

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК ТЯЖЕЛЫХ ДИЗЕЛЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Алисин В.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва

Ключевые слова: тяжелые дизели, цилиндро-поршневая группа, лазерная упрочняющая обработка, трибологические испытания, износостойкость, приработка поверхности.

Аннотация. Работа посвящена изучению износостойкости материалов в сопряжении цилиндрическая втулка – поршневое кольцо в тяжелых дизелях. Разработана лабораторная машина трения, моделирующая работу сопряжения гильзы и поршневого кольца с учетом влияния температурного фактора. Образцы для проведения испытаний вырезались из натуральных цилиндрических втулок и поршневых колец. Измерение износа образцов осуществлялось весовым способом. Исследовалось влияние лазерной обработки поверхностей трения цилиндрической втулки на износ сопряжения гильзы и поршневого кольца. Установлено, что лазерная обработка поверхностей трения цилиндрических втулок увеличивает износостойкость в 1,5 раза, однако отмечается увеличение износа поршневых колец. Предлагается при освоении технологии лазерного упрочнения цилиндрических втулок тяжелых дизелей провести мероприятия по повышению износостойкости поршневых колец.

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF CYLINDER BUSHINGS OF HEAVY DIESEL ENGINES BY LASER TREATMENT

Alisin V. V.

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Keywords: heavy diesel engines, cylinder-piston group, laser hardening treatment, tribological tests, wear resistance, surface run-in.

Abstract. The work is devoted to the study of the wear resistance of materials in the coupling of a cylinder sleeve-piston ring in heavy diesel engines. A laboratory friction machine has been developed that simulates the coupling of the sleeve and the piston ring, taking into account the influence of the temperature factor. Samples for testing were cut from full-scale cylinder bushings and piston rings. The wear of the samples was measured by weight. The effect of laser treatment of the friction surfaces of the cylinder sleeve on the wear of the coupling of the sleeve and the piston ring was investigated. It has been found that laser treatment of the friction surfaces of cylinder bushings increases wear resistance by 1.5 times, however, there is an increase in wear of piston rings. When mastering the technology of laser hardening of cylinder bushings of heavy diesel engines, it is proposed to take measures to increase the wear resistance of piston rings.

Введение. Трение в сопряжении цилиндр-поршневое кольцо в значительной степени влияет на эффективность и стабильность двигателя. Эффективность улучшения трибологических характеристик и снижение расхода топлива в низкооборотных судовых дизельных двигателях проводятся на основе лабораторных трибологических испытаний. К числу основных факторов определяющих эффективность и долговечность дизеля относится [1] износостойкость цилиндро-поршневой группы. Изучению трибологических свойств сопряжения цилиндр-поршневое кольцо уделяется много внимания. В работе [2] рассмотрены проблемы с отказами компонентов гильзы цилиндра-поршневого кольца, которые работают в суровых условиях высокой температуры, высокого давления. В этом исследовании рассматривались проблемы отказов, вызванных износом, путем анализа методов оперативного состояния и методологии своевременного технического обслуживания судовых дизельных двигателей. В работе [3] предложена модель диагностики неисправностей износа на основе машинного обучения. Предложенный метод диагностики позволяет определять неисправности и быстро принимать меры, чтобы избежать серьезных аварий. В работе [4] изучены характеристики пар трения гильза цилиндра-поршневое кольцо с различной текстурой поверхности, которая влияет на срок службы, надежность и

экономичность дизельных двигателей. Были получены данные о потере массы поршневого кольца при износе, морфологии изношенной поверхности и глубине износа гильзы цилиндра. Оптимизация топографии поверхности оказывает большое влияние на общие характеристики двигателей. Был разработан [5] процесс многомерного лазерного текстурирования поверхности, который позволяет создавать управляемые массивы микро-углублений на поверхности цилиндра. Гильзы цилиндров с различными схемами текстурирования поверхности прошли стендовые испытания на одноцилиндровом дизельном двигателе, которые подтвердили эффективность предложенной упрочняющей обработки. Известны работы по применению лазерной закалки для повышения износостойкости чугуна. В работе [6] изучались фазовые превращения и износостойкость закаленных лазером образцов из серого чугуна с аустенитной закалкой. Испытания на износ проведены на лабораторной машине трения возвратно-поступательного движения. Изношенные поверхности были подвергнуты анализу для установления механизмов износа. В статье [7] обсуждается формирование ориентированных многослойных покрытий деталей судовых дизельных двигателей. Формирование покрытия связано с обеспечением требуемого ресурса для морских дизелей и их элементов. Установлены критерии предельного состояния, которые позволяют решить проблему обеспечения равного заданного срока службы. Были проведены [8] стендовые испытания двигателя с динамометрическим датчиком, чтобы оценить серьезность работы двигателя и дать рекомендации по защите двигателя от износа. На трибологические характеристики сопряжений цилиндр-поршневое кольцо влияют применяемые масла и топлива, рациональный подбор которых занимает [9-11] важное место. Системные исследования по повышению ресурса работы тяжелых тепловозных дизелей путем повышения износостойкости цилиндрических втулок лазерной обработкой выполнены в работах [12-13]. В работе [12] отмечается, что оптимизация надежности дизельных двигателей оказывает огромное влияние на эксплуатационную готовность судна, безопасность и затраты на жизненный цикл. Описывается разработка 4-тактного высокоскоростного симулятора отказа судового дизельного двигателя, используемого на гражданских судах в качестве основного двигателя крупных судов. Анализ состояния проблемы оценки трибологических характеристик в сопряжении цилиндр-поршень показал, что требуемые параметры для оценки надежности дизеля получают в основном косвенными методами. Проведение лабораторных модельных экспериментов крайне мало.

Цель работы состоит в определении влияния лазерной обработки на эффективность повышения износостойкости поверхностей в сопряжении цилиндрическая втулка-поршневое кольцо в условиях приближенных к работе тяжелых дизелей.

Материалы и методы исследований.

Объектом исследования была цилиндрическая втулка дизеля с внутренним диаметром 240 мм и поршневые кольца, выполненные из серого перлитного чугуна АХНММ. Образцы изготавливались соответственно вырезанием из гильзы цилиндра и компрессионного кольца (рис. 1.)

Лазерная обработка выполнялась на CW-лазере мощностью непрерывного излучения 2 кВт.

Трибологические эксперименты выполнены на специально созданном стенде с возвратно-поступательным движением образцов. Машина трения, моделирующая работу сопряжения цилиндр-поршневое кольцо с учетом температурного фактора, предназначена для проведения сравнительных испытаний на износ пары "гильза цилиндра -компрессионное кольцо". С этой целью в установке осуществляется возвратно-поступательное движение образцов с задаваемыми параметрами условий трения, т.е. давления поршневого кольца на цилиндрическую втулку, температуры трущихся поверхностей, количества подаваемого масла.

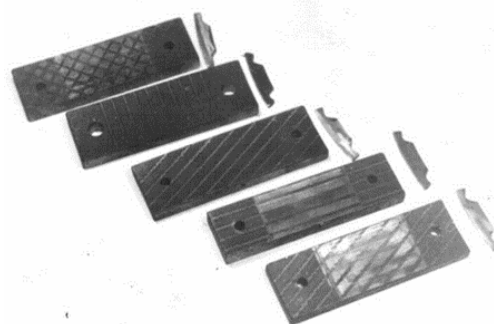


Рис. 1. Общий вид образцов «гильза»

Выбором указанных параметров моделируются условия, приближенные к реально работающему дизелю. На рисунке 2 представлена схема установки.

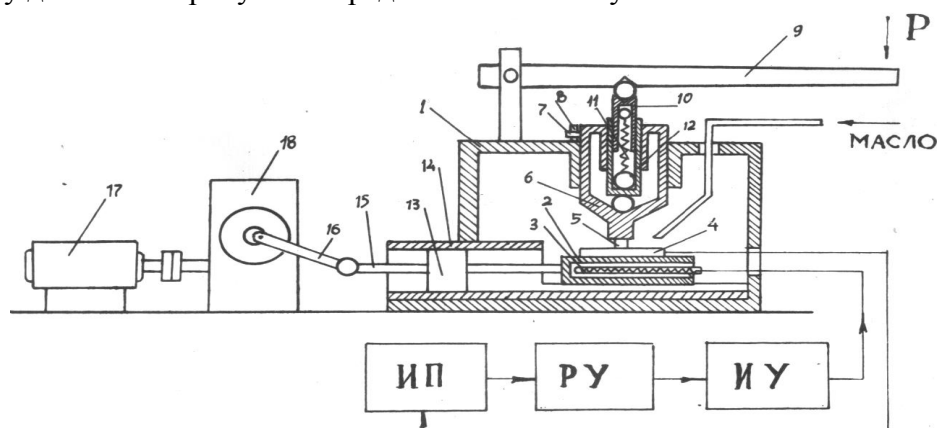


Рис. 2. Схема машины трения

Основными узлами установки являются: узел трения, привод, измерительно-регулирующая система (по температуре). Узел трения состоит из корпуса 1, нагружающего устройства рычажного типа, салазок 2 с печкой 3, а также деталей, обеспечивающих подачу масла в зону контакта. Испытываемый образец "гильза" 4 укрепляется на салазках. Образец "кольцо" 5 зажимается в нижней части стакана 6 нагружающего устройства. В корпусе стакана имеется штифт 7, предотвращающий поворачивание стакана вокруг вертикальной оси и позволяющий, благодаря направляющим 8 в корпусе, перемещаться стакану лишь вдоль оси. Усилие рычага 9 передается через стальной шарик на верхнюю втулку, затем через пружину 11 на нижнюю втулку 12 и через шарик на корпус стакана и образец "кольцо". Наличие шарнирных соединений во всех точках контакта обеспечивает неискаженную передачу нагружающего усилия. Машина трения (рис. 2) приводится в действие от электродвигателя 17 через червячный редуктор 18 и шатун 16, соединяющий редуктор со штоком 15 узла трения. Направляющей для штока и салазок служит отрезок трубы 14. Шток соединен с салазками карданом 13. Это позволяет салазкам под действием нагрузки автоматически выбирать наиболее выгодный крен для обеспечения правильного прилегания трущихся поверхностей испытываемой пары, даже при нарушении соосности образцов. Внутри салазок под поверхностью, на которой крепится "гильза" имеется электрическая печь 3. Задаваемый температурный режим трения поддерживается автоматически. Сигнал с термопары, установленной в отверстии под поверхностью трения "гильзы" подается в измерительный прибор (ИП) с регулирующим устройством (РУ), которое через исполнительное устройство (ИУ) управляет работой печи.

Результаты. Для лазерной обработки образцы "Гильза" были вырезаны из цилиндрической втулки тепловозного дизеля. Внутренняя поверхность втулки фосфатирована, поэтому лазерная обработка образцов проводилась без нанесения технологического покрытия. Перед обработкой образцы промывались бензином и высушивались. Поверхность трения для повышения износостойкости упрочнялась нанесением дорожек лазерной закалки. Расчетный оптимальный режим лазерной закалки для глубины 0,3 мм имеет место при обработке пятном диаметром 2,2 мм со скоростью $v=4,26$ м/мин. При меньших значениях параметров d и v поверхность сильно оплавляется, а при больших значениях d и v снижается эффективность упрочнения для повышения износостойкости поверхностей. Для уменьшения влияния шероховатости на фрикционные свойства рабочих поверхностей образцы прирабатывались при трении без смазки не менее 5 часов, а при граничной смазке не менее 40 часов. В течение приработки линейный износ поверхности достигал половины исходной шероховатости, что обеспечивало удаление наиболее высоких выступов и выглаживало в целом поверхность трения. По завершении приработки образцов до и после испытаний производились замеры веса "гильзы" и высоты стакана в сборе с "кольцом" (табл. 1). Износ образца «поршневое

кольцо» определялся по уменьшению линейного размера. Сравнение износостойкости образцов проводили по параметру I/p ($\text{см}^2/\text{кгс}$), где I – линейная интенсивность изнашивания (ГОСТ 27674-88).

На основании проведенных испытаний можно утверждать, что лазерная закалка цилиндрических втулок эффективна для увеличения износостойкости, но снижает износостойкость поршневых колец. В тяжелых дизелях, особенно крупных судовых, заменить цилиндрическую втулку очень сложно и, как правило, ремонт выполняется в заводских условиях. Замена поршневого кольца возможна при проведении текущего ремонта.

Табл. 1. Результаты трибологических испытаний

Состояние поверхности трения	P , кг/см ²	T , час	Приведенная величина износа I/p , см ² /кгс	
			гильза	поршневое кольцо
Без лазерной обработки	66,7	1	$3,78 \cdot 10^{-9}$	$2,73 \cdot 10^{-9}$
	66,7	1	$7,84 \cdot 10^{-9}$	$1,24 \cdot 10^{-9}$
	66,7	3	$7,18 \cdot 10^{-9}$	$2,23 \cdot 10^{-9}$
Упрочненная лазером	70,1	1	$1,19 \cdot 10^{-10}$	$2,03 \cdot 10^{-9}$
	70,1	1	$2,04 \cdot 10^{-10}$	$2,13 \cdot 10^{-9}$
	70,1	3	$1,13 \cdot 10^{-9}$	$1,65 \cdot 10^{-9}$
	70,1	5	$1,38 \cdot 10^{-9}$	$2,92 \cdot 10^{-9}$

Выводы. Выполнены исследования фрикционных свойств поверхностей серого чугуна обработанного лазерным излучением непрерывного действия. Установлено, что лазерная обработка эффективно влияет на повышение износостойкости поверхностей трения цилиндрических втулок тяжелых дизелей. По результатам ускоренных лабораторных испытаний на износ образцов, и экспериментально-расчетной оценке влияния лазерной обработки втулок на ресурс работы сопряжения цилиндрическая втулка поршневое кольцо ожидается увеличение износостойкости втулок не менее, чем в 1,5 раза. Для массового освоения технологии лазерного упрочнения цилиндрических втулок необходимы мероприятия по повышению износостойкости поршневых колец.

Список литературы

1. Rui Li, Chengwei Wen, Xianghui Meng, Youbai Xie. Measurement of the friction force of sliding friction pairs in low-speed marine diesel engines and comparison with numerical simulation // Applied Ocean Research. 2022, vol. 121, p. 103089.
2. Xiang Rao, Chenxing Sheng, Zhiwei Guo, Chengqing Yuan. Review of online condition monitoring and maintenance strategy for cylinder liner-piston rings of diesel engines // Mechanical Systems and Signal Processing. 2022, vol. 165, pp. 108385.
3. Xiaojian Xu, Zhuangzhuang Zhao, Xiaobin Xu, Jianbo Yang, Leilei Chang, Xinpeng Yan, Guodong Wang. Machine learning-based wear fault diagnosis for marine diesel engine by fusing multiple data-driven models // Knowledge-Based Systems. 2020, vol. 190, p. 105324.
4. Xiang Rao, Chenxing Sheng, Zhiwei Guo, Xuecheng Zhang, Huabing Yin, Chang Xu, Chengqing Yuan. Effects of textured cylinder liner piston ring on performances of diesel engine under hot engine tests // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021, vol. 146, p. 111193.
5. Zhengyang Kang, Yonghong Fu, Dashuang Zhou, Qiqi Wu, Tianyang Chen, Yuyang He, Xiaoping Su. Reducing engine oil and fuel consumptions by multidimensional laser surface texturing on cylinder surface // Journal of Manufacturing Processes. 2021, vol. 64, pp. 684-693.
6. Bingxu Wang, Yuming Pan, Yu Liu, Gary C. Barber, Feng Qiu, Ming Hu. Wear behavior of composite strengthened gray cast iron by austempering and laser hardening treatment // Journal of Materials Research and Technology. 2020, vol. 9, iss. 2, pp. 2037-2043.
7. Kostenko A.V., Mikhaylov A.N., Lukichov A.V. Technological features of formation of functionally oriented coatings of marine diesel engine parts // Materials Today: Proceedings. 2021, vol. 38, part 4, pp. 1789-1793.
8. Sujay Bagi, Carl Justin Kamp, Vibhu Sharma, Pranesh B. Aswath. Multiscale characterization of exhaust and crankcase soot extracted from heavy-duty diesel engine and implications for DPF ash // Fuel. 2020, vol. 282, p. 118878.

9. Sonu Kumar Patidar, Hifjur Raheman. Performance and durability analysis of a single-cylinder direct injection diesel engine operated with water emulsified biodiesel-diesel fuel blend // *Fuel*. 2020, vol. 273, p. 117779.
10. Jai Gopal Gupta, Avinash Kumar Agarwal. Engine durability and lubricating oil tribology study of a biodiesel fuelled common rail direct injection medium-duty transportation diesel engine // *Wea*. 2021, vol. 486-487, p. 204104.
11. Sharma A., Murugan S. Durability analysis of a single cylinder DI diesel engine operating with a non-petroleum fuel // *Fuel*. 2017, vol. 191, pp. 393-402.
12. Асташкевич Б.М., Воинов С.С., Шур Е.А. Лазерное упрочнение втулок цилиндров тепловозных дизелей 10Д100 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1985. – №4. – С. 48-50.
13. Асташкевич Б.М. Прочность и износостойкость чугуна для втулок цилиндров двигателей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1987. – №7. – С. 31-34.
14. Jose Antonio Pagán Rubio, Francisco Vera-García, Jose Hernandez Grau, Jose Muñoz Cámara, Daniel Albaladejo Hernandez. Marine diesel engine failure simulator based on thermodynamic model // *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 144, pp. 982-995.

References

1. Rui Li, Chengwei Wen, Xianghui Meng, Youbai Xie. Measurement of the friction force of sliding friction pairs in low-speed marine diesel engines and comparison with numerical simulation // *Applied Ocean Research*. 2022, vol. 121, p. 103089.
2. Xiang Rao, Chenxing Sheng, Zhiwei Guo, Chengqing Yuan. Review of online condition monitoring and maintenance strategy for cylinder liner-piston rings of diesel engines // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022, vol. 165, pp. 108385.
3. Xiaojian Xu, Zhuangzhuang Zhao, Xiaobin Xu, Jianbo Yang, Leilei Chang, Xiping Yan, Guodong Wang. Machine learning-based wear fault diagnosis for marine diesel engine by fusing multiple data-driven models // *Knowledge-Based Systems*. 2020, vol. 190, p. 105324.
4. Xiang Rao, Chenxing Sheng, Zhiwei Guo, Xuecheng Zhang, Huabing Yin, Chang Xu, Chengqing Yuan. Effects of textured cylinder liner piston ring on performances of diesel engine under hot engine tests // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, vol. 146, p. 111193.
5. Zhengyang Kang, Yonghong Fu, Dashuang Zhou, Qiqi Wu, Tianyang Chen, Yuyang He, Xiaoping Su. Reducing engine oil and fuel consumptions by multidimensional laser surface texturing on cylinder surface // *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, vol. 64, pp. 684-693.
6. Bingxu Wang, Yuming Pan, Yu Liu, Gary C. Barber, Feng Qiu, Ming Hu. Wear behavior of composite strengthened gray cast iron by austempering and laser hardening treatment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9, iss. 2, pp. 2037-2043.
7. Kostenko A.V., Mikhaylov A.N., Lukichov A.V. Technological features of formation of functionally oriented coatings of marine diesel engine parts // *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, part 4, pp. 1789-1793.
8. Sujay Bagi, Carl Justin Kamp, Vibhu Sharma, Pranesh B. Aswath. Multiscale characterization of exhaust and crankcase soot extracted from heavy-duty diesel engine and implications for DPF ash // *Fuel*. 2020, vol. 282, p. 118878.
9. Sonu Kumar Patidar, Hifjur Raheman. Performance and durability analysis of a single-cylinder direct injection diesel engine operated with water emulsified biodiesel-diesel fuel blend // *Fuel*. 2020, vol. 273, p. 117779.
10. Jai Gopal Gupta, Avinash Kumar Agarwal. Engine durability and lubricating oil tribology study of a biodiesel fuelled common rail direct injection medium-duty transportation diesel engine // *Wea*. 2021, vol. 486-487, p. 204104.
11. Sharma A., Murugan S. Durability analysis of a single cylinder DI diesel engine operating with a non-petroleum fuel // *Fuel*. 2017, vol. 191, pp. 393-402.
12. Astashkevich B.M., Warriors S.S., Shur E.A. Laser hardening of cylinder bushings of diesel locomotives 10D100 // *Metallography and heat treatment of metals*. 1985, no. 4, pp. 48-50.
13. Astashkevich B.M. Strength and wear resistance of cast iron for engine cylinder bushings // *Metallography and heat treatment of metals*. 1987, no. 7, pp. 31-34.
14. Jose Antonio Pagán Rubio, Francisco Vera-García, Jose Hernandez Grau, Jose Muñoz Cámara, Daniel Albaladejo Hernandez. Marine diesel engine failure simulator based on thermodynamic model // *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 144, pp. 982-995.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Алисин Валерий Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	Alisin Valery Vasil'evich – candidate of technical sciences, leading researcher
vva-imash@yandex.ru	

Получена 26.09.2022