

С.В. Петров, д-р техн. наук (Институт газа НАН Украины), В.Н. Коржик, д-р техн. наук (ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины), В.Ф. Горбань, кандидат техн. наук (ИПМ НАН Украины),

В.Д. Демидов, А.В. Новоселов, кандидаты техн. наук, ООО «ТЕХПЛАЗМА» г. Москва

## ***ПЛАЗМЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ЛОКОМОТИВНЫХ ДИЗЕЛЕЙ***

Ключевые слова: плазменные покрытия, втулка цилиндра, поршневое кольцо, локомотивный дизель, упрочнение, износ, надежность.

Разработка, производство и эксплуатация мощных дизелей постоянно сопровождаются поиском путей повышения КПД, снижения затрат, использования доступных и дешевых материалов, облегчения, ускорения и повышения гибкости ремонта. Наиболее значимым для надежной работы дизеля узлом является цилиндро-поршневая группа, а важнейшую роль в этом играет правильный выбор материалов сопряжения трущейся пары «втулка-кольцо». Поскольку допустимая величина износа рабочих поверхностей втулки и кольца составляет всего десятые доли миллиметра, то в последние годы активно развивается новый подход к их конструированию – на дешевое и массивное основание наносить дорогое и эффективное покрытие. Накопленный опыт Европейских, Японских, Американских компаний [1,2,3,4,] и авторов статьи [5] показывает, что процесс плазменного напыления является эффективным методом решения указанных проблем. Так фирма Sulzer Metco ввела в эксплуатацию линию по производству дизельного двигателя VW's V10 TDI для моделей Touareg и Phaeton с плазменно напыленным покрытием на внутренней стенке цилиндра на заводе Volkswagen (VW) в Германии. Польза от реализации высокой технологии плазменного напыления заключается в повышении времени жизни и экономичности двигателя за счет снижения износа, коэффициента трения и защиты от коррозии. Кроме того, весь блок цилиндров становится более дешевым, компактным и легким за счет замены стали на алюминиевые сплавы. Фирма «ТЕХПЛАЗМА» освоила выпуск модернизированных двухслойных втулок цилиндров повышенной износостойкости для тепловозных и речных дизелей.

Плазменные защитные покрытия на деталях цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и элементах камеры сгорания (Рис.1) позволяют в 3 - 4 раза уменьшить износ, увеличить время их жизни практически до выработки запаса усталостной прочности материала, улучшить технические характеристики двигателя (снизить расход топлива и масла, количество вредных выбросов, повысить мощность) и получить значительную экономию. Плазменная технология хорошо вписывается в современные тенденции развития двигателестроения, связанные с ростом удельных мощностей дизелей за счет форсирования среднего эффективного давления в цилиндрах и направленные на повышение топливной экономичности двигателя. Как следствие форсирование приводит к увеличению механической и тепловой напряженности деталей дизеля. При этом вопросы долговечности и надежности дизеля, определяемые в целом по отдельным его деталям и в первую очередь по работоспособности цилиндровой втулки, обостряются.

Цилиндровая втулка локомотивного дизеля рассматривается практически всегда, как монолитная деталь и изготавливается из одного материала. Как правило, это серый высокопрочный чугун, легированный редкоземельными элементами. Следует отметить, что внутренняя и наружная поверхности цилиндровой втулки а также её каркас работают в совершенно разных условиях и к ним необходимо предъявлять совершенно разные

требования. Если наружная поверхность втулки должна обладать, в первую очередь, высокой кавитационной и эрозионной стойкостью при сравнительно низких температурах, редко превышающих 100 °С, то для внутренней поверхности в этих свойствах нет необходимости. Внутренняя поверхность цилиндрической втулки должна обладать износо, задиры - коррозионной стойкостью при высоких температурах. Сочетать такие свойства в одном материале достаточно сложно. Наиболее оптимальный путь - внутренняя и наружная поверхности цилиндрической втулки должны быть изготовлены из различных материалов. Часть цилиндрической втулки, служащая ее каркасом, должна обладать только необходимой механической прочностью и нет необходимости легировать эту область втулки дорогостоящими редкоземельными элементами.

Исходя из условий работы цилиндрической втулки, ее можно разбить на три основные зоны, к каждой из которых предъявляются различные требования:

1. Первая зона, внутренний поверхностный слой цилиндрической втулки, должна обладать низкой теплопроводностью, высокой износостойкостью, противозадирными свойствами, стойкостью к термическим циклам, низким коэффициентом трения в паре с поршневым кольцом. Материал этой зоны должен иметь достаточную механическую и термическую прочность.
2. Вторая, каркас цилиндрической втулки, как основная несущая часть втулки, должна иметь необходимую механическую прочность.
3. Третья зона, примыкающая к наружной поверхности втулки, должна обладать высокой кавитационной и эрозионной стойкостью.

В настоящее время применяемые материалы для изготовления цилиндрических втулок, не могут оптимально удовлетворить все эти требования. В связи с этим, наиболее целесообразным является формирование каждой зоны детали из материалов с заранее заданными свойствами так, чтобы во взаимосвязи между собой зоны представляли единое целое. Задача облегчена тем, что внутренняя и наружная зоны втулки представляют собой поверхностные слои малой толщины.

Использование технологии плазменного напыления позволяет формировать на цилиндрической втулке поверхностные слои с необходимым набором свойств. Напыляемое покрытие на внутренней поверхности цилиндрической втулки должно обладать не только высокой износостойкостью, но и создавать так называемый “тепловой барьер” для уменьшения термических напряжений и тепловых потерь через втулку в охлаждающую дизель воду. Так, температура втулки дизеля 10Д100 в районе выпускных окон повышается до 280...320 °С [6]. При этом величины деформации с образованием корсетности втулки под нижним посадочным поясом водяной рубашки и бочкообразности по перемычкам выпускных окон достигают недопустимых значений. В таком случае погрешности макрогеометрии, связанные с технологией изготовления деталей и сборки, суммируясь с тепловыми и силовыми деформациями, возникающими при работе двигателя, являются основной причиной интенсивного износа и задириобразования. Как известно, из общих тепловых потерь в дизеле, около 40 % тепловых потерь приходится на потери через цилиндрическую втулку.

Для создания “теплового барьера” наиболее перспективными являются керамические материалы вследствие их малой теплопроводности и высокой термической стойкости при высоких температурах. Но керамическое покрытие обладает низкой стойкостью к ударным нагрузкам. Поэтому внутренний слой цилиндрической втулки необходимо формировать из материалов, имеющих в своем составе керамические материалы и металлы. Такие композиционные материалы при правильном выборе хорошо противостоят схватыванию с материалом поршневых колец в местах фрикционного взаимодействия, что является предпосылкой высокой стойкости к износу и задирированию. При выборе материала покрытия следует учитывать то обстоятельство, что существенное влияние на износ цилиндрической втулки могут оказывать продукты сгорания топлива, так как при его сгорании образуется углекислота, сернистый

ангидрид, водяной пар, нагар и коксующиеся отложения. В зависимости от условий в камере сгорания может наблюдаться газовая, химическая и электрохимическая коррозия. Твердые частицы приводят так же к абразивному износу. Газовая коррозия протекает при высоких температурах при контакте металлов с сухими газами. Так как в камере сгорания двигателя находится влажный газ, то протекает процесс электрохимической коррозии. При сгорании 1 кг топлива образуется около 1 кг водяного пара. К примеру, при мощности дизеля 1500 кВт через цилиндр в течении часа проходит около 300 кг водяного пара. Конденсата, который оседает на стенках цилиндра, вполне достаточно для возникновения интенсивной электрохимической коррозии даже при незначительном содержании серы в топливе. Обязательным условием выпадения конденсата на стенках цилиндра является превышение температуры насыщения водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания, над температурой поверхности втулки.

Важной особенностью покрытия является его пористость, обеспечивающая маслосъемность поверхности в процессе всей эксплуатации.

Работоспособность цилиндровой втулки дизеля зависит в первую очередь от износа ее внутренней поверхности. Исследование поверхностей втулок, вышедших из строя по предельному износу или задиру, показывает, что большинство из них имеет характерные особенности. Пояс повреждений может локализоваться в разных местах, в зависимости от конструктивного исполнения и условий работы. Как правило, критичным во втулке является пояс расположенный на уровне положения верхнего поршневого кольца при нахождении поршня в верхней мертвой точке. В этом поясе наблюдается максимальный износ цилиндровой втулки. Поверхность втулок цилиндров Д100, вышедших из строя по задиру имеет характерный пояс сильных повреждений шириной 30...50 мм выше выпускных окон [6]. В любом случае при повышенном износе резко увеличивается расход топлива и смазочного масла, а также падает мощность дизеля. Поэтому повышение износостойкости внутренней поверхности цилиндровой втулки увеличивает не только ресурс работы втулки, но и экономические показатели дизеля в целом.

В ряде случаев кавитационно-эрозионный износ является лимитирующим фактором повышения моторесурса двигателя в целом. Возникновение такого положения ставит проблему защиты гильз цилиндров от кавитационного разрушения в число важнейших задач. Технически и экономически приемлемым является применение защитных антикавитационных покрытий, получаемых плазменным напылением [7]. Анткавитационное покрытие гильзы позволяет снизить скорость эрозии блока цилиндров в 1,5 ... 2 раза.

Покрытие внутренней поверхности втулки цилиндра может осуществляться различными способами газотермического напыления сверхзвуковым газопламенным, электродуговым и плазменным [2]. Выбор наиболее рационального способа осуществляется исходя из двух принципиальных аспектов – это тепловая и кинетическая энергия напыляемых частиц. Наиболее высокие значения этих параметров достигаются при сверхзвуковом газопламенном и плазменном напылении. Однако, для сверхзвукового газопламенного напыления необходима повышенная дистанция, её сокращение приведет к недопустимому перегреву основы. Наиболее приемлемым методом нанесения защитных покрытий на внутреннюю и внешнюю поверхности втулки цилиндра является плазменное напыление, при котором нагрев, плавление, диспергирование и перенос напыляемого материала осуществляется плазменной струей продуктов сгорания углеводородного газа с воздухом, полученной в электрическом дуговом разряде [8,9].

Стенка втулки цилиндра, поршневое кольцо и смазка двигателя внутреннего сгорания взаимодействуют как трибологическая система с установившимся равновесием по скорости износа её компонент и угару смазочного масла. Такой характер работы обуславливает следующие требования к материалу покрытия втулки:

- низкий коэффициент трения и низкий износ материала поршневого кольца в граничных условиях смазки;

- более низкий износ материала покрытия в сравнении с материалом кольца;
- высокое сопротивление термоударам;
- совместимость свойств покрытия с требованиями к финишной обработке зеркала цилиндровой втулки.

Благодаря тому, что для плазменного напыления используются порошки, выбор материала покрытия осуществляется в основном исходя из следующего:

- отсутствие дефицитных и дорогих компонентов;
- обеспечение требуемых износостойкости и коэффициента трения;
- наличие заданной пористости и маслостойкости поверхности в процессе эксплуатации.

В числе удовлетворяющих требованиям локомотивных дизелей может использоваться достаточно изученное [10] композиционное покрытие из порошкового никель-алюминиевого материала ПН85Ю15 с керамической составляющей из двуокиси циркония  $ZrO_2$ , частично стабилизированной оксидом иттрия  $Y_2O_5$ . Покрытие имеет хорошую адгезионную прочность с чугуном цилиндровой втулкой (55 МПа), низкую пористость  $\leq 2\%$ , двуокись циркония обладает низкой теплопроводностью и наиболее близким к ПН85Ю15 коэффициентом термического расширения. Напыление покрытия проводится механической смесью порошков ПН85Ю15 и  $ZrO_2$ .

Изучение физико-механических свойств покрытий, оценка влияния покрытий на рабочий процесс двигателя и определение трибологических характеристик деталей ЦПГ дизеля выполнены [11] в ходе ускоренных лабораторных исследований. Исследование процесса изнашивания проводилось на машине трения МИ-1 (трибомер Амслера) и одноцилиндровом дизеле 1Ч10,5/13 с использованием метода радиоактивных индикаторов.

Сравнительные испытания покрытий ПН85Ю15+25% $ZrO_2$ , ПРЮ20Х2С2+25% $ZrO_2$  и СЧМ-1 по ТУ 24.06.13.12-80 на смазочном масле М-11 показывают, что наименьшей скоростью изнашивания во всем диапазоне изменения нагрузок обладает металлокерамическое покрытие ПН85Ю15+25% $ZrO_2$  (Рис.2). Скорость изнашивания этого покрытия при увеличении нагрузки уменьшается и при нагрузке 7,5 МПа достигает своего минимума. Дальнейшее увеличение нагрузки не приводит к изменению скорости изнашивания. Наибольшая разница в скоростях изнашивания покрытия ПН85Ю15+25% $ZrO_2$  по сравнению с чугуном наблюдается при нагрузках 2,5 и 12,5 МПа. При этих нагрузках скорость изнашивания покрытия в 10 раз меньше, чем чугуна.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента трения этих материалов от нагрузки. Обращает на себя внимание то, что характер изменения коэффициента трения, так же как и скоростей изнашивания, покрытия ПРЮ20Х2С2+25% $ZrO_2$  и чугуна идентичен, в то время, как для покрытия ПН85Ю15+25% $ZrO_2$  он совершенно другой. До нагрузки примерно 5,0 МПа коэффициент трения покрытия ПРЮ20Х2С2+25% $ZrO_2$  и чугуна меньше, чем покрытия ПН85Ю15+25% $ZrO_2$ . При увеличении нагрузки происходит резкое изменение этих соотношений. Коэффициент трения покрытия ПРЮ20Х2С2+25% $ZrO_2$  и чугуна резко возрастает, в то время, как коэффициент трения покрытия ПН85Ю15+25% $ZrO_2$  продолжает снижаться.

Температура поверхностей трения характеризует работу трения этих материалов. Температурное состояние поверхности покрытия ПН85Ю15+25% $ZrO_2$  до нагрузки 5,0 МПа изменяется незначительно. При дальнейшем увеличении нагрузки температура поверхности покрытия практически не меняется. Температура поверхности покрытия ПРЮ20Х2С2+25% $ZrO_2$  и чугуна по мере роста нагрузки увеличивается до 140- 150 °С при нагрузке 12,5 МПа.

Сравнительные испытания на других типах смазочных масел М-10В2(с) и М-16В2 (с металлсодержащими присадками и различной вязкостью) показали аналогичные зависимости. По результатам трибологических испытаний для нанесения на внутреннюю поверхность цилиндровой втулки выбран материал ПН85Ю15+25% $ZrO_2$ .

В комплекте поршневых колец, поставляемых заводом изготовителем, первое поршневое кольцо, как правило, имеет покрытие гальваническим хромом. Технологический процесс нанесения этого покрытия является экологически вредным из-за выделений шестивалентного хрома. Но с другой стороны покрытие гальваническим хромом повышает износостойкость поршневого кольца, поэтому оно получило широкое распространение в двигателестроении. Если исходить из общепринятых требований к износостойким материалам – матричный материал и включения обладающие эффектом смазки то гальванический хром к данному классу материалов не подходит. В тоже время не следует забывать, что в паре поршневое кольцо-втулка единица площади поверхности кольца проходит намного больший путь трения, чем единица площади поверхности втулки. Этот путь во столько раз больше во сколько высота пробега поршня больше высоты поршневого кольца. Известно, что износостойкость пары определяется не только исходным состоянием материалов пары, а и теми изменениями, которые происходят в поверхностных слоях при трении. В процессе самоорганизации, материал пар трения претерпевает значительные структурные и химические изменения, что отражается на их механических свойствах, которые в конечном итоге и определяют уровень износостойкости пары.

Так за данными исследований [12] поверхность трения железа и покрытия из газотермического хрома насыщается кислородом до 30 % без образования оксидных фаз. Деформационные процессы происходящие в поверхностных слоях при трении приводят к существенным изменениям структуры. На рис. 4 приведены электронно-микроскопические снимки поверхностного слоя до и после фрикционного контакта.

Приведенные данные показывают, что размер ячеек в результате деформации трением снизился с 2-5 мкм до 50-100 нм. Следует отметить, что если насыщение поверхности кислородом происходит на глубину до 3 мкм, то деформационные процессы распространяются на глубину до 20 мкм. Такое изменение структуры существенно повлияло на уровень твердости. В табл. 1. представлены данные изменения в поверхностных слоях различных металлов и покрытий после фрикционного контакта. Измерения микротвердости проводилось на твердомере с автоматической записью диаграммы деформации при нагрузке 20 г. с точностью измерения глубины внедрения  $\pm 2,5$  нм. Обработка диаграммы записи позволяет получать не только значение твердости, но и определить коэффициент пластичности и склонность материала к пластической деформации при нагрузке, что особенно важно для материалов работающих при циклических нагрузках как в случае трения.

Представленные данные показывают, что для материалов склонных к деформационному упрочнению наблюдается значительное повышение характеристик твердости в условиях фрикционного контакта. При этом следует отметить, что максимальные значения твердости находятся на одном уровне для одного металла независимо от исходной твердости и метода получения. В тоже время коэффициент пластичности и уровень релаксации напряжений более чувствительный к состоянию материала. При одинаковой твердости в поверхностном слое трения газопламенного и гальванического хрома показатель уровня релаксации отличается значительно, что свидетельствует о большей склонности к деформации газотермического покрытия, чем гальванического. Вместе с тем пониженная твердость хромового газопламенного покрытия способствует более низкому износу материала контртела. Все это отражается и на уровне износостойкости пары трения. Так, износ поршневого кольца с хромовым газопламенным покрытием, по данным межведомственных испытаний, в течение 1000 ч. работы дизеля мощностью 8000 квт, 900 об/мин, при затрате смазочных масел 1,2 г/(квт ч.) составил всего 11, а гильзы – 9 мкм. Вместе с тем износ в подобных условиях для электролитического хрома составил 15 и 32 мкм, а для молибденового плазменного - 20 и 50 мкм, сталь-молибден электродугового – 13 и 40 соответственно. Следует также отметить, что для керамических материалов отсутствует склонность к деформационному

упрочнению в условиях трения и учитывая их высокую исходную твердость можно ожидать низкие значения износостойкости металла имеющего малую склонность к деформационному упрочнению например, гальванический хром.

Выполненные исследования влияния покрытия гальваническим хромом на износ металлокерамического покрытия ПН85Ю15+25%ZrO<sub>2</sub> показали, что оно практически не работоспособно с контртелом, имеющим покрытие гальваническим хромом. Следовательно, целесообразно исключить из комплекта поршневых колец, работающих в цилиндрических втулках с металлокерамическим покрытием на никель-алюминиевой основе, кольца с гальваническим хромом.

Ниже приведены результаты исследования износа плазменного металлокерамического покрытия ПН85Ю15+25%ZrO<sub>2</sub> на дизелях 1Ч10,5/13 и 6ЧСП18/22. За базу сравнения принята работа дизеля со штатной цилиндрической втулкой. Выполненные замеры износа втулок за время приработки 65 часов и за 220 ч трибологических испытаний показывают, что за первые 65 ч работы дизеля износ штатной цилиндрической втулки превосходит износ втулки с покрытием за весь последующий период испытаний. На рис. 5 показан средний износ втулки с покрытием и серийной, из которого видно, что втулка с металлокерамическим покрытием обладает значительно более лучшими противоизносными свойствами по сравнению со штатной. Скорость изнашивания втулки с покрытием в районе, расположенном на 5 мм ниже остановки верхнего поршневого кольца в ВМТ составляет 0,036 мкм/ч, а штатной - 0,141 мкм/ч, т.е. более чем в 4 раза меньше. Средний износ втулки с покрытием меньше серийной более, чем в 3,5 раза, а в плоскости, перпендикулярной плоскости качания шатуна, в месте максимального износа, более, чем в 7 раз меньше, чем у серийной. Осмотр внутренних поверхностей цилиндрических втулок дизелей после испытаний как на дизеле 1Ч10,5/13, так и на дизеле 6Ч18/22 показал, что состояние последних хорошее: задиры, натирки и отслаивания покрытия отсутствуют.

Так как металлокерамическое покрытие ПН85Ю15+25%ZrO<sub>2</sub> неработоспособно с гальваническим хромом при испытаниях на дизеле применялись комплекты поршневых колец без хромового покрытия. По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

1. скорость изнашивания первого поршневого кольца высокооборотного дизеля 1Ч10,5/13 при работе в паре с опытной цилиндрической втулкой, имеющей на внутренней поверхности плазменное металлокерамическое покрытие, при всех нагрузках в диапазоне температур охлаждающей воды от 35 до 95 °С значительно меньше, чем скорость изнашивания кольца при работе в паре со штатной цилиндрической втулкой в аналогичных условиях работы. Скорость изнашивания поршневого кольца при работе с опытной втулкой уменьшилась от двух до пяти раз по сравнению со штатной;
2. минимум износа поршневого кольца, как при работе с опытной втулкой, так и со штатной, при всех нагрузках находится в диапазоне температур воды от 55 до 75 °С;
3. изменение температуры охлаждающей воды незначительно влияет на износ поршневого кольца при работе с цилиндрической втулкой с покрытием;
4. при работе поршневого кольца со штатной цилиндрической втулкой такое изменение температуры охлаждающей воды, особенно ее уменьшение до 35 °С, оказывает значительное влияние на износ кольца;

Как показало термометрирование цилиндрических втулок дизеля, металлокерамическое покрытие оказывает влияние на их тепловое состояние. Наблюдается некоторое увеличение и выравнивание по высоте значения температуры внутренней поверхности опытной втулки. Но увеличение температуры невелико, поэтому не может негативно повлиять на характер смазывания цилиндрической втулки. Колебания температуры охлаждающей воды для втулки с покрытием вызывают меньшие термические

напряжения, чем в серийной, в то время как снижение перепада температуры внутренней поверхности по высоте уменьшают температурные напряжения в ней.

Как известно, наибольшие температурные напряжения возникают в деталях ЦПГ при переменных режимах работы дизеля. Это связано с изменением температурных полей деталей. Выполненные сравнительные исследования динамики изменения температуры в отдельных точках цилиндровой втулки показали следующее. На рис.6 показана динамика прогрева цилиндрических втулок в поясе, примыкающем к ВМТ. Видно, что перепад температур во втулке с покрытием намного меньше, чем в серийной. Максимальный перепад температур для втулки с покрытием составляет 9,6 град.С, а для серийной - 72 град.С, то есть для опытной втулки перепад температур в 7,5 раз меньше. Расстояние между кривыми 1, 2 и 1', 2' характеризует величину теплового потока через цилиндрическую втулку в месте установки термодатчиков. Таким образом, как видно из графиков, цилиндрическая втулка с металлокерамическим покрытием (МКП) значительно уменьшила теплоотвод в охлаждающую воду во время пуска и вывода дизеля на рабочую нагрузку. Это подтверждается и увеличением температуры отработавших газов. Таким образом, кроме высокой износостойкости, плазменное металлокерамическое покрытие ПН85Ю15+25%ZrO<sub>2</sub> выполняет функции теплового барьера.

Изучение рабочего процесса дизеля 1С10,5/13 с серийной и цилиндрической втулкой с покрытием, выполненное с помощью контрольно-измерительным комплексом К-748 показало следующее. Покрытие на цилиндрической втулке оказывает положительное влияние на рабочий процесс. На всех режимах работы дизеля и во всем диапазоне изменения температуры охлаждающей воды увеличилось индикаторное давление при работе дизеля с втулкой, имеющей покрытие. В среднем на 5% уменьшился расход топлива, особенно при малых нагрузках. В этих же испытаниях проводили измерения времени выбега, которое определяет механические потери в двигателе. Время выбега дизеля с серийной цилиндрической втулкой 29 сек., а у втулки с покрытием - 36 сек., то есть время выбега дизеля увеличилось на 25%. Это объясняется тем, что в паре трения для втулки с покрытием меньше коэффициент трения. Увеличение времени выбега свидетельствует об увеличении мощности дизеля.

Опыт промышленной эксплуатации (более двух лет на локомотивах 2Т-116 с пробегом более 300 тысяч км и пяти тысяч часов на речных дизелях ЧН18/24) подтверждает выполненные исследования. Износ втулок - как показало совместное с Российским речным регистром обследование втулок на речном дизеле ЧН18/24 - за навигацию 2003 года составил 0,02 мм против 0,08 по нормативу для данного дизеля [5]. На основании полученных результатов фирма «ТЕХПЛАЗМА» ввела в эксплуатацию технологическое оборудование (Рис.7), которое позволяет из отработавших свой срок по износу внутренней поверхности чугунных втулок изготавливать практически новые и более износостойкие. Только за 2003 год было выпущено более 600 единиц продукции по высокой технологии. В перечень основной номенклатуры входят втулки для двигателей Д49, Д40, Д42ЧН21/21, Д50, ЧН18/22, ЧН23/30, NVD26, NVD36, NVD48? 12VFE и др. с размерами указанных деталей от 120 мм и выше (Рис.8).

Подводя итоги изложенному можно сделать вывод, что современные высокие технологии дают реальный шанс считать ремонт не просто процессом восстановления работоспособности машин, но возможностью осуществления модернизации двигателей с выходом на более высокие показатели по экономичности и надежности.

1. McCune Thermal Spraying of Cylinder Bore Surfaces for Aluminium Engine Blocks/ Welding Journal, №1, August 1995, p. 41-47.
2. Barbezat G., Keller S., Wuest G. Internal Plasma Spray Process for Cylinder Bores in Automotive Industry/ Proc. of the 15<sup>th</sup> Int. Thermal Spray Conf. 25-29 May 1998, Nice, France, Vol.2, p. 963-974
3. Marc Delaet Thermally Sprayed Piston Ring Coatings for Use in Tomorrow's Heavy Duty Engines/ Proc. Of the 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Surface Modification Technologies held in Paris, France September 8-10, 1997, p. 256-273
4. Harris D.H., Lutz J. Thermal barrier coatings-technology for diesel engines. - "SAE Techn. Pap. Ser.", 1998, No 880437, pp.6.
5. Демидов В.Д. Пути увеличения ресурса работы цилиндро-поршневой группы в дизельных двигателях (плазменные технологии в восстановлении и упрочнении деталей)/ Российские железные дороги-партнер, 2004, №6 (70), с. 103.
6. Асташкевич Б.М. Износостойкость и роль защитных слоев на поверхности деталей цилиндропоршневой группы транспортных дизелей/ Вестник машиностроения, 2000, №1, с. 13-20.
7. Богуш В.Н. Разработка технологии газотермического напыления антикавитационных покрытий на гильзы цилиндров дизельных двигателей/АР диссертации, Киев, 1990, - 17с.
8. Петров С.В., Карп И.Н. Плазменное газоздушное напыление. Киев: Наукова думка, 1993, - 494 с.
9. Петров С.В., Саков А.Г. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. Киев: ТОПАС, 2000, - 218 с.
10. Хмелевская В.Б. Основы технологии восстановления деталей дизелей методом газотермического напыления. Диссертация на соискание ученой степени Д.Т.Н. Санкт-Петербург., СПбГУВК, 1996., 334 с.
11. Хамзин Р.М. Влияние металлокерамического покрытия на износ цилиндровой втулки и поршневого кольца. /"Трение, износ, смазка" - Научно-технический электронный журнал, том 2, № 1, март 2000 г.
- 12.

Таблица 1. уровень микротвердости (Н), коэффициента пластичности (К) и уровня релаксации напряжений (Р) поверхностных слоев до и после фрикционного контакта для различных материалов и покрытий.

Материал	Состояние	Микротвердость, ГПа	Коэффициент пластичности	Уровень релаксации напряжений, %
Хром деформированный	исходное	2,4-2,6	0,920-0,930	16- 17,6
	после трения	4,5-8,0	0,860-0,880	8,0-11,3
Хромовое газопламенное покрытие	исходное	3,2-4,6	0,889-0,890	9,0-11,0
	после трения	5,6-11,2	0,850-0,870	7,2-8,5
Хромовое плазменное покрытие	исходное	5,0-6,4	0,770-0,820	8,1-10,8
	после трения	6,2-11,8	0,710-0,730	6,2-8,3
Хромовое гальваническое покрытие	исходное	8,0-8,4	0,700-0,705	5,0-5,8
	после трения	9,0-11,3	0,670-0,680	3,0-3,5
Чугун высокопрочный	исходное	3,0-3,2	0,880-0,890	2,5-3,5
	после трения	6,0-8,2	0,820-0,870	2,1-2,6
Карбид титана	исходное	35,0-40,0	0,710-0,730	3,5-5,0
	после трения	35,0-40,0	0,650-0,710	3,5-4,7
Нитрид хрома	исходное	17,2-18,4	0,650-0,660	3,1-3,4
	после трения	17,4-18,5	0,640-0,650	2,4-3,0

## Подрисуночные подписи

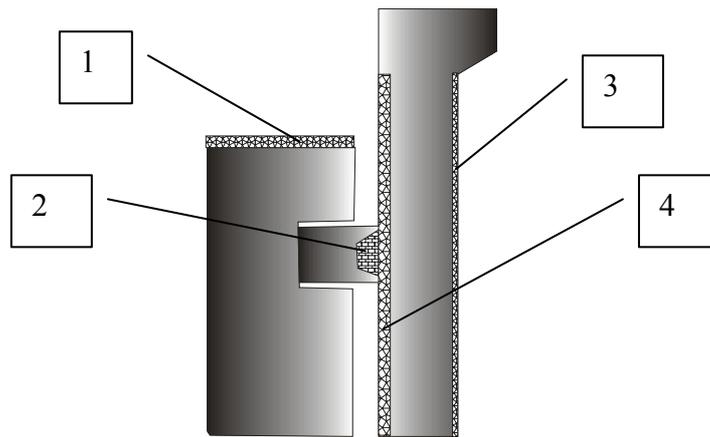


Рис.1. Плазменные защитные покрытия на деталях цилиндропоршневой группы  
 1 – термобарьерное каталитическое покрытие поршня;  
 2 – износостойкое покрытие поршневого кольца;  
 3 – кавитационностойкое покрытие наружной поверхности втулки цилиндра;  
 4 – износостойкое, задиристое, термобарьерное покрытие внутренней поверхности втулки цилиндра.

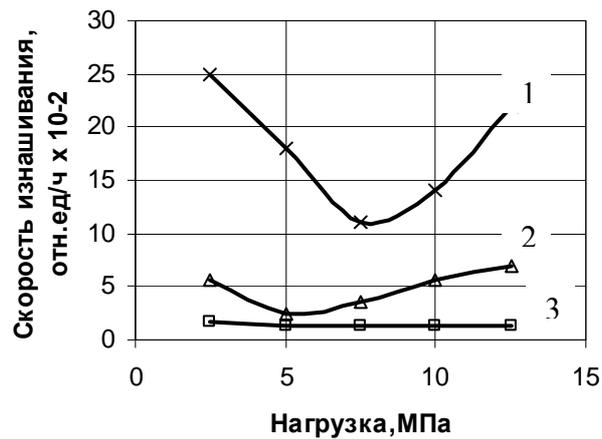


Рис.2. Зависимость скорости изнашивания от нагрузки  
 1 – спецчугун, 2 - ПН85Ю15 + ZrO<sub>2</sub>, 3 - ПРИО20Ч2С2 + ZrO<sub>2</sub>

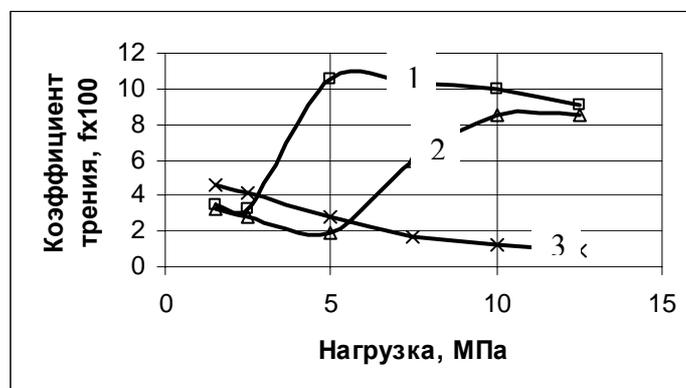
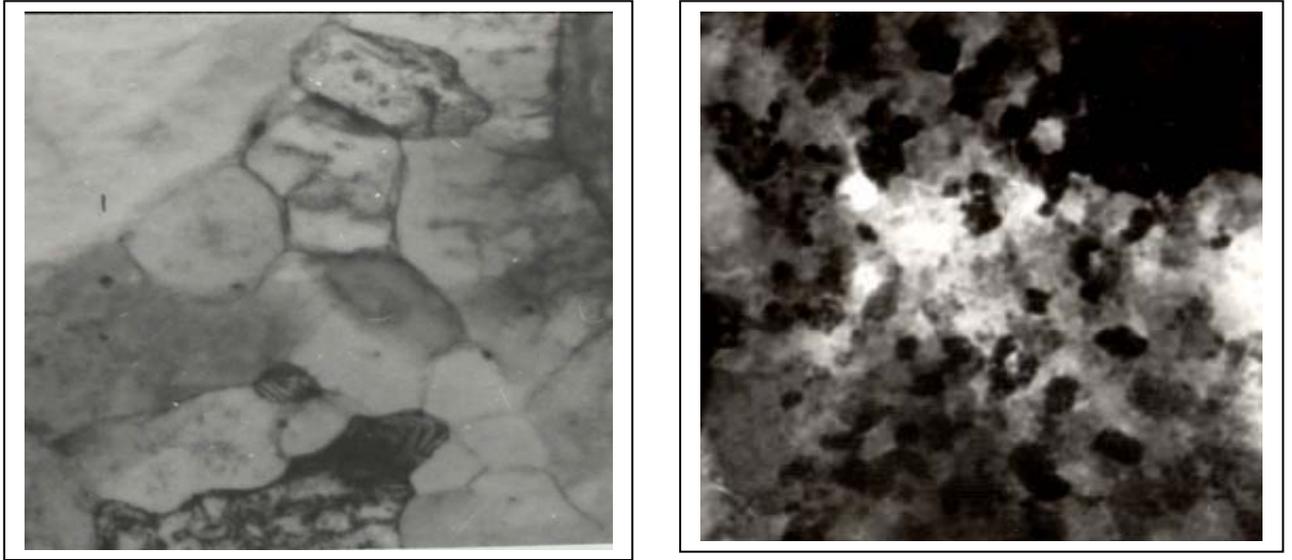


Рис.3. Зависимость коэффициента трения от нагрузки  
 1 – спецчугун, 2 - ПН85Ю15 + ZrO<sub>2</sub>, 3 - ПРИО20Ч2С2 + ZrO<sub>2</sub>



а

в

Рис. 4. Электронномикроскопическая структура поверхностного слоя газотермического покрытия на основе хрома до (а) и после трения (ув. x 30 000)

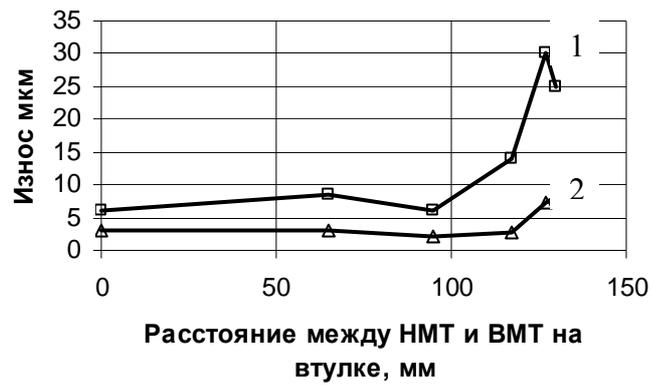


Рис.5. Износ втулки цилиндра

1 – стандартная втулка, 2 – втулка с покрытием - ПН85Ю15 +  $ZrO_2$

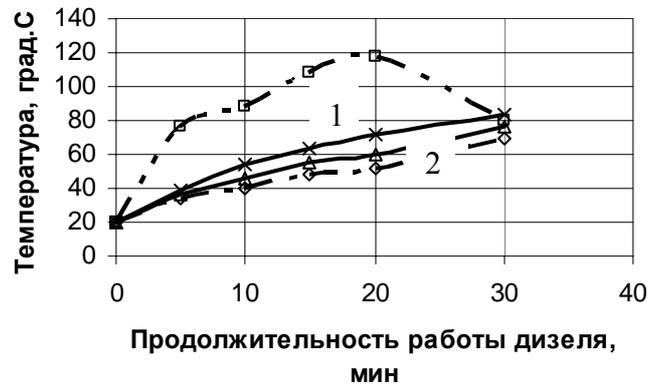


Рис.6. Диаграмма прогрева втулки цилиндра дизеля 1Ч10,5/13 в ВМТ

— · · · — · · · Стандартная втулка, — — — — — втулка с покрытием  
1 – наружная поверхность, 2 – внутренняя поверхность



Камера абразивоструйная

камера напылительная

Рис. 7. Полуавтомат для напыления покрытия на внутреннюю поверхность втулки



Рис. 8. Восстановленные и упрочненные локомотивные втулки