

**В.В. ШПАКОВСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**А.П. МАРЧЕНКО**, докт. техн. наук, **В.А. ПЫЛЕВ**, докт. техн. наук,  
**О.Ю. ЛИНЬКОВ**, канд. техн. наук, **В.В. ОСЕЙЧУК**, НТУ „ХПИ”

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОРУНДОВОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПОРШНЯ НА УСКОРЕНИЕ ПРЕДПЛАМЕННОЙ ПОДГОТОВКИ ТОПЛИВА**

Підвищення ресурсу й паливно-економічних показників дизелів з корундовими поршнями, отримане в результаті випробувань, указує не тільки на зниження механічних втрат у циліндро-поршневій групі, але й на поліпшення організації робочого процесу в камері згорання за рахунок термokatалітичної конверсії палива.

Increase of resource and fuel-economic indicators of diesels with the corundum pistons, got as result of tests, specifies not only on the decrease of mechanical losses in a piston-cylinder-group but also on the improvement of organization of working process in the combustion chamber due to catalytic thermal conversion of fuel.

**Постановка проблемы и связь с научными направлениями.** Совершенствование процессов воспламенения и сгорания топлива в дизеле играет основную роль при решении задач по снижению расхода топлива, уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу, повышению ресурса. Однако процессы сгорания топлива являются очень сложными, остаются недостаточно изученными и нуждаются в дальнейших исследованиях. Помимо традиционных направлений, таких как оптимизация параметров впрыскивания топлива, формы камеры сгорания (КС), формы газовоздушных каналов, в настоящее время осуществляется интенсивный поиск дополнительных способов влияния на эффективность сгорания.

**Анализ публикаций.** Для улучшения экономических показателей двигателя необходимо улучшать дисперсность распыливания топлива, увеличивать вихревое движение заряда, повышать температуру и давление к моменту начала впрыскивания.

Для повышения качества рабочего процесса предлагается введение в топливо различных присадок [1] и использование предварительной термokatалитической его обработки [2]. Недостатком данного подхода является необходимость ввода в цилиндры двигателя активирующих веществ вместе с топливом.

Дополнительного повышения температуры и давления в КС достигают применением калильных тел [3]. Это снижает период задержки воспламенения топлива и приводит к улучшению показателей токсичности отработавших газов без значительных изменений конструкции. Здесь трудности вызывает задача определения оптимальных размеров калильного тела и места его расположения.

Исследования по применению внутрицилиндровых катализаторов [4]

подтвердили возможность улучшения показателей рабочего процесса дизеля путем организации терموкаталитической конверсии топлива в КС. Термокаталитическое преобразование части топлива осуществляется с целью снижения энергии активации предпламенных и пламенных реакций углеводородов топлива за счет изменения реакционной способности среды, путем увеличения в ней количества активных частиц (центров зарождения реакций), то есть повышение их концентрации в КС. Образование активных частиц происходит в результате пиролитического и термического преобразования углеводородов на каталитическом элементе. Установлено, что для осуществления термокаталитической реакции превращения углеводородов необходимо попадание топлива на катализатор с температурой более  $(400 - 500)^\circ\text{C}$  и рассредоточение продуктов термокаталитической конверсии по всему объему КС в течение предпламенной фазы цикла. Необходимо также обеспечить чистоту поверхности катализатора и способность ее к самоочищению от нагара. Применение промышленного катализатора из слоя корундовых гранул, пропитанных солями никеля с последующей прокалкой, оказалось нецелесообразным из-за низкого содержания никеля в гранулах, низкой прочности и склонности к разрушению [4]. Однако в результате исследований было установлено, что применение термокаталитических покрытий ускоряет процесс предпламенной подготовки топлива, сокращает продолжительность задержки воспламенения с  $9,5^\circ$  до  $7^\circ$  поворота коленчатого вала (п.к.в.), смещает оптимальный угол начала впрыска топлива в сторону более поздних углов. Присутствие катализатора позволяет снизить максимальную скорость тепловыделения на 25%, а максимум тепловыделения смещается к верхней мертвой точке (ВМТ). При этом уменьшается концентрация оксидов азота в отработанных газах на 25%, а содержание сажи уменьшается на 20%.

При применении в качестве катализаторов жаровых вставок, со слоем грунтового покрытия из порошка нихрома, нанесенного порошково-плазменным способом, а затем каталитического покрытия ПХ20Н80 или ПХ15Н80Ю5, нанесенного газопламенным напылением, установлено, что это приводит к ускорению процесса предпламенной подготовки топлива, сокращению периода задержки воспламенения, уменьшению концентрации оксидов азота в отработавших газах, сокращению продолжительности сгорания в цикле на  $20^\circ$  п.к.в., снижению удельного расхода топлива. Однако дополнительная установка в КС каталитических жаровых вставок усложняет конструкцию дизеля и снижает его надежность [5].

При проведении испытаний дизеля, укомплектованного поршнями с каталитическими активными трехслойными покрытиями, состоящими из адгезионного грунтового слоя из порошка Н85Ю15, теплоизоляционного слоя из порошка глинозема и порошка нихрома ПХ20Н80, подтверждено существование термокаталитической конверсии топлива и ее влияние на показатели рабочего процесса дизеля [4]. Однако во время испытаний керамический теплоизоляционный слой разрушился. Из-за склонности к разрушению примене-

ние таких термokatалитических покрытий на поршнях может привести к аварии двигателя.

Глубокие исследования по влиянию теплоизоляции поршня на рабочий процесс описаны в работах [6, 7]. Методом плазменного напыления на поршни из алюминиевых сплавов наносились покрытия из оксида алюминия. Исследования были проведены на дизелях Ч 24/36, 1Ч 10,5/13, 2ЧН 26/26, Д20 и показали явные преимущества покрытий. При теплоизоляции поршня температура и давление в КС к моменту начала впрыскивания топлива выше, чем без теплоизоляции. Температура керамической поверхности головки поршня выше на 50 – 100°С, а температура тела поршня ниже на 20° – 85°С. Повышенная температура поверхности поршня определила мягкий рабочий процесс – условия для воспламенения стали более благоприятными, несколько уменьшился период его задержки. При этом доля впрыснутого топлива за уменьшенный период задержки воспламенения невелика, горение протекает в основном в диффузионной фазе и заканчивается раньше на 30 – 40° п.к.в. Наличие покрытия привело к улучшению экономичности дизеля на всех режимах и снижению суммарной токсичности отработанных газов. Было также установлено, что «иногда изменения рабочего процесса бывают чрезмерно велики по сравнению с незначительным повышением температуры поверхности» покрытия поршня [7]. Поэтому было выдвинуто предположение о каталитическом воздействии корундовой поверхности на процесс сгорания [7].

Однако теплоизолирующие покрытия так и не нашли широкого применения – из-за большой разницы в тепловом расширении алюминия и керамического покрытия происходит отслаивание последнего.

Таким образом, видно, что важнейшей проблемой при создании термokatалитического покрытия деталей КС является получение прочного, теплостойкого, теплоизолирующего каталитического слоя.

**Цели статьи.** Целью работы является оценка влияния на увеличение ресурса цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и на процесс сгорания корундового термоизолирующего слоя поверхности поршня, имеющего высокую адгезию к основному металлу.

В соответствии с представленной целью в работе решаются две задачи:

- выбор перспективного метода образования на поверхности поршня покрытия из оксида алюминия, обеспечивающего надежное сцепление материалов покрытия и поршня;
- оценка влияния теплоизолирующего слоя поверхности поршня на процесс сгорания топлива в цилиндре дизеля.

**Обоснование научных результатов.** Вместо методов плазменного напыления покрытий и микродугового оксидирования предложен метод гальвано-плазменной обработки, когда поверхностный слой алюминия обрабатываемой детали преобразуется в оксид алюминия – корунд, имеющий высокую адгезию к основному металлу. Для формирования корундового поверхностного слоя и удаления из него окислов легкоплавких соединений и окислов ме-

таллических примесей, имеющих малую адгезию, была создана полупромышленная установка гальвано-плазменной обработки [8]. На этой установке был обработан ряд деталей из алюминиевых сплавов для двигателей внутреннего сгорания. С 1987 года в условиях длительной эксплуатации были опробованы следующие детали с корундовым поверхностным слоем: поршни, в том числе камеры сгорания, огневое днище головки цилиндров, внутренние поверхности цилиндров, коренные и шатунные вкладыши, поршневые кольца, подшипники распределителя, подшипники турбокомпрессора, втулки толкателей и др. Детали показали увеличенный ресурс, надежность и лучшие эксплуатационные свойства.

Применительно к поршню масштабные экспериментальные исследования в условиях эксплуатации были проведены для двигателей различного назначения.

В результате ресурсных испытаний в депо Харьков-Сортировочный, длившихся более 12 лет, было установлено, что ресурс деталей цилиндропоршневой группы модернизированного дизеля тепловоза ЧМЭ-3, в дизель которого установлены поршни с корундовым поверхностным слоем, был в три раза больше, чем у серийного дизеля [8]. Наименьший износ гильз и цилиндрической части поршней был в первой цилиндропоршневой группе (ЦПГ) (в 1 и 6 цилиндрах), куда были установлены поршни с корундовым слоем на всей рабочей поверхности. Во второй ЦПГ (2 и 5 цилиндры) были установлены поршни с корундовым слоем только на головках поршней и кольцевом поясе, в третьей ЦПГ (3 и 4 цилиндры) – поршни с корундовым слоем только на доньшке поршня, а на цилиндрической части поршней второй и третьей ЦПГ корундового слоя не было. Но и в этих ЦПГ износ поршней, кольцевых канавок и гильз цилиндров был значительно меньше, чем у серийного дизеля. Уменьшение износа гильз, цилиндрической части поршней и кольцевых канавок первой ЦПГ можно объяснить малым коэффициентом трения корундовой поверхности и улучшением организации процесса сгорания, а уменьшение износов перечисленных поверхностей во второй и третьей ЦПГ, там, где не было корундового слоя – только лучшей организацией процесса сгорания в КС. Важно отметить, что уменьшение износа деталей ЦПГ при использовании поршней с корундовым слоем может быть связано с уменьшением механических потерь в модернизированных парах трения и с улучшением качества протекания рабочего процесса.

При проведении полевых ресурсных испытаний трактора „Беларусь” с дизелем Д-240Л, оснащенным поршнями с корундовым покрытием, установлено, что размеры деталей ЦПГ и кривошипно-шатунного механизма после наработки 15 тыс. моточасов остались без изменений; расходы топлива и масла на протяжении всего периода эксплуатации были ниже норм, установленных для новых двигателей. Стендовые испытания двигателя в Старо-Салтовском РТП Харьковской области показали, что поршни с корундовым слоем обеспечили повышение максимальной мощности дизеля на 8,7%, сни-

жение удельного расхода топлива на 6,6% и снижение температуры масла и охлаждающей жидкости на 15°С.

Испытания двигателя Д65НТ1 в составе трактора ЮМЗ с корундовым слоем на поршнях и тефлоновым покрытием на поверхностях трения, проведенные на испытательной базе ПО „Южный машиностроительный завод”, показали снижение удельного расхода топлива на 5,1%, уменьшение дымности на 16%, повышение максимальной мощности на 4,4%, снижение температуры охлаждающей воды на 5°С.

Надежная длительная работа двигателей, улучшение топливно-экономических показателей и уменьшение дымности подтверждают реальную возможность совершенствования рабочего процесса дизеля при использовании поршней с корундовым поверхностным слоем.

Совершенствование процесса сгорания следует начинать с первой его стадии – предпламенной подготовки топлива с целью уменьшения продолжительности фазы предпламенных реакций (периода запаздывания самовоспламенения смеси)  $\tau_i$ .

Задержка самовоспламенения оказывает решающее влияние на характер сгорания топлива, скорость нарастания давления, момент достижения максимального давления и температуру рабочего тела. Так, при достаточно большом  $\tau_i$  происходит цепочно-тепловой взрыв, приводящий к увеличению жесткости процесса, а значит к снижению ресурса деталей ЦПГ. При этом образуется большое количество окислов азота.

Температура деталей КС оказывает существенное влияние на протекание рабочего процесса в дизеле, на показатели его экономичности и токсичности [9]. Поэтому согласование температур стенок КС с температурой рабочего тела имеет первостепенное значение. Это подтверждается работами других исследователей [10, 11]. На основе имеющихся данных можно ожидать, что при теплоизоляции доньшка поршня температура и давление воздуха в камере сгорания на такте сжатия к моменту впрыска топлива выше, чем без теплоизоляции примерно на 70° и 0,3 МПа соответственно.

Оценку достижимых эффектов по нагреву поверхности КС с корундовым слоем выполнено на основе рассмотрения динамики прогрева неограниченной пластины. Установлено, что прогрев корундовой поверхности на глубину 5 мкм до температуры окружающей среды происходит за  $2,5 \cdot 10^{-6}$  с, на глубину 1 мкм – за  $1 \cdot 10^{-7}$  с, на глубину 0,5 мкм – за  $2,5 \cdot 10^{-8}$  с, на глубину 0,1 мкм – за  $1 \cdot 10^{-9}$  с (рис. 1). Это означает, что при скорости вращения коленчатого вала 2000 мин<sup>-1</sup> поворот вала на 1° происходит за  $0,83 \cdot 10^{-4}$  с, а поверхностный слой на глубину 0,1 мкм прогреется за  $6 \cdot 10^{-5}$  градуса поворота коленчатого вала. То есть в первом приближении можно принять, что температура поверхности корундового слоя изменяется одновременно с нагревом рабочего тела.

Результаты расчетов процесса сжатия применительно к двигателю 4ЧН12/14 при использовании серийной конструкции поршня и конструкции с корундовым слоем представлены на рис. 2. При этом для серийного дизеля

4ЧН12/14 период задержки самовоспламенения  $\tau_i$  составляет 9,5° п.к.в., а температура самовоспламенения  $T_c = 1100^\circ\text{K}$ . При использовании поршней с корундовым слоем температура  $T_c$  будет достигнута за  $\tau_{ик} = 6^\circ$  п.к.в.. При этом фактор динамичности уменьшается.

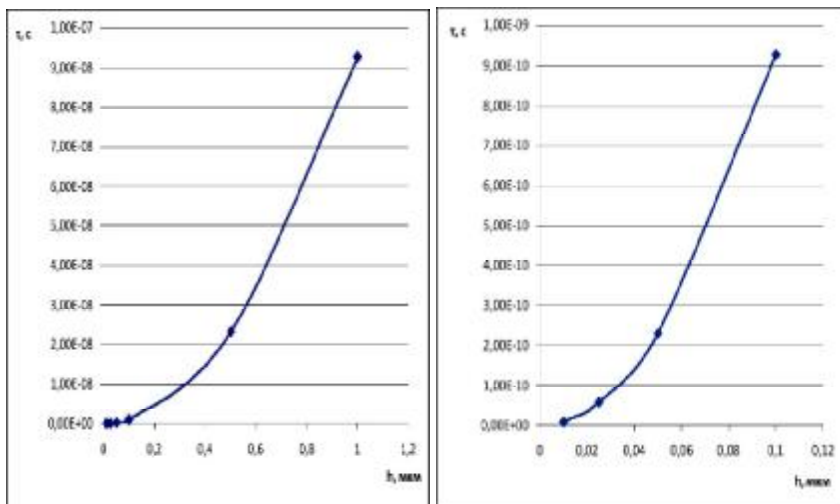


Рис. 1. Время прогрева корундового слоя по глубине до температуры окружающей среды

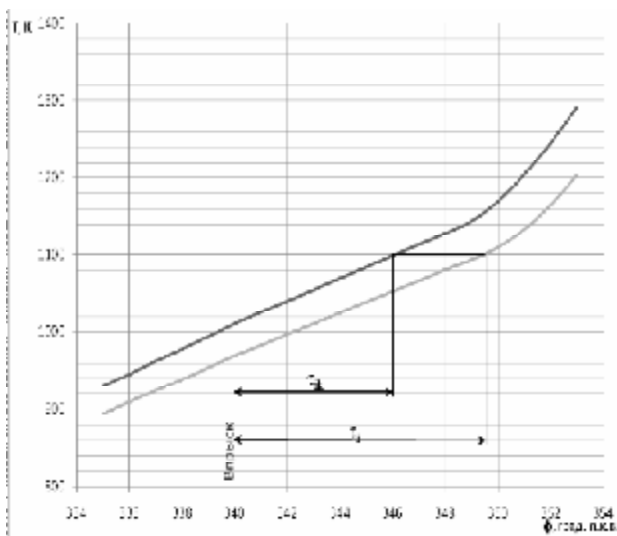


Рис. 2. Оценка периода задержки самовоспламенения при использовании серийных и корундовых поршней

Таким образом, следует ожидать, что теплоизоляция доньшка поршня приводит к повышению давления и температуры воздуха к моменту впрыскивания топлива. Это обеспечивает сокращение фазы предпламенных реакций и обуславливает более мягкий процесс сгорания, повышение ресурса двигателя, улучшение его топливной экономичности.

**Выводы.** При применении поршней с теплоизолирующим корундовым поверхностным слоем следует ожидать сокращения времени процессов предпламенной подготовки топлива и его сгорания, что приводит к улучшению топливно-экономических показателей дизеля, повышению ресурса и снижению механических потерь.

Дальнейшее направление работ требует учета локального нестационарного теплообмена в системе рабочее тело дизеля – теплоизолированная стенка камеры сгорания, а также совершенствования методики расчета рабочего процесса, включающее оценку влияния нестационарного теплообмена на экономичность и токсичность дизеля.

**Список литературы:** 1. Новоселов А.Л. Применение антидымных присадок в топливо дизелей / Двигателестроение. – 1983, №1. 2. Фомин В.М., Носков Н.И., Халед Абдулгаббар. Улучшение экологических показателей дизелей на основе предварительной термохимической переработки топлива / Автомобильные и тракторные двигатели: Межвуз. сб. науч. тр., вып. XV. – 1999. 3. Шевченко П.Л., Ширлин И.И. Калильные тела и цетановое число дизельного топлива / Автомобильная промышленность. – 2004. №4 – С.13–14. 4. Фомин В.М. Системы химического воздействия на параметры рабочего цикла дизеля / Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. – №6. 5. Фомин В.М. Пути совершенствования эколого-экономических показателей дизелей / Автомобильные и тракторные двигатели: Межвуз. сб. науч. тр., вып. XVI. – 1999. 6. Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. – Л.: Машиностроение, 1979. – 222 с. 7. Никитин М.Д., Кулик А.Я., Захаров Н.И. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей. – Л., Машиностроение, 1977. – 165 с. 8. Шпаковский В.В., Осейчук В.В. Влияние корундовой поверхности поршней дизеля тепловоза ЧМЭ-3 на эксплуатационные характеристики цилиндра-поршневой группы // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ „ХПИ“, 2007. – №2 – С. 81-85. 9. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності: Монографія. – Харків: НТУ „ХПИ“, 2001. – 332 с. 10. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. – М.: МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2001. – 591с. 11. Куколев М.И., Петриченко М.Р. Определение температурного поля стенки при периодическом тепловом воздействии /Сборник научных трудов по материалам международной конференции Двигатель-2007, посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им.Н.Э.Баумана // Под ред. Н.А. Ивашенко, В.Н. Костюкова, А.П. Науменко, Л.В. Грехова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2007. – 572 с.

*Поступила в редколлегию 01.11.07*