

4. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / под общ. ред. И.В. Суминова. В 2-х т. Т. 1. М.: Техносфера, 2011. 464 с.

5. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2011. № 3. С. 11–17.

6. **Технологические процессы** поверхностного пластического деформирования / А.В. Киричек, В.Ю. Blumenштейн, С.А.Зайдес, Х.М. Рахимьянов и др.; под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: 2007. 404 с.

7. **Иванцовский В.В., Рахимьянов Х.М.** Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и финишной механической обработки // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2005. № 6. С.43–46.

8. **Рахимьянов Х.М., Исакова Г.А.** Поверхностное упрочнение с использованием низкотемпературной плазмы и ультразвука // *Электронная обработка материалов*. 1990. № 5. С. 9–12.

9. **Высокоэнергетические** процессы обработки материалов / Солоненко О.П., Алхимов А.П., Марусин В.В., Рахимьянов Х.М. и др.; отв. ред. М.Ф. Жуков, В.М. Фомин. Новосибирск: 2000. Т.18. Низкотемпературная плазма, 425 с.

REFERENCES

1. Grigoriyants A.G., Shiganov I.N., Miryusov A.I. *Technological Processes of Laser Working* / under the editorship of A.G. Grigoriyants M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2008. pp. 664.

2. Iskhakova G.A., Rakhimyanov Kh.M. Investigation of microstructure and stress-strain properties of a steel 45 surface layer after plasma thermo-strengthening // *Material Electron Processing*. 1987. № 5. pp. 24–27.

3. Rakhimyanov Kh.M., Yeryomina A.S. Low-carbon steel case-hardening at heating in electrolytes // *Strengthening Technologies and Coverings*. 2006. № 3. pp. 9–13.

4. Suminov I.V., Belkin P.N., Epelfeld A.V. and others. *Plasma-Electrolyte Modification of Metal and Alloy Surfaces* / under the general editorship of I.V. Suminov. In 2 Vol., Vol. 1. M.: Technosphere, 2011. pp. 464.

5. Rakhimyanov Kh.M., Semyonova Yu.S. Prediction of geometrical state of cylinder part surfaces made of steel 45 at ultrasonic surface plastic deformation // *Metal Machining (Techniques, Equipment, Tools)*. 2011. № 3. pp. 11–17.

6. *Technological Processes of Surface Plastic Deformation* / A.V. Kirichek, V.Yu. Blumenstein, S.A.Zaides, Kh.M. Rakhimyanov and others; under the editorship of S.A. Zaides. Irkutsk: 2007. pp.404.

7. Ivantsivsky V.V., Rakhimyanov Kh.M. Quality technological support of machine parts surface layer at integration of surface thermal and finish machining // *Strengthening Technologies and Coverings*. 2005. № 6. pp.43–46.

8. Rakhimyanov Kh.M., Iskhakova G.A. Surface strengthening with use of low-temperature plasma and ultrasound // *Material Electronic Processing*. 1990. № 5. pp. 9–12.

9. High-energy processes of material processing / Solonenko O.P., Alkhimov A.P., Marusin V.V., Rakhimyanov Kh.M. and others.; executive editor. M.F. Zhukov, V.M. Fomin. Novosibirsk: 2000. Vol.18. *Low-temperature Plasma*, pp. 425.

Рецензент д.т.н. С.В. Давыдов

УДК 621.9.015-621.432
DOI: 10.12737/20133

А.Ф. Дорохов, д.т.н.
(ФГБОУ ВПО Астраханский государственный технический университет),
А.Г. Проватар, начальник судоводительского отделения факультета
(Каспийский институт морского и речного транспорта – филиал ФГБОУ ВПО «ВГАВТ»),
Ю.И. Матвеев, д.т.н.
(Волжский государственный университет водного транспорта)
E-mail: dorokhovaf@rambler.ru

Повышение качества поверхностного слоя зеркала рабочего цилиндра поршневых ДВС

Рассмотрена задача создания в поверхностном слое зеркала рабочего цилиндра структуры, обеспечивающей противозносные и антифрикционные свойства.

Ключевые слова: фуллерены; диффузия; безабразивное хонингование; шаржирование; коэффициент диффузии; зеркало цилиндра.

A.F. Dorokhov, D.Eng.
(FSBEI HVE Astrakhan State Technical University),
A.G. Provatar, Head of Navigation Dep. of the Faculty
(Caspian Institute of Sea and river Transport – Branch of FSBEI HVE “VSAWT”),
Yu.I. Matveyev, D.Eng.
Volga State Water Transport University)
E-mail: dorokhovaf@rambler.ru

Quality increase in surface layer of working cylinder face of reciprocating internal combustion engines (ICE)

The purpose of this investigation is the problem consideration in the creation in a surface layer of the working cylinder face a structure ensuring antiwear and anti-friction properties. The discovery of new carbon forms – fullerenes and the study of their properties gave a direction in the development of micro-mechanics of friction and wear on the basis of the formation new surface layer properties in friction pairs by means of the saturation its crystal structure with convex polyhedral molecules of fullerenes, mainly C₆₀ and C₇₀. In such cases the most acceptable coating techniques will be, for example, technologies of cylinder nonabrasive honing (charging) for internal combustion engines (ICE). A significant and new feature in this direction is aimed in this case to introduce fullerenes by means of their diffusion into a lattice of a surface layer in a part subjected to friction and wear.

Keywords: fullerenes; diffusion; nonabrasive honing; charging; diffusion constant; cylinder face.

Поршневые двигатели внутреннего сгорания, особенно дизельные, являются основой приводов движителей большинства наземных и водных транспортных средств, которым нет альтернативы в обозримой перспективе. Важным аспектом улучшения эксплуатационных показателей поршневых ДВС является повышение износостойкости зеркала рабочего цилиндра и уменьшение потерь мощности на преодоление сил трения в цилиндропоршневой группе (ЦПГ). В этом направлении выполнены многочисленные исследования, результаты которых изложены в работах [1 – 3].

Однако большая часть этих исследований была посвящена повышению твёрдости поверхностного слоя зеркала рабочего цилиндра за счёт термической, химико-термической обработки, поверхностного пластического деформирования, при этом уменьшение потерь мощности на преодоление сил трения в ЦПГ достигалось за счёт применения лакирующих присадок к моторным маслам.

Другое направление – создание различных типов регулярных микрорельефов на зеркале цилиндра, обеспечивающих повышение маслёмкости поверхности или механическое нанесение на зеркало цилиндра различного рода антифрикционных приработочных покрытий многокомпонентного состава. При этом вопрос о создании в поверхностном слое условий, одновременно способствующих повышению твёрдости (а следовательно, износостойкости) и антифрикционных свойств, не ставился.

Целью настоящего исследования является

рассмотрение задачи создания в поверхностном слое зеркала рабочего цилиндра структуры, обеспечивающей противоизносные и антифрикционные свойства.

Открытие новых форм углерода – фуллеренов и изучение их свойств дало направление развитию микромеханики трения и износа на основе формирования новых качеств поверхностного слоя в парах трения путём насыщения его кристаллической структуры выпуклыми многогранными молекулами фуллеренов, преимущественно C₆₀ и C₇₀, которые в их твёрдом состоянии получили название фуллериты. Уже первые эксперименты из исследования механических свойств фуллерита подтвердили надежды исследователей на создание высокоэффективного твердого смазывания на основе фуллеренов. Согласно работам [4 – 6], поверхность твердых материалов, покрытых фуллереновой пленкой, имеет аномально низкий коэффициент трения, повышенную долговечность и износостойкость. Если технология производства такого покрытия будет реализована, износостойкость деталей повысится в 1,5 – 2,5 раза, расходы топлива сократятся на 2...7 % и мощность ДВС возрастет на 2... 4 %.

Наиболее распространёнными способами внедрения фуллеренов в поверхностный слой пар трения является нанесение, напыление, наплавка. Технологии напыления и наплавки достаточно хорошо отработаны и апробированы в производстве, но они наиболее применимы для формирования слоя со специальными свойствами для наружных поверхностей [3].

Но эти же технологии трудноприменимы для их реализации на внутренних поверхностях, например для зеркала цилиндра ДВС с диаметром менее 200 мм. В таких случаях наиболее приемлемыми будут технологии нанесения, например – посредством безабразивного хонингования (шаржирования) цилиндров ДВС [7, 8].

Важным и новым в этом направлении является то, что в данном случае преследуется цель внедрения фуллеренов посредством их диффузии в кристаллическую решётку поверхностного слоя детали, подвергающейся трению и изнашиванию, а не нанесения плёнки за счёт адгезии.

Диффузия, как физическое явление, имеет несколько форм, которые достаточно полно описаны в научной литературе. В рассматриваемом случае необходимо диффундировать молекулы фуллерена из состава безабразивных хонинговальных брусков (безабразивный состав) в поверхностный слой обрабатываемого зеркала цилиндра. Безабразивные бруски для такого вида обработки получают спеканием многокомпонентного состава из 20 % фуллерена C₆₀, 5 % меди и 75 % политетрафторэтилена (фторопласт-4). Предполагается использовать для диффундирования в поверхностный слой обрабатываемого изделия такие формы диффузии, как термодиффузия и бародиффузия. Скорость термодиффузии, выражаемая коэффициентом диффузии D_T , определяется выражением [9, 10]

$$D_T = D_0 \exp \left[- \frac{Q}{(k_B T)} \right], \text{ м}^2/\text{с} \quad (1)$$

где D_0 – частотный фактор, м²/с; Q – энергия активации процесса диффузии, эВ; k_B – постоянная Больцмана, 1,380 648 52(79)·10⁻²³ Дж·К⁻¹. Экспериментальные значения при диффундировании углерода в железоуглеродистый сплав: $D_0 = 2,0 \cdot 10^{-5}$; $Q = 0,9$ [10]. Обеспечение термодиффузии требует создания температурного градиента, что возможно при нагреве обрабатываемого изделия до значений температур, соответствующих его эксплуатационным температурам.

Аналогично коэффициенту термодиффузии определяется коэффициент бародиффузии D_p :

$$D_p = D_0 \exp \left[- \frac{Q}{(k_B p)} \right], \text{ м}^2/\text{с}, \quad (2)$$

где p – давление в зоне диффундирования, Па. Давление в зоне диффундирования будет определяться давлением разжима хонинговальных брусков. В данном случае предполагается, что направленность обеих форм диффузии будет одинакова, и тогда общий коэффициент

диффузии будет представлять собой сумму выражений (1) и (2), т.е.

$$D_{\Sigma} = D_T + D_p. \quad (3)$$

При этом надо учитывать то, что D определяет количество вещества (кг), проходящего через единичную площадь (1 м²) в одну секунду – м²/с. И тогда значение D_{Σ} необходимо привести к площади поверхности зеркала цилиндра, т.е. $D_{\text{общ}} = D_{\Sigma} \cdot S_{\text{з.ц}}$, где $S_{\text{з.ц}}$ – площадь поверхности зеркала цилиндра, м². Окончательно, количество диффундированного вещества будет определяться временем обработки цилиндрической втулки t_0 , где t_0 – основное время шаржирования, мин.

Фактором, усиливающим диффузионное проникновение фуллерена в поверхностный слой, будет ситуация при которой будут более явно выделены дислокации и свободные вакансии в кристаллической решётке. Такая ситуация может быть создана за счёт организации напряжений растяжения поверхностного слоя изделия, в который будет диффундировать фуллерен.

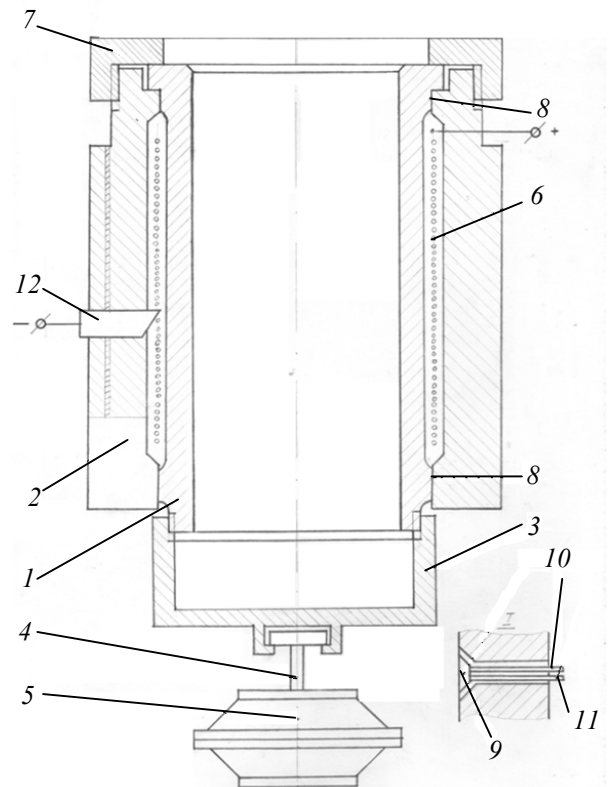


Рис. 1. Конструктивная схема приспособления

С учётом всех вышеизложенных факторов предлагается конструктивная схема приспособления для насыщения поверхностного слоя зеркала цилиндрической втулки фуллереном путём безабразивного хонингования – шаржирования (рис. 1). Здесь 1 – цилиндрическая втулка; 2 – конус приспособления; 3 – стакан, навин-

чиваемый на резьбу на нижней части втулки; 4 – шток пневмокамеры; 5 – пневмокамера; 6 – индукторная обмотка; 7 – прижимная гайка приспособления; 8 – места установки термомпар в приспособлении; 9 – спай термомпары; 10, 11 – термоэлектроды; 12 – подвижный контакт в пазе корпуса приспособления.

Цилиндровая втулка, установленная в приспособлении, базируется по верхнему посадочному пояску и торцу бурта, фиксируется прижимной гайкой 7, а на её нижнюю часть навинчивается стакан 3. В индукторную обмотку подаётся ток, посредством чего втулка разогревается. В теле втулки создаётся температурное поле аналогичное или близкое к её действительному температурному полю в эксплуатации, показатели которого определены расчётно или экспериментально. Значения температурного поля регулируются силой тока путём перемещения подвижного контакта 12 по показаниям термомпар 8.

Посредством пневмокамеры в поверхностном слое зеркала цилиндра создаются упругие напряжения растяжения $\sigma_p - [\sigma]$, где $[\sigma]$ – допускаемые напряжения растяжения. Таким образом, создаются условия способствующие проникновению фуллеренов в поверхностный слой зеркала цилиндра, в результате чего ожидается повышение его износостойкости и трибологических характеристик.

Внедрение безобразивного состава (БС) в поверхностный слой будет достаточно успешным при формировании специального микропрофиля поверхности путём плосковершинного хонингования. Процесс плосковершинного хонингования производится за три операции:

- черновое хонингование алмазными брусками зернистостью 160/125 мкм; частота вращения хонинговальной головки $n = 100$ об/мин; скорость возвратно-поступательного движения хонинговальной головки $v_{в-п} = 31$ дв.х/мин; давление разжима хонинговальных брусков по манометру станка $p = 1,3$ МПа; смазочно-охлаждающая жидкость – керосин 70 %, масло минеральное 30 %;

- получистовое хонингование алмазными брусками зернистостью 100/80 мкм; $n = 100$ об/мин.; $v_{в-п} = 31$ дв.х/мин; $p = 1,0$ МПа; СОЖ – керосин 70 %, масло 30 %;

- чистовое хонингование алмазными брусками зернистостью 80/60 мкм, $n = 100$ об/мин; $v_{в-п} = 31$ дв.х/мин; $p = 0,4$ МПа; СОЖ – керосин 70 %, масло 30 %.

В результате комплекса хонинговальных

операций на обработанной поверхности зеркала цилиндра образуется система микронеровностей, которая состоит из сравнительно глубоких впадин, оставшихся от чернового хонингования и площадок с собственной шероховатостью, образовавшихся после окончательного хонингования путём частичного среза выступов исходного профиля, как показано на рис. 2.

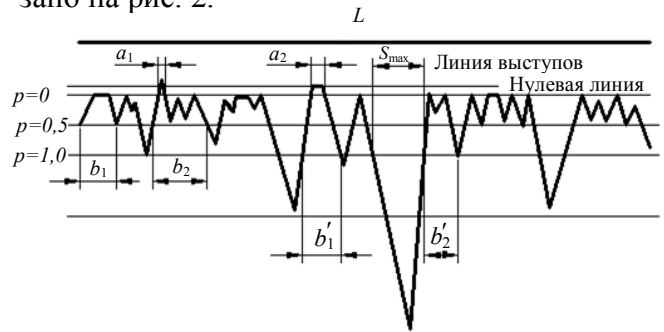


Рис. 2. Профилограмма зеркала цилиндрической втулки

При втирании БС в поверхностный слой зеркала цилиндра, сам БС, а также элементы микро рельефа зеркала упруго деформируются. В дальнейшем, при работе двигателя, под действием рабочей температуры, появляются температурные деформации, что предопределяет сложное напряжённое состояние соединения «цилиндр – БС».

Сочетание трёх факторов при внедрении имплантата в поверхностный слой – температурного, барометрического и напряжённого даёт возможность избежать при работе двигателя возникновения термоупругих сил, стремящихся вытолкнуть БС из впадин микро рельефа. Он будет там находиться, удерживаемый силами разжима поршневых колец и силами трения покоя. Таким образом, диффузионное проникновение фуллерена в поверхностный слой зеркала цилиндра будет продолжаться ещё какое-то время после начала эксплуатации двигателя под действием тех же факторов – температуры, давления и напряжённого состояния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мышкин М.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.
2. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. В 2-х т. Т. 1. / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2014. 480 с.
3. Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика / Материалы 17-й междунар. науч.-практ. конф. 14-17 апреля 2015 г. С-Пб.: Изд-во По-

литехн. ун-та, 2015. 546 с.

4. Елецкий А.В., Смирнов В.М. Фуллерены // УФН. 1993. № 2. С. 33–58.

5. Gusev A.I., Rempel A.A. Nanocrystalline Materials. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2004. 351 p.

6. Сидоров Л.Н., Юровская М.А., Борщевский А.Я. и др. Фуллерены. М.: Экзамен, 2005. 687 с.

7. Дорохов А.Ф., Санаев Н.К. Исследование надёжности сцепления антифрикционного покрытия с рабочей поверхностью цилиндра судового ДВС // Вестник Астраханского госунар. Техн. ун-та. Морская техника и технология. 5(46)/2008. С. 143–147.

8. Дорохов А.Ф., Санаев Н.К., Масуев М.А. Снижение потерь мощности на преодоление сил трения в судовых высокооборотных дизелях // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 9. С. 18–21.

9. Гуров К.П., Карташкин Б.А., Угастэ Ю.Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах. М.: Наука, 1981. 350 с.

10. Диффузия в кристаллах: Интернет-ресурс <http://dssp.petrstu.ru/>

REFERENCES

1. Myshkin M.K., Petrokovets M.I. *Friction, Lubrication, Wear. Physical Fundamentals and Engineering Applications of Tribology*. M.: Physmathlit, 2007. pp. 368.

2. *Technology and Tools of Finish-strengthening of Parts*

with Surface Plastic Deformation: Reference Book. In 2 Vol., Vol. 1. / Under the general editorship of A.G. Suslov. M.: Mechanical Engineering, 2014. pp. 480.

3. Technology of strengthening, plating and repair; theory and practice / *Proceedings of the 17th Int. Scient. Pract. Conf. 14-17 April 14-17, 2015, S-Pb.*: University Publishing House, 2015. pp. 546.

4. Yeletsky A.V., Smirnov V.M. Fullerenes // UFN. 1993. № 2. pp. 33–58.

5. Gusev A.I., Rempel A.A. Nanocrystalline Materials. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2004. 351 p.

6. Sidorov L.N., Yurovskaya M.A., Borshchevsky A.Ya. and others. *Fullerenes*. M.: Examination, 2005. pp. 687.

7. Dorokhov A.F., Sanayev N.K. Reliability investigation in cohesion of antifriction plating with cylinder working surface of marine ICE // *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Marine Technique and Technology*. 5(46)/2008. pp. 143–147.

8. Dorokhov A.F., Sanayev N.K., MaSuyev M.A. Decrease of capacity loss for friction force negotiation in marine high-speed diesel engines // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. 2008. № 9. pp. 18–21.

9. Gurov K.P., Kartashkin B.A., Ugaste Yu.E. *Interdiffusion in Multiphase Metal Systems*. M.: Science, 1981. pp. 350.

10. Diffusion in Crystals: Internet-resource <http://dssp.petrstu.ru/>

Рецензент д.т.н. О.А. Горленко

УДК 620.193:622.279.51

DOI: 10.12737/20134

А.С. Тюсенков, к.т.н., С.Е. Черепашкин, к.т.н.
(Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, ул. Космонавтов, 1)
E-mail: anton.tyusenkov@yandex.ru

Причины коррозии насосно-компрессорных труб нефтепромыслов и технологическое повышение их долговечности

Рассмотрены основные причины коррозионных разрушений, факторы, интенсифицирующие скорость коррозии насосно-компрессорных труб нефтепромыслов (НКТ). Основным способом защиты внутренней поверхности НКТ является использование ингибиторов коррозии. Выполнен подбор ингибитора коррозии.

Ключевые слова: насосно-компрессорная труба; коррозия; сталь; сероводород; углекислый газ; муфтовое соединение; ингибитор коррозии.

A.S. Tyusenkov, Can.Eng., S.E. Cherepashkin, Can.Eng.
(Ufa State Oil Technical University, 1, Cosmonauts Str., Ufa)

Corrosion reasons in oil-well tubing of oil fields and their life technological support

Basic reason corrosion destructions, factors intensifying corrosion in oil-well tubing (OWT) of oil fields are analyzed. The main method of protection of OWT inner surface is the use of corrosion inhibitors. The selection of corrosion inhibitors is carried out.

Keywords: tubing; corrosion; steel; sulphuretted hydrogen (hydrogen sulphide); carbonic acid (gas); clutch coupling; corrosion inhibitor.