

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-12-20



УДК 62.843.6

05.02.07 – Технология и оборудования механической и физико-технической обработки

## **К ВОПРОСУ ОБ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЦПГ В ПРОЦЕССЕ НАНЕСЕНИЯ НА НИХ ПОКРЫТИЙ**

**Аль-Бдейри Махмуд Шакир Хассан**  
аспирант кафедры материаловедения и нанотехнологий НИУ «БелГУ»,  
г. Белгород, РФ

**Красильников Владимир Владимирович**  
доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий НИУ «БелГУ», г. Белгород, РФ

✉<sup>1</sup>**Кадырметов Анвар Минирович**  
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроительных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ  
e-mail: [kadyrmetov.a@mail.ru](mailto:kadyrmetov.a@mail.ru)

**Сергеев Сергей Валерьевич**  
кандидат технических наук, доцент, начальник НИЛ технологических систем НИУ «БелГУ», г. Белгород, РФ

### **Аннотация.**

Исследуется влияние давления пескоструйной обработки и объема глинозема на шероховатость подложки, изготовленной из сплава АК12ММгН, а также на шероховатость нанесенных после струйной очистки покрытий, полученных гальвано-плазменной модификацией ГПМ, и на адгезионную прочность этих покрытий. Установлено, что предлагаемая технология обработки поверхности деталей цилиндропоршневой группы дизельных двигателей (ЦПГ) внутреннего сгорания из сплава АК12ММгН как перед нанесением покрытий ГПМ, так и после их нанесения на вышеуказан-

## **TO THE QUESTION OF SURFACE TREATMENT OF CPG PARTS IN THE PROCESS OF APPLYING COATINGS ON THEM**

**Al'-Bdeyri Makhmud Shakir Khassan**  
graduate student of the department of materials science and nanotechnology of University of Scientific Research "Belgorod State University", Belgorod, RF

**Krasilnikov Vladimir Vladimirovich**  
doctor of technical sciences, professor of the department of materials science and nanotechnology of University of Scientific Research "Belgorod State University", Belgorod, RF

✉<sup>1</sup>**Kadyrmetov Anvar Minirovich**  
doctor of technical sciences, associate professor, head of machine-building technology department of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, RF  
e-mail: [kadyrmetov.a@mail.ru](mailto:kadyrmetov.a@mail.ru)

**Sergeyev Sergey Valerevich**  
candidate of technical sciences, associate professor, head of the scientific research laboratory of technological systems of Research University "Belgorod State University", Belgorod, RF

### **Annotation.**

The effect of the sandblasting pressure and the volume of alumina on the roughness of the substrate made of the AK12MMgN alloy, on the roughness of the deposited galvanic-plasma modification (GPM) coatings after blast cleaning, and on the adhesion strength of these coatings is investigate. It has been established that the proposed technology of surface treatment of cylinder-piston group (CPG) parts made of AK12MMgN alloy both before the application of GMG coatings and after their application to the above alloy makes it possible

ный сплав позволяет получить теплозащитный слой, приводящий к значительной экономии топлива в дизельных двигателях внутреннего сгорания. Эффективной представляется данная методика обработки поверхностей деталей ЦПГ дизельного двигателя до и после нанесения теплозащитных и износостойких покрытий, подтвержденная натурными и стендовыми испытаниями.

**Ключевые слова:** ЦИЛИНДРОПОРШНЕВАЯ ГРУППА, ГАЛЬВАНО-ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ, ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ, СТРУЙНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА, СРЕДНЯЯ ШЕРОХОВАТОСТЬ, КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ.

to obtain a heat-shielding layer, leading to significant fuel savings in diesel internal combustion engines. This method of treating the surfaces of the parts of a diesel engine CPG before and after applying heat-protective and wear-resistant coatings, confirmed by full-scale and bench tests, seems to be effective.

**Keywords:** CYLINDER-PISTON GROUP, GALVANIC-PLASMA MODIFICATION, HEAT-PROTECTIVE COATING, JET-ABRASIVE TREATMENT, AVERAGE ROUGHNESS, COEFFICIENT OF FRICTION.

<sup>1</sup>Автор для ведения переписки

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Развитие современного машиностроения во многом обусловлено проблемой экономии топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС). Поскольку на расход топлива влияют такие основные факторы, как температура в камере сгорания и тепловые напряжения на деталях цилиндропоршневой группы (ЦПГ), то существуют различные методы уменьшения влияния указанных факторов путем нанесения теплозащитных покрытий на поверхности элементов ЦПГ [1]. В этой связи одним из перспективных методов нанесения покрытий является метод гальвано-плазменной модификации (ГПМ) микродугового оксидирования (МДО) [2-4].

Технология формирования теплозащитных покрытий методом ГПМ, включает в себя технологию предварительной очистки поверхности сплава АК12ММgН, служащего подложкой, само формирование покрытия методом ГПМ и технологию финишной обработки детали с покрытием путем достижения необходимых характеристик точности и качества поверхности.

Кроме того, в случае ремонта изношенных деталей ЦПГ (рис. 1) до нанесения восстановительных покрытий требуется проводить обдув поверхности абразивным материалом, чтобы удалить нагары и мелкие дефекты поверхности, так как возникающая при этом шероховатость в



Рисунок 1 – Изношенный поршень перед подготовкой его поверхности покрытием ГПМ

последующей процедуре увеличивает толщину и улучшает теплозащитные свойства покрытий. Избавиться от нагара, трещин в днище поршня и сколов на поверхности поршня, возникших в течение эксплуатации ДВС, позволяет черновая пескоструйная обработка поверхностей перед нанесением покрытия с применением технологии ГПМ. Такая обработка способствует обеспечению высокой прочности на разрыв между покрытием и подложкой.

Целью настоящей работы является выяснить, каково влияние давления пескоструйной обработки и объема глинозема на шероховатость подложки, изготовленной из сплава АК12ММгН, а также на шероховатость нанесенных покрытий ГПМ после их струйной очистки, и на адгезионную прочность этих покрытий.

Данная задача оценки шероховатости поверхности очень актуальна для решения многих фундаментальных проблем, связанных с процессами изменениями параметров трения и изнашивания, контактной деформации, теплопроводности, электрической проводимости, герметичности контактных соединений и т. д. [5].

## 2 Материалы и методы

Величина шероховатости поверхности определяется многими технологическими факторами, такими как состав материала, зерновая структура, давление, угол и время струйной обработки, дистанция обработки, твердость обрабатываемой поверхности [6, 7]. Достижение высокого качества покрытия ГПМ с весьма высокой адгезией покрытия к подложке требует оптимизации параметров процесса и надлежащего контроля за ним.

При анализе характеристик поверхности используется множество различных величин, к числу которых относятся средняя шероховатость  $R_a$ , среднеквадратичная шероховатость  $R_q$ , перекося  $R_{sk}$  и др. [8, 9]. Среднеквадратичная шероховатость  $R_q$  описывает среднеквадратичное отклонение по отношению к базовой линии и связана с оптическими свойствами поверхности. Перекос  $R_{sk}$  характеризует симметрию распределения неровностей поверхности. При отрицательном перекося  $R_{sk} < 0$  на поверхности больше впадин и пор, а при положительном перекося  $R_{sk} > 0$  поверхность имеет больше выступов и меньше впадин [10]. Часто трибологические свойства поверхности в машиностроении нуждаются в отрицательном перекося, так как он обеспечивает лучшую заполняемость смазкой поверхности трения во впадинах шероховатости и, соответственно, смазывающую способность [11].

Для наших целей, связанных с нанесением теплозащитных покрытий на детали ЦПГ, важной характеристикой является средняя шероховатость  $R_a$ , поскольку от нее зависит коэффициент трения.

Предварительная очистка поверхности проводилась с помощью пескоструйной машины. Подложка из сплава АК12ММгН подвергалась струйно-абразивной обработке (САО) в течение разных периодов времени, изменяющихся от 30 до 180 с. При этом использовалась глиноземная крошка как более мелкая (стеклянная дробь размера  $400 \div 600$  мкм), так и более крупная (электрокорунд белый марки 25А размера  $600 \div 1100$  мкм). Параметры и размеры частиц пескоструйной обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры САО

№	Параметры	Описание
1	Давление струи, кПа	103,5; 138; 207, 2
2	Порошок абразивный	электрокорунд белый марки 25А / стеклянная дробь
3	Средний размер частиц	$600 \div 1100$ мкм / $400 \div 800$ мкм
4	Дистанция обработки	195 мм
5	Угол обработки	$90^0$
6	Время обработки	2 мин

### 3 Результаты исследований

Результирующая шероховатость поверхностей подложки из сплава АК12ММгН после струйной очистки является функцией времени, в течение которого производилась струйная очистка. Эта функция представлена на рисунке 2 для четырех комбинаций размера частиц  $D$  и давления струи  $P$ .

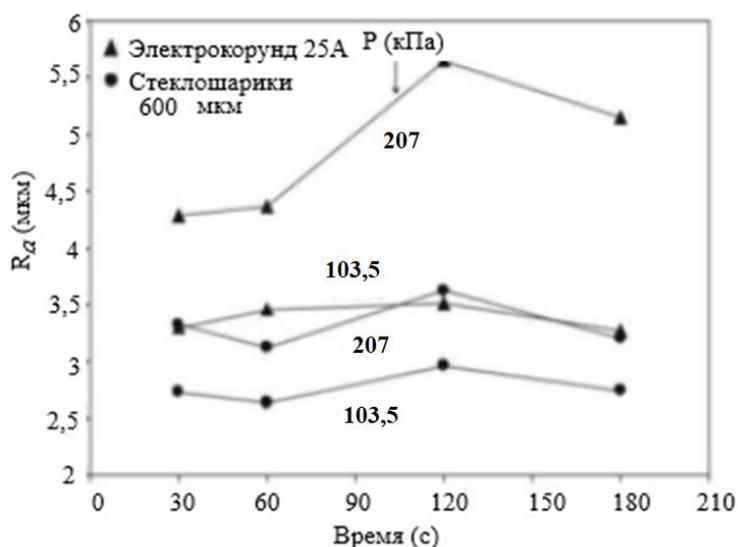


Рисунок 2 – Зависимости средней шероховатости поверхности от времени САО. Числа под (над) полигонами означают избыточное давление струи  $P$  (кПа)

Рисунок 2 показывает, что средняя шероховатость обработанной поверхности  $R_a$  существенно изменяется с увеличением времени обработки.

В результате экспериментов обнаружено, что если в процессе САО шероховатость поверхности увеличивается, то, независимо от значения  $R_a$  формирование нового микрорельефа происходит в течение первых  $50 \div 70$  с, а затем шероховатость практически не изменяется. При этом для всех четырех комбинаций  $P$  и  $D$ , представленных четырьмя линиями, значение  $R_a$  достигало максимального значения через 120 с. Это позволило все последующие эксперименты проводить до времени обработки 120 с, как указано в таблице 1.

На рисунке 3 показаны графики зависимости шероховатости от давления  $P$  воздуха на

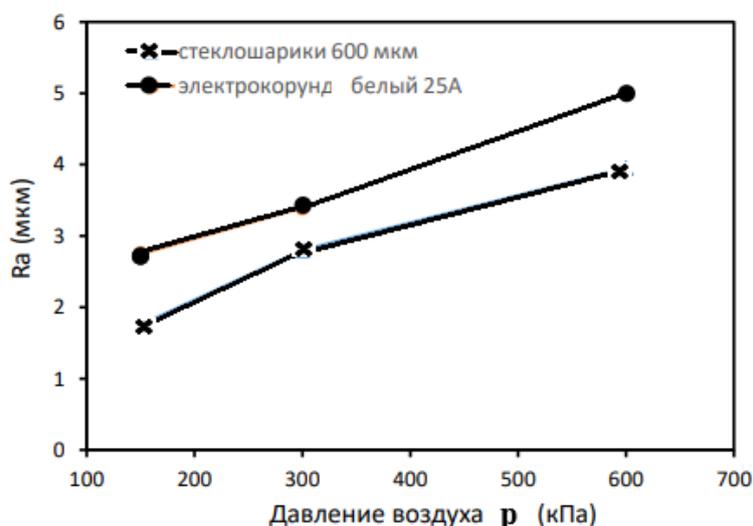


Рисунок 3 – Зависимость средней шероховатости поверхности от давления струи

входе в активное сопло. С увеличением  $P$  от 150 до 600 кПа значения  $R_a$  увеличиваются примерно на 80 ÷ 100 % независимо от размеров частиц абразива, причем в этом диапазоне давлений зависимости  $R_a$  от  $P$  носят практически линейный характер. Из рисунка 3 видно, что увеличение размера частиц при переходе от стеклянной дроби 400 ÷ 600 мкм к электрокорунду белому марки 25А 600 ÷ 1100 мкм увеличивает значение  $R_a$  при всех давлениях обработки на 25 ... 50 %.

Исследования показали, что зависимость шероховатости обработанной поверхности от размеров абразивных частиц является линейной (рис. 4).

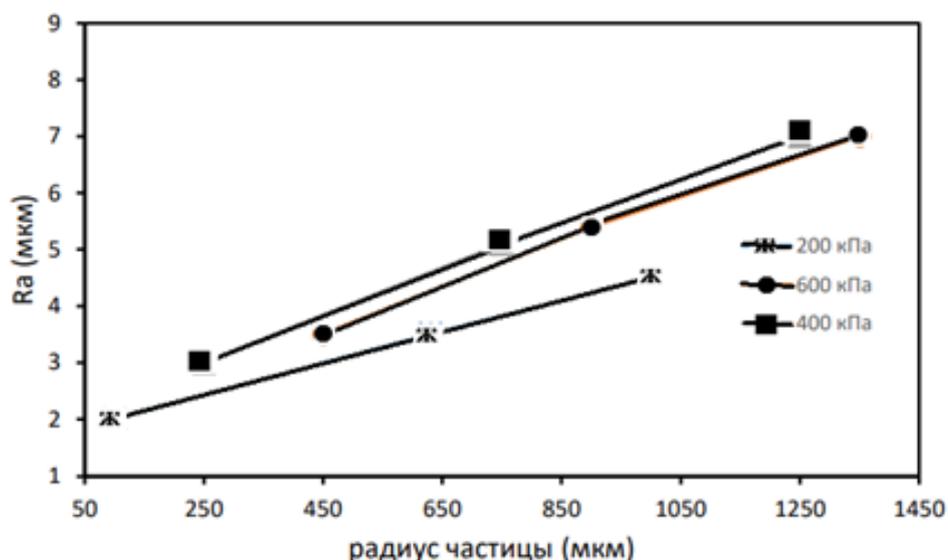


Рисунок 4 – Зависимости средней шероховатости поверхности от размеров абразивных частиц

С увеличением размера частиц абразивного материала высота микронеровностей резко возрастает, так как увеличиваются размеры лунок, оставляемых на обрабатываемой поверхности абразивными частицами. Это подтверждают профилограммы поверхностей, обработанных абразивными материалами различной зернистости. Профилограммы были получены с помощью портативного автономного прибора Surtronic 25. Измерение линейного профиля поверхности проводилось методом измерения вертикального отклонения, перемещающегося при минимальной нагрузке и постоянной скорости алмазного накопечника (щупа) в механическом контакте с образцом. Для каждого размера абразивных частиц существует максимальное (при данных условиях обработки) значение средней шероховатости поверхности. Значения средней шероховатости поверхности, которые получались в результате обработки абразивными материалами различной зернистости, лежат в пределах 0,03-6,35 мкм.

Влияние шероховатости поверхности ГПМ покрытий на их трибологические свойства было определено испытаниями образцов с ГПМ покрытием и без покрытия в течение 180 минут для трех различных значений шероховатости ( $R_a = 0,9; 2,1$  и  $3,2$ ). Результаты испытаний представлены зависимостями коэффициента трения от средней шероховатости, показанными на рисунке 5. Из рисунка видно, что наблюдаются два различных поведения образцов с ГПМ покрытием. Образцы К1, М0, С2, А2 обладают почти постоянным коэффициентом трения при увеличении средней шероховатости, что приемлемо для стабильной работы двигателя, в отличие от образцов С1, А1, К2, коэффициент трения которых при этом увеличивается. Последнее поведение будет раньше приводить к коррозии и, следовательно, выходу двигателя из строя.

С помощью рентгеноструктурного анализа установлено, что ГПМ покрытия образцов состоят из двух фаз: гамма оксида алюминия ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) и муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ). Фазовый состав образцов представлен в таблице 2.

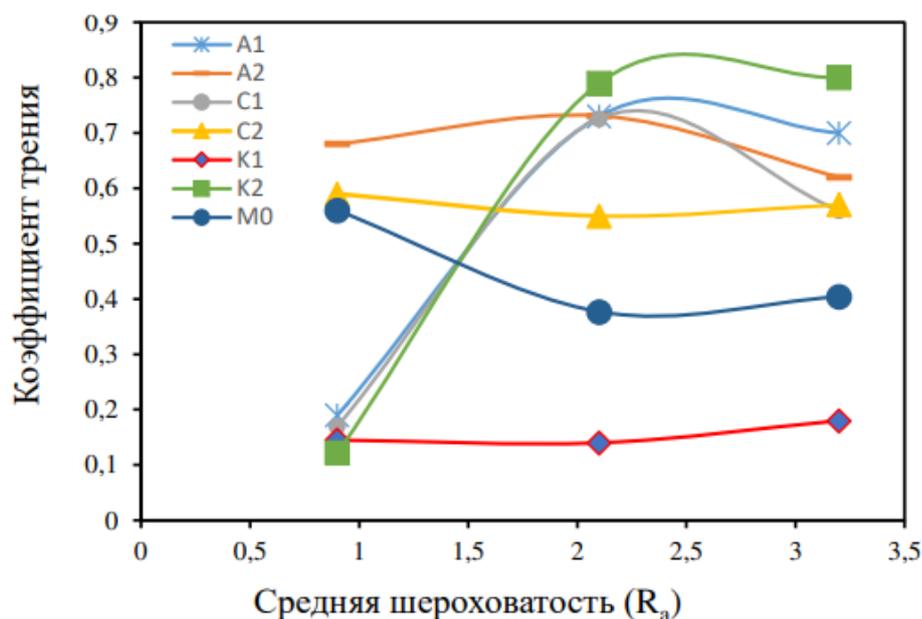


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента трения от средней шероховатости для семи образцов: образцы A1, A2, C1, C2, K1, K2 – с ГПМ покрытием, образец M0 – без покрытия

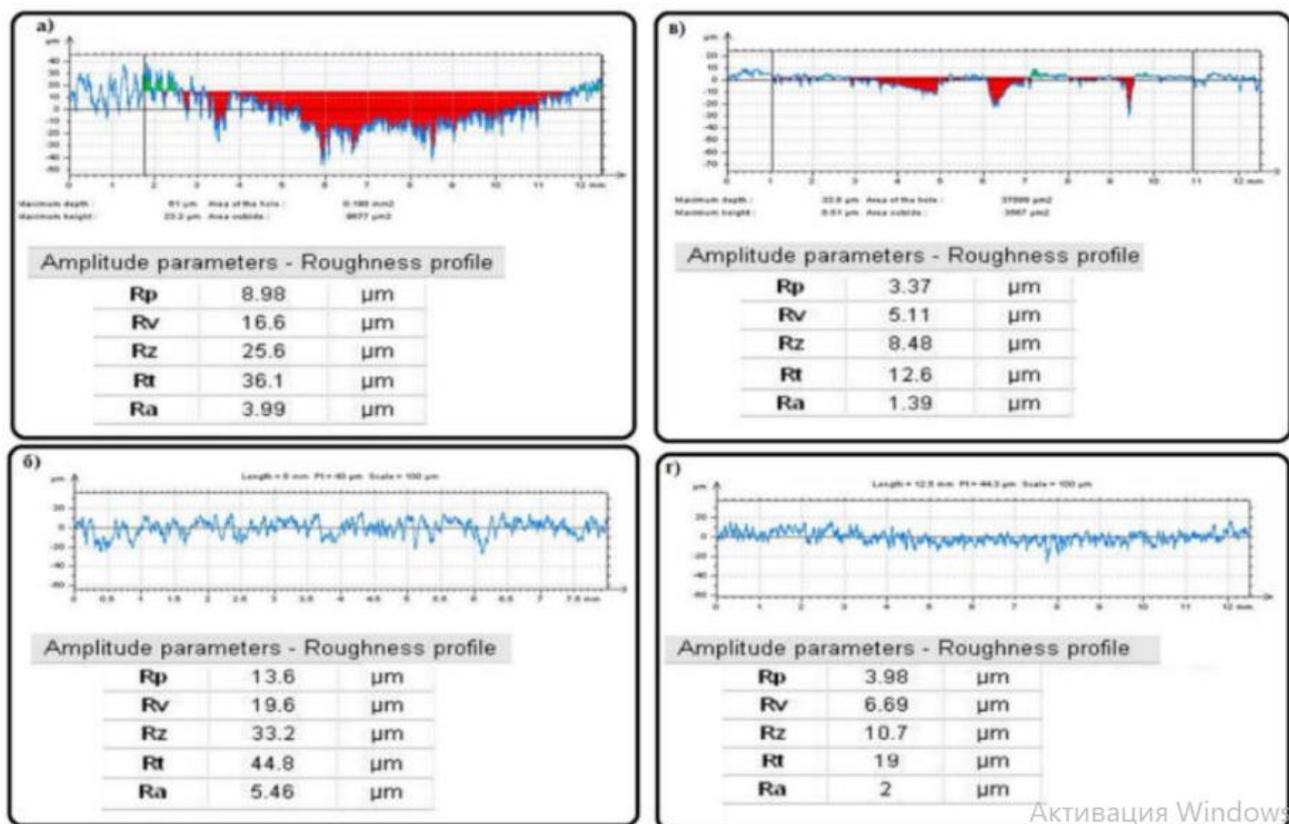
Таблица 2 – Фазовый состав ГПМ покрытий

Содержание фаз, мас.%					
Образец A1		Образец A2		Образец C1	
муллит	$\gamma$ -оксид алюминия	муллит	$\gamma$ -оксид алюминия	муллит	$\gamma$ -оксид алюминия
58,7	41,3	87	13	53,7	46,3
Образец C2		Образец K1		Образец K2	
муллит	$\gamma$ -оксид алюминия	муллит	$\gamma$ -оксид алюминия	муллит	$\gamma$ -оксид алюминия
66,3	33,7	59,8	40,2	74,2	25,8

Гамма-оксид алюминия состоит из слоев кубических плотноупакованных анионов кислорода с катионами алюминия в октаэдрических и тетраэдрических позициях [12-15].

В процессе экспериментальных исследований было установлено, что из всех благоприятных образцов оптимальным является образец C2, так как его износ после трибологических испытаний при температурах 25 °С (комнатная температура) и 250 °С (температура, сравнимая с эксплуатационной температурой в двигателе) не превышал уровень средней шероховатости поверхности без покрытия. Рисунок 6 демонстрирует параметры профиля шероховатости образца C2.

Для остальных образцов также измерены параметры профиля шероховатости. Оказалось, что максимальная глубина  $R_v$  впадины профиля и средняя шероховатость  $R_a$  образцов с покрытием на 50 % и более превышают аналогичные величины для образца M0.



а – след износа на образце М0 (подложка из сплава АК12ММгН);

б – профиль этого следа; в – след износа на покрытии образца С2; з – профиль этого следа

Рисунок 6 – Параметры профиля шероховатости образца С2

#### 4 Обсуждение и заключение

Предлагаемая технология обработки поверхности деталей ЦПГ из сплава АК12ММгН как перед нанесением ГПМ покрытий, так и после их нанесения на вышеуказанный сплав позволяет получить теплозащитный слой, приводящий к значительной экономии топлива в дизельных двигателях внутреннего сгорания, что обусловлено повышением износостойкости покрытия.

Внедрение данной технологии было проведено на поршнях дизельного ДВС Cummins серии КТА на предприятии АО «Черногорский ремонтно-механический завод», входящий в состав компании «СУЭК», на специализированном стенде и подтверждены протоколами испытаний. Эффективность теплозащитных и износостойких покрытий на поршнях дизельного двигателя была продемонстрирована путем натурных и стендовых испытаний, которые показали, что, например, часовой расход топлива в двигателях с поршнями, имеющими теплозащитное покрытие, снижается на 13 % по сравнению с использованием стандартных поршней.

Несомненно, что обозначенная выше технология обработки поверхности имеет большие перспективы при ее развитии использования на другие материалы.

#### Список литературы

1 Дорохов, А. Ф. Моделирование теплопередачи через стенку рабочего цилиндра поршневого ДВС и управление его напряженно-деформированным состоянием / А. Ф. Дорохов, Н. В. Пахомов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 1 (45). – С. 68-74.

2 Тихоненко, В. В. Метод микродугового оксидирования / В. В. Тихоненко, А. М. Шкилько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Материаловедение. – 2012. – 2/13 (56). – С. 13-18.

3 Тимошенко, А. В. Влияние наложенного переменного тока на состав и свойства оксидных покрытий, формируемых в микроплазменном режиме на сплаве Д16 / А. В. Тимошенко, Б. К. Опара, Ю. В. Магурова // Защита металлов. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 32-38.

4 Аль-Бдейри М. Ш. Х. Обзор методов гальвано-плазменной модификации для производства анодированных покрытий на сплавах алюминия : микроструктура, свойства и применение / Аль-Бдейри М. Ш. Х. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 51-59.

5 Chen L Effects of Surface Roughness Parameters on Tribological Performance for Micro-textured Eutectic Aluminum–Silicon Alloy / Chen L., Liu Z., Wang X., Wang Q., Liang X. // Journal of Tribology. – 2020. – Vol. 142. – № 2. – PP. 43-48.

6 Иордан В. И., Имитационное моделирование формирования шероховатой поверхности подложки в процессе ее пескоструйной обработки / Иордан В. И., Бледнов В. А., Смирнов А. В., Чесноков А. Е. // Ползуновский альманах. – 2018. – №. 4. – С. 23-27.

7 Ghara T. Effect of grit blasting parameters on surface and near-surface properties of different metal alloys / Ghara T., Paul S., Bandyopadhyay P. P. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2021. – Vol. 30. – №. 1. – PP. 251-269.

8 Xie T. Simulation of effect of counterface roughness on the friction transfer and wear of PTFE sliding against steel / Xie T., Lai J., Yang H. // Industrial Lubrication Tribology. – 2019. – Vol. 71, № 9. – PP. 1086-1092.

9 Пат. 2 741 039 Рос. Федерация. Способ формирования износостойкого самоприрабатывающегося покрытия на рабочих элементах спирального детандера из алюминиевого сплава : С1 / С. В. Сергеев, М. Ш. Аль-Бдейри ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ». – заявл. 18.09.2020 ; опублик. 22.01.2021.

10 Yasmin T. Tribological (wear) properties of aluminum-silicon eutectic base alloy under dry sliding condition / Yasmin T., Khalid A. A., Haque M. M. // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 153. – PP. 833-838.

11 Дударева, Н. Ю. Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость гильзы цилиндра ДВС из алюминиевого сплава / Дударева Н. Ю., Кальщиков Р. В., Мусин Н. Х., Рябова Д. А. // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – Т. 80, № 9 – С. 127-144.

12 Santos D. M. F. Hydrogen production by alkaline water electrolysis / Santos D. M. F., Sequeira C. A. C., Figueiredo J. L. // Química Nova. – 2013. – Vol. 36. – №. 8. – pp. 1176-1193.

13 Lu X. Effects of phase transformation on properties of alumina ceramic membrane : A new assessment based on quantitative X-ray diffraction (QXRD) / Yang J., Li X., Sun F., Wang F., Chao Y. // Chemical Engineering Science. – 2019. – Vol. 199. – P. 349-358.

14 Xue W. Analysis of phase distribution for ceramic coatings formed by microarc oxidation on aluminum alloy / Xue W., Deng Z., Lai Y., Chen R. // Journal of the American Ceramic Society. – 1998. – Vol. 81. – pp. 1365-1368. DOI : 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02493.

15 Al-Bdeiri M. S. Analysis of Physical and Mechanical Properties of Galvanic-Plasma Wear-Resistant Coatings / Al-Bdeiri M. S., Sergeev S., Krasilnikov V. V. // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. – 2020. – Vol. 5, pp. 1387-1393.

## References

1 Dorokhov, A. F. Modeling of heat transfer through the wall of the working cylinder of a piston internal combustion engine and control of its stress-strain state. / A. F. Dorokhov, N. V. Pakhomov // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2015. – №. 1 (45). – pp. 68-74.

2 Tikhonenko, V. V. Microarc oxidation method. / V. V. Tikhonenko, A. M. Shkilko // Eastern European Journal of Advanced Technologies. Materials Science. – 2012. – 2/13 (56). – pp. 13-18.

3 Timoshenko, A. V. Influence of the superimposed alternating current on the composition and properties of oxide coatings formed in the microplasma mode on the D16 alloy / A. V. Timoshenko, B. K. Opara, Yu. V. Magurova // Protection of metals. – 1994. – Vol. 30, №. 1. – pp. 32-38.

4 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.

5 Chen L Effects of Surface Roughness Parameters on Tribological Performance for Micro-textured Eutectic Aluminum–Silicon Alloy / Chen L., Liu Z., Wang X., Wang Q., Liang X. // Journal of Tribology. – 2020. – Vol. 142. – № 2. – pp. 43-48.

6 Jordan V. I., Simulation modeling of the formation of a rough surface of a substrate during its sandblasting / Jordan V. I., Blednov V. A., Smirnov A. V., Chesnokov A. E. // Polzunov Almanac. – 2018. – №. 4. – pp. 23-27.

7 Ghara T. Effect of grit blasting parameters on surface and near-surface properties of different metal alloys / Ghara T., Paul S., Bandyopadhyay P. P. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2021. – Vol. 30. – №. 1. – pp. 251-269.

8 Xie T. Simulation of effect of counterface roughness on the friction transfer and wear of PTFE sliding against steel / Xie T., Lai J., Yang H. // Industrial Lubrication Tribology. – 2019. – Vol. 71, № 9. – pp. 1086-1092.

9 Pat. 2 741 039 Rus. Federation. Method of forming a wear-resistant self-wearing coating on working elements of a spiral expander made of aluminum alloy : C1 / S. V. Sergeev, M. Sh. Al-Bdeiri ; applicant and patentee FGAOU VO NRU "BelGU". – declared. 09.18.2020 ; publ. 01.22.2021.

10 Yasmin T. Tribological (wear) properties of aluminum-silicon eutectic base alloy under dry sliding condition / Yasmin T., Khalid A. A., Haque M. M. // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 153. – pp. 833-838.

11 Dudareva N. Yu. Study of the effect of micro-arc oxidation on the wear resistance of the cylinder liner of an internal combustion engine made of aluminum alloy / Dudareva N. Yu., Kalshchikov R. V., Musin N. Kh., Ryabova D. A. // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. – 2013. – Vol. 80, №. 9 – pp. 127-144.

12 Santos D. M. F. Hydrogen production by alkaline water electrolysis / Santos D. M. F., Sequeira C. A. C., Figueiredo J. L. // Química Nova. – 2013. – Vol. 36. – №. 8. – pp. 1176-1193.

13 Lu X. Effects of phase transformation on properties of alumina ceramic membrane : A new assessment based on quantitative X-ray diffraction (QXRD) / Yang J., Li X., Sun F., Wang F., Chao Y. // Chemical Engineering Science. – 2019. – Vol. 199. – pp. 349-358.

14 Xue W. Analysis of phase distribution for ceramic coatings formed by microarc oxidation on aluminum alloy / Xue W., Deng Z., Lai Y., Chen R. // Journal of the American Ceramic Society. – 1998. – Vol. 81. – pp. 1365-1368. DOI : 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02493.

15 Al-Bdeiri M. S. Analysis of Physical and Mechanical Properties of Galvanic-Plasma Wear-Resistant Coatings / Al-Bdeiri M. S., Sergeev S., Krasilnikov V. V. // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. – 2020. – Vol. 5, pp. 1387-1393.

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