

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 газоздушных 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 терموкаталитической реакции превращения углеводородов необходимо попадание топлива на катализатор с температурой более $(400 - 500)^\circ\text{C}$ и рассредоточение продуктов терموкаталитической 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 терموкаталитических покрытий ускоряет процесс предпламенной подготовки топлива, сокращает продолжительность задержки воспламенения с $9,5^\circ$ до 7° 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° 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 терموкаталитической 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) τ_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 τ_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⁻¹ 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 τ_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.

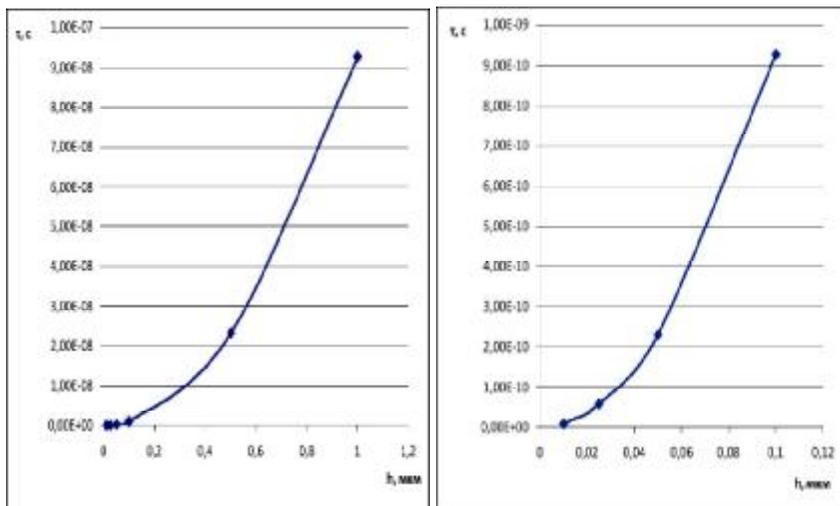


Рис. 1. Время прогрева корундового слоя по глубине до температуры окружающей среды

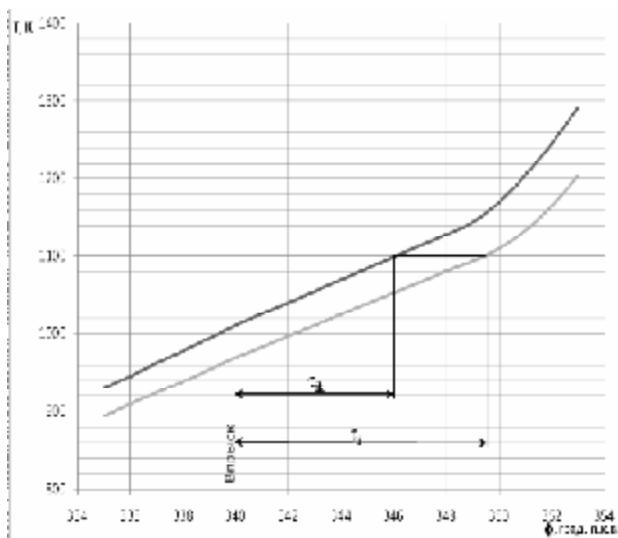


Рис. 2. Оценка периода задержки самовоспламенения при использовании серийных и корундовых поршней

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