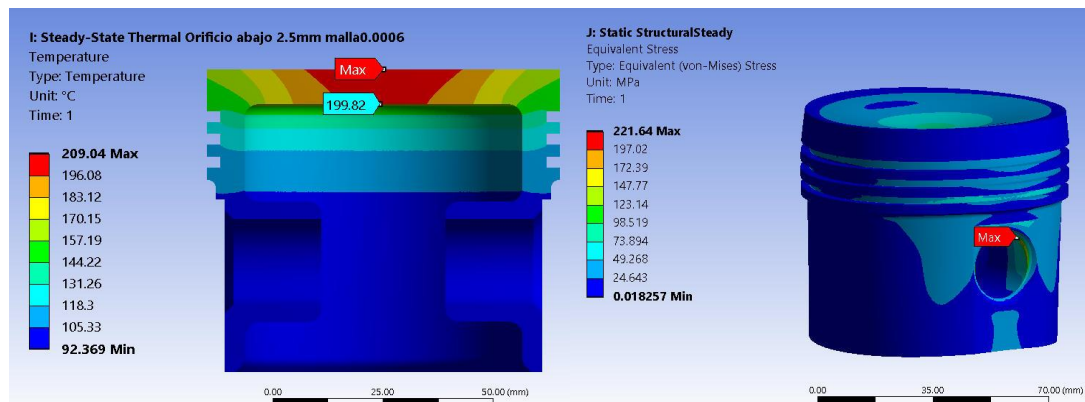


Figura 4. a) Temperaturas para el caso sin recubrimiento b) Esfuerzos para el caso sin recubrimiento

Temperaturas y Esfuerzos Von Mises en pistones con $ZrO_2-8\%Y_2O_3$

Para el caso del pistón con barrera térmica $ZrO_2-8\%Y_2O_3$, se puede apreciar que las temperaturas más altas también se desarrollan en la cabeza del pistón. El nivel de estas temperaturas disminuye alrededor de $13.2^\circ C$, a comparación del caso sin barrera, debido a la baja conductividad térmica del recubrimiento. Las temperaturas más bajas se localizaron en las faldas del pistón. En el caso de los esfuerzos, estos incrementaron en 54.02 MPa en el orificio del perno respecto al pistón sin TBC, lo cual se le atribuye a una distribución no uniforme de temperaturas distinto al caso mencionado.

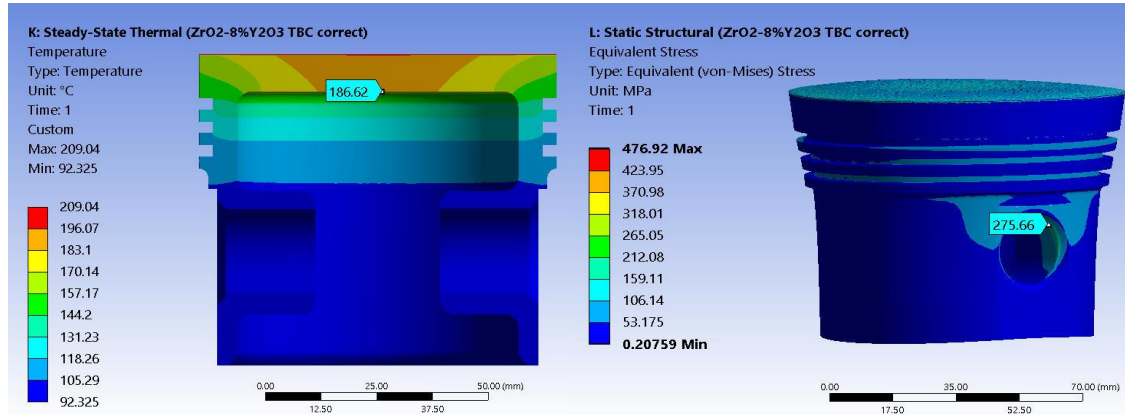


Figura 5. a) Temperatura con $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ b) Esfuerzos con $ZrO_2-8\%Y_2O_3$

Temperaturas y Esfuerzos Von Mises en pistones con $3A_2O_3-2SiO_2$

Los resultados de la distribución de temperatura y esfuerzo para el caso del pistón con barrera térmica $3A_2O_3-2SiO_2$ se muestran en la Figura 6a y Figura 6b, respectivamente. Se puede apreciar un desempeño similar al anterior, pero con una diferencia en los niveles de temperatura y esfuerzos de $6.91^\circ C$ y 54.02 MPa , respectivamente, en comparación al pistón sin TBC.

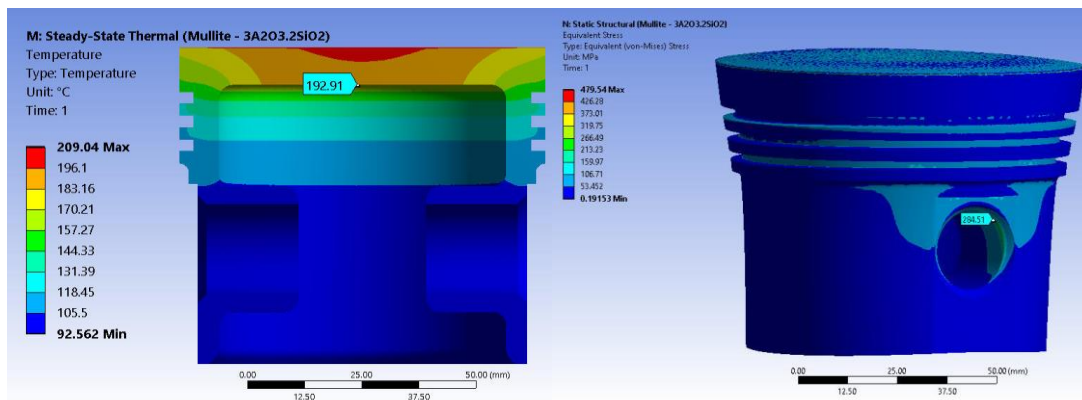


Figura 6. a) Temperatura con $3A_2O_3-2SiO_2$ b) Esfuerzos con $3A_2O_3-2SiO_2$

Temperaturas y Esfuerzos Von Mises en pistones con $La_2Zr_2O_7$

Los resultados de distribución de temperatura y esfuerzos para el caso del pistón con barrera térmica $La_2Zr_2O_7$ se muestran en la Figura 7a y Figura 7b, respectivamente. Se puede apreciar una mejoría en el desempeño de la TBC a comparación con los dos casos anteriores, obteniendo diferencias de temperatura y esfuerzos de $18.89^\circ C$ y 8.6 MPa , respectivamente. La ubicación de las temperaturas y esfuerzos más altos no se vio afectada.

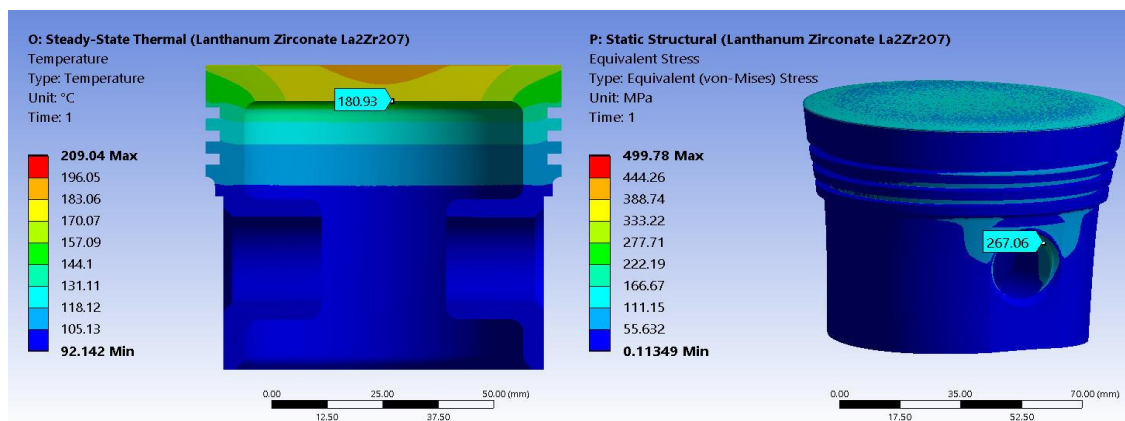


Figura 7. a) Temperatura con $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ b) Esfuerzos con $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$

Cuadro comparativo de resultados

Un resumen de los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 2. Se puede observar que la temperatura de la cabeza del pistón disminuye con el uso de TBCs, debido a las bajas conductividades térmicas. Las diferencias de temperatura entre las TBCs y el sustrato tienen rangos que van desde 6.91°C hasta 18.89°C . La TBC compuesta de $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ presenta la mayor disminución de temperatura equivalente a 18.89°C en la cabeza del pistón respecto a los otros dos recubrimientos utilizados.

Tabla 2. Comparativa de resultados

Material	Temperatura máxima	Esfuerzos máximos
Sustrato (sin recubrimiento)	199.82°C	221.64 MPa
Con $\text{ZrO}_2\text{-}8\%\text{Y}_2\text{O}_3$	186.62°C	275.66 MPa
Con $3\text{A}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$	192.91°C	284.51 MPa
Con $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	180.93°C	267.06 MPa

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se estudió el efecto del empleo de TBCs en un pistón. Se observó un aumento en los esfuerzos de Von Mises para los casos con recubrimiento térmico respecto al pistón sin TBC debido a las restricciones. Para el caso del pistón con $3\text{A}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ se obtuvo un esfuerzo máximo de 284.51 MPa sobrepasando el límite elástico del material del sustrato que conllevaría a una deformación permanente en la zona del orificio del perno con posible rotura. Los resultados muestran que el recubrimiento con mejor desempeño fue el de $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, logrando disminuir la temperatura en mayor medida en la parte inferior de la cabeza del pistón y, además, es la que menor esfuerzos generó de todos los recubrimientos térmicos.

Referencias

- Asmatulu, R. (2012). Nanocoatings for corrosion protection of aerospace alloys. In *Corrosion Protection and Control Using Nanomaterials*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857095800.2.357>
- Cioată, V. G., Kiss, I., Alexa, V., & Rațiu, S. A. (2017). Mechanical and thermal analysis of the internal combustion engine piston using Ansys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 163(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/163/1/012043>
- Dhomne, S., & Mahalle, A. M. (2019). Thermal barrier coating materials for SI engine. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1532–1537. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.08.002>
- Ghyadh, N. A., Al-Baghdadi, M. A. R. S., & Ahmed, S. S. (2016). Mechanical And Thermal Stresses Anlysis In Diesel Engine Poiston With And Without Different Thermal Coating Layer On Piston Head. *International Journal of Advanced Network, Monitoring and Controls*, 1(2), 96–111. <https://doi.org/10.21307/ijanmc-2016-018>
- Karthickeyan, V. (2018). Effect of thermal barrier coating on performance and emission characteristics of kapok oil methyl ester in diesel engine. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 1973–1977. <https://doi.org/10.1080/14484846.2018.1546450>
- Kumar, M., Balaji, K., & Suresh, G. (2018). *Different Thermal Barrier Coatings on Modified Piston*. 7(7), 57–65.

Spitsov, O. (2013). *Heat Transfer Inside Internal Combustion Engine* : 15.

Venkadesan, G., & Muthusamy, J. (2019). Experimental investigation of Al₂O₃/8YSZ and CeO₂/8YSZ plasma sprayed thermal barrier coating on diesel engine. *Ceramics International*, 45(3), 3166–3176. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.218>

Yao, Z., Hu, K., & Li, R. (2019). Enhanced high-temperature thermal fatigue property of aluminum alloy piston with Nano PYSZ thermal barrier coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 790, 466–479. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.177>