

6. Hudjakov, S. A. "Posledstvija otkaza shatunnogo podshipnika glavnogo dizelja t/h «Prof. Barabanov»." *Vestnik MGU. Serija: Sudostroenie i sudoremont* 25 (2008): 52–54.
7. Manicyn, V. V. *Tehnologija remonta sudov rybopromyslovogo flota*. M.: Kolos, 2009.
8. *Kompleksnaja sistema tehničeskogo obsluzhivanija i remonta sudov. Osnovnoe rukovodstvo. RD 31.20.50* – 87. M.: V/O «Mortehinformreklama», 1988.
9. Sobolenko, A. N., and D. K. Glazuk. "Improvement of efficiency and fail-safety of marine engines by means of their operators' simulator training." *Fisheries* 1 (2014): 12–14.
10. Sobolenko, Anatolij Nickolaevich, Yuriy Alekseevich Korneychuk, and Dmitry Konstantinovich Glazyk. "Summary of the operation practice of marine engine-room simulators." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2016): 59–69.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маницын Владимир Викторович —
кандидат технических наук, доцент.
Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет
manytsynv@mail.ru
Соболенко Анатолий Николаевич —
доктор технических наук, профессор.
Морской государственный университет
им. адм. Г. И. Невельского
sobolenko_a@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Manitsin Vladimir Victorovich —
PhD, associate professor.
Far Eastern State Technical
Fishery University
manytsynv@mail.ru
Sobolenko Anatoly Nikolayevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Marine State University named
after G.I.Nevelskoy
sobolenko_a@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-155-168
УДК 621.43-242:004.62:621.436:629.5

И. И. Кулешов,
В. М. Ходаковский

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОРШНЕВЫХ КАНАВОК ГОЛОВОК ПОРШНЕЙ СУДОВЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Задачей данной работы являлось повышение работоспособности поршневых канавок головок поршней судовых малооборотных дизелей. В настоящее время существующие технологии восстановления поршневых канавок головок поршней не обеспечивают необходимую их долговечность. Наиболее перспективной технологией является технология восстановления канавок путём установки противоизносных колец. Однако данная технология нуждается в дальнейшем совершенствовании, так как долговечность головок поршней, восстановленных данным способом, не превышает 16 тыс. ч. Практически, единственным способом упрочнения данных колец является лазерная обработка. К существенному недостатку лазерного упрочнения без оплавления поверхности можно отнести низкую глубину зоны лазерного воздействия, которая достигает 0,3 мм. В свою очередь, существенным достоинством лазерной обработки является отсутствие какого-либо коробления детали вследствие небольших глубин термического влияния. Перспективным способом упрочнения рабочей поверхности противоизносных колец является способ лазерного упрочнения с оплавлением поверхности, так как, используя данный способ, можно значительно увеличить глубину упрочнённого слоя.

В работе исследовалось влияние лазерного упрочнения с оплавлением поверхности чугуна на прочность кольца на твёрдость зоны лазерного воздействия, так как в настоящее время нет детальных исследований закономерности изменения глубины и структуры зоны лазерного воздействия в зависимости от изменения параметров лазерной обработки. В результате проведённого экспериментального исследования было выявлено, что при лазерном упрочнении с оплавлением поверхности глубина зоны лазерного воздействия достигает 1 мм, что значительно больше, чем при лазерном упрочнении без оплавления

поверхности. Выведены формулы для расчёта глубины лазерного воздействия для чугунов в зависимости от плотности полезной мощности и скорости перемещения лазерного луча.

Ключевые слова: повышение работоспособности головок поршней, поршневая канавка, противоизносное кольцо, лазерное упрочнение с оплавлением, лазерное упрочнение чугунных деталей.

Введение

Эффективный срок службы головок поршней (ГП) малооборотных дизелей (МОД) при достижении максимального износа верхней канавки ГП, равного 1,0 – 1,5 мм для дизелей МАН KZ 70/120A и KZ 70/120E, составляет около 15 тыс. ч, после чего производится замена головки поршня [1]. По некоторым сведениям, средняя высота канавки поршня увеличивается на 0,01 мм за 1 тыс. ч работы [2]. Следует отметить, что при увеличении общего износа торца канавки происходит увеличение степени изнашивания к периферии канавки. В работе [3] приводится анализ износа опорной поверхности поршневой канавки, и необходимо отметить то, что скорость изнашивания кольца в два раза меньше, чем канавки. Проведённый авторами работы анализ путём замера величины износа кольца дизеля МАН показал, что при величине износа кольца 0,2 мм износ канавки составил 0,4 – 0,5 мм. Также отмечено, что верхние кольца имеют блестящую полоску по всей длине нижней опорной поверхности кольца, что является следствием прогиба кольца в поперечном сечении в результате давления газов и деформации перемычек ГП. В итоге наблюдается выраженный износ торца опорной поверхности поршневой канавки ГП.

В настоящее время существуют способы, которые позволяют восстановить первоначальную геометрию поршневой канавки. К основным способам можно отнести следующие:

- скос кромок опорных поверхностей канавки ГП с дальнейшей их наплавкой;
- выборка канавок на станке с дальнейшей наплавкой выбранного участка и проточкой новых канавок;
- хромирование канавок;
- установка сменных чугунных противоизносных колец (ПИК) (иногда с поверхностной закалкой) [4].

Недостатками способов, которые включают в себя наплавку износостойкими материалами, являются:

- относительно невысокая технологичность при довольно высоких трудозатратах;
- сравнительно низкое качество и недостаточная долговечность полученных канавок, что приводит к преждевременному выходу из строя поршневых колец (ПК);
- высокая стоимость (может достигать 50 % стоимости детали, а наработка до отказа ГП варьируется в пределах 5 – 9 тыс. ч);
- при наплавке канавок стальных ГП требуется общий отжиг головки (так как возможно изменение структуры материала детали в самом напряжённом месте головки, и только общий отжиг, который не всегда возможен, может восстановить нужную структуру) [1].

К недостаткам способа хромирования поршневых канавок можно отнести:

- неравномерный износ хромированных канавок по образующей;
- наличие трещин в перемычках;
- если величина износа превышает возможную толщину хромового покрытия (0,25 мм), то перед хромированием необходимо производить наращивание поверхности;
- высокая стоимость [5].

Наиболее простым способом восстановления поршневых канавок является способ установки чугунных ПИК. Технологический процесс установки ПИК заключается в проточке ручьёв для их установки и дальнейшей установке колец в ручей.

Преимуществами восстановления канавок ГП способом установки ПИК являются:

- простота установки ПИК;
- низкая стоимость;

— довольно высокая технологичность, так как при износе ПИК его замену представляется возможным произвести судовому экипажу.

Данный способ также имеет свои недостатки, к которым можно отнести:

- потерю плотности посадки через 10 – 12 тыс. ч наработки [2];
- невысокую прочность материала ПИК в сравнении с материалом поршня.

В научно-исследовательской работе «Работоспособность деталей ЦПГ двигателей «B&W» 874 VT 2BF-160 т/х типа «Пула», руководителем которой является Г. С. Щукин [6], авторы приводят данные о наработке и отказах основных деталей ЦПГ. В частности приводятся данные о наработке до отказа поршней судовых МОД «B&W» 874 VT 2BF-160, в головке которых были установлены ПИК. ГП были выполнены из стали специальной ТУ 24-4-01-071-65, ПИК — из чугуна СЧ20 ГОСТ 1412-79. Авторами обследовались четыре судна типа «Пула». Общее количество цилиндров — 32; на поршне — пять компрессионных колец, одно маслосъёмное; также в ГП завальцовано пять ПИК. Проведённые эксплуатационные испытания показали, что средняя наработка ГП до отказа вследствие поломок ПИК составила 16 тыс. ч при коэффициенте вариации 0,4. По окончании проведения исследования наработка дизелей варьировалась от 39,9 до 50,0 тыс. ч. В период исследования произошло суммарно 107 отказов ГП вследствие поломок ПИК. Авторами отмечено, что поломки ПИК происходили вследствие увеличения зазора в местах их вальцовки в ГП.

Для того чтобы ПИК наиболее плотно прилегал к нижней поверхности канавки ГП, были разработаны такие методы установки ПИК, как:

- проточка под одинаковым углом торцевых перемычек и ПИК, затем — точечная приварка ПИК к головке поршня [7];
- закрепление ПИК в проточенном для него ручье, когда кольцо фиксируется от горизонтального перемещения посредством металлической проставки [8].

Путём установки ПИК способом закатки металлической проставки максимально снижается возможность их поломки. Практика показала, что данный способ позволяет значительно увеличить их срок службы. ПИК, установленные таким способом компанией ООО НТК «АЛЬКОР КО ЛТД», были смонтированы на шесть головок поршней главного двигателя (ГД) HANSHIN 6LUS40 т/х Seatiger в 2004 г. Восстановленные ГП отработали в ГД без происшествий, сколов и разрушений, а также не наблюдался повышенный износ ПК. Следует иметь в виду и то, что устанавливаемое по технологии [8] ПИК также проходит лазерное упрочнение с оплавлением верхней опорной поверхности. После того как данные поршни отработали 6 тыс. ч, была проведена их ревизия, в процессе которой определено, что ПК ГП находится в работоспособном состоянии, зазоры не превышают предельно-допустимые значения. В результате было принято решение оставить данные поршни на второй срок. Также по данной технологии компанией было восстановлено 12 ГП ГД 6UEC 37LA т/х «Айс Бриз» и «Айс Стрим». Нарботка поршней, восстановленных таким способом, составила 10 тыс. ч, после чего был произведён их осмотр. Во время работы происшествий и аварий ГД не было, сколов или разрушений отремонтированных канавок поршней не наблюдалось, повышенного износа ПК также не наблюдалось.

ПИК МОД, как правило, изготавливаются из чугуна СЧ20, СЧ25, СЧ 30 (ГОСТ 1412-85) [9].

В свою очередь, в процессе работы ПК, совершая вращение в канавках со скоростью 0,1 – 1,0 м/с [1] а также поступательные движения вследствие перекадки поршня в верхней мёртвой точке (ВМТ) и нижней мёртвой точке (НМТ), так же, как и канавку ГП, изнашивают ПИК. Следствием этого является приобретение ПИК некоторой конусообразности [3]. Следовательно, возникает необходимость в упрочнении верхней опорной и торцевой поверхности ПИК.

Существуют следующие способы упрочнения рабочих поверхностей противоизносных колец:

- плазменная наплавка противоизносных колец из углеродистых сталей [5];
- лазерное упрочнение чугунных колец без оплавления поверхности [10];
- лазерное упрочнение чугунных ПИК с оплавлением поверхности [11].

К недостаткам упрочнения ПИК путём плазменной наплавки можно отнести низкую технологичность, наличие коробления детали, необходимость проведения термообработки, из-за чего необходимо изготавливать заготовку большего размера с последующей её механической обработкой.

К существенному недостатку лазерного упрочнения без оплавления поверхности можно отнести низкую глубину зоны лазерного воздействия, которая достигает 0,3 мм [12] – [14]. В свою очередь существенным достоинством лазерной обработки является отсутствие какого-либо коробления детали вследствие небольших глубин термического влияния.

Определение влияния параметров лазерного упрочнения на глубину зоны лазерного воздействия

Задачей данной работы являлось определение влияния лазерного упрочнения с оплавлением поверхности чугунного ПИК на твёрдость зоны лазерного воздействия, так как в настоящее время нет детальных исследований закономерности изменения глубины и структуры ЗЛВ в зависимости от изменения параметров лазерной обработки. Исследовалась структура серого перлитного чугуна после лазерного упрочнения с оплавлением поверхности. Так как ПИК — это деталь, работающая на износ, то данное исследование даёт возможность определить оптимальные параметры лазерной обработки с оплавлением поверхности.

Лазерное упрочнение с оплавлением поверхности проводили на установке «Комета-2». Режимы лазерного упрочнения:

- мощность излучения — 0,9 – 1,2 кВт;
- диаметр лазерного луча — 2,5 мм;
- скорость перемещения луча — 0,01 – 0,04 м/с.

Металлографическое исследование проводилось на микроскопе Leica DM4000 M при увеличениях от $\times 50$ до $\times 1000$ до травления и после травления в 4 %-м растворе азотной кислоты в спирте. Измерение твёрдости проводилось на микротвердомере МНТ-10 при нагрузке 150 Н и увеличении в $\times 500$.

Исследования исходной структуры чугуна по графиту и металлической основе (по ГОСТ 3443-87) показали:

Графит	ПГ пластинчатый (рис. 1)
Форма ПГф1	(пластинчатая прямолинейная)
Распределение	ПГр1 (равномерное)
Размер	ПГд350 (250 – 500 мкм)
Количество	ПГ6 (5 – 8 %)



Рис. 1. Форма и распределение графита, $\times 50$

Металлическая основа (рис. 2):

Вид структуры	перлит пластинчатый Пт1
Содержание перлита	П (от 98 %)
Дисперсность перлита	Пд0,5 (0,3 – 0,8 мкм)

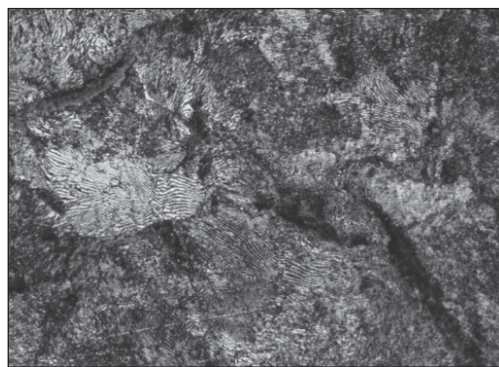


Рис. 2. Микроструктура металлической основы чугуна, $\times 500$

Фосфидная эвтектика (рис. 3):

Строение	ФЭ4 (тройная игольчатая + ФЭ5 (тройная с пластинками цементита)
Распределение	ФЭр2 (разорванная сетка)
Размер ячеек сетки	ФЭд650 (500 – 750 мкм)
Площадь включений	ФЭп2000 (до 2000 мкм)

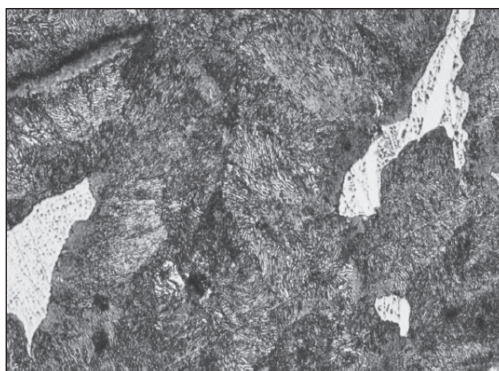


Рис. 3. Строение фосфидной эвтектики, $\times 500$

Результаты определения структуры: структура серого чугуна с равномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 250 – 500 мкм; металлическая основа: перлит пластинчатый в количестве от 98 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 – 0,8 мкм; фосфидная эвтектика тройная игольчатого строения и с пластинками цементита в виде разорванной сетки, диаметр ячеек сетки до 650 мкм:

ПГф1–ПГр1–ПГд350–ПГ6–Пт1–П–Пд0,5–ФЭ4–ФЭр2–ФЭд650–ФЭп2000.

Микроструктура чугуна в исходном состоянии показана на рис. 4.

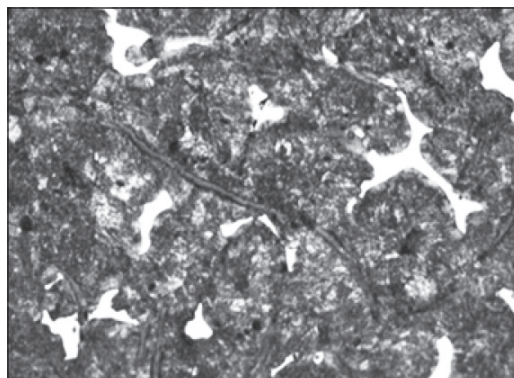


Рис. 4. Микроструктура чугуна в исходном состоянии, $\times 200$

Твёрдость металлической основы сравнительно невысока и составляет 397,3 HV до травления и 310,79 HV после травления. Твёрдость фосфидной эвтектики варьируется от 600 до 822 HV, среднее значение 708 HV.

После лазерной обработки с оплавлением поверхности в структуре металла образуются:

- зона оплавления;
- зона термического влияния (ЗТВ).

Общий вид зоны лазерного воздействия, полученной в режиме оплавления, показан на рис. 5.

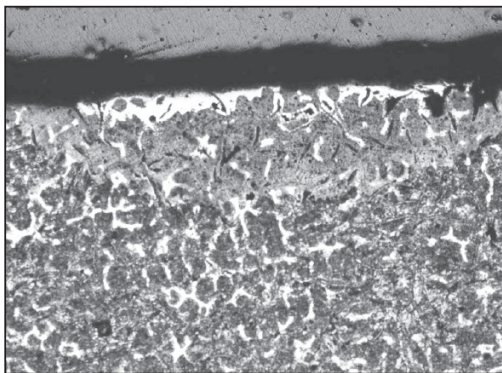


Рис. 5. Общий вид зоны оплавления, $\times 50$

Размеры зоны лазерного воздействия:

общая глубина зоны лазерного воздействия	– 525 мкм;
глубина зоны оплавления	– 75,6 мкм;
глубина ЗТВ	– 450 – 480 мкм;
ширина зоны лазерного воздействия	– 2425 мкм;
ширина зоны оплавления	– 1663 мкм.

Зона оплавления получается при закалке из жидкого состояния.

Структура зоны оплавления состоит из мелких дендритов аустенита, выросших при кристаллизации расплавленного металла и окруженных дисперсным ледебуритом. Главные оси дендритов ориентированы в сторону отвода тепла, т. е. к кромке дорожки оплавления.

Неоднородность зоны оплавления обусловлена кратковременностью лазерного воздействия, не позволяющего получить однородный по составу (прежде всего по углероду) жидкий раствор в расплавленном объеме. Этому способствует и одновременное расплавление участков гетерогенной структуры. Графит обладает большой теплопроводностью, особенно в нагретом состоянии [15], кроме того, графит — практически абсолютно черное тело, что способствует поглощению лазерного излучения. Тепло легко проникает по пластинкам графита и вызывает расплавление металлической основы вокруг пластинок графита (эффект контактного плавления). Расплавление металлической основы эвтектоидного состава запаздывает, а кристаллизация ее начинается раньше. Главным фактором, определяющим конечную структуру этого слоя, является количество растворенного графита за время оплавления [16].

Микротвердость зоны оплавления со структурой *ледебурит + аустенит* — 684 HV-756 HV. В зоне оплавления присутствуют участки со структурой *мартенсит + аустенит остаточный*, их микротвердость 545-585 HV.

Отличительной особенностью строения ЗЛВ чугунов является неровная линия плавления между ЗО и ЗТВ, что обусловлено эффектом контактного плавления. Вследствие разных размеров графитных включений расплавленные объемы в разной степени насыщаются углеродом, что приводит к формированию различных структур после затвердевания:

- ледебурита, микротвердость которого 8400 Н/мм²;
- ледебурита с ячейками аустенита — 6150 ... 7 330 Н/мм²;
- мартенсита — 6000 ... 6500 Н/мм²;
- мартенсита и остаточного аустенита — 5450 ... 5880 Н/мм² (в зоне оплавления).

Микроструктура на границе между зоной оплавления и зоной термического влияния показана на рис. 6.

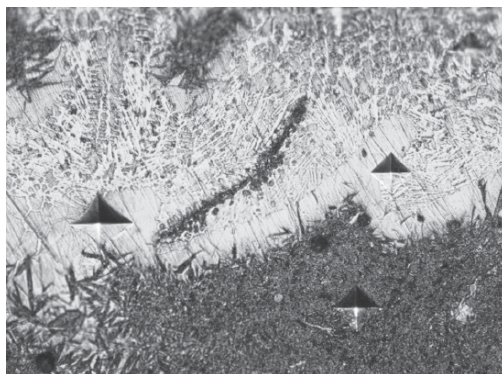


Рис. 6. Микроструктура на границе между ЗО и ЗТВ, $\times 500$

При лазерной обработке поверхности серого чугуна с оплавлением поверхности в зоне термического влияния происходит:

- распад аустенита (металлической основы чугуна);
- превращения перлитографитной составляющей чугуна, связанные с эффектом контактного плавления или только растворения графита в аустените (рис. 7);
- подплавления в местах залегания фосфидной эвтектики (рис. 8).

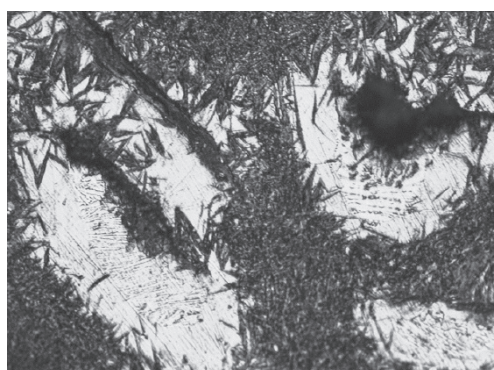
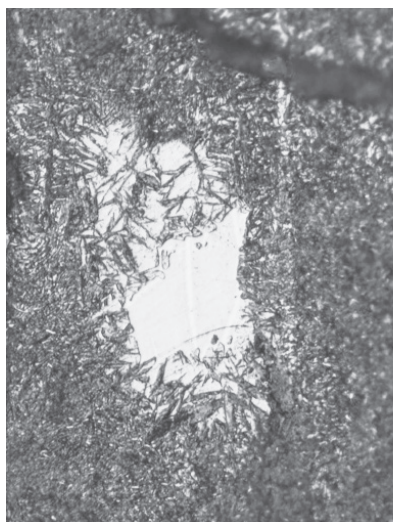


Рис. 7. Подплавление металлической основы около включений графита, $\times 500$, $\times 1,5$

а)



б)

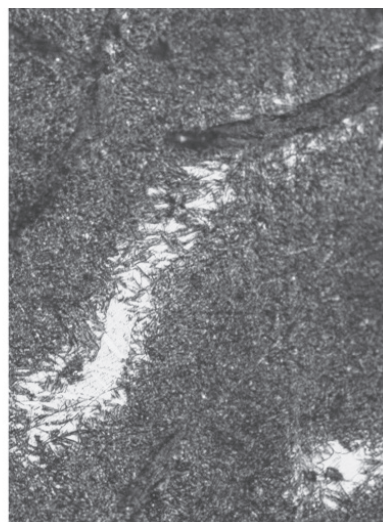


Рис. 8. Подплавление в местах залегания фосфидной эвтектики в ЗТВ:
а — $\times 1000$; б — $\times 500$, $\times 1,5$

Высокая скорость нагрева вызывает значительный перегрев, а высокая скорость охлаждения приводит к разной степени насыщения матрицы углеродом из включений графита. В результате нагрева этой зоны выше критической точки A_{c1} (температур порядка 1147 °С) перлитная основа превращается в аустенит, а потом происходит ее быстрое охлаждение. Степень переохлаждения аустенита определяет механизм и кинетику превращения, а, следовательно, и структуру продуктов превращения [17].

Насыщение расплава из полурасплавленной частицы графита при последующем охлаждении приводит к образованию области со структурой белого чугуна, микротвердость которой находится в интервале 810 ... 1022 HV (рис. 7, 9).



Рис. 9. Микроструктура вокруг включений графита в ЗТВ, $\times 1000$

Светлые области на периферии таких участков образованы в результате диффузии углерода из расплава в металлическую основу чугуна, что приводит к формированию в них структуры мартенсита и остаточного аустенита с невысокой микротвердостью 470-645 HV. По мере удаления от включений графита происходит уменьшение микротвердости за счет уменьшения диффузии углерода в металлическую основу и уменьшения его содержания в кристаллической решетке мартенсита. На участках с температурой, меньшей эвтектической, происходит лишь диффузия углерода из графита в аустенит и образование после охлаждения двухслойных — мартенситной и аустенитной — оторочек, толщина которых уменьшается с увеличением глубины залегания графита вплоть до полного исчезновения [18].

Металлическая основа чугуна в зоне термического влияния темно-серого цвета, она закалена на мартенсит с средней микротвердостью 584 HV.

Микротвердость участков, на которых произошло подплавление ФЭ и произошли структурные превращения, колеблется в пределах 574-1021 HV. На тех участках, где образовался мартенсит + аустенит остаточный, микротвердость — 574-734 HV, а где ледебурит + мартенсит + аустенит остаточный — 901-1021 HV.

В нижней части ЗТВ включения ФЭ (тройная игольчатая) осталась без изменения (в ней не произошло превращений), но микротвердость её колеблется в пределах 950-1042 HV.

Обсуждение основных результатов

По результатам эксперимента были построены математические модели зависимости ожидаемой глубины зоны лазерного воздействия от принятых факторов технологического процесса лазерного упрочнения. В качестве независимых переменных принимались: плотность полезной мощности лазерного излучения (q), скорость перемещения лазерного луча (v). В качестве отклика (зависимой переменной) принималась глубина ЗЛВ, измеренная в двух местах.

Факторы, их уровни и интервалы варьирования, выбранные на основании априорной информации и предварительных экспериментов, приведены в табл. 1. Результаты эксперимента приведены в табл. 2. Обработка результатов эксперимента проводилась для равномерного дублирования опытов.

Таблица 1

Факторы, уровни и интервалы варьирования

Фактор	Кодовое обозначение	Вариант	Уровни факторов			Интервал варьирования
			+1	0	–1	
Плотность полезной мощности q , Вт/мм ²	x_1	1	180	160	140	20
		2	193	173	153	20
Скорость перемещения лазерного луча v , м/с	x_2	1	0,03	0,02	0,01	0,01
		2	0,04	0,03	0,02	0,01

По данным параллельных опытов проводился расчёт построчных дисперсий и проверялась гипотеза однородности дисперсий по критерию Кохрена. Поскольку выполнялось условие $G_{\text{табл}} = 0,6798 > G_{\text{расч}} = 0,415; 0,423$, то ряд дисперсий считался однородным.

Таблица 2

Результаты измерения глубины ЗЛВ

Номер опыта	Матрица планирования		Глубина зоны лазерного воздействия для исследуемых чугунов, мкм			
	x_1	x_2	y_1		y_2	
			Вариант			
			1	2	1	2
1	+	+	0,863	0,825	0,850	0,769
2	–	+	0,613	0,613	0,506	0,506
3	+	–	1,025	0,919	0,944	0,875
4	–	–	0,860	0,816	0,763	0,706

Рассчитывались коэффициенты регрессии и проверялась их статистическая значимость. Статистически значимыми признавались коэффициенты, абсолютная величина которых равна или больше доверительного интервала. В данном случае это линейные коэффициенты b_0 , b_1 , и b_2 . Коэффициенты парного взаимодействия b_{12} статистически незначимы, поэтому из математической модели исключались.

Таким образом, в результате полного факторного эксперимента 2^2 для исследуемого чугуна были получены уравнения регрессии для глубины ЗЛВ в кодированном виде:

$$y_1 = 0,803 + 0,117 x_1 - 0,095 x_2; \quad (1)$$

$$y_2 = 0,754 + 0,093 x_1 - 0,075 x_2. \quad (2)$$

Адекватность моделей проверялась по критерию Фишера. При уровне значимости $\alpha=0,05$ табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл}} = 3,84$. Поскольку $F_{\text{табл}} = 3,84 > F_{\text{расч}} = 2,229; 1,44$, то принималась гипотеза об адекватности моделей. Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа уравнений для глубины ЗЛВ

Расчётные величины	Результаты расчёта	
	1	2
Коэффициенты регрессии:		
b_0	0,803	0,754
b_1	0,117	0,093
b_2	-0,095	-0,075
b_{12}	0	0
Доверительный интервал $\pm \Delta b_i$	0,068	0,069
Критерий Кохрена G :	0,6798	
табличный		
расчётный	0,415	0,423
Дисперсия адекватности $S^2_{ад}$	$7,688 \cdot 10^{-3}$	$5,151 \cdot 10^{-3}$
Дисперсия воспроизводимости эксперимента S^2_y	$8,944 \cdot 10^{-4}$	$8,944 \cdot 10^{-4}$
Критерий Фишера F :	3,84	
табличный		
расчётный	2,229	1,44

Поскольку линейные части полиномов адекватны, следовательно, глубину зоны лазерного воздействия для каждого чугуна с достаточной точностью можно аппроксимировать уравнениями степенного вида. В результате перехода от кодированных значений к натуральным по формулам для случая, когда плотность полезной мощности изменяется от 140 до 180 Вт/мм²:

$$x_1 = \frac{q-160}{20}; \quad x_2 = \frac{v-0,02}{0,01},$$

получили

$$h_1 = 0,057 + 0,00585q - 9,5v,$$

а когда плотность полезной мощности изменяется от 153 до 193 Вт/мм²:

$$x_2 = \frac{q-173}{20}; \quad x_2 = \frac{v-0,03}{0,01},$$

получили

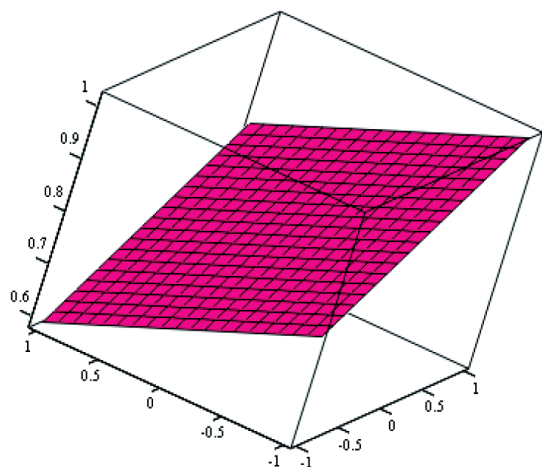
$$h_2 = 0,175 + 0,0047q - 7,5v.$$

Эти формулы позволяют рассчитывать глубину зоны лазерного воздействия для чугунов при различной плотности полезной мощности и скорости перемещения лазерного луча.

Заключительная часть

В результате проведения эксперимента были определены параметры лазерного упрочнения с оплавлением поверхности, выведены формулы для расчёта глубины лазерного воздействия для чугунов в зависимости от плотности полезной мощности и скорости перемещения лазерного луча. Определена максимальная глубина упрочнённой зоны в зависимости от плотности полезной мощности и скорости перемещения лазерного луча, которая приведена на рис. 9 и 10, и достигает 1 мм.

а)



б)

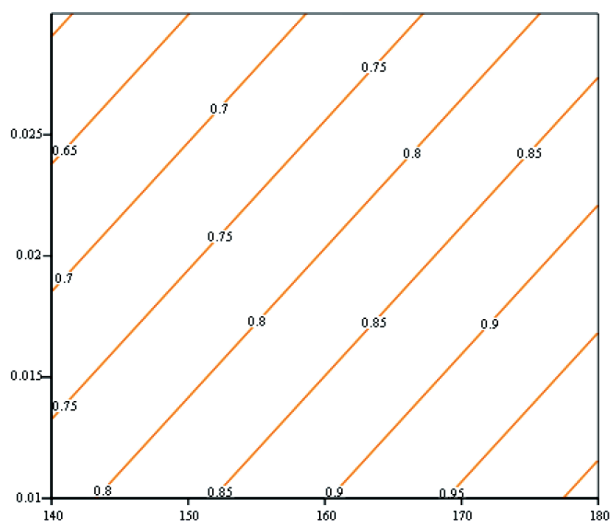
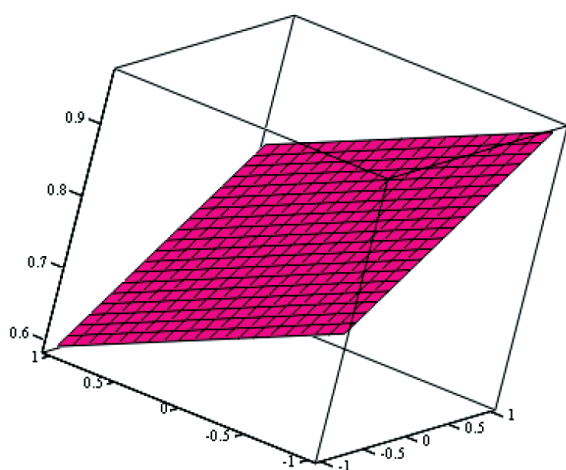


Рис. 10. Геометрическая интерпретация математической модели (1) в кодированной форме (а) и линии одного уровня (б) для этой модели

а)



б)

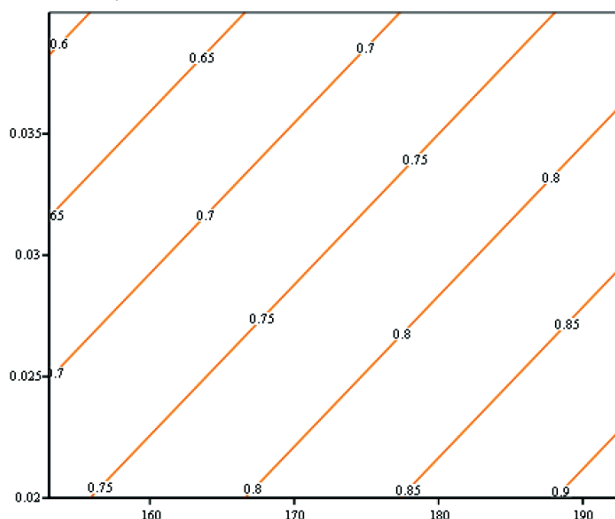


Рис. 10. Геометрическая интерпретация математической модели (2) в кодированной форме (а) и линии одного уровня (б) для этой модели

Выводы

1. Существующие способы восстановления канавок ГП СДВС не обеспечивают достаточную долговечность, а также являются трудоёмкими и нетехнологичными.
2. Наиболее простой в исполнении, и также перспективной технологией восстановления канавок является установление чугунных ПИК, твёрдость рабочей поверхности которых, в свою очередь, влияет на их работоспособность. Следовательно, вследствие особенностей материала ПИК возникает необходимость в их упрочнении.
3. Практически единственной технологией упрочнения рабочей поверхности ПИК без её коробления служит лазерная обработка.
4. Лазерное упрочнение принципиально можно разделить на упрочнение без оплавления поверхности и с оплавлением.
5. Упрочнение рабочей поверхности детали позволяет укрепить её на глубину до 0,3 мм, что на практике является, зачастую, недостаточным.

6. Опытным путём установлено, что лазерное упрочнение с оплавлением рабочей поверхности чугуновой детали характеризуется большей глубиной ЗЛВ (до 1 мм) в сравнении с лазерной обработкой без оплавления поверхности. Также установлены оптимальные параметры глубины лазерного упрочнения с оплавлением в зависимости от плотности мощности и скорости перемещения лазерного луча.

7. Для внедрения лазерного упрочнения рабочей поверхности ПИК требуется дальнейшее совершенствование технологии обработки, целью которой будет являться:

- установление рациональных режимов лазерного упрочнения с оплавлением поверхности, в том числе выявление влияния режимов лазерного упрочнения с оплавлением поверхности на количество остаточного аустенита в микроструктуре металла;
- разработка технологий для повышения твёрдости упрочнённой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кривошеков В. Е.* Восстановление изношенных деталей судовых дизелей. Обзор зарубежного опыта фирмы DMI / В. Е. Кривошеков, В. И. Фадеев. — М.: Транспорт, 1994. — 33 с.
2. *Возницкий И. В.* Двигатели модельного ряда МС 50-98. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание / И. В. Возницкий. — СПб.: Моркнига, 2008. — 260 с.
3. *Слободянюк И. М.* Влияние износа сопряженных деталей ЦПГ на долговечность судовых дизелей после ремонта / И. М. Слободянюк, Н. С. Молодцов, В. Н. Голобородько // Судовые энергетические установки. — 2010. — № 26. — С. 136–144.
4. *Хмелевская В. Б.* Повышение надежности судового оборудования технологическими методами: в 3 т. / В. Б. Хмелевская, Л. Б. Леонтьев. — Владивосток: Дальнаука, 2003.
5. *Апчел В. Н.* Повышение долговечности головок поршней судовых дизелей путем упрочнения плазменной наплавкой при ремонте / В. Н. Апчел, И. М. Слободянюк, Н. С. Молодцов // Судовые энергетические установки. — 2014. — № 34. — С. 175–182.
6. *Щукин Г. С.* Работоспособность деталей цилиндро-поршневой группы двигателей «Бурмейстер и Вайн» 874 VT 2BF-160 т/х типа «Пула» в ДВМП / Отчёт о НИР; ДВВИМУ, рук. Г. С. Щукин. — ХДТ-18/79; № ГР 01840087847; инв. № 0284,0092476. — Владивосток, 1984. — 78 с.
7. Пат. 1734976 Российская федерация. МПК В 23 Р 6/00. Способ восстановления канавок под компрессионные кольца поршней / В. И. Дегтярь, Е. Г. Киперник, Л. А. Морозов, И. М. Слободянюк; заяв. и патентообл. Южный научно-исследовательский проектно-конструкторский институт морского флота. — Заявл. 02.11.1989. Оpubл. 23.05.1992, Бюл. № 19. — 4 с.
8. Пат. 1817512 Российская федерация. МПК 6 F 02 F 3/00, F 16 J 9/00. Поршень двигателя внутреннего сгорания / Г. В. Загинайло, М. С. Дальман, В. И. Лапшин, В. А. Блинов, М. В. Флорианская; заяв. и патентообл. Дальневосточное высшее инженерное морское училище им. адм. Г. И. Невельского. — Оpubл. 10.09.1995, Бюл. № 25. — 4 с.
9. *Возницкий И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания: в 2 т. / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. — М.: Моркнига, 2007. — Т. 1. — 284 с.
10. *Матвеев Ю. И.* Особенности лазерной обработки поршневых колец судовых среднеоборотных дизелей / Ю. И. Матвеев, С. С. Казаков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2010. — № 2. — С. 34–38.
11. Пат. 2008488 Российская Федерация. МПК F 02 F 3/00, F 16 J 9/00. Поршень двигателя внутреннего сгорания / И. О. Мечейко, В. М. Ходаковский; заяв. и патентообл. Дальневосточная государственная морская академия им. адм. Г. И. Невельского. — Заявл. 01.07.91. Оpubл. 28.02.94. — 3 с.
12. *Григорьянц А. Г.* Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. — М.: Высш. шк., 1987. — 191 с.
13. *Матвеев Ю. И.* Формирование структур серого чугуна в зоне лазерного воздействия / Ю. И. Матвеев, С. С. Казаков // Вестник НГИЭИ. — 2011. — Т. 2. — № 1 (2). — С. 41–53.
14. *Ходаковский В. М.* Исследование влияния режима лазерной обработки на глубину и структуру упрочнённой зоны чугуновых деталей судовых ДВС / В. М. Ходаковский, Е. П. Патенкова, И. И. Кулешов // Вестник Морского государственного университета. — 2016. — № 74. — С. 28–36.

15. Свойства конструкционных материалов на основе углерода / под ред. В. П. Соседова. — М.: Металлургия, 1975. — 336 с.
16. Крапошин В. С. Влияние остаточного аустенита на свойства сталей и чугунов после поверхностного оплавления / В. С. Крапошин // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1994. — № 2. — С. 2–5.
17. Арзамасов Б. И. Металловедение / Б. И. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов [и др.] / под ред. Б. И. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1986. — 384 с.
18. Сафонов А. Н. Особенности лазерной закалки поверхности графитизированных сталей и чугунов / А. Н. Сафонов // Вестник машиностроения. — 1999. — № 4. — С. 22–26.

IMPROVING THE OPERABILITY OF THE PISTON'S CROWNS RINGS GROOVES OF LOW SPEED PROPULSION MARINE DIESEL ENGINE

The aim of the article was improving the operability of the pistons crown's rings grooves of low speed propulsion marine diesel engine. Currently exists methods for the restoration of the pistons crown's rings grooves do not provide the necessary durability. The most promising method is the method of the recovery grooves by installing antiwear rings. However, this method needs further improvement because piston's crowns durability recovered by this method does not exceed 16 000 h. In practice, the only method is to harden antiwear rings is a laser hardening. Among the significant disadvantages of the laser hardening without melting of the surface can be attributed the low depth of the laser action zone, which reaches 0,3 mm. In turn, a significant advantage of the laser treatment is the absence of any warpage due to the small quantity depth of thermal influence.

A promising method of hardening the working surface of antiwear rings is a laser hardening method with melting because, by using this method, may significantly increase the depth of the hardened layer.

The influence of laser hardening with melting surface of the cast-iron antiwear ring of the laser treated area, as there is currently no detailed studies of patterns of change and the depth of laser action zone structure depending on changes in the laser treatment parameters.

As a result experimental investigation it found that laser hardening with melting the surface the depth of influence zone up to 1 mm, which is considerably more than the laser hardening without melting the surface. The formulas for calculating the depth of the laser effects for cast irons, depending on the density of useful power and speed of laser beam

Keywords: improving the operability of the piston's crowns, ring groove, antiwear ring, laser hardening with melting, laser hardening of cast iron parts.

REFERENCES

1. Krivoshhekov, V. E., and V. I. Fadeev. *Vosstanovlenie iznoshennykh detalej sudovykh dizelej. Obzor zarubezhnogo opyta firmy DMI*. M.: Transport, 1994.
2. Voznickij, I. V. *Dvigateli modelnogo rjada MC 50-98. Konstrukcija, jekspluatacija i tehničeskoe obsluzhivanie*. SPb.: Morkniga, 2008.
3. Slobodjanjuk, I. M., N. S. Molodcov, and V. N. Goloborodko. "Vlijanie iznosa soprjazhennykh detalej CPG na dolgovečnost sudovykh dizelej posle remonta." *Sudovye jenergetičeskie ustanovki* 26 (2010): 136–144.
4. Hmelevskaja, V. B., and L. B. Leontev. *Povyšenie nadežhnosti sudovogo oborudovanija tehnologičeskimi metodami: v 3 t.* Vladivostok: Dalnauka, 2003.
5. Apchel, V. N., I. M. Slobodjanjuk, and N. S. Molodcov. "Povyšenie dolgovečnosti golovok porshnej sudovykh dizelej putem upročnenija plazmennoj naplavkoj pri remonte." *Sudovye jenergetičeskie ustanovki* 34 (2014): 175–182.
6. Shhukin, G. S. *Rabotosposobnost detalej cilindro-porshnevoj grupy dvigatelej «Bur-mejster i Vajn» 874 VT 2BF-160 t/h tipa «Pula» v DVMP*. Research report. Vladivostok, 1984.
7. Degtjar, V. I., E. G. Kipernik, L. A. Morozov, and I. M. Slobodjanjuk. RU 1734976 U1, IPC B 23 P 6/00. *Sposob vosstanovlenija kanavok pod kompressionnye kolca porshnej*. Russian Federation, assignee. Publ. 23 May 1992.
8. Zaginajlo, G. V., M. S. Dalman, V. I. Lapshin, V. A. Blinov, and M. V. Florianskaja. RU 1817512 U1, IPC 6 F 02 F 3/00, F 16 J 9/00. *Porshen dvigatelja vnutrennego sgoranija*. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Sept. 1995.

9. Voznickij, I. V., and A. S. Punda. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya*. M: Morkniga, 2007. Vol. 1.
10. Matveev, Yury Ivanovich, and Sergey Sergeevich Kazakov. "Features of laser processing of piston rings of ship medium-reverse diesel." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2010): 34–38.
11. Mechejko, I. O., and V. M. Hodakovskij. RU 2008488 U1, IPC F 02 F 3/00, F 16 J 9/00. Porshen dvigatelja vnutrennego sgoraniya. Russian Federation, assignee. Publ. 28 Feb. 1994.
12. Grigorjanc, A. G., and A. N. Safonov. *Metody poverhnostnoj lazernoj obrabotki*. M.: Vyssh. shk., 1987.
13. Matveev, Y. I., and S. S. Kazakov. "Formation of structures of grey pig-iron in the zone of laser influence." *Bulletin NGII* 2.1(2) (2011): 41–53.
14. Hodakovskij, V. M., E. P. Patenkova, and I. I. Kuleshov. "Issledovanie vlijaniya rezhima lazernoj obrabotki na glubinu i strukturu uprochnjonnoj zony chugunnyh detalej sudovyh DVS." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 74 (2016): 28–36.
15. Sosedov, V. P., editor. *Svojstva konstrukcionnyh materialov na osnove ugleroda*. M.: Metallurgija, 1975.
16. Kraposhin, V. S. "Effect of retained austenite on the properties of steels and irons after surface melting." *Metal Science and Heat Treatment* 2 (1994): 2–5.
17. Arzamasov, B. I., I. I. Sidorin, G. F. Kosolapov, et al. *Materialovedenie*. Edited by B. I. Arzamasov. M.: Mashinostroenie, 1986.
18. Safonov, A. N. "Osobennosti lazernoj zakalki poverhnosti grafitizirovannyh stalej i chugunov." *Russian Engineering Research* 4 (1999): 22–26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кулешов Игорь Игоревич — аспирант.
Научный руководитель:
Ходаковский Владимир Михайлович.
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
igor-igorevich.2011@bk.ru
Владимир Михайлович Ходаковский —
кандидат технических наук, доцент.
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
Khodakovskiy@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuleshov Igor Igorevich — postgraduate.
Supervisor:
Khodakovsky Vladimir Mikhailovich.
Maritime State University named after G. I. Nevelskoy
igor-igorevich.2011@bk.ru
Khodakovsky Vladimir Mikhailovich —
PhD, associate professor.
Maritime State University named after G. I. Nevelskoy
Khodakovskiy@msun.ru

Статья поступила в редакцию 25 октября 2016 г.