

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК / TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 621.7-4

DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-38-42



## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МДО ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**ЧАВДАРОВ АНАТОЛИЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

E-mail: info@firma-tom.ru

**ДЕНИСОВ ВЯЧЕСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ**, докт. техн. наук, главный научный сотрудник

E-mail: va.denisov@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5

Рассмотрены перспективы использования нанокристаллических керамических покрытий на деталях двигателя внутреннего сгорания, полученных по технологии микродугового оксидирования (МДО). Показана тенденция развития двигателестроения по замене чугунных блоков и гильз на алюминиевые со специальными покрытиями, получаемыми гальваническими методами. Отмечено, что данное направление не предполагает использования ремонтных технологий, что значительно сказывается на потребителях. Показана возможность использования технологии МДО как при изготовлении деталей двигателя, так и для выполнения восстановительных работ. Для оценки эффективности использования предлагаемой технологии были выполнены практические работы по покрытию рабочей части цилиндра для малой сельскохозяйственной техники. Двигатели были испытаны на предельных режимах 5,1 кВт при 3600 об/мин в течение 300 ч. После испытаний дефекты и износ на зеркале цилиндров обнаружены не были. Предварительные результаты испытаний собранного двигателя показали отсутствие потери мощности на протяжении 10000 ч пробега автомобиля, что говорит о сохранении геометрических параметров деталей. Отмечено, что наиболее оптимальным является сочетание в паре трения двух деталей с МДО-покрытием. Установлено, что введение нанодобавок в МДО-покрытие приводит к снижению коэффициента трения между зеркалом цилиндра и поршневым кольцом, а использование наноприсадок снижает износ поршневых колец и зеркала цилиндра в 10 раз. Сделан вывод о необходимости внедрения рассматриваемой технологии в серийное производство двигателей и поршней, а также разработки комплекта оборудования для выполнения ремонтных работ.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, микродуговое оксидирование, трение и износ.

**Формат цитирования:** Чавдаров А.В., Денисов В.А. Перспективы использования технологии МДО для двигателей внутреннего сгорания // Агроинженерия. 2020. № 5(99). С. 38-42. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-38-42.

## PROSPECTS OF USING MICROARC OXIDATION TECHNOLOGY FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

**ANATOLIY V. CHAVDAROV**, PhD (Eng), Key Research Engineer

E-mail: info@firma-tom.ru

**VYACHESLAV A. DENISOV**, DSc (Eng), Chief Research Engineer

E-mail: va.denisov@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, 1<sup>st</sup> Institutskiy Proyezd Str., Bld. 5, Moscow, Russian Federation

The paper considers the prospects of using nano-crystalline ceramic coatings on internal combustion engine parts obtained using microarc oxidation (MAO) technology. The authors reveal an engine development tendency to replace cast-iron blocks and liners with aluminum ones with special coatings obtained by electroplating methods. It is noted that this method does not involve the use of repair technologies, which significantly affects consumer costs. The paper shows the prospects of using MAO technology both in the manufacturing of engine parts and restoration operations. To assess the effectiveness of the proposed technology, practical study was performed on covering the working part of the cylinder used in small-size agricultural machinery. The engines were tested at 5.1 kW at 3,600 rpm for 300 hours. After testing, no defects or wear were found on the cylinder face. Preliminary test results of the assembled engine showed no loss of power over 10,000 hours of car mileage, which indicates that the geometric parameters of the parts are preserved. The authors emphasize that the most optimal combination is the friction pair

of two parts with an MAO coating. It has been established that the introduction of nano-additives in a MAO-coating leads to a decrease in the coefficient of friction between the cylinder and the piston ring and reduces the wear of piston rings and the cylinder face in more than 10 times. A conclusion is made about the feasibility of introducing the considered technology into the mass production of engines and pistons, as well as developing a set of repair equipment.

**Key words:** internal combustion engine, microarc oxidation, friction and wear.

**For citation:** Chavdarov A.V., Denisov V.A. Prospects of using microarc oxidation technology for internal combustion engines. *Agricultural Engineering*, 2020; 5 (99): 38-42. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-38-42.

**Введение.** Зеркала цилиндров в двигателях внутреннего сгорания должны иметь практически равномерный и относительно небольшой зазор между своей внутренней окружностью и движущимися возвратно-поступательно внутри них поршнями и/или поршневыми кольцами для обеспечения идеальных трибологических условий.

Ученые всего мира занимаются поиском оптимального соотношения износостойкости и низкого коэффициента трения в паре «Зеркало цилиндра-поршневое кольцо». Это связано с изменением как материала гильзы, так и материала колец. Для гильз из чугуна чаще используют хромирование или никелевое гальваническое покрытие, для алюминиевых гильз – никелирование (никосил) или кремниевое покрытие (алюсил). Все перечисленные виды обработки поверхности зеркала гильзы являются недоступными в ремонтном производстве.

Триботехнические характеристики поверхностей трения (износостойкость и коэффициент трения) являются производными обобщенными характеристиками удельных величин износа и сил трения, действующих на фактических пятнах контакта. Наиболее рационально изменять напряженно-деформированное состояние в приповерхностном слое путем нанесения покрытий и модифицирования поверхности трения.

Работа элементов цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является предметом исследований многих ученых. Ежегодно публикуются десятки патентов по технологии изготовления блоков цилиндров, новых конструкторских решений по конфигурации поршней и поршневых колец. Все эти исследования преследуют одну главную цель: снижение веса двигателя и сокращение потерь от износа подвижных частей.

Использование технологии микродугового оксидирования (МДО) для создания износостойкого с низким коэффициентом трения покрытия на стенке цилиндра двигателя внутреннего сгорания описано в нескольких работах Тольяттинского государственного университета. В частности, приведены сведения о формировании МДО-покрытий на сплавах типа «силумин» и представлена оснастка для проточного процесса МДО [1] (рис. 1). По мнению авторов [1], использование технологии МДО позволит полностью исключить чугунные гильзы в блоках ДВС. Исследования в этом направлении представлены также в других работах [2-7].

Интересные результаты получены в МГТУ «МАМИ» [6]. На примере дизельных двигателей авторами показаны перспективность и эффективность использования МДО-процесса не только для создания износостойкого покрытия, но и для применения его в качестве объемного поглотителя лучистой компоненты теплового потока.

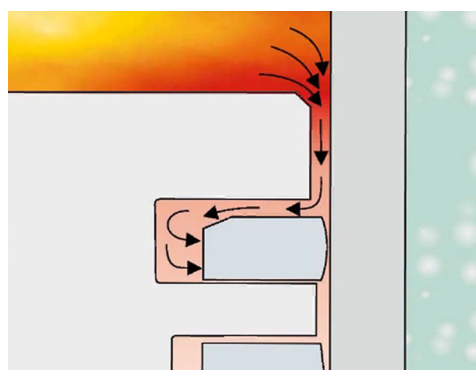


**Рис. 1. Технологическая оснастка для оксидирования блоков цилиндров в проточном режиме**

**Fig. 1. Technological equipment for the oxidation of cylinder blocks in flow-through mode**

В процессе работы цилиндропоршневой группы процессу износа подвергаются зеркало цилиндра, поршень и поршневые кольца. Предложен метод МДО для создания керамического покрытия на юбке поршня [7]. Экспериментально установлено, что износ юбки поршня снизился в 2,5 раза, однако при этом зеркало цилиндра изнашивается в 1,8 раза интенсивнее. Данный факт говорит о том, что необходим комплексный подход к разработке технологии создания аналогичного керамического покрытия и на зеркале цилиндра.

При рассмотрении схемы работы пары «первое компрессионное кольцо-зеркало цилиндра» следует учитывать, что усилие прижима кольца к зеркалу определяется прежде всего давлением сгорания горючей смеси во время рабочего такта (рис. 2).



**Рис. 2. Схема нагружения компрессионного кольца**

**Fig. 2. Loading pattern of a compression ring**

По общеизвестным данным, указанное давление для бензиновых двигателей достигает до 5 МПа, а для форсированных дизельных – до 15 МПа.

Установлено, что МДО-покрытие отлично выдерживает термоциклирование, характерное для работы ДВС [2].

**Цель исследования:** оценка возможности использования технологии МДО применительно к элементам двигателя внутреннего сгорания.

**Материал и методы.** В качестве объекта исследований использовались образцы из стали с нанесенным газотермическим способом алюминиевым покрытием и сформированным на его поверхности с помощью МДО керамического слоя. Данная технология позволяет восстанавливать практически любые гильзы из любых материалов.

Нанесение алюминиевого порошка марки А20-11 на образец производилось сверхзвуковым газодинамическим напылением аппаратом «Димет-403» с использованием специального сопла [8]. После механической обработки поверхности образцов выполнялся процесс анодно-катодного МДО в различных по составу электролитах при плотности тока 15 А/дм<sup>2</sup> и продолжительности

процесса 40 мин. В качестве эталона для сравнения были взяты фрагменты из алюминиевого блока цилиндров с залитыми чугунными гильзами.

В качестве контрообразца при проведении триботехнических исследований использовался фрагмент поршневого кольца, контактирующего с зеркалом гильзы цилиндра (ГЦ). Триботехнические исследования выполнялись на трибометре «TRB-S-DE» при условиях:

- движение контрообразца – возвратно-поступательное;
- амплитуда колебаний – 20 мм, скорость колебаний – 0,25 м/с;
- нормальное давление – 10 Н;
- общий путь трения контрообразца – 2000 м.

Износ определялся путем взвешивания образца и контрообразца на аналитических весах с точностью 1 мг. В качестве дополнительной присадки в электролит для МДО-процесса использовались оксид меди, оксид ванадия, вольфрамат натрия, гидроксид кобальта, оксид никеля.

**Результаты исследований.** По результатам испытаний составлена сводная таблица.

**Сводные результаты испытаний на износостойкость**

**Summary of wear resistance test results**

№	Присадка (количество) Additive (quantity)	Износ образца, г Sample wear, g	Износ кольца, г Ring wear, g	Время приработки, с Run-in time, sec	Коэффициент трения Coefficient of friction
Эталон Reference sample	-	0,012	0,022	30	0,061
1	Притирка/ Lapping	0,428	0,332	200	0,332
2	CuO (5%)	0	0,022	90	0,049
3	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (1%)	0	0,003	80	0,046
4	NaWO <sub>4</sub> (1%)	0,001	0,003	80	0,049
5	Co(OH) <sub>2</sub> (5%)	0	0,003	80	0,058
6	NiO (5%)	0,001	0,008	80	0,048

На основании анализа результатов исследований можно сделать следующие выводы:

- введение нанодобавок в МДО-покрытие приводит к снижению коэффициента трения между зеркалом цилиндра и поршневым кольцом;
- использование наноприсадок снижает износ поршневых колец и зеркала цилиндра в 10 раз.

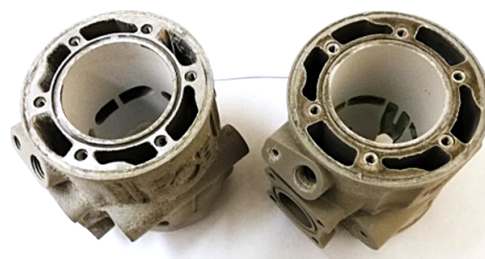
Для оценки эффективности использования предлагаемой технологии были выполнены практические работы по покрытию рабочей части цилиндра для малой сельскохозяйственной техники (рис. 3).

Двигатели с данными блоками были испытаны на предельных режимах 5,1 кВт при 3600 об/мин в течение 300 ч (10 заправок топливного бака). После испытаний дефекты и износ на зеркале цилиндров обнаружены не были.

Продолжением работы по МДО-технологии стала обработка комплекта гильз и поршней (рис. 4).

Следует отметить, что именно сочетание в паре трения двух деталей с МДО-покрытием обеспечило полученный эффект [9, 10]. Предварительные результаты испытаний

собранного двигателя показали отсутствие потери мощности на протяжении 10000 ч пробега автомобиля, что говорит о сохранении геометрических параметров деталей. Выводы сделаны на основании замера компрессии и после разборки поршневой группы по следам износа. Ресурсные испытания продолжаются.



**Рис. 3. Блоки цилиндра для малой сельскохозяйственной техники**

**Fig. 3. Cylinder blocks for small-size agricultural machinery**



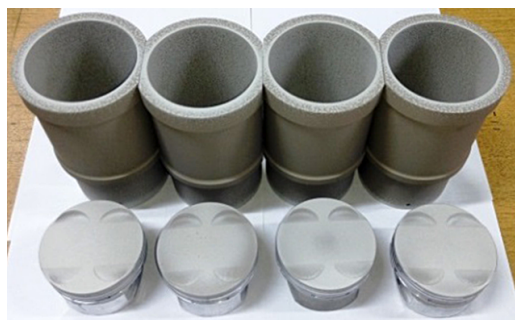


Рис. 4. Ремонтный комплект ДВС

Fig. 4. ICE repair kit

#### Библиографический список

1. Криштал М.М., Ивашин П.В., Полуниин А.В., Павлов Д.А. Повышение износостойкости деталей алюминий-кремниевых сплавов методом МДО для работы в экстремальных режимах трения // *Механика и машиностроение*. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 765-768.
2. Чавдаров А.В., Скоропупов Д.И., Милованов Д.А., Артамонов С.Н. Исследование стойкости керамических покрытий при термоциклировании // *Труды ГОСНИТИ*. 2015. Т. 121. С. 298-302.
3. Мальшев В.Н., Вольхин А.М., Гантимиров Б.М., Ким С.Л. Повышение антифрикционных свойств износостойкости МДО-покрытий // *Химическая физика и мозоскопия*. 2013. Т. 15. № 2. С. 285-291.
4. Duneleavy C.S., Golosnoy I.O., Curran J.A., Clyne T.W. Characterisation of discharge events during plasma electrolytic oxidation // *Surface & Coatings Technology*, 2009. 203. P. 3410-3419. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.05.004
5. Хокинг М., Васатасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: получение, свойства, применение // Пер. с англ. М.: Изд-во Мир, 2000. 518 с.
6. Шандров Б.В., Шудров Ф.В., Нуриев Р.Т. Применение МДО-покрытий как один из способов улучшения энергоэффективности и экологичности машин // *Материалы 77-й Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров»*. Секция 7 «Технологии и оборудование механосборочного производства». URL: [https://mospolytech.ru/science/aai77/scientific/article/s07/s07\\_38.pdf](https://mospolytech.ru/science/aai77/scientific/article/s07/s07_38.pdf)
7. Бутусов И.А., Дударева Н.Ю. Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость поршня ДВС // *Наука и образование*. 2013. 9 сентября. URL: <http://engineering-science.ru/doc/606017.html>
8. Устройство для газодинамического нанесения покрытий на внутренние поверхности цилиндрических деталей: Патент № 2714002 РФ, С23С4/12, С23С24/04, В05В7/14 / А.В. Чавдаров, А.А. Толкачев, А.В. Валяйчиков; опубл. 2020. Бюл. № 5.
9. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКО-МЕТ, 2005. 368 с.
10. Bing Yin, Zhenjun Peng, Jun Liang, Kongjie Jin, Shengyu Zhu, Jun Yang, Zhuhui Qiao. Tribological behavior and mechanism of self-lubricating wear-resistant composite

#### Выводы

1. Керамические покрытия на деталях двигателя внутреннего сгорания, полученных по технологии микродугового оксидирования, сокращают износ в 10 раз и увеличивают срок службы ДВС.
2. В качестве наноприсадки в стандартный щелочной электролит рекомендуется использовать или оксид ванадия в количестве 1 г/л, или вольфрамат натрия в количестве 1 г/л.
3. Предлагаемая технология создания керамического покрытия является весьма перспективной и имеет большое практическое значение.

#### References

1. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Polunin A.V., Pavlov D.A. Povysheniye iznosostoykosti detaley alyuminiyevo-kremniyevykh splavov metodom MDO dlya raboty v ekstremal'nykh rezhimakh treniya [Increasing the wear resistance of aluminum-silicon alloy parts by the MAO method for operating in extreme friction modes]. *Mekhanika i mashinostroyeniye*, 2011; Vol. 13, 4(3): 765-768. (In Rus.)
2. Chavdarov A.V., Skoropupov D.I., Milovanov D.A., Artamonov S.N. Issledovaniye stoykosti keramicheskikh pokrytiy pri termotsiklirovanii [Study of the resistance of ceramic coatings during thermal cycling]. *Trudy of GOSNITI*, 2015; 121: 298-302. (In Rus.)
3. Malyshev V.N., Volkhin A.M., Gantemirov B.M., Kim S.L. Povysheniye antifriktsionnykh svoystv iznosostoykosti MDO-pokrytiy [Improving anti-friction properties and wear resistance of the MAO coating]. *Khimicheskaya fizika i mozoskopiya*, 2013; 15(2): 285-291. (In Rus.)
4. Duneleavy C.S., Golosnoy I.O., Curran J.A., Clyne T.W. Characterisation of discharge events during plasma electrolytic oxidation. *Surface & Coatings Technology*, 2009; 203: 3410-3419. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.05.004.
5. Hawking M., Vasatasri V., sidki P. Metallicheskiye i keramicheskiye pokrytiya: polucheniye, svoystva, primeneniye [Metal and ceramic coatings: production, properties, application]. Translated from English. Moscow, Mir, 2000: 518. (In Rus.)
6. Shandrov B.V., Shudrov F.V., Nuriev R.T. Primeneniye MDO-pokrytiy kak odin iz sposobov uluchsheniya energoeffektivnosti i ekologichnosti mashin [Application of MDO coatings as one of the ways to improve energy efficiency and environmental friendliness of machines]. *Materialy 77-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii AAI "Avtomobile- i traktorostroyeniye v Rossii: prioritety razvitiya i podgotovka kadrov"*. Sektsiya 7 "Tekhnologii i oborudovaniye mekhanosborochnogo proizvodstva". Access mode: [https://mospolytech.ru/science/aai77/scientific/article/s07/s07\\_38.pdf](https://mospolytech.ru/science/aai77/scientific/article/s07/s07_38.pdf) (In Rus.)
7. Butusov I.A., Dudareva N.Yu. Issledovaniye vliyaniya mikrodugovogo oksidirovaniya na iznosostoykost' porshnya DVS [Study of the effect of micro-arc oxidation on the wear resistance of the internal combustion engine piston]. *Nauka I obrazovanie*, 2013. September 9. Access mode: <http://engineering-science.ru/doc/606017.html>. (In Rus.)
8. Chavdarov A.V., Tolkachev A.A., Valyaichikov A.V. Ustroystvo dlya gazodinamicheskogo naneseniya pokrytiy

coatings fabricated by one-step plasma electrolytic oxidation // *Tribology International*. Volume 97, May 2016, Pages 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.020>

na vnutrennie poverkhnosti tsilindricheskikh detaley [Device for gas-dynamic coating on the internal surfaces of cylindrical parts]: Pat. no. 2714002 RF, C23C4 / 12, C23C24 / 04, B05B7/14; 2020. (In Rus.)

9. Suminov I.V., Epelfeld A.V., Ludin V.B., Krit B.L., Borisov A.M. Mikrodogovoye oksidirovaniye (teoriya, tekhnologiya, oborudovaniye [Microarc oxidation (theory, technology, equipment)]. Moscow, ECOMET, 2005: 368. (In Rus.)

10. Bing Yin, Zhenjun Peng, Jun Liang, Kongjie Jin, Shengyu Zhu, Jun Yang, Zhuhui Qiao. Tribological behavior and mechanism of self-lubricating wear-resistant composite coatings obtained by single-Stage plasma electrolytic oxidation. *Tribology International*, Volume 97, May 2016, Pages 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.020>.

### Критерии авторства

Чавдаров А.В., Денисов В.А. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент. Чавдаров А.В., Денисов В.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 09.09.2020

Опубликована 30.10.2020

### Contribution

A.V. Chavdarov, V.A. Denisov carried out theoretical studies and conducted the experiment based on the obtained theoretical results. A.V. Chavdarov, V.A. Denisov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on September 9, 2020

Published 30.10.2020