

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2024-2-191-196

УДК 656.11

Теоретическое обоснование снижения износа уменьшением величины ЭДС в паре трения «поршневое кольцо – гильза цилиндров»

И. Р. Салахутдинов^{1✉}, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»

А. А. Глущенко², кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и сервис автомобилей им. И.С. Антонова»

А. Л. Хохлов¹, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования»

¹ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

✉ilmas.73@mail.ru

²ФГБОУ ВО Ульяновский ГУ

432017, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42

Резюме. Работа посвящена исследованию влияния разности потенциалов, возникающей в паре трения "поршневое кольцо – гильза цилиндров" на износ деталей цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Выдвинуто предположение о влиянии разности потенциалов на физические и эксплуатационные свойства материалов узлов трения. За основу теоретических исследований была принята теория зависимости интенсивности износа от геометрических параметров контакта трения, свойств материала и условий работы в паре трения "поршневое кольцо - гильза цилиндров". Установлена теоретическая зависимость фактической площади контакта от механических свойств материала поршневого кольца и его геометрических параметров при внедрении в поверхность гильзы, что позволило обосновать зависимость износа от механических свойств материала и геометрических параметров поршневого кольца. Установлена теоретическая зависимость изменения модуля упругости материалов пары трения "поршневое кольцо - гильза цилиндров" от величины ЭДС, возникающей при их контакте, позволяющая получить аналитическое выражение для расчета интенсивности износа трущихся пар с учетом величины ЭДС и ее влияния на модуль упругости материалов. Установлено, что при отсутствии ЭДС интенсивность износа составляет $2,2 \cdot 10^{-9}$ мкм/мм, при увеличении ЭДС до 140 мВ интенсивность износа увеличилась в 3,2 раза и составила $7 \cdot 10^{-9}$ мкм/мм, при этом модуль упругости материалов пары трения снизился с 6 МПа до 1,8 МПа. Использование полученных аналитических зависимостей позволяет по величине, возникающей в сопряжениях ЭДС, не только определять интенсивность износа и ресурс работы деталей ЦПГ, но также прогнозировать техническое состояние как самой ЦПГ, так и различных узлов трения ДВС.

Ключевые слова: разность потенциалов, цилиндропоршневая группа, износ, модуль упругости.

Для цитирования: Салахутдинов И. Р., Глущенко А. А., Хохлов А. Л. Теоретическое обоснование снижения износа уменьшением величины ЭДС в паре трения «поршневое кольцо – гильза цилиндров» // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №2 (66). С. 191-196. doi:10.18286/1816-4501-2024-2-191-196

Theoretical justification for wear reduction by reducing the EMF in the friction pair "piston ring – cylinder liner"

I. R. Salakhutdinov^{1✉}, A. A. Glushchenko², A. L. Chochlov²

¹FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University

432017, Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard, 1

✉ilmas.73@mail.ru

²FSBEI HE Ulyanovsk State University

432017, Ulyanovsk, Lev Tolstoy st., 42

Abstract. The work is devoted to the study of the influence of the potential difference arising in the friction pair "piston ring - cylinder liner" on wear of parts of the cylinder-piston group of an internal combustion engine (ICE). An assumption

was made about the influence of potential differences on physical and operational properties of friction unit materials. The theory of the dependence of wear intensity on geometric parameters of the friction contact, material properties and operating conditions in the friction pair "piston ring - cylinder liner" was adopted as the basis for theoretical research. A theoretical dependence of the actual contact area on the mechanical properties of the piston ring material and its geometric parameters when entering the surface of the liner was established, which allowed to substantiate the dependence of wear on the mechanical properties of the material and the geometric parameters of the piston ring. A theoretical dependence of the change in the elastic modulus of the materials of the friction pair "piston ring - cylinder liner" on the EMF arising during their contact was established, which allows to obtain an analytical expression for calculating the wear rate of the rubbing pairs, taking into account the EMF and its influence on the elastic modulus of the materials. It was established that in the absence of EMF, the wear intensity is $2.2 \cdot 10^{-9} \mu\text{m}/\text{mm}$; with an increase in EMF to 140 mV, the wear intensity increased 3.2 times and amounted to $7 \cdot 10^{-9} \mu\text{m}/\text{mm}$, while the elastic modulus of the material friction pairs decreased from 6 MPa to 1.8 MPa. The application of the obtained analytical dependencies allows, based on the value arising in the EMF interfaces, not only to determine the wear rate and service life of the CPG parts, but also to predict the technical condition of both the CPG itself and various friction units of the internal combustion engine.

Keywords: potential difference, cylinder-piston group, wear, elastic modulus.

For citation: Salakhutdinov I. R., Glushchenko A. A., Chochlov A. L. Theoretical justification for wear reduction by reducing the EMF in the friction pair "piston ring – cylinder liner" // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2024;2(66): 191-196 doi:10.18286/1816-4501-2024-2-191-196

Введение

Любая энергетическая установка самоходной машины представляет собой систему механизмов, детали которых контактируют между собой при различных нагрузочно-скоростных и температурных режимах. Воздействие этих факторов приводит к возникновению различного рода термохимических, термоэлектронных, термических, и др. явлений, приводящих к изменению физико-химических и эксплуатационных свойств поверхностного слоя материалов рабочих поверхностей деталей. Результатом их влияния является износ и снижение ресурса работы не только деталей и узлов, но и всего ДВС [1, 2].

Особый интерес представляет возникновение в парах трения термоэлектрической электродвижущей силы (ЭДС) и ее влияние на износ деталей ДВС, поэтому установление его воздействия на износ деталей величины ЭДС позволит повысить ресурс работы ДВС за счет разработки методов, позволяющих снизить ее последствия.

Материалы и методы

Наиболее полноесным и часто используемым показателем оценки износа является показатель линейного износа, и, в частности, интенсивность последнего, которая оценивается как отношение объема материала, снимаемого с поверхности, к геометрическим параметрам сопряжения [1-7]:

$$I_h = \frac{V}{LS_H}, \quad (1)$$

где L – длина контактируемого отрезка поверхностей, мм; V – объем отделяемого с поверхности материала, мм^3 ; S_H – номинальная площадь контактируемых поверхностей, мм^2 .

То есть, в случае "поршневое кольцо - гильза цилиндров" интенсивность износа будет равна деформируемому объему материала V_M , отделяемого на единицу площади фактического контакта S_Φ при перемещении на расстояние, соответствующего общей высоте поршневых колец $\sum \delta_i$:

$$I_h = \frac{V_M}{S_\Phi \sum \delta_i}, \quad (2)$$

С учетом геометрических характеристик контакта, деформируемый объем материала:

$$V_M = \frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{(\nu+1) \cdot \chi} \sum \delta_i S_\Phi, \quad (3)$$

где λ и ν – параметры, характеризующие контактируемые поверхности; ε – деформация сжатия, Н/мм; χ – количество воздействий, в результате которых происходит отделение материала поверхности; S_Φ – площадь фактического контакта, мм^2 .

С учетом выражения (3) формула (2) примет вид:

$$I_h = \frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{(\nu+1) \cdot \chi}, \quad (4)$$

С учетом действующего в контакте давлений реального P_a и нормального P_H :

$$I_h = \frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{(\nu+1) \cdot \chi} \cdot \frac{P_a}{P_H}, \quad (5)$$

С учетом геометрических параметров вступающих в контакт поверхностей [12] физико-механическая характеристика контактирующих тел будет определяться как [1-6, 8]:

$$\frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{\nu+1} \approx 0,15 \dots 0,21 \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (6)$$

где h – высота микронеровности, внедряющаяся в контактируемое тело, мм; R – радиус кривизны микронеровности внедрившейся поверхности, мм.

Тогда получим:

$$I_h = \frac{0,15}{\chi} \sqrt{\frac{h S_\Phi}{R S_H}}, \quad (7)$$

Таким образом, на величину линейного износа будут влиять высота микронеровностей h , определяющая глубину их внедрения, количество циклов соприкосновения χ и отношение площади фактического S_Φ контакта к номинально возможной площади S_H . Это позволяет заключить, что линейный износ может быть определен только с учетом физико-механических характеристик материалов трущихся поверхностей и факторов процесса их взаимодействия (скорость перемещения, нагрузка в контакте, температура в контакте и др.).

Фактическая площадь контакта с учетом свойств материалов может быть определена [1-6, 18]:

$$S_{\phi} = \frac{1,65 S_M \gamma_1^{\frac{1}{3}} \gamma_2^{\frac{1}{3}}}{k^{\frac{2}{3}}} \rho_H^{\frac{2}{3}} \quad (8)$$

где k - коэффициент пропорциональности, учитывающий свойства материала в внедряемой поверхности в контакте; γ_1 и γ_2 - коэффициенты, учитывающие свойства материала поршневых колец и гильзы цилиндров; S_M - площадь контакта в сопряжении, мм².

Коэффициент пропорциональности [13-17]:

$$k = \frac{E_1}{2\delta(1-\mu_1^2)} \quad (9)$$

где δ - высота поршневого кольца, мм; μ_1 - коэффициент Пуассона материала поршневого кольца; E_1 - модуль упругости материала поршневого кольца, МПа.

Тогда, подставив в (9) в выражение (8) и проведя преобразование с учетом свойств материала гильзы цилиндров, получим:

$$S_{\phi} = 1,65 \frac{S_M^{\frac{2}{3}} \gamma_1^{\frac{1}{3}} \gamma_2^{\frac{1}{3}} (E_1 + E_2)^{\frac{2}{3}} [2\delta(1-\mu_1^2)]^{\frac{2}{3}}}{(E_1 E_2)^{\frac{2}{3}}} \rho_H^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

где E_2 - модуль упругости материала гильзы цилиндров, МПа.

Исходя из процесса работы ЦПГ при перемещении поршня величина внедрения поршневого кольца в поверхность гильзы цилиндров (h/R) будет определяться:

$$v = \sqrt{\frac{h}{R}} \quad (11)$$

В этом случае с учетом фактической площади контакта формула (7) примет вид:

$$I_h = \frac{0,247 v S_M \gamma_1^{\frac{1}{3}} \gamma_2^{\frac{1}{3}} (E_1 + E_2)^{\frac{2}{3}} [2\delta(1-\mu_1^2)]^{\frac{2}{3}} \rho_H^{\frac{2}{3}}}{\chi_{SH} (E_1 E_2)^{\frac{2}{3}} L} \quad (12)$$

Исходя из полученной зависимости, уменьшение износа сопряжения будет тем меньше, чем больше будет модуль упругости трущихся материалов, т.е. поршневого кольца и гильзы цилиндров.

Однако, возникновение ЭДС в сопряжении «гильза цилиндров – поршневое кольцо» будет влиять на свойства металлов контакта. Известно, что появление ЭДС, сопровождаемое протеканием электрического тока, влияет на изменение модуля упругости материалов [9-11, 18-20]:

$$E = E_M (1 - 1,97 \cdot 10^{-7} \cdot I_A^2), \quad (13)$$

где E_M - модуль упругости материалов гильзы цилиндров и поршневого кольца, МПа; I_A - сила тока, возникающая в контакте «гильза цилиндров – поршневое кольцо», А.

Сила тока в контакте, согласно закону Ома [9-11, 18-20]:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\Delta\phi_{1,2}}{R} = \frac{\epsilon}{R'} \quad (14)$$

где U - напряжение в контакте, В; R - сопротивление в контакте «гильза цилиндров – поршневое кольцо», Ом; $\Delta\phi_{1,2}$ - разность потенциалов в контакте, В; ϵ - значение ЭДС, В.

$$R = \frac{k_{\text{тлх}}}{(0,102 \cdot P_a)^i} \quad (15)$$

где $k_{\text{тлх}}$ = 0,0076 - коэффициент, определяемый электрофизическими свойствами материала и формой контакта трущихся поверхностей, чистотой обработки контактирующих материалов, Ом·Н; i - показатель, характеризующий количество точек контакта на поверхности поршневого кольца и гильзы цилиндров (принимается для ЦПГ $i=0,7...1$).

В этом случае зависимость модуля упругости от значения ЭДС:

$$E = E_M \left(1 - 1,97 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{\epsilon}{R} \right)^2 \right) \quad (16)$$

Тогда выражение (12) примет вид:

$$I_h = \frac{0,247 v S_M \gamma_1^{\frac{1}{3}} \gamma_2^{\frac{1}{3}} \left[E_M \left(1 - 1,97 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{\epsilon}{R} \right)^2 \right) \right]^{\frac{2}{3}} [2\delta(1-\mu_1^2)]^{\frac{2}{3}} \rho_H^{\frac{2}{3}}}{\chi_{SH} (E_1 E_2)^{\frac{2}{3}} L} \quad (17)$$

Исходя из полученной аналитической зависимости видно, что с увеличением модуля упругости будет наблюдаться уменьшение износа деталей ЦПГ. Это заключение подтверждает, что появление ЭДС приводит к снижению модуля упругости и увеличению износа, поэтому в ЦПГ необходимо снизить величину ЭДС, что приведет к снижению износа и увеличению ресурса работы трущихся поверхностей.

Результаты

Для подтверждения полученных аналитических закономерностей проведены теоретические исследования влияния ЭДС на износ трущихся пар. Используя формулы (15) и (16) для расчета, было установлено следующее (рис. 1).

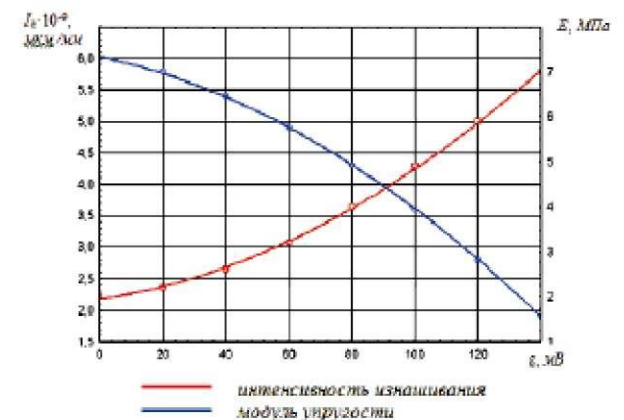


Рис. 1. Изменение интенсивности износа (I_h) от изменения величины ЭДС (ϵ) и величины модуля упругости (E)

Установлено, что изменение величины модуля упругости материала ЦПГ от величины ЭДС подчиняется полиномиальному закону второй степени:

$$E = 6,0292 - 0,0106\epsilon - 0,0001\epsilon^2$$

Величина достоверности аппроксимации при этом составляет $R = 0,993$.

С увеличением величины ЭДС наблюдается снижение модуля упругости материалов ЦПГ. Так, при отсутствии ЭДС модуль упругости составляет 6 МПа, при увеличении ЭДС до 140 мВ модуль упругости материала снизился в 3,3 раза и составил 1,8 МПа.

Изменение интенсивности износа сопряжения ЦПГ от изменения величины ЭДС также подчиняется полиномиальному закону второй степени:

$$I_h = 1,95 + 0,102E + 0,0002E^2.$$

Величина достоверности аппроксимации при этом составляет $R = 0,995$.

С увеличением величины ЭДС наблюдается увеличение интенсивности износа сопряжений ЦПГ. При отсутствии ЭДС интенсивность износа составляет $2,2 \cdot 10^{-9}$ мкм/мм, при увеличении ЭДС до 140 мВ интенсивность износа увеличилась в 3,2 раза и составила $7 \cdot 10^{-9}$ мкм/мм.

Обсуждение

Все ранее известные научные работы исследования возникновения ЭДС в сопряжениях ДВС и ее влияния на ресурс работы трущихся пар ограничивались лишь распределением материалов трущихся деталей в пределах ряда Вольты, т.е. с точки зрения энергии электронных уровней. Этот подход, к сожалению, не позволяет объяснить изменение

интенсивности износа в парах трения. В результате затрудняется не только описание факторов и параметров, приводящих к увеличению интенсивности износа, но и выбор методов её снижения.

Предлагаемое теоретическое обоснование на основе влияния разности потенциалов (ЭДС) на физические и эксплуатационные свойства материалов трущихся пар может быть использовано для расчета интенсивности износа деталей ЦПГ при различных физических свойствах материала, геометрических параметров поверхностей трения деталей и нагрузочно-скоростных условиях их работы. Использование установленных аналитических зависимостей позволяет не только определять величину ЭДС, но и степень ее влияния на величину износа и ресурс работы любых деталей в сопряжениях ДВС.

Заключение

Теоретически обосновано, что при работе ДВС возникающая в его сопряжениях ЭДС приводит к снижению модуля упругости материала трущихся поверхностей в 3,3 раза. В результате это приводит к увеличению интенсивности износа рабочих поверхностей в 3,2 раза, а соответственно, и к снижению ресурса работы как самого ДВС, так и самоходной машины.

Литература

1. Гаркунов Д. Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника. М.: КноРус, 2013. 408 с.
2. Рыжкин А. А., Бурлаков В. Э. Об электрических явлениях при трении // Вестник ДГТУ. 2011. Т.11. № 9 (60) С. 1564–1573.
3. Минимизация утечек топлива в изношенных плунжерных парах смещением зон износа / В. Н. Гаврилов, А. М. Новиков, А. В. Семенов и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. № 4 (56). С. 49-53. doi: 10.12737/2073-0462-2020-49-53.
4. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
5. Подмастерьев К. В. Состояние и инструментальное обеспечение электрических методов мониторинга узлов трения // Известия ТулГУ: Технические науки. 2012. № 7.С. 221–234.
6. Теоретическое обоснование оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания по величине суммарной ЭДС в парах трения / И. Р. Салахутдинов, А. А. Глушченко, Д. Е. Молочников и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 1(61). С. 90-95. doi:10.12737/2073-0462-2021-90-95. EDN JVICUY.
7. The results of studying the EMF emergence in friction pairs of power machines / I. Salakhutdinov, D. Molochnikov, A. Glushchenko et al. // E3S Web of Conferences : 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021, Rostov-on-Don, 24–26 февраля 2021 года. Vol. 273. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2021. P. 07034. doi: 10.1051/e3sconf/202127307034. EDN XXQXCN.
8. Верещагин М. Н., Шепелевич В. Г., Остриков О. М. Негомогенная пластическая деформация аморфных сплавов на основе железа: ГТУ им. П. О. Сухого, 2004. 134 с.
9. Рыжкин А. А., Бурлаков В. Э. Трибоэлектрические явления и износ инструментальных материалов // Вестник ДГТУ. 2011. Т.11. № 10 (61). С. 1831–1842.
10. Влияние внешней среды на износ твердых сплавов / А. А. Рыжкин, А. И. Боков, В. В. Зотов и др. Вестник ДГТУ. 2010. Т.10. № 1 (44). С. 112–120.
11. Классификация технологий упрочнения, нанесения покрытий и восстановления деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей / С.Н. Шарифуллин, Н.Р. Адигамов, П.А. Тополянский и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. № 3 (54). С. 128-132. doi: 10.12737/article_5db9737337f839.90239250.
12. Контактная разность потенциалов легированной стали после термической обработки / Л. П. Арефьева, А. Г. Сукиязов, Ю. В. Долгачев и др. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2020. Vol. 20. No. 3. P. 289-294. doi:10.23947/2687-1653-2020-20-3-289-294

13. Эволюция кривизны кристаллической решетки в металлических материалах на мезо- и наноструктурных уровнях пластической деформации / А. Н. Тюменцев, И. А. Дитенберг, А. Д. Коротаев и др. // Физическая мезомеханика. 2013. Т. 16. №3. С.63-79.
14. Халиуллин Ф. Х., Ахметзянов И. Р. Оценка предельной наработки двигателя по величине компрессии в цилиндре // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. № 1 (39). С. 96-98. doi: 10.12737/19334.
15. Оценка трибологических характеристик системы кольцо/гильза при дезактивации цилиндра с учетом деформации гильзы цилиндра и подачи масла / Ю. Лу, К. Лю, Ю. Чжан // PLoS ONE. 2018. Vol. 13. No. 9. P. e0204179. doi:10.1371/journal.pone.0204179.
16. The feasibility of determining the condition of friction units of engines by the EMF magnitude / I. Salakhutdinov, D. Molochnikov, A. Glushchenko et al. // E3S Web of Conferences : 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021, Rostov-on-Don, 24–26 февраля 2021 года. Vol. 273. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2021. P. 07033. doi: 10.1051/e3sconf/202127307033. – EDN XBJPSE.
17. Методы повышения маслоемкости поверхности трения гильз цилиндров / Р. Р. Шайхутдинов, Х. С. Фасхутдинов, М. Х. Фасхутдинов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2010. № 2 (16). – С. 120-121.
18. Shuster L. Sh. and other. Self-Organization During Friction. Advanced Surface-Engineered Materials and Systems Design / edited by German S. Fox-Rabinovich, George E. Totten. Taylor & Francis, 2006. 458 p.
19. Zhilyaev A. P., Langdon T. G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications // Progress in Materials Science. 2008. Vol. 53. P. 893-979.
20. The role of hydrostatic pressure in Severe Plastic Deformation / M. Zehetbauer, H. P. Stilwe, A. Vorhauer // Nanomaterials by Severe Plastic Deformation: Fundamentals - Processing - Applications. Proc. 2nd International Conference. Vienna: J.Wiley VCH Weinheim. 2004. P.435-446.

References

1. Garkunov, D. N. Tribotechnics. / D.N. Garkunov, E.L. Melnikov, V.S. Gavriluk M.: KnoRus, 2013.408 p.
2. Ryzhkin A.A., Burlakov V.E. On electrical phenomena during friction // Vestnik of DSTU. 2011. V.11. No. 9 (60) P. 1564–1573.
3. Minimizing fuel leaks in worn plunger pairs by shifting wear zones / V.N. Gavrilov, A.M. Novikov, A.V. Semenov et. al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2019. No. 4 (56). P. 49-53. doi: 10.12737/2073-0462-2020-49-53.
4. Myshkin N. K., Petrokovets M. I. Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology. M.: FIZMATLIT, 2007. 368 p.
5. Podmasterev K.V. Condition and instrumental support of electrical methods for monitoring friction units // Izvestiya of Tula State University: Technical Sciences. 2012. No. 7. P. 221–234.
6. Theoretical justification for assessing the technical condition of an internal combustion engine by the value of the total EMF in friction pairs / I. R. Salakhutdinov, A. A. Glushchenko, D. E. Molochnikov, et. al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2021. Vol. 16. No. 1(61). P. 90-95. doi:10.12737/2073-0462-2021-90-95. EDN JVJCUY.
7. The results of studying the EMF emergence in friction pairs of power machines / I. Salakhutdinov, D. Molochnikov, A. Glushchenko, et al. // E3S Web of Conferences: 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021, Rostov-on-Don, February 24–26, 2021. Vol. 273. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2021. P. 07034. doi: 10.1051/e3sconf/202127307034. EDN XXQXCN.
8. Vereshchagin M. N., Shepelevich V. G., Ostrikov O. M. Non-homogeneous plastic deformation of amorphous iron-based alloys: GSTU named after P. O. Sukhoi, 2004. 134 p.
9. Ryzhkin A. A., Burlakov V. E. Triboelectric phenomena and wear of tool materials // Vestnik of DSTU. 2011. Vol.11. No. 10 (61). P. 1831–1842.
10. The influence of the external environment on wear of hard alloys / A. A. Ryzhkin, A. I. Bokov, V. V. Zotov et. al. // Vestnik of DSTU. 2010. Vol.10. No. 1 (44). P. 112–120.
11. Classification of technologies for hardening, coating and restoration of parts of fuel equipment of diesel engines / S.N. Sharifullin, N.R. Adigamov, P.A. Topolyanskiy et. al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2019. No. 3 (54). P. 128-132. doi: 10.12737/article_5db9737337f839.90239250.
12. Contact potential difference of alloy steel after heat treatment / L. P. Arefieva, A. G. Sukiyazov, Yu. V. Dolgachev, et. al. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2020. Vol. 20. No. 3. P. 289-294. doi:10.23947/2687-1653-2020-20-3-289-294
13. Evolution of crystal lattice curvature in metallic materials at meso- and nanostructural levels of plastic deformation / A. N. Tyumentsev, I. A. Ditenberg, A. D. Korotaev, et al. // Physical mesomechanics. 2013. Vol. 16. No. 3. P.63-79.
14. Khaliullin F. Kh., Akhmetzyanov I. R. Estimation of the maximum operating time of the engine by the amount of compression in the cylinder // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2016. No. 1 (39). P. 96-98. doi:10.12737/19334.

4.2.5. Разведение, селекция, генетика и биотехнология животных (сельскохозяйственные науки)

15. Assessment of tribological characteristics of the ring/liner system in case of cylinder deactivation, taking into account the deformation of the cylinder liner and oil supply / Y. Lu, K. Liu, Y. Zhang // PLoS ONE. 2018. Vol. 13.No. 9. P. e0204179. doi:10.1371/journal.pone.0204179.

16. The feasibility of determining the condition of friction units of engines by the EMF magnitude / I. Salakhutdinov, D. Molochnikov, A. Glushchenko, et al. // E3S Web of Conferences: 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021, Rostov-on-Don, February 24–26, 2021. Vol. 273. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2021. P. 07033. doi: 10.1051/e3sconf/202127307033. EDN XBJPSE.

17. Methods for increasing the oil absorption capacity of the friction surface of cylinder liners / R. R. Shaikhutdinov, Kh. S. Faskhutdinov, M. Kh. Faskhutdinov // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2010. No. 2 (16). P. 120-121.

18. Shuster L. Sh. and others. Self-Organization During Friction. Advanced Surface-Engineered Materials and Systems Design / edited by German S. Fox-Rabinovich, George E. Totten. Taylor & Francis, 2006. 458 p.

19. Zhilyaev A. P., Langdon T. G. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications // Progress in Materials Science. 2008. Vol. 53. P. 893-979.

20. The role of hydrostatic pressure in Severe Plastic Deformation / M. Zehetbauer, H. P. Stilwe, A. Vorhauer // Nanomaterials by Severe Plastic Deformation: Fundamentals - Processing - Applications. Proc. 2nd International Conference. Vienna: J. Wiley V. C. H. Weinheim. 2004. P.435-446.