

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-28-35



УДК 621.793.79

05.02.07 – Технология и оборудования механической и физико-технической обработки

**ФАКТОРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ
ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОЦЕНКИ
ОПТИМАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА
ДЕТАЛЯХ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ
ГРУППЫ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Аль-Бдейри Махмуд Шакир Хассан

аспирант научно-исследовательской лаборатория технологических систем Белгородского государственного национального исследовательского университета, РФ

Красильников Владимир Владимирович
доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий Белгородского государственного национального исследовательского университета, РФ.

✉¹**Кадырметов Анвар Минирович**

д.т.н., зав. кафедрой машиностроительных технологий Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г. Ф. Морозова (РФ) e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Сергеев Сергей Валерьевич

аспирант научно-исследовательской лаборатория технологических систем Белгородского государственного национального исследовательского университета, РФ.

Аннотация.

Предлагается технология создания теплозащитных износостойких покрытий на поверхности деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) из сплава АК12ММгН с помощью гальваноплазменной модификации микродугового оксидирования. С этой целью проведен полный трехфакторный эксперимент типа 2^3 в форме полуреplik нанесения покрытий. Установлены зависимости толщины, микротвердости, износостойкости и пористости гальваноплазменного покрытия от технологических параметров про-

**FACTOR PLANNING OF AN
EXPERIMENT FOR ESTIMATING
THE OPTIMAL PROPERTIES OF
HEAT PROTECTIVE COATINGS ON
DETAILS OF A CYLINDER-PISTON
GROUP OF DIESEL ENGINES**

Al-Bdeiri Mahmud Shakir Hassan post-graduate student, research laboratory of technological systems, Belgorod state national research university, RF

Krasilnikov Vladimir Vladimirovich
doctor of technical sciences, professor, department of materials science and nanotechnology, Belgorod state national research university, RF.

✉¹**Kadirmetov Anvar Minirovich**

doctor of tech. sc., professor head. department of engineering technologies, of the department of mechanical engineering technologies of the Voronezh state forestry university named after G. F. Morozov (RF) e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

Sergeev Sergei Valerevich

postgraduate student, research laboratory of technological systems, Belgorod state national research university, RF

Annotation.

A technology is proposed for creating heat-protective wear-resistant coatings on the surface of CPG parts made of AK12MMgN alloy using galvanoplasma modification of microarc oxidation. For this purpose, a complete three-factor experiment of type 2^3 was carried out in the form of semi-replicas of coating deposition. The dependences of the thickness, microhardness, wear resistance and porosity of the galvanoplasma coating on the technological parameters of the process have been established.

цесса. Данная технология представляется эффективной, поскольку она уменьшает расход топлива на 5-7 % и увеличивает мощность двигателя на 8 % при обеспечении оптимальных свойств теплозащитного слоя.

This technology appears to be effective as it reduces fuel consumption by 5-7 % and increases engine power by 8 % while ensuring optimal properties of the heat-shielding layer.

Ключевые слова: ЦИЛИНДРОПОРШНЕВАЯ ГРУППА, ГАЛЬВАНОПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ, ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ИЗНОСОСТОЙКОЕ ПОКРЫТИЕ, ПОЛНЫЙ ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ДИСПЕРСИЯ, КРИТЕРИЙ ФИШЕРА, РЕГРЕССИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ.

Keywords: CYLINDER-PISTON GROUP, GALVANIC-PLASMA MODIFICATION, HEAT-PROTECTIVE WEAR RESISTANT COATING, FULL FACTORIAL EXPERIMENT, DISPERSION, FISHER'S TEST, REGRESSION EQUATIONS.

¹Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В процессе эксплуатации дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) материал поршня подвергается значительным термоциклическим воздействиям теряя свои прочностные свойства, приводящее к большим теплотерям в камере сгорания и снижению КПД двигателя [1-4].

Несмотря на многообразие методов, методик, предлагаемых для решения этих проблем, вопрос о разработке новых подходов остается открытым.

В данной работе предлагается технология для создания теплозащитных покрытий на днище поршня методом гальваноплазменной модификации поверхности (ГПМ) [5], являющаяся развитием метода микродугового оксидирования. В результате расчетов и экспериментальных исследований установлено, что нанесение теплозащитного покрытия на днище поршня и его жаровом поясе уменьшает расход топлива на 5-7 % и увеличивает мощность двигателя на 8 % при обеспечении оптимальных свойств теплозащитного слоя [6].

2 Материалы и методы

Эксперимент типа 2^3 имел форму полу-репликации полного факторного эксперимента [7-9], т. е. был основан на варьировании трех факторов на двух уровнях. Таким образом, всего проводилось $2^3 = 8$ экспериментов. Рассматриваемыми технологическими факторами, участвующими во всех возможных сочетаниях уровней, были: Z_1 – концентрация едкого калия КОН; Z_2 – концентрация метасиликата натрия (жидкого стекла Na_2SiO_3); Z_3 – емкость батареи конденсаторов (мкф).

Перечень технологических факторов Z_i , их нормированных значений x_i ($i = 1, 2, 3$), интервалы их варьирования представлены в таблице 1. Состав и концентрации электролита варьиро-

Таблица 1 – Факторы эксперимента

Факторы	Кодовое обозначение	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень	Интервал варьирования
концентрация едкого калия (КОН)	Z_1	6,4	9	7,7	1,3
концентрация метасиликата натрия (Na_2SiO_3)	Z_2	5	10	7,5	2,5
емкость конденсаторов (мкф)	Z_3	700	900	800	100
$x_1 = (z_1 - 7,7)/1,3 = 0,769z_1 - 5,923$, $x_2 = (z_2 - 7,5)/2,5 = 0,4z_2 - 3$, $x_3 = (z_3 - 800)/100 = 0,01z_3 - 8$					

вались с целью выяснения влияния легирующих элементов на износостойкость покрытий.

Для предотвращения коррозии или травления поверхности образцы погружались в электролит непосредственно перед обработкой. В течение времени нанесения покрытия в электролите от 90 до 120 минут покрытия были нанесены при двух емкостях конденсаторов: 500 мкф и 700 мкф.

Поддержание постоянной плотности тока обеспечивалось постепенным увеличением входного напряжения между анодом и катодом, так как при увеличении толщины покрытия проводимость оксидной пленки уменьшалась. Для каждого образца регистрировалось изменение напряжения в зависимости от времени обработки.

3 Результаты исследований

При двух различных концентрациях щелочно-силикатного раствора получились две группы покрытий ГПМ. Для каждого состава электролита наносились покрытия при двух различных плотностях тока в двух режимах: анодном и конденсаторном, что в итоге дало 8 образцов (см. табл. 2).

Данные экспериментов по нанесению покрытий анализировались с помощью программного обеспечения IBM SPSS Statistics 23 в два этапа: сначала получали информацию о механических и физических свойствах поверхности покрытия (толщина y_1 , (мкм), средняя пористость y_2 в %, и микротвердость y_3 (ГПа)), затем получали трибологические результаты (интенсивность износа). Все значения полученных параметров сведены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства ГПМ покрытий, сформированных на подложках из сплава АК12ММгН

Образцы	Значения нормированных факторов			Результаты экспериментов			
	x_1	x_2	x_3	Толщина y_1 , мкм	средняя пористость y_2 , %	микротвердость y_3 , ГПа	Интенсивность износа $v \cdot 10^{-5}$, мм ³ /м
A1	1	1	1	200	10.5	7.4	35,12
A2	0	1	1	120	8.41	7.8	28,44
C1	1	0	1	50	2.12	10.3	58,78
C2	0	0	1	30	3.74	5.77	98,72
M1	1	1	0	180	1.99	17	10.4
M2	0	1	0	110	7.71	7.7	25,44
K1	1	0	0	70	5.15	9.4	90,12
K2	0	0	0	80	5.6	8.8	102,6

Проверка адекватности полученной линейной модели производилась с помощью критерия согласия Фишера F [10]:

$$F_{\text{набл}} = S_{\text{ост}}^2 / S_y^2, \quad (1)$$

где $S_{\text{ост}}^2$ – остаточная дисперсия, S_y^2 – дисперсия воспроизводимости;

$$S_y^2 = \frac{n}{m-r} \sum_{j=1}^8 (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2, \quad (2)$$

где m – количество повторений каждого опыта, n – количество опытов (количество образцов), r – число независимых параметров (число факторов), \tilde{y}_j – расчетное значение параметра выхода, \bar{y}_j – его среднее значение.

Как известно из работы [11], критерий согласия Фишера состоит в выполнении неравенства

$$F_{\text{набл}} < F_{\text{таб}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{таб}}$ – табличное значение критерия Фишера [11], выбираемое по определенному значению риска β для заданных степеней свободы.

Математическая модель является линейной и описывается полиномом первой степени [12]

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (4)$$

где коэффициенты $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$, вычисляются с помощью эмпирических данных по известным формулам:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_j^n \bar{y}_j, \quad b_i = \frac{1}{n} \sum_j^n x_{ij} \cdot \bar{y}_j, \quad b_{im} = \frac{1}{n} \sum_j^n x_{ij} \cdot x_{jm} \cdot \bar{y}_j,$$

где $x_i = \pm 1$ – кодированные значения переменной; $n = 8$ – количество опытов; x_{ij} – значение i -го фактора в j -м опыте.

Параметры ГПМ-слоя на сплаве АК12ММГН сведены в таблице 3.

Таблица 3 – Дисперсии параметров ГПМ – покрытий на сплаве АК12ММГН

№ опыта	Толщина ($S = y_1$), мкм		Средняя пористость ($\rho = y_2$), %		Микротвердость ($H = y_3$), ГПа		Интенсивность изнашивания $v \cdot 10^{-5}$ (W), мм ³ /м	
	среднее	$S_{y_1}^2$	среднее	$S_{y_2}^2$	среднее	$S_{y_3}^2$	среднее	S_W^2
1	200	1,05	10,5	0,57	7,4	1	35,12	1,01
2	120	10	8,41	1,93	7,8	0,64	28,44	1,49
3	50	2,5	2,12	0,86	10,3	1,73	58,78	1,73
4	30	2,5	3,74	0,37	5,77	0,003	98,72	1,04
5	180	5	1,99	0,50	17	3,24	10,4	0,58
6	110	15	7,71	1,77	7,7	1,93	26,44	0,60
7	70	4	5,15	1,57	9,4	5,76	90,12	1,02
8	80	17,5	5,6	0,85	8,8	2,19	102,6	1,36
Сумма		57,5	Сумма	8,529	Сумма	16,49	Сумма	8,85
Средняя дисперсия S_y^2		7,19		1,066		2,062		1,1
Остаточная дисперсия, $S_{\text{ост}}^2$		6,3		2,209		5,77		3,1
$F_{\text{набл}}$		0,88		2,07		2,8		2,82
$F_{\text{таб}}$		3,63		3,63		3,63		3,63
Результаты	$F_{\text{набл}} < F_{\text{таб}}$		$F_{\text{набл}} < F_{\text{таб}}$		$F_{\text{набл}} < F_{\text{таб}}$		$F_{\text{набл}} < F_{\text{таб}}$	

Значение $F_{\text{таб}}$ выбиралось для числа степеней свободы $r - 1 = 2$ и значения риска $\beta = 0,05$.

Регрессионные уравнения типа (4), полученные с помощью экспериментальных данных, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} S &= 65 + 5x_1 + 50x_2 - 10x_3 - 12x_1x_2 - 10x_1x_3 + 9.69x_2x_3 + 11.56x_1x_2x_3 \\ \rho &= 5.65 - 0.78x_1 + 0.5x_2 + 0.83x_1x_3 + 1.76x_2x_3 + 1.12x_1x_2x_3 \\ H &= 9,25 + 1,75x_1 + 0,7x_2 - 1,45x_3 - 0,75x_1x_3 - 0,9x_2x_3 - 1,7x_1x_2x_3 \\ W &= 56.2 - 7.6x_1 - 31.35x_2 - 0.93x_3 + 5.5x_1x_2 + 0.717x_1x_3 + \\ &\quad + 7.86x_2x_3 + 6.147x_1x_2x_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для визуального представления областей оптимальных настроек факторов, управляющих технологическими параметрами процесса, построены 3D графики. С помощью них предсказываются отклики в любой зоне экспериментальной области. Влияние значений факторов проявляется в том, что увеличение технологических параметров приводит к изменению результатов физических и топологических свойств покрытий (толщины покрытия, пористости, а также твердости и скорости износа).

На рисунках 1, 2 представлены 3D графики поверхности отклика для толщины покрытия

относительно различных концентраций едкого калия (KOH) и метасиликата натрия (Na_2SiO_3) при постоянных значениях емкости конденсатора 500 мкФ и 700 мкФ, соответственно.

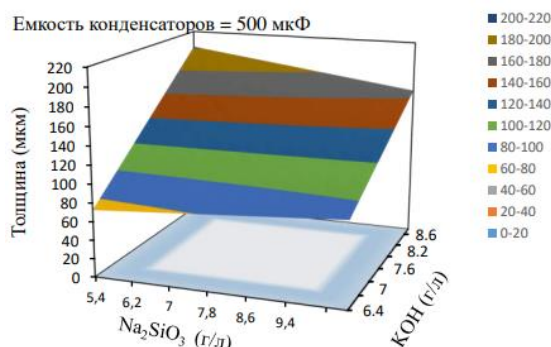


Рисунок 1 – Поверхность отклика, отображающая влияние технологических параметров на толщину ГПМ покрытия при емкости конденсаторов 500 мкФ

Из рисунков 1, 2 видно, что с увеличением концентрации KOH увеличивалась толщина покрытий, наносимых в различных режимах. При этом контроль осуществлялся измерением их толщин через каждые полчаса нанесения. Толщина, необходимая для восстановления головки поршня, составляет 100–200 мкм покрытия поверхности.

Рисунок 3 демонстрирует, что увеличение концентрации KOH приводит к более высокой пористости, а увеличение концентрации метасиликата натрия (Na_2SiO_3) приводит к снижению пористости. Так как для целей теплозащиты необходимо прочное покрытие с более высокой пористостью, то при минимальной пористости покрытия ~1,99 % и малом среднем размере пор 1,12 мкм, скорость роста покрытия и достижимые значения толщины покрытия отвечают заданным требованиям.

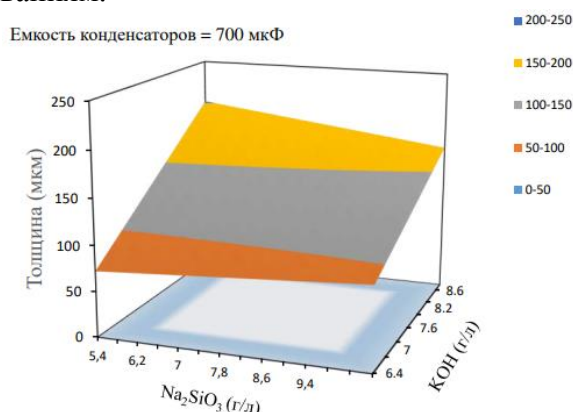


Рисунок 2 – Поверхность отклика, отображающая влияние технологических параметров на толщину ГПМ покрытия при емкости конденсаторов 700 мкФ

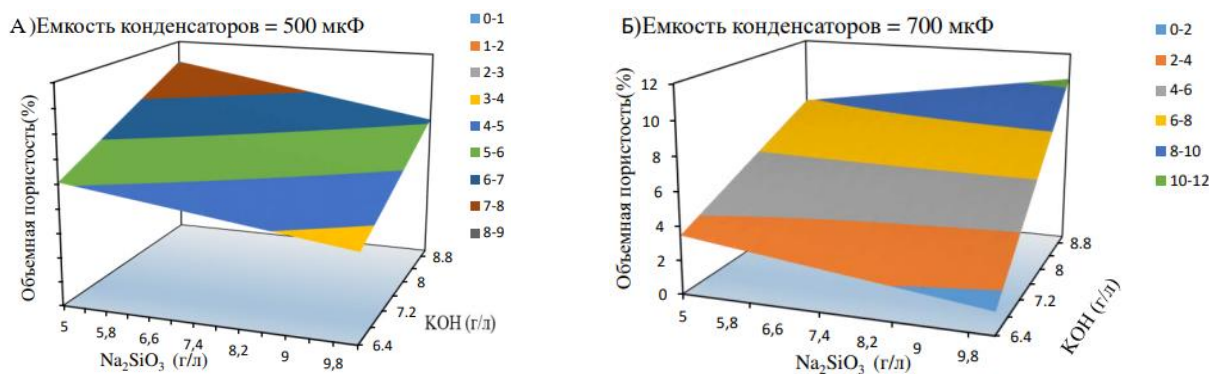
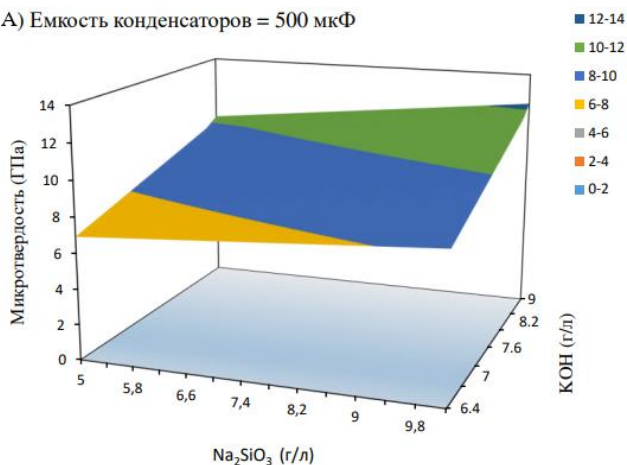


Рисунок 3 – Поверхности отклика, отображающие влияние взаимодействия технологических параметров на объемную пористость (%) ГПМ покрытия

Из рисунка 4 видно, что микротвердость слабо меняется в зависимости от концентрации метасиликата натрия (Na_2SiO_3), но она сильно зависит от концентрации едкого калия (KOH) и емкости конденсатора.

А) Емкость конденсаторов = 500 мкФ



Б) Емкость конденсаторов = 700 мкФ

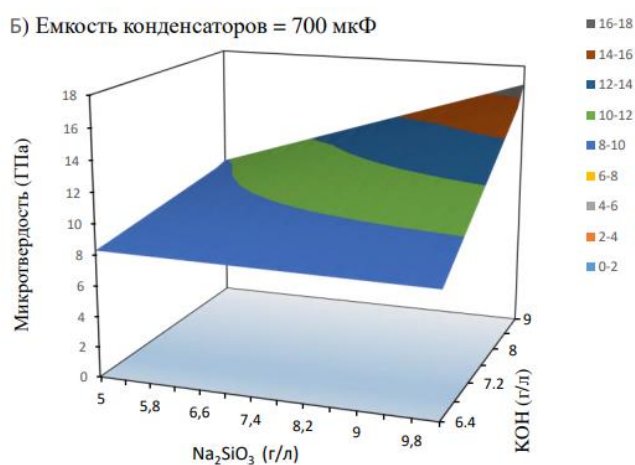
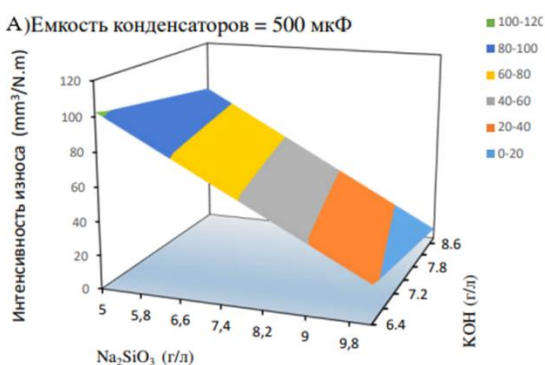


Рисунок 4 – Поверхности отклика, отображающие влияние взаимодействия технологических параметров на микротвердость ГПМ покрытия

Покрyтия ГПМ на образцах, обработанных при плотности тока, соответствующей емкости 700 мкФ, имеют более высокие значения микротвердости по сравнению с образцами, обработанными при плотности тока, соответствующей емкости 500 мкФ. Это связано с тем, что при больших скоростях окисления преимущественно растут фазы оксида алюминия, что приводит к появлению большего количества микротрещин и увеличению пористости. Это также свидетельствует о том, что изменения фазового состава в большей степени влияют на среднюю микротвердость, чем на пористость покрытий.

На рисунке 5 приведены поверхности отклика для интенсивности износа ГПМ покрытий, из которого видно, что интенсивность износа явно уменьшается с увеличением концентрации метасиликата натрия.

А) Емкость конденсаторов = 500 мкФ



Б) Емкость конденсаторов = 700 мкФ

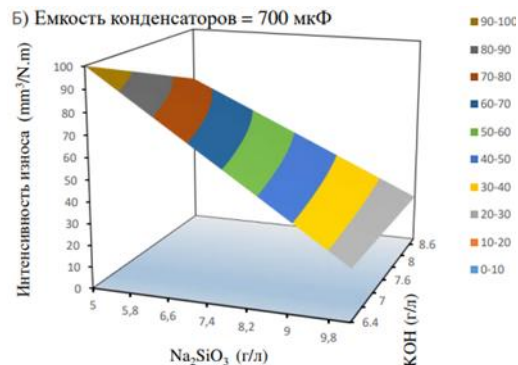


Рисунок 5 – Поверхности отклика, отображающие влияние взаимодействия технологических параметров на интенсивность износа ГПМ покрытия

4 Обсуждение и заключение

Таким образом, проведены факторные эксперименты типа 2^3 в форме полуреплик, определяющие зависимость основных свойств ГПМ покрытия (толщина, пористость, микротвердость, коэффициент трения, интенсивность износа) от технологических параметров процесса: емкостных характеристик технологического источника тока и концентрации элементов электролита, влияющих на процесс его формирования. Выявлен оптимальный состав электролита, состоящий из 6,4 г/л KOH и 10 г/л Na_2SiO_3 при конденсаторной емкости 500

мкФ, для которого получается ГПМ покрытие толщиной 150-300 мкм, с объемной пористостью менее 1 % и микротвердостью более 11 ГПа.

Предлагаемый метод нанесения ГПМ покрытий на детали ЦПГ дизельного ДВС позволяет получить теплозащитный слой, значительно понижающий расход топлива и повышающий КПД двигателя.

Применение данной технологии к другим материалам является весьма перспективным, так как ее реализация вполне доступна в машиностроительной индустрии.

Список литературы

1 Кадыров, С. М. Автомобильные и тракторные двигатели / С. М. Кадыров, С. Е. Никитин, А.Л. Ахметов // Москва : С, Мультимедийное изд-во Стрельбицкого, 2017. – 618 с.

2 Богуславский, А. К. Изучение структуры и свойств алюминиевого вторичного сплава для производства дизельных поршней / Богуславский А. К., Андрушевич А. А. // Молодые исследователи агропромышленного и лесного комплексов регионам, Том 2. Часть 1. Технические науки : Сборник научных трудов по результатам работы III международной молодежной научно-практической конференции. – Вологда-Молочное : ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, 2018. – С. 75-80.

3 Жуков, В. А. Влияние износа деталей цилиндропоршневой группы дизеля на температурное состояние поршня / В. А. Жуков, О. В. Мельник, Л. В. Тузов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. – Т.10 – №5. – С. 1040-1052. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1040-1052.

4 Дружинин, А. М. Модернизация двигателей внутреннего сгорания. Цилиндропоршневая группа нового поколения / Дружинин А. М. // М. – Вологда : Инфра – Инженерия, 2017. – 150 с.

5 Al-Bdeiri M. Sh. Kh. Review of methods of galvanic-plasma modification for the production of anodized coatings on aluminum alloys : microstructure, properties and application / Al-Bdeiri M. Sh. Kh. // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. – 2020. – Vol. 22. – №. 3. – pp. 51-59.

6 Аль-Бдейри, М. Ш. Выбор оптимальных технологических параметров при восстановлении теплозащитных гальваноплазменных покрытий для днища поршня из сплава АК12ММГН / М. Ш. Аль-Бдейри, С. В. Сергеев, Н. А. Дубровина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17, – С. 27-31.

7 Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский // М. : Наука, 1976. – 279с.

8 Мхитарян, В. С. Теория вероятностей и математическая статистика / Мхитарян В. С., Трошин Л. И., Адамова Е. В., Шевченко К. К., Бамбаева Н. Я. // М. : Издательский дом Университета "Синергия". 2012. – 336 с.

9 Хацкевич, Г. А. Теория вероятностей и математическая статистика [Электронный ресурс] : учебник / Г. А. Хацкевич, М. А. Матальцкий. // – Электрон. дан. Минск : Вышэйшая школа, 2017. – 591 с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/97306>.

10 Любченко, Е. А. Планирование и организация эксперимента : учебное пособие. Часть 1 / Е. А. Любченко, О. А. Чуднова // Владивосток : Изд-во ТГЭУ, 2010. – 156 с.

11 Володарский, Е. Т. Проверка однородности по критерию Фишера как дополнительный инструмент контроля при проверке условий повторяемости в исследуемых лабораториях / Е. Т. Володарский, Е. В. Козыр // Системи обробки інформації. – 2008. – №. 4. – С. 55-58.

12 Мухачев В. А. Планирование и обработка результатов эксперимента : учеб. пособие / В. А. Мухачев // Томск : Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 118 с.

References

- 1 Kadyrov S. M. Automotive and tractor engines / С. М. Кадиров, С. Е. Никитин, А. Л. Ахметов // Moscow: С, Strelbitsky Multimedia Publishing House, 2017. – 618 p.
- 2 Boguslavsky A. K. Study of the structure and properties of an aluminum secondary alloy for the production of diesel pistons / Boguslavsky A. K., Andrushevich A. A. // Young researchers of agroindustrial and forestry complexes in the regions, Volume 2. Part 1. Technical sciences : Collection of scientific papers based on the results of the III International Youth Scientific and Practical Conference. – Vologda-Molochnoe : FGBOU VO Vologda State Dairy Academy, 2018. – P. 75-80.
- 3 Zhukov V. A. The influence of wear of parts of the cylinder-piston group of a diesel engine on the temperature state of the piston / V. A. Zhukov, O. V. Melnik, L. V. Tuzov // Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov. 2018. –Vol. 10 – № 5. – pp. 1040-1052. DOI : 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1040-1052.
- 4 Druzhinin A. M. Modernization of internal combustion engines. Cylinder-piston group of a new generation / Druzhinin A. M. // M.-Vologda : Infra – Engineering, 2017. – 150 p.
- 5 Al-Bdeiri M. Sh. Kh. Review of methods of galvanic-plasma modification for the production of anodized coatings on aluminum alloys: microstructure, properties and application / Al-Bdeiri M. Sh. Kh. // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. – 2020. – Vol. 22. – №. 3. – pp. 51-59.
- 6 Al-Bdeiri M. Sh. Selection of the optimal technological parameters for the restoration of heat-shielding galvanoplasma coatings for the piston crown made of ak12mmgn alloy / M. Sh. Al-Bdeiri, Sergeev S. V., Dubrovina N. A. // Hardening technologies and coatings. – 2021. – Vol. 17, – pp. 27-31.
- 7 Adler, Yu. P. Planning an experiment in the search for optimal conditions / Yu. P. Adler, E V Markova, Yu. V. Granovsky // M. : Nauka, 1976. – 279 p.
- 8 Mkhitaryan V. S. Probability theory and mathematical statistics / Mkhitaryan V. S., Troshin L. I., Adamova E. V., Shevchenko K. K., Bambaeva N. Ya. // M. : Publishing House of the University of Synergy. 2012. – 336 p.
- 9 Khatskevich, G. A. Probability theory and mathematical statistics [Electronic resource] : textbook / G. A. Khatskevich, M. A. Matalytsky. // Electron. Dan. Minsk: Higher school, 2017. – 591 p. – Access mode : <https://e.lanbook.com/book/97306>.
- 10 Lyubchenko E. A. Planning and organizing an experiment : a tutorial. Part 1 / E. A. Lyubchenko, O. A. Chudnova // Vladivostok : TGEU Publishing House, 2010. – 156 p.
- 11 Volodarsky E. T. Checking homogeneity by Fisher's criterion as an additional control tool when checking the repeatability conditions in the laboratories under study / Volodarskiy E. T., Kozyr E. V. // Information processing systems. – 2008. – №. 4. – PP. 55-58.
- 12 Mukhachev V. A. Planning and processing of experiment results : textbook. allowance / V. A. Mukhachev // Tomsk : Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2007. – 118 p.

© Аль-Бдейри М.Ш.Х., Красильников В.В., Кадырметов А.М., Сергеев С.В., 2021