

УДК 631.03

DOI 10.18286/1816-4501-2022-2-18-24

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ СТенок ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРОВ НАНЕСЕНИЕМ АНТИКАВИТАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

**Салахутдинов Ильмас Рифкатович<sup>1</sup>**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»

**Глуценко Андрей Анатольевич<sup>2</sup>**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и сервис автомобилей им. И.С. Антонова»

**Хохлов Алексей Леонидович<sup>1</sup>**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, дом 1; тел.: 88422559535; e-mail: chochlov.73@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Ульяновский ГУ

432017, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, дом 42; тел.: 88422372462; e-mail: oildel@yandex.ru

**Ключевые слова:** кавитация, кавитационное изнашивание, гильза цилиндра, антикавитационное покрытие

Одним из направлений повышения ресурса работы двигателей внутреннего сгорания является снижение интенсивности кавитационного изнашивания внешней стенки гильз цилиндров. Наиболее перспективным в настоящее время способом является нанесение антикавитационных покрытий на внешнюю поверхность гильзы цилиндров. Целью проводимых исследований являлось установление теоретических зависимостей, позволяющих обосновать свойства и толщину наносимого на внешнюю стенку гильзы цилиндров антикавитационного материала. Теоретическими исследованиями интенсивности кавитационного изнашивания по глубине разрушения стенки гильзы цилиндров установлено, что при выборе кавитационностойких материалов следует исходить из структуры материала и отдавать предпочтение тем материалам, которые характеризуются высоким сопротивлением микрообъемов пластической деформации при микроударном воздействии и способным противостоять режимам работы в широких пределах температур. Наиболее полно этим требованиям соответствуют материалы политетрафторэтиленовой группы - фторопласты. Исследования фторопластового покрытия, нанесенного на внешнюю стенку гильзы цилиндров, с использованием полученных теоретических зависимостей показали, что минимальная интенсивность изнашивания гильзы цилиндров  $0,0006 \text{ мм}^3/\text{цикл}$  достигается при толщине покрытия фторопластом внешней поверхности гильзы цилиндров толщиной 1,8 мм. При этом разности нагрева типовой гильзы и гильзы с фторопластовым покрытием с увеличением температуры нагрева внутренней стенки гильзы уменьшаются с 15 % при температуре 50 °С до 5,7 % при температуре нагрева 150 °С, то есть нанесение фторопластового покрытия на внешнюю стенку гильзы цилиндров не приводит к изменению теплонапряженности гильзы цилиндров и не оказывает влияния на тепловой баланс двигателя внутреннего сгорания. Таким образом, полученные теоретические зависимости позволяют установить и обосновать не только свойства антикавитационного материала, но и толщину его нанесения на внешнюю поверхность гильзы цилиндров.

#### Введение

В процессе эксплуатации двигателя внутреннего сгорания происходит изменение состояния его основных элементов. Одним из таких элементов является гильза цилиндров, являющаяся деталью цилиндропоршневой группы и одной из важных частей двигателя. Потеря ра-

ботоспособности гильзы цилиндров происходит по причинам воздействия множества факторов. Наибольший процент нарушения работоспособности гильз цилиндров происходит в результате износа их рабочей поверхности (60 %) и кавитационного разрушения внешних стенок гильзы цилиндров (30 %).

Поскольку износ рабочей поверхности гильзы цилиндров может быть снижен в результате соблюдения как эксплуатационных режимов эксплуатации ДВС, так и технического регламента по обслуживанию двигателей, то вопрос обеспечения работоспособности гильз цилиндров по причине кавитационного разрушения остается открытым. Поэтому одним из способов повышения ресурса работы ДВС, и в частности цилиндропоршневой группы, является защита гильз цилиндров от кавитационного разрушения. При этом наиболее перспективным способом является нанесение антикавитационных покрытий на внешнюю поверхность гильзы цилиндров.

### Материалы и методы исследований

Для обоснования снижения кавитационного изнашивания стенок гильзы цилиндров нанесением антикавитационного покрытия в качестве характеристики изнашивания примем отношение изношенной массы материала внешней поверхности гильзы цилиндров к массе частиц охлаждающей жидкости, вызывающей изнашивание материала поверхности [1, 2]:

$$I_{KH} = \frac{V \cdot \rho_m}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho_{ож} \cdot n}, \quad (1)$$

где  $\rho_m$  и  $\rho_{ож}$  - соответственно, плотность материала гильзы цилиндров и плотность пузырьков охлаждающей жидкости, г/мм<sup>3</sup>; R - радиус пузырьков, мм; n - число пузырьков, оказывающих воздействие на внешнюю поверхность гильзы цилиндров.

Разрушение материала гильзы цилиндров будет определяться размером пятна контакта пузырька с поверхностью. Так как последний будет меняться в зависимости от различных факторов, то объем изнашиваемого материала может быть представлен в дифференциальном виде:

$$dV = \frac{V_d}{n \cdot d}, \quad (2)$$

где  $V_d$  - деформируемый объем поверхности гильзы цилиндров, мм<sup>3</sup>; d - диаметр пятна контакта, мм.

Поскольку отверстия повреждений очень малы ( $h/R < 1$ ), тогда:

$$d = 2\sqrt{2R \cdot h} \text{ и } V_d = \pi \cdot R \cdot h^2, \quad (3)$$

где h - глубина разрушения поверхностного слоя гильзы цилиндра, мм.

Тогда число циклов до разрушения по-

верхности можно определить:

$$n_{\text{ц}} = \left( \frac{3\pi \cdot \frac{1-\mu}{E} \cdot \sigma_o}{4k} \right)^t \cdot \left( \frac{R}{h} \right)^{\frac{t}{2}}. \quad (4)$$

где  $\mu$  - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости материала, Па; k - коэффициент пропорциональности эквивалентного напряжения в очаге разрушения (в зависимости от марки материала гильзы составляет от 2,5 до 7);  $\sigma_o$  - напряжение в зоне разрушения, Па; t - показатель, учитывающий усталостные свойства материала.

С учетом уравнений (3, 4) количество отделиваемого материала может быть определено:

$$V = \frac{\pi \cdot g}{2R^2} \left( \frac{4k}{3\pi \cdot \sigma_o \cdot \frac{1-\mu}{E}} \right)^t \int_0^x h^{\frac{t+3}{2}} dx. \quad (5)$$

где g - ускорение свободного падения, мм<sup>2</sup>/с.

Если рассматривать воздействие пузырька охлаждающей жидкости как удар жесткой частицы о деформируемое полупространство, то данный процесс будет описываться системой уравнений:

$$m \frac{d^2 h}{d\tau^2} = -N(h); \quad (6)$$

$$m \frac{d^2 x}{d\tau^2} = -F, \quad (7)$$

$$m = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 \cdot \rho_{ож}. \quad (8)$$

где m - масса воздействующей частицы, г;  $\tau$  - время воздействия пузырька на поверхность гильзы, ч; N - нормальное усилие, Н; F - касательное усилие, Н.

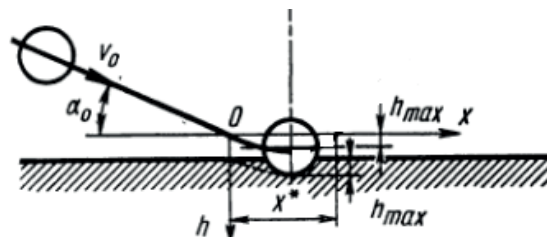


Рис. 1 - Схема взаимодействия пузырька как твердой частицы с поверхностью гильзы цилиндров

Предполагая, что в начальный момент времени соприкосновения пузырька с поверх-

ностью гильзы цилиндров

$$dx = dh - v_o (\sin \alpha_o - \cos \alpha_o) d\tau, \quad (9)$$

где  $v_o$  - скорость приближения пузырька к поверхности гильзы, мм/с;  $\alpha_o$  - угол наклона траектории приближения пузырька к поверхности гильзы, град.

Тогда уравнение (6) примет вид:

$$\frac{dh}{d\tau} = \pm \sqrt{v_o^2 \sin^2 \alpha_o - \frac{4h^{\frac{5}{2}}}{5\pi \cdot \rho_{окс} \cdot \frac{1-\mu}{E} \cdot R^2}}. \quad (10)$$

Отсюда максимальная глубина повреждения поверхности гильзы может быть выражена как:

$$h_{\max} = R \left( \frac{5}{4} \pi \cdot \rho_{окс} \cdot \frac{1-\mu}{E} \cdot v_o^2 \cdot \sin^2 \alpha_o \right)^{\frac{2}{5}}. \quad (11)$$

В этом случае, используя результаты исследований [2-20], величина изнашивания внешней поверхности гильзы цилиндра может быть определена с учетом выражения (10) и решения выражения (1):

$$I_{KH} = \rho_m \cdot \rho_{окс}^{\frac{1}{5}} \left( \operatorname{ctg} \alpha_o \cdot \frac{v_o \cdot \sin \alpha_o}{\sqrt{\sigma_T}} \right)^{2+\frac{2}{5}} \left( \frac{k}{\sigma_o} \right)^t \cdot \left( \frac{4}{3\pi \cdot \frac{1-\mu}{E}} \right)^{\frac{4}{5}t-1}. \quad (12)$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести материала, Па.

При решении задачи сопряжений пузырька в жидкости для модели схлопывания по Чэпмену и Плессету скорость микроструйки, воздействующей на поверхность гильзы при схлопывании пузырька [9, 12, 19, 20]:

$$v_o = \sqrt{2g \cdot l}, \quad (13)$$

где  $l$  - расстояние, которое проходит пузырек от места своего образования, до поверхности гильзы цилиндров, мм.

Тогда

$$I_{KH} = \rho_m \cdot \rho_{окс}^{\frac{1}{5}} \left( \operatorname{ctg} \alpha_o \cdot \frac{12,8 \sqrt{2g \cdot l} \cdot \sin \alpha_o}{\sqrt{\sigma_T}} \right)^{2+\frac{2}{5}} \left( \frac{k}{\sigma_o} \right)^t \cdot \left( \frac{4}{3\pi \cdot \frac{1-\mu}{E}} \right)^{\frac{4}{5}t-1}. \quad (14)$$

Как видно из выражения (14) на величину изнашивания будет влиять не только плотность материала покрытия и охлаждающей жидкости, но и величина твердости материала, при этом увеличение модуля упругости материала приведет к увеличению изнашивания.

Учитывая, что модуль упругости меняется в зависимости от температуры нагрева материала [5-9]:

$$E = 35 - 0,16 \cdot T - (95 - \sigma_e), \quad (15)$$

где  $T$  - температура нагрева покрытия гильзы цилиндра, К;  $\sigma_e$  - твердость материала покрытия внешней поверхности гильзы цилиндра, Па.

То выражение (14) примет вид:

$$I_{KH} = \rho_m \cdot \rho_{окс}^{\frac{1}{5}} \left( \operatorname{ctg} \alpha_o \cdot \frac{12,8 \sqrt{2g \cdot l} \cdot \sin \alpha_o}{\sqrt{\sigma_T}} \right)^{2+\frac{2}{5}} \left( \frac{k}{\sigma_o} \right)^t \cdot \left( \frac{4}{3\pi \cdot \frac{1-\mu}{35 - 0,16 \cdot T - (95 - \sigma_e)}} \right)^{\frac{4}{5}t-1}. \quad (16)$$

Таким образом, анализируя выражение (16), можно сказать, что интенсивность кавитационного изнашивания будет зависеть не столько от твердости поверхностного слоя, сколько от модуля упругости материала.

Таким образом, при выборе кавитационностойких материалов следует исходить из структуры сплава и отдавать предпочтение тем материалам, которые характеризуются высоким сопротивлением микрообъемов пластической деформации при микроударном воздействии и способным противостоять режимам работы в широких пределах температур. Нами предлагается в виде антикавитационного материала использовать политетрафторэтиленовую группу - фторопласты.

Благодаря наличию в своей структуре большого количества атомов фтора, фторопласты отличаются очень высокой химической, радиационной и коррозионной стойкостью, низким водопоглощением и газопроницаемостью, низким коэффициентом линейного расширения в широком диапазоне температур, что обеспечит хорошее сцепление с внешней поверхностью гильзы цилиндров в процессе эксплуатации. Кроме того, фторопласт-4 обладает коэффициентом теплопроводности 0,25 Вт/м·К, при теплопроводности чугуна - 0,37 Вт/м·К, что является допустимым для систем охлаждения цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания.

#### Результаты исследований

Обоснование толщины фторопластового слоя на внешней поверхности гильзы цилиндров определяли по интенсивности кавитационного изнашивания в зависимости от глубины

повреждения поверхности гильзы и влиянию на теплонапряженность гильзы цилиндров.

На основании проведенных расчетов получено уравнение регрессии зависимости интенсивности изнашивания и глубины разрушения поверхностного

слоя от толщины наносимого фторопластового покрытия (рис. 2):

$$I_{ки} = -0,9269 - 0,53\delta - 725,755h + 0,1431\delta^2 + 56,2904 \cdot \delta \cdot h + 64183,8488h^2, \quad (17)$$

где  $I_{ки}$  - интенсивность изнашивания поверхности гильзы цилиндра,  $\text{мм}^3/\text{цикл}$  ( $\text{мм}^3/1000 \text{ ч}$ );  $\delta$  - толщина покрытия гильзы цилиндров фторопластом, мм;  $h$  - глубина разрушения поверхностного слоя гильзы цилиндров, мм.

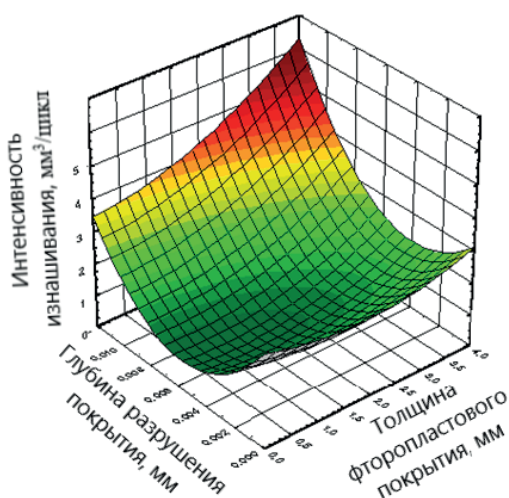


Рис. 2 - Поверхность отклика зависимости интенсивности изнашивания (ИКИ) и глубины разрушения покрытия гильзы цилиндров (h) от толщины фторопластового покрытия (delta)

Минимальная интенсивность изнашивания гильзы цилиндров  $0,0006 \text{ мм}^3/\text{цикл}$  достигается при толщине покрытия фторопластом внешней поверхности гильзы цилиндров толщиной 1,8 мм.

Исследования теплонапряженности проводились по определению разницы температур нагрева внешней поверхности ( $T_{впгц}$ ) типовой гильзы цилиндров и гильзы с нанесенным фторопластовым покрытием при одинаковой температуре нагрева их внутренней поверхности ( $T_{нгц}$ ) (рис. 3). При нагреве внутренней поверхности гильз цилиндров до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  температура внешней поверхности гильзы с фторопластовым покрытием составила  $46^\circ\text{C}$ , а типовой -  $40^\circ\text{C}$ .

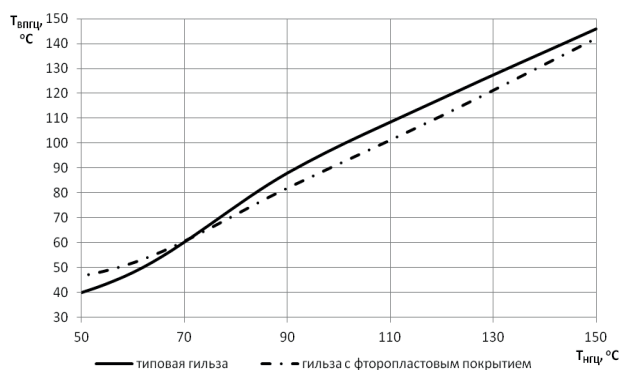


Рис. 3 - Изменение температуры внешней поверхности гильзы цилиндра (ТВПГЦ) от температуры нагрева внутренней поверхности (ТНГЦ)

При дальнейшем увеличении нагрева внутренней поверхности гильзы разница температур нагрева внешней поверхности типовой гильзы и гильзы с фторопластовым покрытием уменьшилась, а после температура нагрева внутренней поверхности гильзы до  $150^\circ\text{C}$  стабилизировалась и составила  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  (соответственно  $140$  и  $148 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (рис. 3).

#### Обсуждение

Проведённые исследования показали, что минимальная интенсивность изнашивания внешней поверхности гильзы цилиндров обеспечивается при толщине ее покрытия фторопластом толщиной  $1,6...1,8 \text{ мм}$ . С увеличением толщины фторопластового покрытия глубина разрушения поверхностного слоя увеличивается. Исходя из литературных источников, предположительно это происходит по причине перегрева фторопластового покрытия в силу его более низкой, чем у чугуна, теплопроводности, в результате чего происходит локальное стеклование слоя фторопласта, сопровождаемое увеличением хрупкости.

Выявлено, что нанесение фторопластового покрытия на внешнюю стенку гильзы цилиндров не приводит к изменению теплонапряженности гильзы цилиндров и не оказывает влияния на тепловой баланс двигателя внутреннего сгорания.

#### Заключение

Теоретические исследования позволили определить требования к свойствам материалов для покрытия внешней стенки гильзы цилиндров с целью снижения их кавитационного изнашивания, основными из которых являются плотность, модуль упругости и теплопроводность.

Полученные теоретические зависимости



позволяют обосновать параметры наносимого на внешнюю стенку гильзы цилиндров антикавитационного материала, в частности, использование материалов фторопластовой группы и толщины наносимого фторопластового покрытия в пределах 1,6...1,8 мм.

#### Библиографический список

1. Схлопывание кавитационного пузырька в жидкости вблизи твердой стенки / А. А. Аганин, М. А. Ильгамов, Л. А. Косолапова, В. Г. Малахов // Вестник Башкирского университета. - 2013. - Т.18, № 1. - С. 15-21.
2. Белый, В. И. Исследование кавитационно-эрозионного изнашивания металлов в химически-активных средах / В. И. Белый, А. И. Некоз // Проблемы трения и изнашивания. — Киев : Техника, 1981. — Вып.19. — С.76-79.
3. Волин, В. Э. Влияние электрохимической коррозии на скорость кавитационной эрозии материалов / В. Э. Волин, А. Я. Гринберг // Труды ВНИИ-Гидромаш. — Москва : Энергия, 1975. — Вып. 46. — С. 44-53.
4. Горбаченко, Е. О. Кинетика упрочнения металлических материалов при кавитационном изнашивании / Е. О. Горбаченко, Ю. Н. Цветков, Ю. К. Лопарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2019. — Т. 11, вып. 4. — С. 696-704.
5. Горбаченко, Е. О. Прогнозирование инкубационного периода кавитационного изнашивания лопастей гребных винтов с использованием метода измерения профиля поверхности / Е. О. Горбаченко, Ю. Н. Цветков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2017. — № 52. — С. 87-95.
6. Горбаченко, Е. О. Структура очагов кавитационных повреждений гребных винтов / Е. О. Горбаченко // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы IX межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов, 23 мая 2018 года. — Санкт-Петербург : Издательство ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2018. — С. 242-245.
7. Петров, А. И. Исследование сравнительной стойкости и кавитационной эрозии образцов материалов и покрытий проточной части гидромашин / А. И. Петров, М. М. Скобелев, А. Г. Ханычев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия. Машиностроение. — 2015. — № 2. — С. 128-137.
8. Третьяков, Д. В. Моделирование долговечности цилиндрических втулок двигателей внутреннего сгорания при вибрационной кавитации / Д. В. Третьяков, А. Г. Валишин, О. О. Матвеевский // Проблемы машиностроения и надёжности машин. — 2008. — № 2. — С. 50-60.
9. Цветков, Ю. Н. Методика оценки глубины проникновения пластической деформации при кавитационном воздействии в условиях ультразвуковой кавитации / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко, Т. В. Иванова // Материалы 63-й Международной научной конференции Астраханского государственного технического университета, посвященной 25-летию Астраханского государственного технического университета. — Астрахань: Издательство АГТУ, 2019.
10. Amann, T. Analysis of mechanical and chemical mechanisms on cavitation erosion-corrosion of steels in salt water using electrochemical methods / T. Amann, M. Waidele, A. Kailer // Tribology International. — 2018. — Vol. 124. — P. 238-246.
11. Numerical investigation of the cavitation damage in the wet cylinder liner of a high performance motorbike engine / S. Fontanesi, M. Giacomini, G. Cicalese, S. Sissa, S. Fantoni // Engineering Failure Analysis. — 2014. — Vol. 44. — P. 408-423.
12. Gravalos, I. Cavitation erosion of wet-sleeve liners: Case study / I. Gravalos, D. Kateris, C. Dimitriadis // KOKA 2006 : XXXVII. International conference of Czech and Slovak Universities' Departments and Institutions Dealing with the Research of Combustion Engines. - Prague, Czech Republic, 2006. — P. 22.
13. Effects of cylinder head temperature and coolant velocity on the erosion behavior of water jacket in a diesel engine / D. Kim, J. Hwang, S. Han, C. Bae // Wear. — 2015. — Vol. 342-343. — P. 117-128.
14. Developments in laser-based surface engineering processes: with particular reference to protection against cavitation erosion / C. T. Kwok, H. C. Man, F. T. Cheng, K. H. Lo // Surface and Coatings Technology. — 2016. — № 291. — P. 189204.
15. ASTM G32-10. Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010. — 20 p.
16. Салахутдинов, И. Р. К вопросу кавитационного разрушения стенок гильз цилиндров / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глущенко, Д. С. Швецов // Эксплуатация автотракторной и сельскохозяйственной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы: материалы IV Международной на-

учно-практической конференции. – Пенза: ПГАУ, 2019. – С. 112-116.

17. Хусаинов, А. Ш. Разработка модели улучшения эксплуатационных показателей транспортных средств / А. Ш. Хусаинов, А. А. Глушченко, М. А. Волков // Автоматизация процессов управления. - 2018. – № 4(54). - С. 96 - 102.

18. Цветков, Ю. Н. Использование метода измерения профиля поверхности в ускоренных испытаниях судостроительных сплавов на кавитационную износостойкость / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко // Сборник тезисов докладов национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова. — Санкт-Петербург: Издательство ГУМРФ им.

адмирала С.О. Макарова, 2016. — С. 63-64.

19. Цветков, Ю. Н. Испытание сталей на кавитационное изнашивание с применением метода измерения профиля поверхности / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2017. — Т. 83, № 7. — С. 54-58.

20. Горбаченко, Е. О. Кавитационный износ гребных винтов и технологические методы борьбы с ним / Е. О. Горбаченко // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы VIII межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. — Санкт-Петербург: Издательство ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, 2017.— С. 120-125.

## THEORETICAL SUBSTANTIATION OF CAVITATION WEAR INTENSITY REDUCTION OF CYLINDER SLEEVE WALLS BY APPLICATION OF ANTI-CAVITATION COATING

Salakhutdinov I. R.<sup>1</sup>, Glushchenko A. A.<sup>2</sup>, Khokhlov A. L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State Agrarian University 432017, Ulyanovsk, Novyi Venets boulevard, 1; tel.: 88422559535; e-mail: [ilmas.73@mail.ru](mailto:ilmas.73@mail.ru), [chochlov.73@mail.ru](mailto:chochlov.73@mail.ru)

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ulyanovsk State University 432017, Ulyanovsk, Leo Tolstoy st., 42; tel.: 88422372462; e-mail: [oieldel@yandex.ru](mailto:oieldel@yandex.ru)

**Key words:** cavitation, cavitation wear, cylinder sleeve, anti-cavitation coating

One of the ways to increase service life of internal combustion engines is to reduce cavitation wear intensity of the outer wall of the cylinder sleeves. The most promising, at present, method is application of anti-cavitation coating on the outer surface of the cylinder sleeve. The aim of the research was to establish theoretical dependencies that allow to substantiate the properties and thickness of the anti-cavitation material applied to the outer wall of the cylinder sleeve. Theoretical studies of cavitation wear intensity along the destruction depth of the cylinder sleeve wall established that when choosing cavitation-resistant materials, it is necessary to have regard to material structure and give preference to those materials that are characterized by high resistance to microvolumes of plastic deformation under microshock action and are capable of withstanding operating modes over a wide temperature range. The materials of the polytetrafluoroethylene group - fluoroplasts - most fully meet these requirements. Studies of the fluoroplastic coating applied to the outer wall of the cylinder sleeve, using the obtained theoretical dependencies, showed that the minimum wear rate of the cylinder sleeve of 0.0006 mm<sup>3</sup>/cycle is achieved with a fluoroplastic coating thickness of the outer surface of the cylinder sleeve with a thickness of 1.8 mm. In this case, the difference in heating of a typical sleeve and a sleeve with a fluoroplastic coating with an increase of the heating temperature of the inner wall of the sleeve decreases from 15% at a temperature of 50 °C to 5.7% at a heating temperature of 150 °C, that is, the application of a fluoroplastic coating on the outer wall of the cylinder sleeve does not lead to a change in the heat stress of the cylinder sleeve and will not affect the heat balance of the internal combustion engine. Thus, the obtained theoretical dependences make it possible to establish and justify not only the properties of the anti-cavitation material, but also the thickness of its application to the outer surface of the cylinder sleeve.

### Bibliography:

1. Aganin A. A. Collapse of a cavitation bubble in a liquid near a solid wall / A. A. Aganin, M. A. Ilgamov, L. A. Kosolapova, V. G. Malakhov. - Vestnik of Bashkir University. - 2013. - V.18. - № 1. - P. 15-21.
2. Belyi, V. I. Study of cavitation-erosion wear of metals in chemically active media / V. I. Belyi, A. I. Nekoz // Problems of friction and wear. - Kiev: Technika, 1981. - Issue 19. - P.76-79.
3. Volin, V. E. Effect of electrochemical corrosion on the rate of cavitation erosion of materials / V. E. Volin, A. Ya. Grinberg // Scientific works of AUSRI-Gidromash, M.: Energiya. - 1975. - Issue 46. - P.44-53.
4. Gorbachenko, E. O. Kinetics of hardening of metallic materials under cavitation wear / E. O. Gorbachenko, Yu. N. Tsvetkov, Yu. K. Loparev // Vestnik of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov.- 2019. - V. 11. - Issue. 4. - P. 696-704.
5. Gorbachenko, E. O. Prediction of the incubation period of cavitation wear of propeller blades using the surface profile measurement method / E. O. Gorbachenko, Yu. N. Tsvetkov // Vestnik of the Volga State Academy of Water Transport. - 2017. - № 52. - P. 87-95.
6. Gorbachenko, E. O. The structure of foci of cavitation damage to propellers / E. O. Gorbachenko // Materials of the IX interuniversity scientific and practical conference of graduate students, students and cadets "Modern trends and prospects for development of water transport in Russia" May 23, 2018. - St. Petersburg: Publishing House of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov, 2018. — P. 242-245
7. Petrov, A. I. Study of comparative resistance and cavitation erosion of samples of materials and coatings of the flow part of hydraulic machines / A. I. Petrov, M. M. Skobelev, A. G. Khanychev // Vestnik of MSTU named after N. E. Bauman. Series "Engineering". - 2015. - № 2. - P. 128-137.
8. Tretyakov, D.V. Longevity modeling of cylinder bushings of internal combustion engines under vibratory cavitation / D. V. Tretyakov, A. G. Valishin, O. O. Matveevskiy // Problems of mechanical engineering and reliability of machines. - 2008. - № 2. - P. 50-60.
9. Tsvetkov, Yu. N. Method for assessing the penetration depth of plastic deformation under cavitation action in the conditions of ultrasonic cavitation / Yu.N. Tsvetkov, E.O. Gorbachenko, T.V. Ivanova // 63rd International Scientific Conference of Astrakhan State Technical University, dedicated to the 25th anniversary of Astrakhan State Technical University University, Astrakhan, April 22-26, 2019 [Electronic resource]: materials / Astrakhan state tech. university-Astrakhan: Publishing House of ASTU, 2019.
10. Amann, T. Analysis of mechanical and chemical mechanisms on cavitation erosion-corrosion of steels in salt water using electrochemical methods / T. Amann, M. Waidele, A. Kailer // Tribology International. — 2018. — Vol.124. — P. 238-246.
11. Fontanesi, S. Numerical investigation of the cavitation damage in the wet cylinder liner of a high performance motorbike engine / S. Fontanesi, M. Giacopini, G. Cicalese, S. Sissa, S. Fantoni // Engineering Failure Analysis. — 2014. — Vol. 44. — P. 408-423.
12. Gravalos, I. Cavitation erosion of wet-sleeve liners: Case study / I. Gravalos, D. Kateris, C. Dimitriadis // KOKA 2006, XXXVII. International conference of Czech and Slovak Universities' Departments and Institutions Dealing with the Research of Combustion Engines, 19-20 September 2006, Prague, Czech

Republic. — P. 22.

13. Kim, D. *Effects of cylinder head temperature and coolant velocity on the erosion behavior of water jacket in a diesel engine* / D. Kim, J. Hwang, S. Han, C. Bae // *Wear*. — 2015. — Vol. 342-343. — P. 117-128.

14. Kwok, C. T. *Developments in laser-based surface engineering processes: with particular reference to protection against cavitation erosion* / C. T. Kwok, H. C. Man, F. T. Cheng, K. H. Lo // *Surface and Coatings Technology*. — 2016. — № 291. — P. 189204.

15. ASTM G32-10. *Standard test method for cavitation erosion using vibratory device*. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010. — 20 p.

16. Salakhutdinov, I.R. *On the issue of cavitation destruction of the walls of cylinder sleeves* / I.R. Salakhutdinov, A.A. Glushchenko, D.S. Shvetsov // *Materials of the IV International Scientific and Practical Conference "Operation of Automotive and Tractor and Agricultural Machinery: Experience, Problems, Innovations, Prospects"*. - Penza: PSAU, 2019. - P. 112-116.

17. Khusainov, A.Sh. *Development of a model for performance improvement of vehicles* / A.Sh. Khusainov, A.A. Glushchenko, M.A. Volkov // *Automation of control processes*, № 4 (54). - Ulyanovsk, 2018. - P. 96 - 102.

18. Tsvetkov, Yu. N. *Usage of the measuring method of the surface profile in accelerated tests of shipbuilding alloys for cavitation wear resistance* / Yu. N. Tsvetkov, E. O. Gorbachenko / *Collection of abstracts of the national annual scientific and practical conference of the academic teaching staff of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*. - St. Petersburg: Publishing house of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov, 2016. — P. 63-64.

19. Tsvetkov, Yu. N. *Testing of steels for cavitation wear using the surface profile measurement method* / Yu. N. Tsvetkov, E. O. Gorbachenko // *Factory laboratory. Material diagnostics*. - 2017. - V. 83. - № 7. - P. 54-58.

20. Gorbachenko, E.O. *Cavitation wear of marine propellers and technological methods of dealing with it* / E.O. Gorbachenko / *Materials of the VIII interuniversity scientific and practical conference of postgraduates, students and cadets "Modern trends and prospects for development of water transport in Russia"* May 17, 2017. - St. Petersburg: Publishing house of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov, 2017.- P. 120-125