УДК 621.787

А. П. МИНАКОВ, М. Е. ЛУСТЕНКОВ, доктора технических наук, Е. В. ИЛЬЮШИНА, канд. техн. наук
(Белорусско-Российский университет, г. Могилев), e-mail: lenatit@tut.by

Упрочняющая пневмоцентробежная обработка гильз ДВС, альтернативная финишному хонингованию

Предлагается финишная упрочняющая пневмоцентробежная обработка гильз ДВС, которая снижает трудоемкость и расход электроэнергии при их изготовлении, исключает химико-термическую и термическую обработки, повышает износостойкость гильз.

Ключевые слова: ДВС, хонингование, пневмоцентробежная обработка, макро- и микрогеометрия гильз, угар масла, расход топлива, энергосбережение, износостойкость.

The finishing strengthening pneumocentrifugal processing of internal combustion engine sleeves, which decreases labour intensity and energy consumption at their production, excluding thermochemical and chemical treatments, increases wear resistance of sleeves, is suggested.

Keywords: internal combustion engine, honing, pneumocentrifugal processing, macro- and microgeometry of sleeves, waste of oil, fuel consumption, energy saving, wear resistance.

Для финишной обработки гильз ДВС применяют разные способы хонингования [1, 2], анализ которых показал, что по технико-экономическим показателям отечественное производство уступает зарубежному. Основными критериями экономичности ДВС являются расход топлива и относительный расход масла на угар, который определяют согласно ГОСТ 18509—88 по формуле

$$g_{\text{м.уг}} = (\Delta G_{\text{м.уг}} / G'_{\text{т}})100,$$

где $\Delta G_{\text{м.уг}}$ — изменение массы масла в двигателе за время угарного цикла, кг; $G'_{\text{т}}$ — расход топлива за время измерения масла на угар, кг.

Например, фирма KROTOSZYN AG (Польша), поставляющая гильзы для легковых и грузовых машин в Европе, получает заготовки по технологии, принципиально отличающейся от российской. Рабочая поверхность гильзы не подвергается закалке,

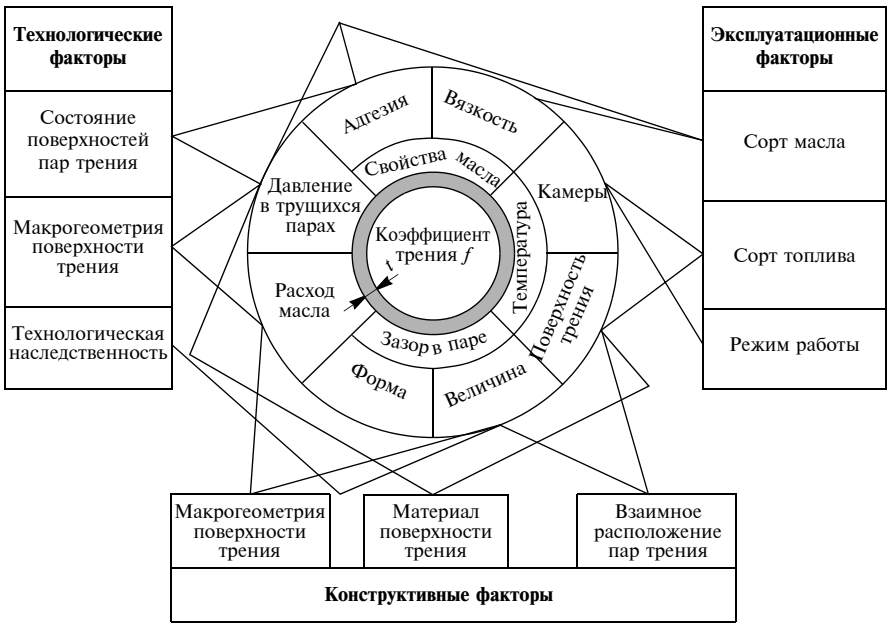

Рис. 1. Факторы, влияющие на толщину *t* масляной пленки в паре трения "гильза — поршневое кольцо"

следовательно, в заготовке не создаются остаточные напряжения и исключается их релаксация при эксплуатации, что улучшает компрессию ДВС [3]. Заготовки гильз после хонингования подвергают фосфатированию.

На ряде российских двигателестроительных заводов в условиях массового производства рабочую поверхность гильз подвергают закалке для повышения износостойкости. Например, закалка токами высокой частоты (ТВЧ) упрочняет рабочую поверхность на глубину до 2,5 мм с твердостью 38÷48 *HRC*. В зависимости от условий эксплуатации автомобиля износ таких гильз составляет от 0,5 до 2 мкм на 1000 км пробега. Получаемая глубина закаленного слоя позволяет перешлифовывать гильзы до ремонтных размеров, что повышает их ресурс.

С позиции триботехники закалка гильз неприемлема для пар сухого и полусухого трения, так как при эксплуатации в некоторых случаях на закаливаемой поверхности образуются сквозные продольные трещины, приводящие к выходу двигателя из строя. Появление трещин связано с распределением остаточных напряжений, обусловливающих возникновение значительных растягивающих напряжений в поверхностном слое зеркала гильзы, а в незакаленном металле — сжимающих напряжений.

Тестирование отечественных двигателей Д-245 с гильзами фирмы KROTOSZYN AG показало, что расход масла на угар в цилиндропоршневой группе составил $g_{\text{м.уг}} \leq 0{,}2$ % (ЕВРО 2), а расход топлива — 273,2 г/(кВт · ч) [4] в отличие от двигателей с гильзами, обработанными по российской технологии. Расход масла на угар в цилиндропоршневой группе составил $g_{\text{м.уг}} = 0{,}31 \div 0{,}34$ %, что превышает нормы евростандартов, но соответствует нормам действующего в России ГОСТ 20000—88. Расход топлива составил 275,2 г/(кВт · ч).

Известно, что экономичность ДВС по маслу в паре трения "гильза — поршневое кольцо" зависит от оптимальной толщины масляной пленки, которая определяется факторами, указанными на рис. 1. На компрессию двигателя и оптимальную толщину масляной пленки большое влияние оказывают геометрическая точность гильзы, отклонение от цилиндричности, которое не должно превышать 0,01÷0,005 мм, а также линейность образующей и шероховатость поверхности.

Установлено, что оптимальная толщина масляной пленки соответствует минимальному коэффициенту *f* трения, при увеличении которого в 1,8 раза интенсивность изнашивания повышается в 6 раз, что ведет к повышенному расходу топлива [5]. Поэтому качество поверхностей, приработка и эффективное смазывание оказывают большое влияние на работу пары трения и определяют ее износостойкость, которая согласно структурно-энергетической теории разрушения (изнашивания) материалов характеризуется четырьмя энергетическими видами изнашивания [4]: I — абразивное; II — усталостное; III — коррозионно-усталостное; IV — коррозионное (нормальное окислительное изнашивание).

Установлено, что средняя скорость изнашивания тонких поверхностных слоев (ПС) зеркала гильз и потери энергии на трение изменяются в геометрической прогрессии: износ поверхности зеркала гильз возрастает ступенчато при переходе (что нежелательно) на абразивное изнашивание с коррозионного, соответствующего изнашиванию при гидродинамическом смазывании и являющегося самым приемлемым при эксплуатации. Поэтому в двигателе необходимо исключить переход с одного вида изнашивания на другой, используя технологические или конструктивные возможности, а также замену одного сорта топлива или моторного масла другим [4, 5].

На работу пары трения "гильза — поршневое кольцо" большое влияние оказывает и технологическая наследственность [6].

Для повышения износостойкости гильзы путем изменения маслоемкости ее поверхности используют нетрадиционные способы финишной обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) [1, 6].

Например, при вибронакатывании шаром на рабочей поверхности гильзы создается смешанный микрорельеф в виде горизонтальных непересекающихся синусоидальных канавок, нанесенных с разной плотностью по высоте гильзы [1]. Испытания двигателей с вибронакатанными гильзами из разных металлов показали повышение их износостойкости в 1,4÷1,8 раза, при этом не наблюдалось задиров, натиров и схватывания. Однако испытания на масляную экономичность двигателей, укомплектованных данными гильзами, показали, что при увеличении маслоемкости рабочей поверхности гильз повышается расход масла на угар. Так, для двигателя ЗИЛ-645 при полной нагрузке, частоте вращения коленчатого вала 2000÷2400 мин$^{-1}$ и увеличении маслоемкости ПС на 10 % угар масла возрастает в 1,3 раза, на 12 % — в 1,5 раза, на 18 % — в 2,3 раза.

На моторостроительных заводах виброобкатывание не получило широкого распространения из-за необходимости создания специального оборудования и инструмента — шарикового накатника. Кроме того, виброобкатывание поверхности гильз после хонингования осуществляют шарами с образованием частично регулярного (смешанного) микрорельефа, который в сочетании с наплывами металла, образующимися по краям синусоидальных канавок, приводит к повышенному угару масла (дымление двигателя) [7]. Только после дополнительной операции — снятия наплывов, относительный расход масла на угар составил 0,4÷0,5 %. Это повышает трудоемкость изготовления гильз по сравнению с традиционной технологией.

Использование приработочных покрытий на поверхностях трения и присадок к маслу на этапе обкатки двигателя показало, что долговечность пары трения "гильза — поршневое кольцо" и КПД ДВС можно повысить путем самоорганизации системы [8]. Поэтому в процессе приработки желательно получить оптимальный (равновесный) микропрофиль рабочей поверхности гильзы, аналогичный эксплуатационному. После специальной приработки поверхность зеркала гильзы имела шероховатость Ra = 0,32÷0,16 мкм. Впадины, полученные при хонинговании, после приработки исчезли, однако угар масла уменьшился, а КПД и ресурс ДВС возросли. Эксплуатационная шероховатость рабочей поверхности гильз после нетрадиционных методов обработки составила Ra = 0,031 мкм. Однако при этом повышается себестоимость изготовления ДВС.

Одним из способов обработки внутренних поверхностей заготовок гильз, повышающим ресурсо- и энергосбережение, является упрочняющая пневмо-центробежная обработка (ПЦО) после получистового хонингования (Ra = 1,15÷2,35 мкм).

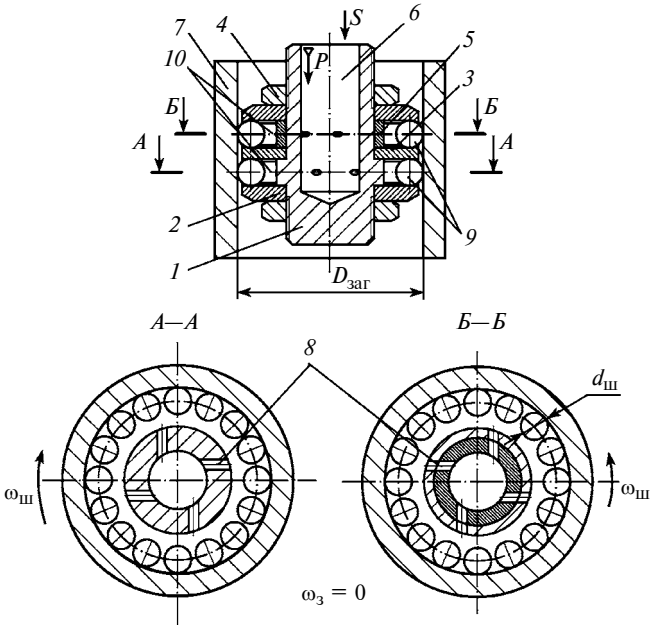

Рис. 2. Схема процесса и инструмента для упрочняющей ПЦО гильз:
1 — корпус; *2* и *3* — диски; *4* — гайки; *5* — втулка; *6* — осевой канал; *7* — заготовка; *8* — тангенциальные сопла; *9* — шары; *10* — камера расширения; $\omega_з$ и $\omega_ш$ — угловые скорости заготовки и шара; $d_ш$ — диаметр шара; $D_{заг}$ — внутренний диаметр заготовки; *P* — давление в осевом канале; *S* — подача инструмента

При этом для снижения трудоемкости изготовления гильзы предполагается: исключить дорогостоящие операции фосфатирования или закалки и устранить прижоги и схватывание. Применение упрочняющей ПЦО для обработки внутренней поверхности гильз позволяет повысить их износостойкость, обеспечить оптимальную масляную экономичность двигателя, уменьшить время его обкатки и снизить расход топлива [9]. Качество поверхности после ПЦО соответствует правилу положительного градиента [4] и IV виду изнашивания — коррозионному.

В процессе ПЦО [10] рабочая поверхность гильз подвергается тонкому динамическому наклепу (упрочнению) стальными шарами *9* (рис. 2). Инструмент устанавливают соосно с неподвижной заготовкой *7* и при обработке перемещают вдоль ее оси. Сжатый воздух от системы питания проходит через центральное осевое отверстие *6* инструмента и тангенциально расположенные сопла *8* и приводит во вращение деформирующие шары *9*, свободно размещенные в камере *10* расширения. Обрабатываемая поверхность пластически деформируется под действием центробежной силы, создаваемой шарами. Однако шары в инструменте не только вращаются, имея шесть степеней свободы, но и совершают осциллирующее и радиальное перемещения относительно обрабатываемой поверхности гильзы в пределах осевого и радиального зазоров в камере

расширения, а также вращаются вокруг собственной оси в турбулентном вихревом потоке сжатого воздуха [10].

Суть упрочняющей ПЦО состоит в разнонаправленном силовом вибрационном воздействии шаров на исходный микрорельеф обрабатываемой поверхности гильзы, что уменьшает ее исходную шероховатость. При этом смятие и сглаживание микровыступов происходит в разных направлениях в результате изменения кинетической энергии шаров при постоянном изменении направления вращения. В процессе ПЦО поверхность очищается от остатков продуктов обработки струями сжатого воздуха, что уменьшает коэффициент трения, а следовательно, повышает износостойкость поверхности.

Локальное кратковременное воздействие деформирующих шаров в режиме автоколебаний на микронеровности согласно дислокационной теории увеличивает число плоскостей скольжения в блоках в разных направлениях и уменьшает сопротивление развитию очагов деформации. В результате получается цельная, не рыхлая, как после хонингования, поверхность. Микротрещины, полученные при хонинговании, закрываются, т. е. устраняются концентраторы напряжений [6, 10].

В кольцевом вихревом потоке сжатого воздуха шары совершают виброколебания, оставляя на рабочей поверхности гильзы следы в виде отдельных хаотично расположенных лунок. Это подтверждают исследования, проведенные на растровом электронном микроскопе [10].

Самая простая вибрация представляет собой гармонический процесс с постоянной амплитудой и частотой. Однако при ПЦО автоколебания совершаются с переменной амплитудой, величина которой в данный момент случайна. Поэтому шероховатость поверхности, обработанной в условиях вибрации, можно рассматривать как нерегулярный микрорельеф.

Кинематику рабочих элементов при ПЦО можно описать известными уравнениями с учетом принятых допущений [10].

Максимальная сила, действующая на обрабатываемую поверхность при каждом ударе шара, определяется уравнением [11]

$$F_{\max} = m\omega_{ш}^2 \frac{(D_{заг} - d_{ш})}{2} + ma_1k^2,$$

где m — масса шара, кг; $\omega_{ш}$ — угловая скорость шара, $с^{-1}$; $D_{заг}$ — диаметр обрабатываемого отверстия заготовки, м; $d_{ш}$ — диаметр шара, м; a_1 — амплитуда колебаний шара, мм; k — частота вращения шара, $с^{-1}$.

Сложная кинематика шаров, действующих на исходный микрорельеф гильзы в разных направлениях, интенсифицирует процесс ПЦО и уменьшает действие силы шара на обрабатываемую поверхность. Например, при $D_{заг}$ = 110 мм и $d_{ш}$ = 11,112 мм центробежная сила $F_{ц} \approx 30$ Н, а крутящий момент $M \approx 1{,}5$ Н · м.

При ПЦО электроэнергия затрачивается лишь на осевое перемещение инструмента: ее расход в разы меньше, чем при хонинговании. Небольшие силы деформации при ПЦО способствуют образованию тонкодеформированного слоя металла (до 0,06 мм), обеспечивающего условия, близкие к равноизносности пары трения "гильза — поршневое кольцо", т. е. старению заготовки. При ЦПО заготовки не нагреваются, поэтому не требуется применение СОЖ. Конструкция инструмента проста и имеет неоспоримые преимущества по сравнению с хонами.

Рассмотрим результаты упрочняющей ПЦО гильз блока цилиндров Д-245, исключив плосковершинное хонингование (ПВХ). Материал гильзы — специальный серый чугун, твердость — 229÷269 *НВ*. Номинальный диаметр гильзы — 110 мм, высота — 245 мм, толщина стенки — 7,25 мм.

Допустимое отклонение рабочей поверхности гильзы от цилиндричности не более 0,01 мм. Рабочая поверхность гильзы должна представлять собой сетку впадин глубиной 1,5÷5 мкм, шириной 10÷70 мкм, с площадками между ними с глубиной микронеровностей 0,1÷1 мкм и параметром шероховатости Ra = 0,63÷0,25 мкм. Базовая относительная опорная длина профиля должна составлять 60÷85 %. Маслоемкость рабочей поверхности должна быть 0,008÷0,041 $мм^3/см^2$. Впадины, образующие сетку хона, должны перекрещиваться и быть наклонены к рабочей поверхности под углом 50÷65°.

Технологическое оснащение ПЦО включает: радиально-сверлильный станок 2А55; двухрядный пневматический шариковый накатник центробежного действия (см. рис. 2); оригинальное приспособление для базирования гильзы по центрирующему пояску ($\varnothing 126f7^{-0{,}043}_{-0{,}083}$ мм) и по нижнему торцу ее буртика (наружный диаметр $\varnothing 133d11^{-0{,}145}_{-0{,}395}$ мм). Устройство для установки в шпиндель станка позволяет соединять пневмосистему с инструментом и исключать его вращение. Инструмент — пневмоцентробежный накатник с двумя рядами деформирующих шаров. В качестве заготовок использовали гильзы после получистового хонингования с параметром шероховатости поверхности Ra = 1,12÷2,34 мкм.

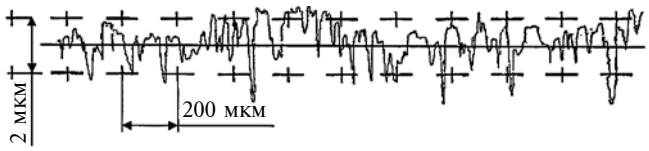

Рис. 3. Профилограмма рабочей поверхности гильзы цилиндра Д-245 после упрочняющей ПЦО

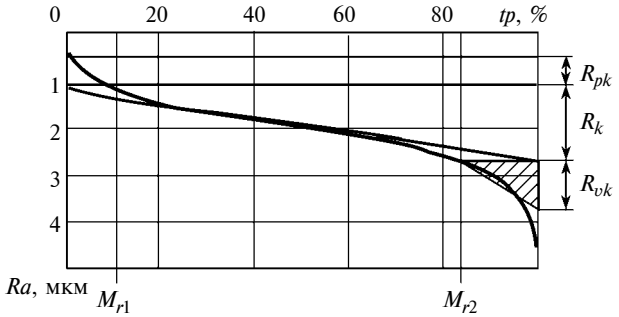

Рис. 4. Кривая Аббота рабочей поверхности гильзы, обработанной упрочняющей ПЦО

В ходе исследований определены режимы ПЦО гильз: давление сжатого воздуха на входе в осевую полость инструмента p = 0,25÷0,35 МПа, подача S = 100÷150 мм/мин, число ходов инструмента i = 1. Установлено, что производительность ПЦО близка производительности ПВХ. Процесс ПЦО легко автоматизировать в агрегатных станках и роторных линиях, возможно применение универсального оборудования. Для обработки используют простые по сравнению с хонами и надежные инструменты — шариковые накатники пневмоцентробежного действия.

Шероховатость поверхности измеряли на профилометрах-профилографах мод. 252 (завод "Калибр") и RTHTALYSURF 5M (фирма TAYLOR HOBSON). Измерительный комплекс состоит из профилометра, вычислительного блока, монитора и цветного печатающего устройства. Шероховатость и другие параметры поверхности измеряли согласно ГОСТ 8.303—78 и стандарта DIN 4776 (Германия) [12].

Профилографирование рабочих поверхностей гильз, прошедших испытания, производили на участках от 40 до 35 мм от верхнего торца гильзы. При этом зона ВМТ маслосъемного кольца находится на расстоянии от 44 до 39 мм от верхнего торца гильзы, а зона ВМТ второго компрессионного кольца — на расстоянии от 34,5 до 32 мм. На рис. 3 приведена профилограмма рабочей поверхности гильзы, записанная на профилометре-профилографе RTHTALYSURF 5M.

После ПЦО диаметр рабочей поверхности гильзы увеличился на 25÷28 мкм; отклонения от круглости и цилиндричности рабочей поверхности гильзы остались неизменными — 0,01 мм; параметр шероховатости — Ra = 0,47÷0,558 мкм; относительная опорная длина профиля составила t_{50} = 85 %.

Маслоемкость поверхности определяли на основании кривой Аббота (рис. 4) согласно стандарту DIN 4776. Исходный контур микрорельефа для расчета параметров получали после фильтрации поверхностного профиля [12].

По глубине микрорельеф делится на центральную область профиля, область выступов и область впадин, которые описываются следующими параметрами [11]:

R_k = 1,4 мкм — основная высота профиля неровностей, которые длительное время находятся в работе и являются несущими по мере изнашивания наружных слоев. Величина R_k определяет эксплуатационные свойства и срок службы поверхностей трения: чем меньше R_k, тем больше несущая способность центральной области профиля;

R_{pk} = 0,6 мкм — средняя высота выступов профиля, которые быстро изнашиваются на начальном этапе эксплуатации. Параметр определяет время приработки поверхностей трения, для уменьшения которого необходимо уменьшать параметр R_{pk};

R_{vk} = 1 мкм — средняя глубина впадин профиля, означает число впадин основного профиля, взаимодействующих с материалом. Параметр определяет маслоемкость поверхностей трения: чем больше R_{vk}, тем больше маслоемкость и меньше коэффициент трения;

сумма R_{pk} + R_k характеризует износостойкость рабочей поверхности; с ее уменьшением износостойкость возрастает;

M_{r1} = 11 % и M_{r2} = 84 % — опорные коэффициенты, определяющие соответственно линии, отделяющие выступы и впадины от основного микрорельефа.

По полученным данным рассчитали удельную маслоемкость Q поверхности по формуле [13]

$$Q = \frac{R_{vk}}{20}\left(1 - \frac{M_{r2}}{100\ \%}\right).$$

Маслоемкость гильз после ПВХ составила Q = 0,269 мм^3/см^2; после упрочняющей ПЦО — Q = 0,0092 мм^3/см^2.

Стендовые испытания проводили в соответствии с ГОСТ 18509—88 в течение 60 ч. В таблице приведены результаты стендовых испытаний дизеля Д-245 с гильзами, рабочая поверхность которых упрочнена ПЦО. Использовали гильзы из отливок ОАО "Костромской завод "Мотордеталь", поршни 260-1004021-В производства ММЗ, поршневые кольца 245-1004060-Б производства завода "Бузулук". Угол опережения впрыска топлива установлен 20° ПКВ до ВМТ.

Гильза	Относительный расход масла на угар $g_{м.уг}$, %	Расход картерных газов $Q_г$, л/мин	Давление картерных газов $p_{к.г}$, Па	Частота вращения коленчатого вала n, мин$^{-1}$	Эффективная мощность N_e, кВт	Удельный расход топлива g_e, г/(кВт · ч)	Условное среднее давление механических потерь $p_{м.п}$, МПа	Давление масла $p_м$, МПа
Дизеля Д-245 (ТУ 23.1.365-84)	Не более 0,5	—	Не более 400	2200^{+40}_{-25}	77^{+4}	Не более 220 + 3 %	Не более 0,251541	Не более 0,343233
После ПВХ	(0,31÷0,34)*	(44÷47)*	160*	2200	77	224	0,203978	—
После ПЦО	(0,22÷0,24)*	(45÷47)*	150*	2200	77	224	0,199075	—

*Показатели, измеренные на угарном режиме при $N_e = 0{,}9N_{eэ}$.

Опытные гильзы цилиндров 245-1002021-А с упрочняющей ПЦО зеркала цилиндра обеспечивают такой же удельный расход топлива, что и штатные гильзы. Расход картерного масла на угар уменьшается на 0,09÷0,1 %.

Однако достигнутый относительный расход масла на угар не является предельным, как и удельный расход топлива. Например, по данным фирмы Gehring GmbH and Co при снижении расхода масла на угар уменьшаются расход топлива, потери на трение и износ.

Внешний осмотр поршней, поршневых колец и гильз цилиндров, прошедших ПЦО, после 60 ч испытаний дефектов не выявил. Все детали цилиндропоршневой группы пригодны к дальнейшей работе.

На поверхности гильзы после ПВХ в отраженном свете хорошо видны зоны с продольными рисками, цвета побежалости, в то время как на поверхности гильзы после ПЦО таких зон нет. Это указывает на то, что упрочняющая ПЦО на финишном этапе обработки рабочих поверхностей гильз предпочтительнее ПВХ.

Таким образом, применение упрочняющей ПЦО рабочей поверхности гильз обеспечивает снижение коэффициента трения в паре до $k \le 0{,}1$ с повышением износостойкости в 2 раза [1, 14, 15], в результате уменьшаются угар масла и расход топлива. Использование ПЦО позволяет уменьшить расход электроэнергии на финишную обработку по сравнению с алмазным хонингованием, исключить химико-термическую и термическую обработки и существенно снизить трудоемкость изготовления гильз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Шнейдер Ю. Г.** Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л.: Машиностроение, 1982. 246 с.
2. **Прогрессивные** методы хонингования / С. И. Куликов, Ф. Ф. Ризванов, В. А. Романчук и др. М.: Машиностроение, 1983. 135 с.
3. **Кравчук В. С., Абу Айаш Юсеф, Кравчук А. В.** Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочненных деталей машин и элементов конструкций. Одесса: Астропринт, 2000. 160 с.
4. **Минаков А. П., Соколов В. Н., Гарлачов Н. С.** Пневмовибродинамическая обработка — предпочтительный метод изготовления поверхностей пар трения и сопрягаемых поверхностей в неподвижных соединениях // Вестник машиностроения. 2002. № 8. С. 39—44.
5. **Погодаев Л. И., Чулкин С. Г.** Анализ надежности деталей цилиндропоршневой группы двигателей при трении скольжения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1998. № 3. С. 57—65.
6. **Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И.** Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: Высшая школа, 1977. 254 с.
7. **Личковаха А. С.** Повышение качества финишной обработки ремонтируемых гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания: Дис. ... канд. техн. наук. Зерноград, 2006. 212 с.
8. **Носихин П. И.** Повышение качества и ускорение обкатки отремонтированных дизелей на основе современных достижений трибологии: Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. М.: МГАУ, 1997. 34 с.
9. **Пат. 2501644 RU:** МПК B24B 39/02, B23P 9/00. Способ финишной обработки внутренних поверхностей заготовок гильз двигателей внутреннего сгорания.
10. **Минаков А. П., Бунос А. А.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / Под ред. П. И. Ящерицына. Минск.: Наука и техника, 1995. 304 с.
11. **Ильюшина Е. В.** Суперфинишная пневмоцентробежная обработка гильз гидроцилиндров: Дис. ... канд. техн. наук. Могилев, 2009. 157 с.
12. **DIN 4776**. Rauheitsmessung; Kenngroßen R_k, R_{pk}, R_{vk}, M_{r1}, M_{r2}, zur Beschreibung des Materialanteils im Rauheitsprofil; Meßbedingungen und Auswerteverfaren. Berlin: Alleinverkuf der Normen Verlag, 1990. 30 s.
13. **Аналитический** обзор методик определения маслоемкости поверхности зеркала гильзы двигателя внутреннего сгорания / А. П. Минаков, О. В. Ящук, В. Н. Соколов, А. В. Павлович // Вестник машиностроения. 1999. № 10. С. 14—16.
14. **Гаркунов Д. Н.** Триботехника (износ и безызносность). М.: Изд-во МСХА, 2001. 616 с.
15. **Николаев В. В.** Технологическое обеспечение износостойкости деталей раскатыванием и обкатыванием (на примере пары: цилиндр — поршневое кольцо): Дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 1986. 227 с.