بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی

عنوان

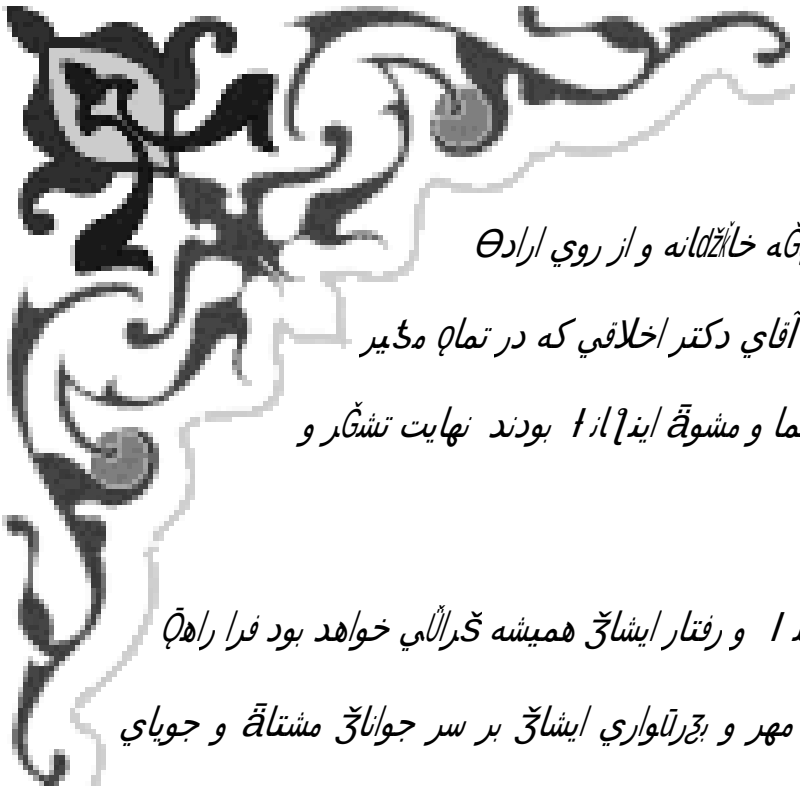
تحلیل استوانه جدار ضخیم *FGM* با اعمال بارگذاری مکانیکی و حرارتی در موتور احتراق داخلی

استاد راهنما

دکتر مهدی اخلاقی

دانشجو

آرش زمانی



نه به شيوه اي رايج و مرسوم با خانواده و از روي اراده

بر آن كه از استاد گرامي جناب آقاي دكتر اخلاقي كه در تمام مدير

ان اين راه نامه همواره راهنما و مشوق اينجانب بودند نهايت تشكر و

قدرداني را بنمايم.

عالوه بر راهنمايي هاي علمي, من و رفتار ايشان هميشه گراني خواهد بود فرا راهم

در گوي زندگي. اميد كه سايه مهر و بزرگواري ايشان بر سر جوانان مشتاق و جوياي

دان پاينده باد.

در پايان از زحمات جناب آقاي مهندس عيني و جناب آقاي مهندس ميرسليم كه در

اين راه ياري و مرا از تجربيات خود بهره مند نمودند, بسيار سپاسگزارم.

تقدیم به

پدر و مادرم

و یگانه خواهر عزیزم

الگاژ منحژدر به فرد بودژ ژایاژ نامه
بدینوسیله الگاژ مΩ تردد که مقاله مندرج در ایژ ژایاژ نامه تا کنوژ براΩ دریافت هیچ نوΩ مدرکΩ
توسط اینجانب و فرد دیگرΩ ارائه نشده است.

Ωامضا

چکیده

یکی از اهداف همیشگی محققان صنعت تولید موتور دستیابی به بازده حرارتی بالاتر بوده است. از جمله روشهای دستیابی به این هدف در موتورهای احتراق داخلی، استفاده از موادی با ضریب رسانایی حرارتی پایین در بدنه سیلندر یا به عبارت دیگر عایق سازی بدنه سیلندر می باشد که در این راستا مواد سرامیکی بهترین انتخاب برای نیل به این هدف می باشند. در سالهای اخیر کاربرد و استفاده از پوششهای سرامیکی در محفظه احتراق مورد بررسی قرار گرفته است ولی از آنجا که عمر این گونه پوششها محدود می باشد محققان به تازگی به فکر استفاده از مواد جایگزینی از جمله مواد هدفمند در بدنه سیلندر افتاده اند.

مواد هدفمند دسته ای جدید از مواد مقاوم در برابر حرارت می باشند که در صنایع پیشرفته کاربرد دارند. این مواد به گونه ای ساخته می شوند که در یک طرف سرامیک و در طرف دیگر فلز قرار گرفته و در بین دو سطح ترکیب ویژه ای از دو ماده وجود خواهد داشت. بدین ترتیب خواص مکانیکی از نقطه ای به نقطه دیگر متفاوت خواهد بود. این مواد علاوه بر مقاومت حرارتی بالا، در برابر سایش و خوردگی نیز مقاومند.

در قسمت اول این تحقیق توزیع درجه حرارت در سیلندر موتور در یک سیکل در حالت گذرا و نیز میزان حرارت تلف شده به سیستم خنک کاری و بیشینه دمای سطح برای مواد مختلفی چون فلز ، سرامیک ، پوشش سرامیکی و مواد هدفمند (FGM) تعیین شده است. در قسمت دوم نیز تنشهای شعاعی و محیطی ناشی از ترکیب شرایط مرزی مکانیکی و حرارتی درون سیلندر موتور به صورت دینامیکی و در طول یک سیکل تعیین شده است و در آخر بین نتایج مقایسه ای انجام گرفته است.

سیلندر موتور به صورت کرنش صفحه ای(طول بینهایت) و متقارن محوری مدل سازی شده است و برای تعیین خواص ماده هدفمند از مدل غیر خطی توانی استفاده شده است. همچنین برای حل معادلات حاکم روش چند لایه ای مورد استفاده قرار گرفته است.

فهرست

صفحه

قدردانی ..... الف
اهدانامه ..... ب
اعلان منحصر به فرد بودن پایان نامه ..... پ
چکیده ..... ت
فهرست ..... ث
فهرست اشکال ..... چ
فهرست جداول ..... خ
فهرست علائم ..... د

فصل ۱ : موتورهای دیزلی آدیاباتیک ۱
۱-۱ مقدمه ۱
۱-۲ موتورهای سرامیکی آدیاباتیک ۲
۱-۳ مزایای استفاده از سرامیک در موتورها ۵
۱-۳-۱ کاهش مصرف سوخت ۶
۱-۳-۲ کاهش آلودگی ۷
۱-۳-۳ قابلیت استفاده از سوختهای جایگزین ۸
۱-۳-۴ کاهش آلودگی صوتی ۸
۱-۳-۵ افزایش قابلیت اطمینان ۹
۱-۴ تنش و درجه حرارت در موتورهای آدیاباتیک ۹
۱-۵ مواد قابل استفاده در موتورهای سرامیکی ۱۰
۱-۶ روشهای روغن کاری در موتورهای سرامیکی ۱۱
۱-۶-۱ روغن کاری هیدرودینامیکی ۱۲
۱-۶-۲ روغن کاری جامد ۱۲
۱-۷ روشهای عایق سازی موتور بوسیله سرامیک ۱۳
۱-۷-۱ پوشش سرامیکی ۱۳
۱-۷-۲ سیلندر های سرامیکی یک پارچه ۱۷
۱-۷-۳ سیلندر های ساخته شده از مواد FGM (هدفمند) ۱۸

فصل ۲: مقدمه ای بر مواد هدفمند ۲۱
۲-۱ مقدمه ۲۱
۲-۲ کلیات مواد هدفمند ۲۲
۲-۲-۱ فیزیک مواد هدفمند ۲۳
۲-۲-۲ تاریخچه مواد هدفمند ۲۳
۲-۲-۳ فرآیندهای ساخت مواد هدفمند ۲۶
۲-۲-۴ ماهیت مکانیکی مواد FGM ۲۷
۲-۳ مروری بر پژوهشهای انجام شده در زمینه تحلیل استوانه FGM ۳۱

فصل ۳ : معادلات و روابط حاکم بر مسئله ۳۶

فهرست

صفحه

۳-۱ مقدمه ۳۶
۳-۲ معادله انتقال حرارت حاکم بر هندسه مسئله ۳۷
۳-۲ معادله ترموالاستیسیته حاکم بر هندسه مسئله ۴۳

فصل ۴ : نتایج ۵۱
۴-۱ مقدمه ۵۱
۴-۲ بررسی صحت نتایج ۵۱
۴-۳ اعمال شرایط مرزی ۵۷
۴-۳-۱ شرایط مرزی معادله انتقال حرارت ۵۷
۴-۳-۲ شرایط مرزی معادله نویر ۶۲
۴-۴ مشخصات مواد مورد استفاده ۶۳
۴-۵ نتایج ۶۵
۴-۶ نمودارها ۷۱
۴-۶-۱ نتایج برای دور ۱۵۰۰ *rpm* و ۲۰٪ بار کامل ۷۲
۴-۶-۲ نتایج برای دور ۱۵۰۰ *rpm* و ۴۰٪ بار کامل ۷۷
۴-۶-۳ نتایج برای دور ۱۵۰۰ *rpm* و ۶۰٪ بار کامل ۸۰
۴-۶-۴ نتایج برای دور ۲۰۰۰ *rpm* و ۲۰٪ بار کامل ۸۳
۴-۶-۵ نتایج برای دور ۲۰۰۰ *rpm* و ۴۰٪ بار کامل ۸۶
۴-۶-۶ نتایج برای دور ۲۰۰۰ *rpm* و ۶۰٪ بار کامل ۸۹
۴-۶-۷ نتایج برای دور ۲۵۰۰ *rpm* و ۲۰٪ بار کامل ۹۱
۴-۶-۸ نتایج برای دور ۲۵۰۰ *rpm* و ۴۰٪ بار کامل ۹۳
۴-۶-۹ نتایج برای دور ۲۵۰۰ *rpm* و ۶۰٪ بار کامل ۹۴
۴-۶-۱۰ انتقال حرارت و بیشینه دمای سطح ۹۵

فصل ۵ : جمع بندی و ارائه پیشنهادات ۹۸
۵-۱ مقدمه ۹۸
۵-۲ مروی بر نحوه انجام پروژه ۹۹
۵-۳ بررسی اجمالی نتایج ۱۰۰
۵-۴ ارائه پیشنهادات ۱۰۳

مراجع ۱۰۴
پیوست ۱۰۸

فهرس الأشكال و نماذج

شكل(Ĥ-Ĥ)، درصد تأثيرپذيري افت انرژي در يک موتور ديزلي (فورد) ..... ĥ

شكل(ĥ-Ĥ)، شماتيک يک موتور Ayلي به همراه تجهيزات آزمون ..... Ĩ

شكل(Ħ-Ĥ)، مشخصه سوخت در نيروي بار..... ĩ

شكل(ĥ-Ĥ)، مشخصه سوخت در باركامل ..... ĩ

شكل(Ĩ-Ĥ)، توليد آلاينده *NOx* در نيروي بار ..... Ī

شكل(ĩ-Ĥ)، توليد آلاينده *NOx* در بار كامل ..... Ī

شكل(Ĩ-Ĥ)، المان گوشه ا سراميكي بر روي تاج سيلندر ..... Ĥħ

شكل(ĩ-Ĥ)، نمونه اي از ماده *FGM* با شكل هايه ..... ĤĬ

شكل(č-č)، توزيع خوا ! در مواد مركب و هدفمند با توجه به توزيع مواد سازنده ..... ĥĥ

شكل(Ĥ-Ħ)، شكل شماتيک استوانه با زير هاي آزمون ..... ĦĪ

شكل(ĥ-Ħ)، نمايي از المان در شرايط شده براي محاسبه ..... Ħĩ

شكل(Ď-Ď)، نحوه قرار گيري هايه ها، المانها و شبكه ها در محيط ارائه شده ..... ĥĤ

نمودار(Ĥ-ħ)، توزيع دماي محاسباتي از المان محدود در زمانهاي مختلف همراه با نتايج تجربي ..... ĨĦ

نمودار(ĥ-ħ)، توزيع تنش اصلي از المان محدود در زمانهاي مختلف همراه با نتايج تجربي ..... Ĩĥ

نمودار(Ħ-ħ)، توزيع تنش اصلي از المان محدود و تحليلي در ليدار ..... Ĩĥ

نمودار(ħ-ħ)، توزيع تنش محيطي از المان محدود در زمانهاي مختلف همراه با نتايج تجربي ..... ĨĨ

نمودار(Ĩ-ħ)، دماي گاز و راديال جابجايي در گوه يک سيكل ..... ĩġ

نمودار(ĩ-ħ)، بيشينه دماي گاز , راديال جابجايي و فشار در گوه يک سيكل ..... ĩġ

نمودار(Ē-đ)، افزايش دماي سيال خنک كن از استاتور سرد موتور ..... ĩĤ

نمودار(ī-ħ)، تأثيرات فشار گاز دروني سيلندر در گوه يک سيكل ..... ĩĦ

شكل(ħ-Ĩ)، تأثيرات هدايت حرارتي در امت سيلندر ..... ĩĨ

شكل(Ĥġ-ħ)، تأثيرات شكاف در امت سيلندر ..... ĩĨ

شكل(ĤĤ-ħ)، تأثيرات مدول استيفنر در امت سيلندر ..... ĩĨ

شكل(ĤĤ-ħ)، تأثيرات راديال نيوتن حرارتي در امت سيلندر ..... ĩĨ

نمودار(ĥĦ-ħ)، ميزان تأثير آلاينده هاي موتور بر دماي هوا ..... Ĩġ

نمودارهاي (Čđ-đ) الي (čĒ-đ)، نتايج معادله انتقال حرارت براي دور *rpm* و ČĐċċ% بار كامل ..... Ĩĥ-Ĩħ

نمودارهاي (čē-đ) الي (dĎ-đ)، نتايج معادله تنش حرارتي راي دور *rpm* و ČĐċċ% بار كامل ..... Ĩħ-Ĩĩ

نمودارهاي (đđ-đ) الي (ĐČ-đ)، نتايج معادله انتقال حرارت براي دور *rpm* و ČĐċċ% بار كامل ..... Ĩĩ-Ĩī

نمودارهاي (Đč-đ) الي (đČ-đ)، نتايج معادله تنش حرارتي براي دور *rpm* و ČĐċċ% بار كامل ..... Ĩī-ĨĬ

نمودارهاي (đč-đ) الي (đĔ-đ)، نتايج معادله انتقال حرارت براي دور *rpm* و ČĐċċ% بار كامل ..... īġ-īĤ

نمودارهاي (Ēċ-đ) الي (ĒĔ-đ)، نتايج معادله تنش حرارتي براي دور *rpm* و ČĐċċ% بار كامل ..... īĤ-īĥ

نمودارهاي (ēċ-đ) الي (ēĒ-đ)، نتايج معادله انتقال حرارت براي دور *rpm* و ċċċċ% بار كامل ..... īĦ-īh

نمودارهاي (ēē-đ) الي (ĔĒ-đ)، نتايج معادله تنش حرارتي براي دور *rpm* و ċċċċ% بار كامل ..... īh-īĨ

نمودارهاي (ēċ-đ) الي (ČċĐ-đ)، نتايج معادله انتقال حرارت براي دور *rpm* و ċċċċ% بار كامل ..... īĭ-īĪ

نمودارهاي (Čċđ-đ) الي (ČČĐ-đ)، نتايج معادله تنش حرارتي براي دور *rpm* و ċċċċ% بار كامل ..... īĪ-īī

نمودارهاي (ČČđ-đ) الي (ČčĎ-đ)، نتايج معادله انتقال حرارت براي دور *rpm* و ċċċċ% بار كامل ..... īĬ-Ĭġ

نمودارهاي (Ččđ-đ) الي (ČčĒ-đ)، نتايج معادله تنش حرارتي براي دور *rpm* و ċċċċ% بار كامل ..... Ĭġ

نمودارهاي (ČĎĎ-ď) الّي (ČĎĎ-ď), نتايج معادلّه انتقال ƒ حرارة Θ براي دور *rpm* ċĐĊċ و ċč% بار کامل ..... ĬĤ
نمودارهاي (ČĎĔ-ď) الّي (ČĎĔ-ď), نتايج معادلّه تن I ƒ حرارتي براي دور *rpm* ċĐĊċ و ċč% بار کامل ..... ĬĥĤ
نمودارهاي (ČďĐ-ď) الّي (ČďĐ-ď), نتايج معادلّه تن I ƒ حرارتي براي دور *rpm* ċĐĊċ و ċď% بار کامل ..... ĬĦ
نمودارهاي (Čďđ-ď) الّي (ČĐČ-ď), نتايج معادلّه تن I ƒ حرارتي براي دور *rpm* ċĐĊċ و ċď% بار کامل ..... Ĭħ
نمودارهاي (ČĐĔ-ď) الّي (ČĐĔ-ď), نتايج اتلاف ƒ حرارتي و بيشينه دماي سلّ Tă ..... ĬĨ
نمودارهاي (ĤĨţ-ď) الّي (ČŢģ-ď), نتايج درصد کاهش انتقال ƒ حرارة Θ در مقايسه با سيلندر شدني ..... ĬĩĨ

جداول O'rsHə

جدوǧ(Č-Č), خوا ! آرماني براي مواد مورد استĂاده در سيلندر موتور[3] ..... Ħ
جدوǧ(č-Č), Ăﻑbه بندي شركت هاي فعاǧ در زمينه Ăيلŭ سازي موتور ..... ħ
جدوǧ(Ď-Č, خوا ! مواد قابĶ استĂاده در سيلندر موتور Ăيلŭ ..... Ĥǧ
جدوǧ(ď-Č), مواد قابĶ استĂاده در قƙمتهاي مUتUر Ăيلŭ موتور بندي شده ..... ĤĤ
جدوǧ(Ĥ-Ĩ), خوا ! مواد قابĶ استĂاده به ŭنواǰ ǰوش ا سراميكي ..... ĤĨ
جدوǧ(Ĥ-ħ), خوا ! فلǰ و سراميک استĂاده شده در ماده *FGM* براي قƙمت تايين نتايƨ ..... Ĩĥ
جدوǧ(ĥ-ħ), خوا ! مكانيكي مشتر t' در ŭرفته شده در روش تحليلي و اŭماǰ محدود ..... ĨĨ
جدوǧ(Ħ-ħ) , توزيŭ دما در ماده *FGM* در مƙايƙه با مرجŭ [31] ..... Ĩĩ
جدوǧ(ħ-ħ), توزيŭ تن ا شعاŭي در سيلندر *FGM* بر ƒƨƒ ا مگاŭاسكاǧ در مƙايƙه با مرجŭ [31]..... Ĩĩ
جدوǧ(ĥ-Ĩ), توزيŭ تن ا محيǎي در سيلندر *FGM* بر ƒƨƒ ا مگاŭاسكاǧ در مƙايƙه با مرجŭ [31] ..... Ĩĩ
جدوǧ(ĩ-ħ), مشUŽUƟ موتور ديǰي مورد استĂاده ..... Ĩī
جدوǧ(Ī-ď), خوا ! مواد بكار رفته در سيلندر موتور ..... ĩħ
جدوǧ(ĩ-ħ), بيشينه دماي سƍ در دور *rpm* ĤĨǧǧ ..... ĪĤ
جدوǧ(Ĩ-ħ)ŭ درصد كاه ا اتلاŭ ƒرارتي از سيلندرŭ در مƙايƙه با سيلندر Šدني ..... ĬĨ

فهرست علائم

a	بردار تابش ماهوی
C	ظرفیت گرمایی ویژه
E	مدول الاستیسیته
f	کسر حجمی ماده *FGM*
h	ضریب جابجایی
K	ضریب هدایت گرمایی
l	طول المان
n	نمای کسر حجمی ماده *FGM*
P_{in}	فشار داخلی
P_{out}	فشار خارجی
r	شعاع استوانه
r_a	شعاع داخلی
r_b	شعاع خارجی
r_j	شعاع گره اول المان
r_k	شعاع گره دوم المان
T	دما
T_{in}	دمای داخلی استوانه
T_{out}	دمای خارجی استوانه
T_0	دمای اولیه
T_∞	دمای سیال درون سیلندر
u	جابجایی
α	ضریب انبساط حرارتی
$\in$	کرنش
ν	ضریب پواسون
ρ	چگالی
σ_{rr}	تنش شعاعی
$\sigma_{\theta\theta}$	تنش محیطی
FDM	روش تفاضل محدود
FEM	روش المان محدود
FGM	Functionally Graded Material
PSZ	Partially Stabilized Zirconium
rpm	دور بر دقیقه

فصل ۱

موتورهای دیزلی آدیاباتیک

فصل ۱

موتورهای دیزلی آدیاباتیک

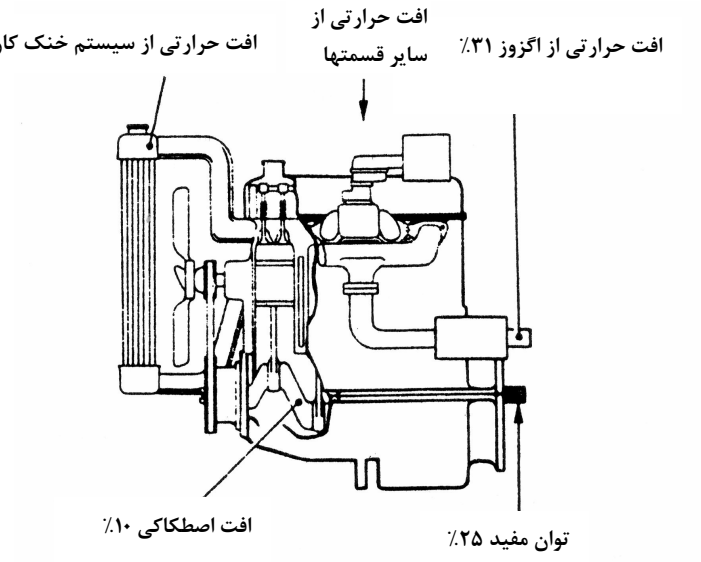
۱-۱ مقدمه

طراحان موتور، پیوسته در جستجوی مواد جایگزینی بوده اند تا بتوانند کارایی و دوام موتور را افزایش داده در حالیکه وزن و هزینه های ساخت آن کاهش یابد. سرامیک ها گروهی از مواد می باشند که در سالهای اخیر توجه طراحان موتور را به صورت قابل ملاحظه ای به خود جلب نموده اند.

استفاده از موادی با ضریب هدایت حرارتی پایین در موتورهای احتراق داخلی پدیده تازه ای نمی باشد بلکه از روزهای اولیه طراحی موتورهای دیزلی استفاده از چنین موادی و خصوصاً سرامیک ها برای جلوگیری از تلفات حرارتی دیواره های محفظه احتراق به صورت اختراعات ثبت شده *(patents)* وجود داشت. اما به بهر حال تا سالهای اخیر سرامیک ها به جز استفاده در عایق شمع ، در قسمتهای دیگری از محفظه احتراق کاربرد نداشتند [۱].

۱-۲ موتورهای سرامیکی آدیاباتیک

همانگونه که از نام آنها پیداست این موتورها به منظور کاهش انتقال حرارت در طول عملکرد موتور طراحی می شوند. یکی از منابع اصلی افت انرژی در موتورهای دیزلی افت حرارتی از طریق سیستم خنک کن می باشد که معمولاً دومین عامل افت انرژی می باشد. این حرارت به صورت انرژی گرمایی غیر مفید وارد محیط شده و علاوه بر آنکه باعث افت بازده می شود موجب ایجاد آلودگی حرارتی برای محیط نیز می گردد. شکل (۱-۱) درصد تقریبی افت انرژی در یک موتور دیزلی را نشان می دهد.



شکل(۱-۱)، درصد تقریبی افت انرژی در یک موتور دیزلی (فورد)

به طور کلی، اتلاف حرارت از موتور را به روشهای زیر می توان کاهش داد [۲].

۱- عایق کردن محفظه احتراق (مانند پارچه سیلندر(*Liner*) ، تاج پیستون و سر سیلندر) ، ورودی های هوا و خروجی دود.

۲- حذف سیستم خنک کاری و در نتیجه کاهش اتلاف انرژی حرارتی مربوط به آن.

۳- استفاده از انرژی گرمایی گازهای خروجی در اگزوز به وسیله تربو شارژ یا سوپرشارژ.

ساده ترین نوع موتور آدیاباتیک توسط عایق کاری محفظه احتراق و از طریق ایجاد پوششی از سرامیک انجام می شود. در این نوع سیستم دمای داخلی محفظه احتراق افزایش بسیار زیادی نمی یابد چراکه هنوز از سیستم خنک کاری برای تعدیل دمای داخل محفظه احتراق بهره برده می شود. این در حالی است که در موتورهایی که کاملاً عایق شده اند و بدنه سیلندر به طور کامل از سرامیک ساخته شده است افزایش چشمگیری را در دمای جداره داخلی محفظه احتراق شاهد هستیم. در این نوع، سیستم خنک کاری به طور کامل حذف می شود. موتورهای نوع اول که در آنها سیستم خنک کاری وجود دارد معمولاً تحت عنوان *Low Heat Rejection Engine* و موتورهای نوع دوم تحت عنوان *Adiabatic Engine* شناخته می شوند که در هر دو موتور به علت افزایش دمای احتراق مقدار کار در مرحله انبساط افزایش می یابد.

با افزایش دمای سطح پارچه سیلندر (*Liner*) تا حداکثر ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد در موتورهای دوزمانه بزرگ سرامیکی فاقد سیستم خنک کاری، مواد معمول مورد استفاده درون سیلندر دیگر قادر به عملکرد در چنین دمایی نمی باشند . در جدول (۱-۱) مشخصات مورد نیاز برای مواد قابل استفاده درچنین دمایی و به عبارتی موتورهای عایق، ثبت شده است [۳].

جدول (۱-۱)، خواص آرمانی برای مواد مورد استفاده درسیلندر موتور[3]

Temperature limit $^\circ C(^\circ F)$	1350 (1800)
Fracture toughness(K_{IC}), $MPa\sqrt{m}$ ($ksi\sqrt{in}$)	>8.0(7)
Flexural strength, MPa (ksi)	>800(115)
Thermal conductivity(k), $W/m\cdot k$	<0.01
Thermal shock resistance (ΔT), $^\circ C$ ($^\circ F$)	>500(900)
$10^{-6}/^\circ C$ Coefficient of expansion,	>10
(ksi) MPa Creep rupture strength,	>97 (14)
Friction coefficient (dry)	>0.2

در تحقیقاتی که در سالهای اخیر انجام شده است تلاشهایی برای دستیابی به یک سیستم یکپارچه از سرامیک صورت گرفته است. بیشتر تحقیقات متوجه پوششهای ضخیم سرامیکی که به روشهای پلاسما اسپری ، تفنگهای انفجاری و یا روشهای رسوب گذاری شیمیایی تولید می شوند ، بوده است.

اگرچه اصطلاح آدیاباتیک هم اکنون برای اینگونه موتورها رواج یافته است ولیکن باید توجه شود که عبارت آدیاباتیک مفهومی ترمودینامیکی می باشد و معنای آن اینست که هیچ گونه گرمایی در طول فرایند با سیستم مبادله نمی شود. بلکه در چنین موتورهایی هدف کاهش اتلاف حرارتی بوده و اتلاف حرارتی همچنان از پورتهای ورودی و خروجی سیلندر انجام می گیرد. به هر حال عایق کاری داخل محفظه احتراق سبب افزایش راندمان و کاهش اتلاف حرارتی به محیط می شود، و علاوه بر آن انرژی بیشتری در پورت خروجی برای توربوشارژ فراهم می شود [۳].

در جدول (۱-۲) چگونگی طبقه بندی موتورهای مذکور و شرکتهای درگیر در تحقیقات آنها نشان داده شده اند. طرح شماتیکی برای یک موتور عایق نیز در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. با دنبال کردن مسیر هوا در می یابیم که هوا در این موتورها توسط کمپرسور توربوشارژ فشرده شده و سپس وارد سیلندر می شوند ، پس از مخلوط شدن با سوخت و انجام عمل احتراق گاز های سوخته شده پس از خروج از پورت دود وارد دو توربین می شوند تا از انرژی جنبشی آن حداکثر استفاده برده شود. اولین توربین برای به گردش درآوردن کمپرسور توربوشارژ و دیگری همانگونه که مشخص است به میل لنگ کوپل بوده و باعث افزایش قدرت خروجی موتور می شود. این توربین اصطلاحاً توربو کامپوند نامیده می شود (*turbocompound*) [۳].

جدول (۱-۲)، طبقه بندی شرکت های فعال در زمینه عایق سازی موتور [۳].

Engine material	Organization with waterless designs	Organization with water-cooled designs
Monolithic Ceramic	Kyocera, Ford, Cummins ,and Isuzu	NGK
Monolithic/coating	.....	GM
Ceramic coating	Adiabatic inc, Cummins and Komatsu	Hino motors, Cummins, Caterpillar, Detroit Diesel, British Leyland and Daimler Benz
Low-conductivity metal(with air gap)	…..	Woschni and GM

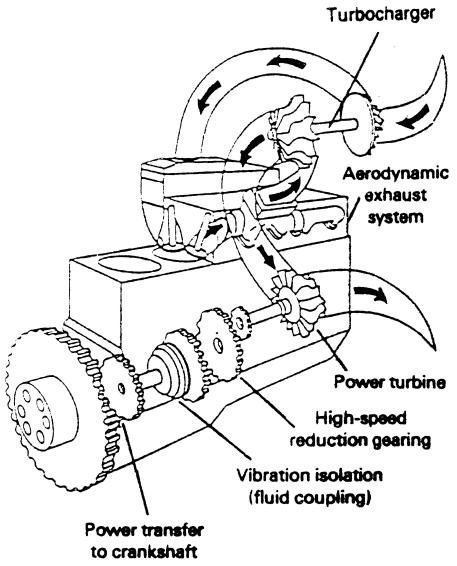


Fig 3 Schematic of adiabatic, turbocompounded diesel engine

شکل (۱-۲)، طرح شماتیک یک موتور عایق به همراه تجهیزات آن [۳]

۱-۳ مزایای استفاده از سرامیک در موتورها

به طور کلی مزایای استفاده از سرامیک به عنوان ماده عایق در موتورها به شرح زیر می باشد.

کاهش مصرف سوخت.

کاهش آلودگی و دود سیاه اگزوز.

قابلیت استفاده از سوختهای جایگزین.

کاهش آلودگی صوتی.

افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه های نگه داری.

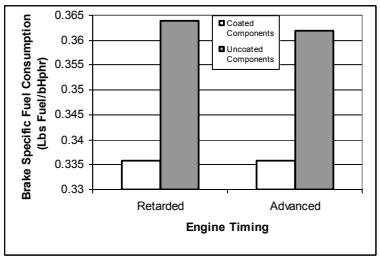
عمر بیشتر قطعات.

وزن کمتر و کاهش حجم کلی موتور.

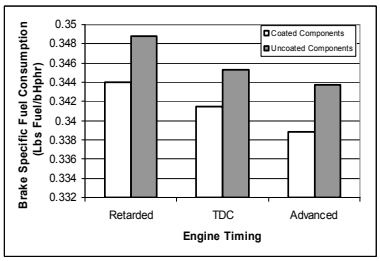
اکنون به توضیح بیشتر هر کدام از این موارد می پردازیم.

۱-۳-۱ کاهش مصرف سوخت

در این گونه موتورها کاهش مصرف سوخت؛ ناشی از بازیافت حرارت ، افزایش دما ، بهبود فرایند احتراق ، افزایش فشار ناشی از افزایش دما و افزایش کار ناشی از مرحله انبساط می باشد . کاهش مصرف سوخت به صورت زیر تخمین زده شده است. کاهش مصرف سوخت ناشی از بهبود کار مرحله انبساط : ۵٪ ؛ افزایش توان میل لنگ توسط توربین توربوکامپوند : ۷٪ ، کاهش انرژی مصرفی برای فن رادیاتور : ۷٪ و واترپمپ : ۱٪ و کاهش اصطکاک : ۸٪ که مجموعاً ۲۰٪ کاهش در مصرف سوخت را شاهد می باشیم. نمونه های ساخته شده توسط کمپانی *Cummins* ، *Hino* و *Komatsu* (جدول۱-۲) به مقدار مصرف سوخت ۰/۱۳ کیلوگرم سوخت به ازای واحد توان دست یافته اند [۳]. اشکال شماره (۱-۳) و (۱-۴) تاثیر استفاده از پوشش سرامیکی را در یک موتور ۱۶ سیلندر (*16V645E3B EMD*) بر میزان مصرف ویژه سوخت نشان می دهند [۱۰].



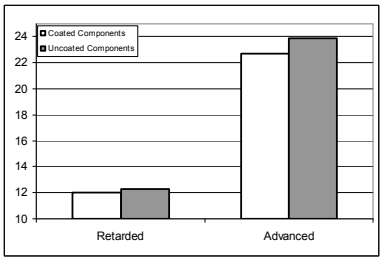
شکل (۱-۳)، مصرف ویژه سوخت در نیم بار [۱۰]



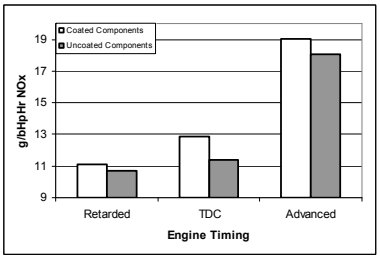
شکل (۱-۴)، مصرف ویژه سوخت در بارکامل [۱۰]

۱-۳-۲ کاهش آلودگی

در این گونه موتورها آلودگی های هیدروکربنی به علت افزایش دمای محفظه احتراق و اکسیداسیون بهتر سوخت کاهش می یابد . البته در چنین دمای بالایی امکان ترکیب نیتروژن با اکسیژن افزایش می یابد و معمولاً آلودگی های NOx در آنها بیشتر می باشد . البته به علت کاهش تاخیر در زمان جرقه در برخی از دورها کاهش تولید NOx نیز گزارش شده است. به علت کاهش آلودگی هیدروکربنی مقدار دوده و سوخت نسوخته نیز در دود اگزوز کاهش می یابد. در این مورد کاهش ۶۰ الی ۸۰٪ در آلودگی خروجی اگزوز توسط کمپانیهای مختلف گزارش شده است [۱]. اشکال شماره (۱-۵) و (۱-۶) تاثیر استفاده از پوشش سرامیکی را در یک موتور ۱۶ سیلندر (*16V645E3B EMD*) بر میزان تولید NO_x نشان می دهند [۱۰]. همانگونه که از اشکال نمایان است استفاده از سرامیک باعث افزایش دمای محفظه احتراق می گردد و این عامل به عنوان کاتالیزور موجب افزایش سرعت ترکیب نیتروژن و اکسیژن و تولید الاینده NO_x می شود. البته با افزایش دمای محفظه احتراق و ایجاد تاخیر در زمان جرقه در برخی از دورها و بارها احتمال کاهش NO_x نیز وجود دارد.



شکل(۱-۵)، تولید آلاینده **NOx** در نیم بار [۱۰]



شکل(۱-۶)، تولید آلاینده **NOx** در بار کامل [۱۰]