Технология и организация судостроения и судоремонта

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-10>

УДК 621.43-242:004.62:621.436:629.5

И.И. Кулешов, Л.Б. Леонтьев

КУЛЕШОВ ИГОРЬ ИГОРЕВИЧ – аспирант, SPIN: 2742-3588,

инженер-инспектор, e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org

Дальневосточный филиал Российского морского регистра судоходства

Станюковича ул., 29а, Владивосток, Россия, 690003

ЛЕОНТЬЕВ ЛЕВ БОРИСОВИЧ – д.т.н., профессор, AuthorID: 760417, SPIN: 9456-5027;

ORCID: 0000-0002-8072-306X; ResercherID: U-9351-2017; ScopusID: 6603944093,

e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru

Кафедра сварочного производства Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул. 8, Владивосток, Россия, 690091

Повышение долговечности головок поршней судовых малооборотных дизелей технологическими методами

Аннотация: Приведены результаты исследования влияния лазерной обработки серого перлитного чугуна марок СЧ25 различного химического состава на величины глубины проплавления, шероховатости, структуры и твердости поверхности. Установлено, что при погонной энергии 10,5–11,0 джоулей в секунду на 1 мм наблюдается только оплавление вершин пиков, высота которых уменьшается на 4–8 мкм, структура зоны термического упрочнения – мартенсит. Лазерная обработка без расплавления поверхности чугуна позволяет повысить износостойкость серого перлитного чугуна примерно в 4 раза и уменьшить коэффициент трения в 1,8 раза.

Увеличение погонной энергии свыше 20 джоулей в секунду на 1 мм приводит к расплавлению чугуна и образованию ледебурита. С увеличением погонной энергии глубина расплавления чугуна возрастает от 0,22 мм при 20 джоулях в секунду на 1 мм до 0,38 мм при 84 джоулях в секунду на 1 мм. Оплавление поверхности чугуна не улучшает его триботехнические свойства.

Модифицирование упрочненной поверхности без оплавления материалом на основе вермикулита обеспечивает увеличение износостойкости в 1,5 раза и уменьшение коэффициента трения на 15% по сравнению с поверхностью, упрочненной только лазерной закалкой. Модифицирование оплавленной поверхности обеспечивает увеличение износостойкости всего на 12%, при этом коэффициент трения уменьшается незначительно.

Для повышения долговечности головок поршней судовых малооборотных дизелей предлагается технология установки противоизносных чугунных колец, упрочненных лазерной обработкой, с последующей трибомодификацией их рабочей поверхности слоистым силикатом на основе вермикулита.

Ключевые слова: долговечность, головка поршня, поршневые канавки, дизель, триботехнический материал, покрытие, износостойкость.

Введение

Анализ отказов головок поршней судовых малооборотных дизелей (МОД), установленных на судах Дальневосточного бассейна, показал, что основной причиной их отказов (в среднем до 70% от общего количества) является износ опорных поверхностей поршневых канавок из-за низкой износостойкости материала детали (низколегированная жаропрочная сталь 40ХМ или близкая к ней по химическому составу твердостью от 198 до 256 НВ в зависимости от фирмы-изготовителя [13]), высоких тепловых и механических нагрузок, а также неравномерного нагружения рабочих поверхностей (рис. 1) [3, 5, 6, 9, 13].

На процесс изнашивания поршневых канавок и поршневых колец оказывают влияние большое количество эксплуатационных факторов: тип двигателя, конструктивные особенности, степень форсирования, применяемые топливо и масло, климатическая зона эксплуатации и т.п. Увеличение степени наддува приводит к росту максимального давления сгорания, увеличению силы трения между компрессионным кольцом и поршневой канавкой и температуры в районе первого компрессионного кольца до 240 °С [13]. Конструктивная невозможность подвода смазки в зону трения «компрессионное кольцо–поршневая канавка», высокие давления трения и температуры существенно интенсифицируют процесс изнашивания, поэтому для снижения скорости износа необходимо упрочнять противоизносные кольца.

Долговечность головки поршня в значительной степени зависит от износостойкости деталей сопряжения «поршневая канавка–поршневое кольцо». Наиболее быстро изнашиваются первое компрессионное кольцо и первая канавка поршня, так как это сопряжение работает в наиболее тяжелых температурных, абразивных и нагрузочных условиях при недостатке смазки. Кольца обычно изнашиваются в несколько раз быстрее канавок, и зазор между ними увеличивается главным образом вследствие износа кольца. Поршневые кольца во время работы теряют свою упругость в результате износа их по толщине и высоте, а также от воздействия высоких температур, вследствие чего происходит релаксация внутренних напряжений.

Под действием силы давления газов и силы трения поршневого кольца о втулку цилиндра первое компрессионное кольцо подвергается многократным радиальным перемещениям. В сочетании с ударным действием на краю поршневой канавки происходит объемная деформация и перемещение тонких слоев металла в направлении боковой поверхности поршня. В результате этого на поршневых канавках формируются зоны износа [5], что приводит к изменению формы канавки (рис. 2).

Рис. 1. Схема сил, действующих на поршневое кольцо:
а – надкольцевое пространство; б – закольцевое пространство; P_g – сила давления газов;
 P_y – сила упругости поршневого кольца; $F_{тр}$ – сила трения.

При износе поршневого кольца и канавки плотность посадки кольца в канавке нарушается, давление газов в закольцевом пространстве уменьшается, и кольцо перестает прижиматься к рабочей поверхности втулки цилиндра. Его уплотняющее действие теряется, происходит прорыв газов и перегрев кольца и канавки. Рост температур создает условия для коксования масла в нем, в последующем приводящее к заклиниванию кольца и полной потере его уплотняющих свойств.

По мере накопления абразивных частиц, продуктов изнашивания, сгорания топлива и масла, создаются условия трения об абразивную прослойку, что приводит к увеличению скорости изнашивания как поршневого кольца, так и опорной поверхности канавки.

Рис. 2. Поршневая канавка: а – номинального размера, б – изношенная.

Для головок поршней МОД типа VTBF, RTA, MC (LMC, UMC, LMC-C, LME), ДКРН нормативный ресурс до отказа составляет 50 тыс. ч при среднем межремонтном периоде 20 тыс. ч. На практике действительный межремонтный период головки поршня зависит от вида и интенсивности изнашивания. В среднем срок службы головок поршней до отказа вследствие износа 1-й и 2-й поршневых канавок варьируется в пределах от 8 до 12 тыс. ч, при этом наработка для остальных канавок до достижения предельно допустимой величины износа составляет от 15 до 20 тыс. ч. Средняя скорость изнашивания поршневых канавок для первого и второго компрессионных колец составляет 0,015 мм/тыс. ч работы [3]. Однако максимальная величина износа кромки канавки может достигать 1 мм при предельно допустимом зазоре между поршневым кольцом и канавкой 0,6 мм уже через 18 тыс. ч [13].

Таким образом, для повышения долговечности головок поршней необходимо повышать износостойкость пары трения «поршневая канавка–поршневое кольцо».

Для повышения долговечности головок поршней необходимо повышать твердость поршневой канавки для увеличения износостойкости и снижения величины деформации канавки. Для этого применяют различные технологические методы. Наибольшее распространение получил метод гальванического хромирования благодаря высокой твердости и износостойкости покрытия, однако он характеризуется большой трудоемкостью.

Простым и эффективным методом восстановления поршневых канавок является установка противоизносных колец (рис. 3), которые позволяют производить их замену при износе больше предельно допустимой величины. Противоизносные кольца изготавливают из серого легированного чугуна марки СЧ25. Крепление в канавке осуществляют методом зачеканивания. Перед установкой кольцо предварительно разламывают на две части. Такая технология применяется в том случае, если расстояние между канавками под поршневые кольца позволяет произвести проточку канавки под их установку (производится прочностной расчет оставшейся толщины перемычки между канавками). Высота противоизносных сменных вставок в зависимости от размера поршня может изменяться от 5 до 9–12 мм [13]. Поверхности сменных колец можно подвергать лазерному упрочнению для повышения износостойкости.

Рис. 3. Поршень с противоизносной вставкой:
1 – головка поршня; 2 – противоизносное кольцо.

Практика эксплуатации восстановленных головок поршней методом установки противоизносных колец показывает, что износостойкость рабочих поверхностей вставок без упрочнения недостаточна. В процессе эксплуатации поршня противоизносные кольца сравнительно быстро приобретают характерную конусообразную геометрическую форму вследствие более интенсивного износа наружной кромки. Находящееся в такой канавке поршневое кольцо испытывает напряжения, превышающие допустимые, что приводит в итоге к его преждевременному износу и даже к разрушению. Упрочнение рабочей поверхности противоизносных колец традиционными методами термической или химико-термической обработки (закалка токами высокой частоты, цементация с последующей закалкой и т.д.) приводит к возникновению в них значительных остаточных деформаций, делающих поршень не работоспособным. Наиболее перспективным методом упрочнения рабочей поверхности чугуновой вставки является лазерная обработка, которая позволяет осуществлять локальный нагрев участков поверхности чугунового кольца с заданной регулируемой интенсивностью и при этом не требуется принудительное охлаждение нагретого или оплавленного участка. Таким образом, происходит поверхностная закалка, или отбеливание чугуна, которые обеспечивают достаточную износостойкость [8].

При лазерной обработке чугуна образуются хрупкие структурные составляющие и остаточные напряжения, которые могут привести к образованию микротрещин (мартенсит или ледебурит – в зависимости от параметров режима) и выкрашиванию частиц при динамической нагрузке на поверхность. Поэтому лазерному упрочнению подвергают не всю поверхность, а участки, которые занимают примерно 60–80% всей рабочей площади и чередуются с неупрочненным металлом [1].

Значительно улучшить триботехнические свойства чугуна после лазерной обработки можно путем модифицирования поверхности трения и формирования на ней тонкопленочного антифрикционного металлокерамического покрытия, которое, как правило, превосходит износостойкие покрытия, полученные при применении традиционных технологических методов упрочнения. При этом потери энергии из-за трения существенно снижаются, а износостойкость сопряженных поверхностей трибоузла повышается в 2–4 раза благодаря их структуре, а также физико-механическим свойствам, отличным от металлов. Наиболее широкое применение для модифицирования поверхностей трения нашли материалы на основе природных слоистых силикатов: серпентинита и вермикулита [4, 7, 11, 16].

Цель статьи – разработка технологии восстановления головок поршней судовых малооборотных дизелей путем установки противоизносных колец, упрочненных лазерной обработкой, с последующим трибомодифицированием слоистым силикатом на основе вермикулита, обеспечивающей оптимальные величины глубины проплавления, шероховатости, структуры и триботехнических характеристик противоизносных колец из серого чугуна.

Методики исследования и материалы

Лазерное упрочнение поверхности проводили на установке «Комета-2» при мощности излучения 1,2 кВт; металлографические исследования – на микроскопе Leica DM4000 M при увеличениях от 50 до 1000 раз; измерение твердости – на микротвердомере МНТ-10 при нагрузке 150 Н.

Микрогеометрические свойства поверхностей деталей после механической и лазерной обработки с оплавлением анизотропны. Поэтому трехмерное профилометрирование позволяет более точно оценить реальные характеристики поверхности; однозначно дифференцировать впадины, образованные единичными лунками или бороздками; определить значения экстремальных характеристик шероховатости, (поскольку при традиционном способе их измерения профиль проходит по склонам вершин и впадин, а не пересекается с ними, что искажает опорную кривую поверхности); повысить информативность результатов в связи с увеличением определяемых независимых параметров; визуализировать поверхность при

помощи компьютера (т.е. детально представить ее топографию); получить ряд новых параметров, таких как материальный объем впадин или выступов [10, 12, 15].

Параметры шероховатости и топографию образцов после шлифования и лазерной обработки определяли с помощью измерительного прибора Contour GT-I 3D Optical Microscope фирмы Bruker. Параметры для оценки структуры поверхностей, полученные при трехмерных измерениях, соответствуют ГОСТ Р ИСО 25178-2–2014 (ISO 25178-2:2012).

Образцы для исследований вырезали из втулок цилиндров судовых дизелей различных фирм-изготовителей, которые существенно различаются по химическому составу чугуна (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав исследуемых чугунов, %

Наименование элемента	Тип чугуна			
	1	2	3	4
Железо	Осн.	Осн.	Осн.	Осн.
Углерод	3,6	3,35	3,1	2,84
Кремний	1,41	1,08	1,16	1,03
Марганец	1,00	1,15	0,63	0,60
Алюминий	0,35	0,28	0,40	—
Хром	0,65	0,7	0,3	0,3
Медь	1,2	1,6	0,82	0,76
Сера	0,11	0,14	0,19	0,12
Фосфор	0,52	0,7	0,20	0,19

Для формирования металлокерамического слоя использовали триботехнический материал на основе вермикулита (дисперсность твердых частиц находится в пределах от 0,05 до 1 мкм), элементный состав исходного вермикулита %:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	MnO	Cr ₂ O ₃	Другие
42,73	11,78	29,47	8,72	5,75	0,85	0,14	0,17	0,47	0,27

Триботехнические испытания проводили по схеме с искусственным загрязнителем в смазке. В качестве искусственного загрязнителя использовалась кварцевая пыль дисперсностью 1–5 мкм. Концентрация загрязнителя в топливе составляла 2%. Смазку пары трения осуществляли капельным способом (10–15 капель в минуту). Для смазки применялось моторное масло марки М-14-Д₂(цл 30). Испытания на универсальной машине трения модели УМТВК проводили по схеме «диск–колодка» в условиях граничной смазки при постоянной скорости скольжения 1,1 м/с и нагрузке 100 Н в течение 1 часа. Колодка из серого чугуна подвергалась различным видам обработки: механическая (шлифование), лазерная (с оплавлением и без оплавления), триботехническое модифицирование. Диск диаметром 45 мм был изготовлен из чугуна марки СЧ25 твердостью 210 НВ.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Микротвёрдость металлической основы исходных серых перлитных чугунов находится в пределах 300–384 НВ, после лазерной обработки без оплавления микротвёрдость зоны термического влияния возрастает до 594–647 НВ, а оплавленной зоны – до 736–756 НВ в зависимости от типа чугуна. Вид зон лазерного воздействия на чугун представлен на рис. 4.

При погонной энергии 10,5–11,0 Дж•с/мм наблюдается только расплавление вершин пиков, в результате их высота уменьшается на 4–8 мкм (рис. 5), благодаря этому высотные параметры структуры несколько уменьшаются. Металлографическая структура участков термического воздействия — мартенсит.

Рис. 4. Зоны лазерного воздействия чугуна ($\times 50$):
а – без оплавления ($E = 10,7$ Дж·с/мм); б – с оплавлением ($E = 38,2$ Дж·с/мм).

Надежность узлов трения судовых дизелей существенно зависит от качества поверхностей сопряженных деталей. Как известно из практики, трение и износ деталей в значительной степени обусловлены микрогеометрией их поверхностей, в этой связи оценка микрогеометрии и анализ влияния этого фактора на функциональные свойства изделий представляются особо важными [2, 14].

При погонной энергии 22 Дж·с/мм и более происходит расплавление верхнего слоя чугуна с образованием ледебурита. С увеличением погонной энергии с 22 до 86 Дж·с/мм глубина проплавления плавно возрастает с 235 до 394 мкм (рис. 6).

Рис. 5. Шероховатость поверхности образцов:
а – исходного чугуна, б – после лазерной обработки на режиме 10,7 Дж·с/мм;
1 – по направлению движения лазерного луча;
2 – перпендикулярно направлению движения лазерного луча.

Анализ глубины лазерного воздействия на чугун показал, что с увеличением погонной энергии с 10,5 до 86,0 Дж·с/мм глубина зоны лазерного воздействия плавно возрастает с 505 до 918 мкм (рис. 6). При этом наблюдается большой разброс значений глубин расплавления и термического воздействия относительно средней величины вследствие значительного различия содержания кремния и углерода в исходном сплаве.

Арифметическое среднее значение высоты поверхности ограниченного масштаба (S_a) зависит от удельной погонной энергии при лазерной обработке (рис. 7), минимальная величина высоты соответствует диапазону энергии 10,7–11 Дж·с/мм, при которой происходит только расплавление вершин пиков, максимальная величина высоты S_a наблюдается при энергии 22 Дж·с/мм, затем плавно снижается.

Рис. 6. Влияние удельной погонной энергии при лазерной обработке на глубину воздействия: 1 – без оплавления; 2 – с оплавлением поверхности.

Рис. 7. Влияние удельной погонной энергии при лазерной обработке на параметры структуры поверхности:
 1 – объем пустот на единицу площади при заданном коэффициенте смятия (V_v);
 2 – арифметическое среднее значение высоты поверхности ограниченного масштаба (S_a);
 3 – объем материала на единицу площади при заданном коэффициенте смятия (V_m).

Величина объема материала на единицу площади при заданном коэффициенте смятия (V_m) имеет такую же зависимость, как и для среднего значения высоты поверхности ограниченного масштаба (рис. 7).

Величина объема пустот на единицу площади при заданном коэффициенте смятия (V_v) по мере возрастания удельной погонной энергии до 38 Дж·с/мм увеличивается вследствие выгорания и растворения углерода в железной матрице (но из-за малого времени лазерного воздействия пустоты не заполняются металлом – рис. 8), затем плавно снижается.

Модифицирование поверхности чугунного образца после лазерной обработки триботехническим материалом осуществляли фрикционным методом на режиме: усилие прижатия индентора к упрочняемой поверхности 100 Н, скорость обработки – 1,1 м/с, время упрочнения – 15 мин.

Сравнительные триботехнические испытания позволили установить следующее (табл. 2):

- лазерная обработка позволяет повысить износостойкость серого перлитного чугуна примерно в 4 раза и уменьшить коэффициент трения в 1,8 раза;
- оплавление поверхности чугуна практически не изменяет величины скорости изнашивания и коэффициента трения;
- модифицирование упрочненной поверхности без оплавления обеспечивает увеличение износостойкости еще в 1,5 раза и уменьшение коэффициента трения на 15%;
- модифицирование упрочненной поверхности с оплавлением неэффективно.

Рис. 8. Топография поверхности:
а – исходного чугуна, б – после лазерной обработки на режиме 38,2 Дж/см.м.

Таким образом, лазерная обработка серых перлитных чугунов без оплавления с последующим модифицированием триботехническим материалом на основе вермикулита обеспечивает повышение износостойкости противоизносных колец в 5,8 раза при глубине упрочнения не менее 0,5 мм, что достаточно для обеспечения срока службы головки поршня свыше 20 тыс. ч.

Таблица 2

Результаты триботехнических испытаний

Вид обработки чугуна	Скорость изнашивания колодки, мг/ч	Коэффициент трения
Шлифование	26,1	0,072
Лазерная без оплавления	6,7	0,040
Лазерная с оплавлением	6,8	0,043
Лазерная без оплавления + трибомодификация	4,5	0,035
Лазерная с оплавлением + трибомодификация	6,0	0,040

Выводы

Для повышения долговечности головок поршней судовых малооборотных дизелей предлагается технология установки противоизносных чугунных колец, упрочненных лазерной обработкой с последующей трибомодификацией рабочей поверхности колец слоистым силикатом на основе вермикулита.

Для обеспечения максимальной износостойкости серых перлитных чугунов необходимо выбирать параметры удельной погонной энергии лазерного упрочнения в диапазоне 10–12 Дж•с/мм с последующим трибомодифицированием слоистым природным силикатом на основе вермикулита, при этом обеспечиваются минимальные коэффициент трения и высотные параметры топографии поверхности и оптимальные величины глубины проплавления и твердости поверхности противоизносных колец.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведерников Д.Н., Шляхтов В.А. Решение трибологических проблем двигателей внутреннего сгорания: современная практика изготовителей и перспективы (по материалам зарубежной печати) // Трение и износ. 1994. Т. 15, № 1. С. 138–148.
2. Вейко В.П., Дышловенко С.С. Лазерное микроструктурирование поверхностей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2001. № 4. С. 119–128.
3. Возницкий И.В., Пунда А.С. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Т. 2. М.: Моркнига, 2002. 282 с.
4. Дунаев А.В., Ладиков В.В., Пустовой И.Ф., Голубев И.Г. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК. М.: Росинформагротех, 2014. 164 с.
5. Ждановский Н.С., Николаенко А.В. Надежность и долговечность автотракторных двигателей. Л.: Колос, 1981. 295 с.
6. Загайко С.А. Имитационное моделирование изнашивания поршневого кольца двигателя внутреннего сгорания // Вестник Уфимского гос. авиационного техн. ун-та. 2008. Т. 11, № 2. С. 84–89.
7. Крылов Н.А., Скотникова М.А., Иванов Е.К., Пустовой Н.И., Никитин А.В. Влияние геоматериалов на улучшение триботехнических свойств пар трения // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: в 2 ч. Ч. 2: Материалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 508–513.
8. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Повышение работоспособности поршневых канавок головок поршней судовых малооборотных двигателей // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2016. № 6(40). С. 155–168.
9. Марьин Д.М., Хохлов А.Л., Глущенко А.А. Теоретическое обоснование снижения износа деталей сопряжения «поршневая канавка – поршневое кольцо» // Вестник Ульяновской гос. сельскохозяйств. академии. 2015. № 4(32). С. 178–182.
10. Медунецкий В.М., Васильков С.Д. Методы оценивания микрогеометрии поверхностей деталей изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 3. С. 231–236.
11. Усачев В.В., Погодаев Л.И., Телух Д.М., Кузьмин В.Н. Введение в проблему использования природных слоистых геомодификаторов в трибосопряжениях // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 1. С. 36–42.
12. Филимонова Е.А., Юльметова О.С., Третьяков С.Д. Оценка шероховатости поверхности с использованием трехмерных топографий // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 8. С. 56–60.
13. Хмелевская В.Б., Леонтьев Л.Б. Повышение надежности судового оборудования технологическими методами: в 3 т. Т. 3. Восстановление и упрочнение деталей. Владивосток: Морской гос. ун-т: Дальнаука, 2005. 356 с.
14. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. 264 с.
15. Franco L.A., Sinatora A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp. Precision Engineering. 2015;40:106–111.
16. Leont'ev L.B., Shapkin N.P., Makarov V.N. Functional Nanostructured Tribotechnical Materials. Materials Engineering and Technologies for Production and Processing III. ICIE-2017. Trans Tech Publication. P. 410–415. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.410>

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-10>

Kuleshov I., Leontyev L.

IGOR KULESHOV, Surveyor of the Far East Branch Office
of the Russian Maritime Register of Shipping, e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org
29a. Stanyukovicha St., Vladivostok, Russia, 690003
LEV LEONTYEV, Doctor of Engineering Sciences, Professor, ORCID: 0000-0002-8072-306X;
ResearcherID: U-9351-2017, ScopusID: 6603944093,
e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru
Department of Welding Engineering, School of Engineering
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Improvement of durability of piston crowns of the low speed marine diesel engines by technological methods

Abstract: The article is aimed to investigation of impact of laser treatment grey perlitic cast iron SCH25 types with variable chemical composition on melting depth, roughness, structure and surface hardness. It was identified that at the heat input from 10.5 to 11.0 j·s/mm only melting of peaks tops with reduce of peaks height up to 4–8 mkmm was observed, and the microstructure of the thermo-hardened area was – martensite. Laser treatment without melting of cast iron surface will increase wear resistance up to 4 times and reduce friction index by 1.8 times.

Increase of heat input over 20 j·s/mm leads to the cast iron melting and ledeburite forming. Due to heat input increase from 20 j·s/mm to 84 j·s/mm melting depth increases from 0.22 mm to 0.38 mm accordingly. Cast iron surface melting doesn't improve its tribological properties.

Modification of hardened surface without melting by vermiculite-based material provides wear resistance up to 1.5 time and friction index reduce at 15% in comparison with cast iron hardened by laser treatment only. Melting area modification provides increase of surface wear resistance only to 12%, thus friction index reduces insignificantly.

To increase the durability of the piston crowns of the low-speed marine diesel engines, the authors proposed a technology for installing anti-wear cast iron rings hardened by laser treatment, followed by tribo-modification of their working surface with vermiculite-based layered silicate.

Keywords: durability, piston crown, piston grooves, diesel, tribotechnical material, cover, wear resistance.

REFERENCES

1. Vedernikov D.N., Shlyahov V.A. The solution of tribological problems of internal combustion engines: contemporary practice of manufacturers and opportunities (based on materials of foreign press). *Friction and Wear*. 1994(15);1:138–148.
2. Veiko V.P., Dyshlovenko S.S. Laser microstructuring of surfaces. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Machineries and Optics*. 2001;4:119–128.
3. Voznitsky I.V., Punda A.S. *Marine Internal Combustion Engines*. Vol. 2. M., Morkniga, 2002, 282 p.
4. Dunaev A.V., Ladikov V.V., Pustovoi I.F., Golubev I.G. Mineral modifiers usage efficiency in the technical service in the agricultural sector. M., Rosinformagrotech, 2014, 164 p.
5. Zhdanovsky N.S., Nikolaenko A.V. Reliability and durability of autotractor's engines. L., Kolos, 1981, 295 p.

6. Zagayko S.A. Imitating modeling of wear of a piston ring of an internal combustion engine. *Bulletin of Ufa State Aviation Technical Univ.*, 2008 (11);2:84–89.
7. Krylov N.A., Skotnikova M.A., Ivanov E.K., Pustovoi N.I., Nikitin A.V. The influence of geo-materials on improving the tribotechnical properties of friction pairs. *Technologies for repair, restoration and hardening of machine parts, machinery, equipment, tools and tooling from nano to macro level: in 2 parts. Part 2: Materials of the 12th International Scientific and Practical Conference*. SPb., Polytechnic Publishing. Univ., 2010. P. 508–513.
8. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Performance improving of piston crown's rings grooves of the vessels low-speed engines. *Bulletin of the State Univ. of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2016;6:155–168.
9. Marin D.M., Khokhlov A.L., Glushchenko A.A. The theoretical substantiation of wear reducing of the coupling “piston groove – piston ring”. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2015;4:178–182.
10. Medunetsky V.M., Vasilkov S.D. Methods for evaluating the microgeometry of the surfaces of parts of products. *News of Universities. Instrument Making*. 2016(59);231–236.
11. Usachev V.V., Pogodaev L.I., Telukh D.M., Kuzmin V.N. Introduction to the problem of natural layered geomodifiers usage in friction conjugation. *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. 2010;1:36–42.
12. Filimonova E.A., Yulmetova O.S., Tretyakov S.D. Evaluation of surface roughness using three-dimensional topographies. *News of Universities. Instrument Making*. 2014 (57);8:56–60.
13. Khmelevskaya V.B., Leontyev L.B. Improving the reliability of shipboard equipment by technological methods: in 3 vols, Vol. 3. *Restoration and hardening of parts*. Vladivostok, Maritime State Univ., Dalnauka, 2005, 356 p.
14. Schneider Yu.G. *Operational properties of parts with regular microrelief*. St. Petersburg., St. Petersburg State University of Information Tehnology, 2001, 264 p.
15. Franco L.A., Sinatora A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp. *Precision Engineering*. 2015;40:106–111.
16. Leont'ev L.B., Shapkin N.P., Makarov V.N. Functional Nanostructured Tribotechnical Materials. *Materials Engineering and Technologies for Production and Processing III. ICIE-2017*. Trans Tech Publication. P. 410–415. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.410>