



## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (Обзор)

Т. В. ЦЫМБАЛИСТАЯ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Обобщены литературные данные о применении теплозащитных покрытий для защиты деталей двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены методы нанесения теплозащитных покрытий и материалы, которые используются для их нанесения.

*Ключевые слова:* теплозащитные покрытия, двигатели внутреннего сгорания, детали цилиндропоршневой группы, плазменное напыление, частично стабилизированный диоксид циркония

В настоящее время основным видом двигателей, используемых в приводах автомобильного, судового и железнодорожного транспорта, сельскохозяйственной техники и целого ряда других машин и агрегатов, являются двигатели внутреннего сгорания (ДВС) [1].

Основными причинами снижения и потери работоспособности ДВС являются абразивный износ в парах трения (поршневые кольца и гильзы, подшипники скольжения коленчатых валов, кулачки распределительных валов и т. п.), кавитационный износ (гильзы цилиндров) и коррозионно-механический износ (тарелка и седло клапана) [1]. Кроме того, немаловажное значение имеет эффективная изоляция камеры сгорания теплозащитным покрытием (ТЗП), которая позволяет перераспределить рассеянное тепло таким образом, чтобы свести его потери к минимуму через охлаждающую систему и систему удаления выхлопных газов. Коррозия на поршне вызывается отложениями оксидов и сульфидов ванадия, весьма агрессивными при температурах поверхности деталей камеры сгорания (400...500 °С). Улучшение антифрикционных свойств контактирующих поверхностей деталей позволяет снизить потери на трение, которые составляют в указанных узлах около 50 % общих механических потерь в двигателе, и, таким образом, повысить экономичность его работы. Наиболее перспективным способом снижения температуры деталей ДВС, повышения износостойкости трущихся пар, защиты от коррозии является создание теплозащитных, износостойких, коррозионностойких покрытий поверхности деталей. На рис. 1 представлены детали автомобилей с ТЗП.

«SULZER METCO» — наиболее известная за рубежом фирма, занимающаяся разработкой и продажей оборудования и изготовлением матери-

алов (порошков, проволоки) для нанесения покрытий различного назначения. Ниже приведены сведения о наиболее часто применяемых фирмой материалах для покрытий, используемых для ремонта деталей автомобиля. При ремонте деталей тормозной системы (тормозные диски, колодки тормозные) для улучшения процесса торможения, снижения массы, увеличения срока эксплуатации дисков и колодок применяют плазменные покрытия из порошков  $Al_2O_3 \cdot 3TiO_2$ , Ni5Mo5,5Al, молибдена. Для деталей системы двигателя, которые работают в условиях износа (поршневые кольца, форсунка дизеля, распределительный вал, коленчатый вал), применяют плазменные покрытия из порошков молибдена и Mo-NiCrBSi, газопламенные покрытия из проволоки Fe38Ni10Al и Fe13Cr, покрытия, напыленные с помощью электродуговой металлизации из проволоки (WC-12Co)38,8Ni6Cr, и покрытия, напыленные сверхзвуковым газопламенным напылением из порошков  $Cr_3C_2$  и  $Cr_3C_2$ -NiCr, которые обеспечивают высокую сопротивляемость заеданию, высокую износостойкость, уменьшение трения, экономию средств, увеличение срока службы компонентов. При коррозии (стержни клапанов, датчик выхлопа) применяют плазменные покрытия из порошков шпинели и покрытия, напыленные с помощью электродуговой металлизации из алюминиевой проволоки, которые увеличивают срок службы клапанов и обеспечивают контроль кислорода. При окислении (датчики кислорода) для защиты от эрозии применяют плазменные покрытия из порошков керамики, а при высоких температурах (днище поршня) — плазменные покрытия из порошков  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ , которые обеспечивают уменьшение разгара поверхности и потери тепла, теплоизоляцию, повышение эффективности работы двигателя, увеличение срока эксплуатации поршня. Для избежания увеличения массы за счет тяжелых чугуновых вставок на цилиндрах двигателя применяют плазменные покрытия из порошков Mo, MoFe, Fe и др., которые снижают размеры двигателя и потребление масла и топлива. При проблеме сцепления на границе раздела между гильзой цилиндра

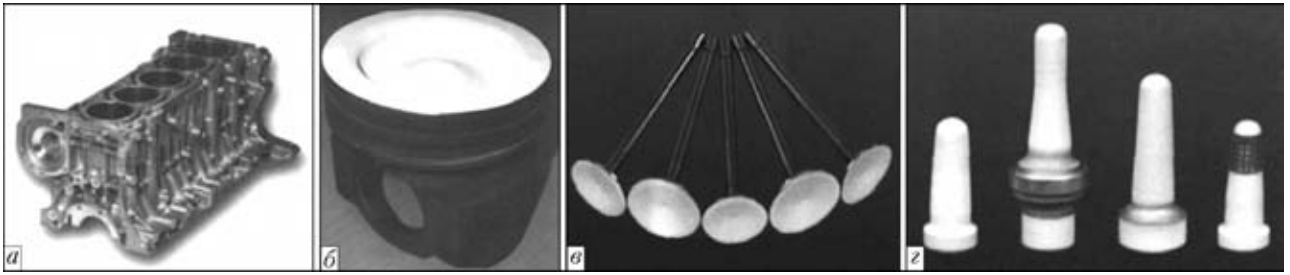


Рис. 1. Детали ДВС с ТЗП: а — цилиндры двигателя; б — поршень; в — выхлопные клапаны; г — датчики выхлопа и датчики кислорода

и литым алюминиевым блоком цилиндра применяют покрытия, напыленные с помощью электродуговой металлизации из проволоки AlSi, и газопламенные покрытия из проволоки NiAl, которые улучшают поверхности алюминиевой отливки и функциональность. При диэлектрической изоляции (крышка генератора) применяют плазменные покрытия из порошков  $Al_2O_3$ . Для компонентов выхлопной системы при увеличенном тепловом излучении и повышенной температуре выхлопных газов применяют плазменные покрытия из порошков керамики, газопламенные покрытия из алюминиевой проволоки для теплоизоляции, тепловой защиты, снижения температуры, сокращения расходов, а в условиях коррозии на выхлопном глушителе применяют газопламенные покрытия из алюминиевой проволоки для увеличения более длительного срока службы при низкой стоимости.

Основным направлением увеличения мощности ДВС является повышение температуры и степени сжатия рабочего газа при сжигании топлива [2]. Поэтому актуальной становится проблема повышения рабочей температуры в камере сгорания за счет снижения потерь тепла в системе охлаждения. Наиболее перспективным способом решения этой задачи является применение ТЗП, при нанесении которых оптимизируется режим работы двигателей, повышается их КПД, сокращается расход топлива и смазочных материалов.

Разработке ТЗП для двигателестроения уделяется большое внимание в США, Японии, Великобритании, Германии и Норвегии. В странах СНГ (Россия, Украина и Республика Беларусь) ведутся исследования по разработке различных покрытий (в том числе ТЗП) для повышения эффективности и надежности ДВС. В настоящее время в Украине ТЗП нашли широкое применение для защиты лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) [3] и практически отсутствует разработка ТЗП для деталей ДВС.

Основное назначение ТЗП в ДВС — снижение потерь тепла в камере сгорания и защита металлической основы от воздействия высоких температур. Как правило, ТЗП состоит из изолирующего внешнего керамического слоя (верхний) и металлического подслоя (связующий слой) между

керамикой и основой (рис. 2) [4, 5]. Теплозащитные функции выполняет внешний керамический слой. Основной функцией подслоя является пластическая релаксация напряжений в покрытии, возникающих из-за несогласованного изменения объемов керамических и металлических материалов при нагреве и охлаждении изделия.

В качестве керамических материалов для ТЗП в основном используют диоксид циркония, частично стабилизированный оксидами (7...8 %  $Y_2O_3$ , 22 % MgO, 25 % MgO, 5 % CaO), оксид алюминия, оксид хрома [5, 6]. Наибольшее распространение получил диоксид циркония, частично стабилизированный оксидом иттрия [4, 5]. Широкое применение  $ZrO_2$  обусловлено его низким коэффициентом теплопроводности ( $1,95 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ), высоким коэффициентом линейного расширения ( $\alpha = 5...5,6\cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ), жаростойкостью и высокой вязкостью разрушения.

В качестве материала подслоя используют жаростойкие сплавы на основе  $MeCrAlY$  ( $Me = Ni, Co, Ni-Co, Fe$ ), а также NiCr. Наиболее применяемым для этой цели является NiCrAlY, что обусловлено его высокой стойкостью к окислению (до 900...1000 °С) и хорошей способностью релаксировать напряжения в покрытии.

Для напыления функциональных защитных покрытий деталей ДВС применяют такие методы напыления, как плазменный метод (на открытом воздухе [1, 2, 4, 5, 7–13], при низком давлении или в атмосфере инертного газа [5, 8]).

Основным методом нанесения керамического слоя ТЗП является плазменное напыление в воз-

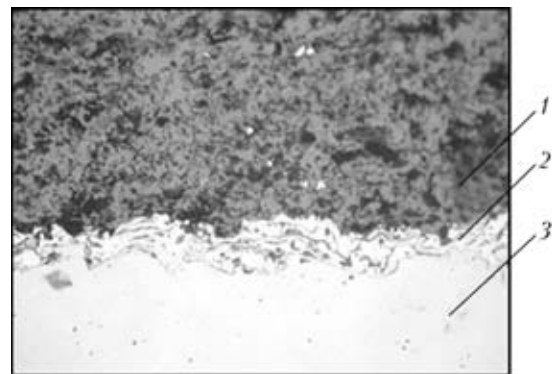


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 200$ ) двухслойного ТЗП: 1 — керамический слой; 2 — металлический подслоя; 3 — основа



душной среде (до 90 % разработок) [5]. Преимущественное распространение плазменного напыления ТЗП обусловлено его высокой производительностью и универсальностью, что позволяет наносить металлические и керамические материалы заданного химического и фазового состава в виде покрытий значительной толщины.

Для нанесения жаростойкого подслоя применяют методы плазменного напыления в инертной среде или динамическом вакууме, вакуумное электронно-лучевое осаждение для предотвращения окисления материала подслоя в процессе напыления.

К настоящему времени наибольшее количество разработок по покрытиям деталей ДВС приходится на долю поршневой группы (более 90 %, в том числе на поршневые кольца около 70 %) [2, 5, 7, 8, 10–13].

Установлено [2], что одним из важных факторов служебных свойств покрытий из  $ZrO_2$  является толщина напыленного слоя. Покрытия из  $ZrO_2$  толщиной 0,1...0,5 мм на чугунных поршнях снижают температуру «горячих» точек поршня на 45...50, температуру днища поршня на 25, а в районе верхнего поршневого кольца на 10 °С, оказывают выравнивающее действие на температурное поле головки поршня, что способствует снижению термических напряжений, являющихся причинами возникновения трещин в поршнях из чугуна. Эффективность применения покрытия тем существеннее, чем выше температура поршня при работе без покрытия. После 9490 ч работы покрытия из  $ZrO_2$  с указанными толщинами (0,1...0,5 мм) не имели отколов, а после 12854 ч работы появились незначительные отколы на кромке днища, покрытия продолжали работать до 22548 ч (6 лет эксплуатации) [2]. При нанесении  $ZrO_2$  покрытия на стальной поршень передача тепла в системе охлаждения снизилась на 26 %, что позволило в двигателе с пониженной отдачей тепла уменьшить на 21 % рабочую поверхность радиатора и снизить потребление на 3 кВт мощность вентилятора охлаждения [8]. В работе [12] установлено, что покрытие на алюминиевом поршне из  $ZrO_2$  толщиной 1 мм после 50 ч работы не имеет никаких повреждений слоя, а при толщине покрытия 2 мм наблюдается крошение и скалывание керамического слоя. Покрытие на алюминиевом поршне судового двигателя из  $ZrO_2$ , стабилизированного 5 % CaO, после 3,5 лет эксплуатации осталось невредимым, хотя и имело на себе слой углерода [7].

Плазменные покрытия на поршне из  $Al_2O_3$  толщиной 0,45...0,5 мм снижают температуру в центре днища на 31, а в районе поршневого кольца на 12 °С. На поршнях ТЗП из  $Al_2O_3$  после 500 ч работы показали хорошую работоспособность, разрушений покрытий внутри камеры не наблю-

дилось, а на чугунных поршнях только после 12854 ч работы в ТЗП появились незначительные отколы на кромке днища, но покрытия продолжали работать до 22548 ч (6 лет эксплуатации). Покрытие из  $Al_2O_3$  толщиной более 1 мм на чугунном поршне оказалось неработоспособным, а при меньших толщинах оно работает без разрушения. На алюминиевых поршнях работоспособная толщина этого покрытия не превышает 0,4 мм при предварительном подогреве поршня перед нанесением покрытия. Без предварительного подогрева алюминиевой основы указанная толщина является неработоспособной вследствие значительных отрывных и растягивающих остаточных напряжений, а также циклических термических напряжений, возникающих при работе на дизеле [2].

Двухслойные покрытия с общей толщиной 1 мм на алюминиевом поршне из стабилизированного  $ZrO_2$ -24 % MgO и подслоя FeCrAlY после испытаний в течение 5000 ч не разрушились [10]. Испытания на термоциклирование при температуре от 0 до 950 °С двухслойных покрытий из  $ZrO_2$ -20 % MgO + NiCrAlY,  $ZrO_2$ -8 %  $Y_2O_3$  + NiCrAlY,  $ZrO_2$ -25 % MgO + CoNiCrAlY,  $ZrO_2$ -20 % MgO + NiCoCrAlY толщиной менее 1 мм на алюминиевых поршнях показали, что ТЗП имеют достаточную стойкость по отношению к циклическим изменениям температуры. Разрушение покрытия происходит по причине окисления нижнего слоя MCrAlY. Покрытие из стабилизированного  $ZrO_2$ -7/8 %  $Y_2O_3$  при температуре свыше 1000 °С проявило себя более стойким [9]. Двухслойное покрытие на алюминиевом поршне из стабилизированного  $ZrO_2$ -5 % CaO с подслоем 20Ni80Cr толщиной 1,5 мм после 50 ч (2800 циклов нагрева-охлаждения) растрескивается и разрушается [12].

На чугунном поршне двухслойное покрытие из  $Al_2O_3$  толщиной 0,6 мм с подслоем из NiCr толщиной 0,1 мм обеспечивает снижение температуры наиболее «горячих» точек днища поршня в зоне воздействия факела пламени на 40...48, а в зоне верхней поршневой канавки на 8...10 °С. На алюминиевом поршне покрытие из  $Al_2O_3$  с подслоем NiCr снизило температуру на 15...20, а в зоне верхней канавки — на 5...7 °С [2].

Двухслойное покрытие из стабилизированного  $ZrO_2$ -22 % MgO с подслоями NiCoCrAlY и NiCrAlY с толщиной примерно 0,4 мм на днище чугунного поршня после 500 ч испытаний осталось без изменений, а покрытие из  $ZrO_2$ -8 %  $Y_2O_3$  с подслоями NiCoCrAlY и NiCrAlY сохранилось даже после 9000 ч испытаний [11]. Покрытие из  $ZrO_2$  на днище стального поршня толщиной до 2 мм уменьшает передачу тепла в систему охлаждения на 30,4, увеличивает эффективную мощность на 3,75, уменьшает удельный расход топлива на 3,58 % [8].



На головках поршней из жаростойкой стали 2X13 покрытия из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{ZrO}_2$  на подслое из NiCr с толщиной более 0,4 мм после пробега 16332 км имеют небольшие отколы, остальная поверхность покрытий сохраняет хорошее состояние и без трещин [2]. Двухслойное покрытие из  $\text{ZrO}_2$ -7 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  с подслоем NiCrAlY на головке алюминиевого поршня уменьшает удельный отвод тепла на 30 %, при этом экономия топлива составила 5...10 % [13].

Для снижения температур поршня и тепловых потоков через поршень применяют покрытия керметного состава [2]. Покрытие керметного состава  $\text{ZrO}_2$ -Ni толщиной 0,7 мм с более высокой теплопроводностью имеет тепловое сопротивление меньше чем покрытие из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 0,6 мм, поэтому и эффективность его меньше. При этом с увеличением толщины покрытия тепловое сопротивление повышается, но непропорционально толщине слоя. Длительные испытания в течение 917 ч работы керметных покрытий на поршнях показали, что покрытия не имеют разрушений [2].

Многослойные покрытия керметного состава с постепенно изменяющимся коэффициентом линейного расширения являются более работоспособными по сравнению с чисто керамическими и могут успешно применяться на чугунных, стальных и алюминиевых поршнях. Многослойные покрытия с поверхностным керамическим слоем  $\text{ZrO}_2$ -Ni толщиной 0,3...0,4 мм с подслоем NiCr толщиной 0,1 мм на алюминиевых поршнях отработали на различных режимах в течение 397...1104 ч [2].

Покрытие из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 0,25...0,35 мм на гильзе цилиндра под действием тепловых ударов отработало без разрушений, при толщине 0,5 мм в процессе испытаний отколов оно не имело, но на более нагретых участках наблюдалось растрескивание покрытий под действием растягивающих напряжений [2]. Проведенные испытания на термоциклирование при температурах от 50 до 1100 °C двухслойных ТЗП из  $\text{ZrO}_2$ , стабилизированного оксидами MgO,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  и CaO, с подслоем CoNiCrAlY на гильзах цилиндров показали, что покрытия из  $\text{ZrO}_2$ -7 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  выдержало 20000 циклов,  $\text{ZrO}_2$ -20 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  — 2500,  $\text{ZrO}_2$ -24 % MgO — 12000,  $\text{ZrO}_2$ -5 % CaO — 3000 циклов. В покрытиях из  $\text{ZrO}_2$ -7 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  с подслоем CoNiCrAlY после испытаний на термоциклирование присутствуют два типа растрескивания — перпендикулярное (сегментирование) и параллельное [7].

На головке цилиндра покрытие из  $\text{ZrO}_2$  толщиной 2 мм и двухслойное покрытие из  $\text{ZrO}_2$ -24 % MgO с подслоем FeCrAlY после испытаний в течение 5000 ч не имеют следов деградации и не разрушаются [10]. При использовании покрытия из  $\text{ZrO}_2$  толщиной 3 мм на втулке цилиндра

после 50 ч работы крошения и скалывания покрытия не наблюдается [12].

Результаты испытаний плоской огневой поверхности крышки цилиндра с покрытиями из  $\text{ZrO}_2$  толщиной 0,4...0,5 мм показали, что покрытие снижает температуру и незначительно повышает температуру поршня и втулки цилиндра и приводит к перераспределению тепловых потоков, проходящих через детали [2].

Анализ факторов, определяющих тепловую и механическую напряженности выпускных клапанов, показывает целесообразность применения ТЗП на тарелках выпускных клапанов [2]. ТЗП на клапанах снижают не только температуру клапана, но, что самое главное, температурные перепады в тарелке клапана, а следовательно, и термические напряжения в ней. С увеличением толщины ТЗП снижение температурных перепадов уменьшается. Покрытие обеспечивает наибольшее снижение температурных перепадов тарелки клапана при нанесении его не на всем диаметре, а на диаметре, меньшем полного на величину фасок. На центральной части тарелки клапана покрытие из  $\text{ZrO}_2$  толщиной 0,5...0,6 мм снижает температуру в центре тарелки на 60 и повышает температуру кромки клапана на 15...20 °C [2].

Покрытие из  $\text{ZrO}_2$  на выхлопном клапане после 180 ч функционирования было покрыто волосными трещинами, что ослабляет термические напряжения и ведет к прекращению дальнейшего разрушающего растрескивания вдоль поверхности раздела керамика/металл. Клапан продолжал работать без серьезных повреждений до появления коррозии при загрязнении топлива, которая привела к образованию кратеров и после 800 ч работы покрытие из  $\text{ZrO}_2$  разрушилось [7]. Испытания клапанов в течение 4000 ч с покрытиями из  $\text{ZrO}_2$ , стабилизированного оксидами 24 % MgO и 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , показали хорошую эксплуатационную долговечность обоих покрытий на поверхности клапанов. Скорость потери массы керамики вследствие эрозии была выше для  $\text{ZrO}_2$ , стабилизированного MgO, чем для  $\text{ZrO}_2$ , стабилизированного 8 %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . При испытаниях в течение 5000 ч покрытия на клапанах не разрушились [10]. Для большего снижения температурных перепадов в клапане целесообразно применять анизотропные покрытия, характеризующиеся низкой теплопроводностью в осевом направлении слоя покрытия и большей теплопроводностью вдоль слоя покрытия. Такие свойства имеют многослойные покрытия, состоящие из чередующихся слоев керамики и металла. Керамические слои препятствуют прохождению теплового потока от газов к тарелке клапана, а металлические — передают теплоту из центра к кромкам тарелки клапана. При правильном подборе состава и толщины слоя покрытия можно добиться такого температурного поля кла-



пана, которое обеспечивает в нем наименьшие термические напряжения [2]. Трехслойные покрытия на выхлопных клапанах из  $ZrO_2-24\% MgO$  с подслоями NiCr и NiCrAlY толщиной 0,7 мм снизили температуру металла на 50 °С, наименьшее понижение температуры было зарегистрировано в области седла клапана (из-за наличия водяного охлаждения кольцевого седла) [10].

На уплотнительной поверхности клапанов двухслойные покрытия из  $ZrO_2-8\% Y_2O_3$  с подслоями NiCoCrAlY и NiCrAlY после 500 ч испытаний имеют локализованное мелкое отслоение в верхней части керамического покрытия. Покрытия из  $ZrO_2-22\% MgO$  с подслоями NiCoCrAlY и NiCrAlY после 500 ч испытаний на уплотнительной поверхности клапанов почти полностью осыпались с поверхности клапана из-за дестабилизации  $ZrO_2$  при протекании химической реакции между MgO и серой, а после 9000 ч испытаний поверхности клапанов разрушались, концентрация MgO в покрытии снизилась до 3 % [11].

Анализ результатов экспериментов показывает, что ТЗП на деталях камеры сгорания, уменьшая теплоотвод, позволяя лучше их использовать для организации процесса сгорания и повышения эффективных показателей двигателя [2]. При испытаниях покрытий на деталях камеры сгорания исследователи ставили задачу уменьшить теплоотвод в охлаждающую среду и улучшить за счет этого экономичность работы ДВС. ТЗП из  $ZrO_2$  толщиной 2,5 мм на камере сгорания повышает эффективность двигателя примерно на 7,5 %, а при толщине 3 мм потери тепла через стенки камеры сгорания снижаются примерно на 50 % [12]. Двухслойное ТЗП из стабилизированного  $ZrO_2-8\% Y_2O_3$  с подслоем NiCrAlY на камере сгорания толщиной от 2 до 2,5 мм уменьшает количество теряемой энергии на нагрев охладителя и снижает потребление горючего двигателем до 10 г/л, покрытие выдерживает более 10000 термических ударов [12].

Анализ результатов работ, направленных на снижение температуры поршней ДВС при применении ТЗП в зависимости от уровня нагрузки, форсировки, частоты вращения, размерности дизеля и свойств покрытий, позволяет сделать вывод, что оно в основном определяется тепловым сопротивлением поршня и покрытия. Тепловое сопротивление поршня зависит от конструкции, диаметра и теплопроводности материала, а тепловое сопротивление покрытия — от его толщины и теплопроводности. В определенной мере на тепловое сопротивление поршня с покрытием оказывает влияние теплопроводность зоны контакта покрытия с поверхностью детали, а также шероховатость покрытия. Гладкая поверхность покрытия способствует большему снижению температуры поршня, что приводит к улучшению его эко-

номичности. Кроме перечисленных выше факторов, на снижение температуры поршня при применении ТЗП определенное влияние оказывает характер протекания рабочего процесса. Покрытие на днище поршня приводит также к перераспределению тепловых потоков через крышку и втулку цилиндра, увеличивает тепловой поток в крышку цилиндра и снижает тепловой поток через втулку (кроме ее верхнего пояса). Тепловая защита этих деталей не только снижает их температуру и термические напряжения, но и уменьшает теплоотвод в систему охлаждения, что должно положительно сказаться на экономичности двигателя и снижении масс и габаритов теплообменных устройств.

Основными причинами разрушений в покрытии являются термические напряжения, вызванные температурным режимом в камере сгорания, конструкцией днища поршня, а также толщиной и физико-механическими свойствами самих керамических покрытий. Разрушение двухслойного ТЗП наиболее часто происходит в межслойной зоне из-за высоких напряжений сжатия в покрытии. На разрушение также влияют перпендикулярные и параллельные трещины в покрытии. Перпендикулярное растрескивание, вызываемое полем растягивающих напряжений, считается благоприятным для долговечности покрытия, поскольку снимает напряжения, давая покрытию возможность расширяться и сжиматься, не испытывая значительных напряжений сдвига. Параллельное растрескивание, возникающее вследствие разрушительного сдвигового напряжения, приводит к разрушению покрытия.

На базе длительных эксплуатационных испытаний двигателей с покрытиями на поршнях установлено, что покрытия, снижая термические напряжения в поршне, в значительной степени позволяют повысить надежность и срок их эксплуатации. Уменьшая тепловой поток через поршень, покрытие обеспечивает лучшие условия работы смазочного масла, предотвращая закоксовывание поршневых колец. При снижении динамических нагрузок и температуры поршня покрытие значительно снижает износ деталей цилиндропоршневой группы. Все это способствует увеличению срока службы дизеля и смазочного масла. ТЗП повышают надежность и срок службы поршней не менее чем в 1,5 раза. Эти покрытия снижают температуру поршней и динамические нагрузки, а в соответствии с этим шум и вибрацию дизелей, токсичность их отработанных газов, износ и нагароотложения на деталях цилиндропоршневой группы, а также улучшают экономичность и условия работы смазочного масла и повышают надежность и срок службы поршней и всего дизеля в целом.

На головке поршня ТЗП предназначено также для обеспечения коррозионной стойкости его ма-

териала при высоких температурах, что снижает развитие процессов разгара.

ТЗП на головке цилиндра повышает температуру выхлопных газов примерно на 30 °С, снижает время запаздывания момента воспламенения топлива в цилиндре по сравнению с неизолированным двигателем примерно на 10 %.

На выхлопных клапанах ТЗП уменьшают теплоподвод к клапану, что позволяет поддерживать температуру поверхности седла ниже порогового значения высокотемпературной коррозии в агрессивных средах.

Данные испытаний показали, что при применении ТЗП может быть уменьшен тепловой поток через камеру сгорания к охладителю приблизительно на 30 %. Вследствие этого представляется возможность использования большего количества тепла от выхлопных газов, например, для нагнетания. В результате повышается общий тепловой КПД. Более высокая средняя температура будет положительно влиять на процесс сжигания и количество дымности выхлопа.

Использование ТЗП на деталях ДВС обеспечивает экономию топлива до 11 %; повышает долговечность двигателя до 20 %; уменьшает токсичность выхлопа  $\text{NO}_x < 5$ ,  $\text{CO} < 15,5$ ;  $\text{HC} < 1,3$  и сажистых  $< 0,10$  г/л с.ч, количество твердых веществ в выхлопных газах на 52 %, дымление двигателя на 75 %, шумовые показатели на 3 дБ, температуру двигателя на 100 °С; повышает долговечность выхлопных клапанов на 30 %; снижает стоимость двигателя за счет использования при прочих равных параметрах более дешевых и менее дефицитных материалов.

Таким образом, ТЗП на поршне и других деталях камеры сгорания существенно улучшают работу дизеля. Снижаются «жесткость» процесса сгорания и максимальное давление при сгорании, что уменьшает шум, вибрации дизеля и токсичность отработавших газов. Повышение скорости сгорания в основной фазе горения увеличивает полноту сгорания и обеспечивает более экономичный рабочий процесс.

При применении ТЗП необходимо руководствоваться целью их назначения для каждого конкретного дизеля. В каждом случае, варьируя толщину и состав покрытий, можно достичь их максимальной эффективности.

1. Борисов Ю. С., Кулик А. Я., Гольник В. Ф. Газотермические покрытия в дизелестроении и энергетике // Газотермические и вакуумные покрытия в энергетике и двигателестроении. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1989. — С. 22–26.
2. Никитин М. Д., Кулик А. Я., Захаров Н. И. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизеля. — Л.: Машиностроение, 1977. — 168 с.
3. Мовчан Б. А., Гречанюк И. М., Грабин В. В. Современное состояние и перспективы создания теплозащитных покрытий для лопаток авиационных ГТД // Электронно-лучевые и газотермические покрытия: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1988. — С. 5–12.
4. Ильющенко А. Ф., Оковитый В. А., Кундас С. П., Форманек Б. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / Под общ. ред. А. Ф. Ильющенко. — Минск: Беспринт, 2002. — 480 с.
5. Теплозащитные покрытия на основе  $\text{ZrO}_2$  / А. Ф. Ильющенко, В. С. Ивашко, В. А. Оковитый, С. Б. Соболевский. — Минск: НИИ ПМ с ОП, 1998. — 128 с.
6. Высокотемпературные материалы из диоксида циркония / Д. С. Рутман, Ю. С. Торопов, С. Ю. Плинер и др. — М.: Металлургия, 1985. — 137 с.
7. Moorhouse P., Johnson M. P. Development of tribological surfaces and insulation coatings for diesel engines // SAE Techn. Pap. Ser. — 1987. — № 870161. — P. 211–221.
8. Design study for a low heat loss version of the dover engine / N. Hay, P. M. Watt, M. J. Ormerod et al. // Proc. Inst. Mech. Eng. D. — 1986. — 200. — P. 53–60.
9. Kvernes I., Heel R. Advanced coating developments for internal combustion engine parts // SAE Techn. Pap. Ser. — 1987. — № 870160. — P. 187–209.
10. Kvernes I. Ceramic coatings as thermal barriers in diesel and gas turbine engine components // Proc. of the World Congr. High-Tech. Ceram. Techn. — 1987. — P. 2519–2536.
11. Levy A., Macadam S. The behavior of ceramic thermal barrier coatings on diesel engine combustion zone component // Surface and Coatings Technology. — 1987. — 30, № 1. — P. 51–61.
12. Guillemani J. M., Dehaudt P., Ducos M. Diesel engine combustion chamber insulation by ceramic plasma spraying // Advances in Thermal Spraying. — 1986. — 30, № 1. — P. 513–521.
13. Kamo R., Bryzik W. Adiabatic engine trends-worldwide // SAE Techn. Pap. Ser. — 1987. — № 870018. — P. 1–13.

Literature data on application of thermal barrier coatings for protection of internal combustion engines components have been generalised. The methods used to apply the thermal barrier coatings and the consumables used to deposit them are considered

Поступила в редакцию 19.12.2011