

Научная статья
УДК 621.9.047
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.79.65.012

Повышение ресурса работы деталей пожарной техники

Александра Александровна Снежко^{1,2}
*Анастасия Петровна Филкова*¹
*Олег Рафаилович Лузанов*²

¹Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика

М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-1885-5747>

Автор ответственный за переписку: Александра Александровна Снежко,
golenkova.aleksa@mail.ru

Аннотация. В работе анализируются причины износа и способы упрочнения деталей пожарной техники. Представлены результаты исследований влияния технологических параметров на структуру и свойства оксидных покрытий (твердость, толщину, износостойкость). Обсуждается влияние химического состава материала основы на геометрию и эксплуатационные характеристики деталей после микродугового оксидирования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, износостойкие покрытия, детали поршневой группы, пожарные насосы

Для цитирования: Снежко А.А., Филкова А.П., Лузанов О.Р. Повышение ресурса работы деталей пожарной техники // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 2 (25). С. 96-102.

Original article

INCREASING THE SERVICE LIFE OF FIRE EQUIPMENT PARTS

Alexandra A. Snezhko^{1,2}
*Anastasia P. Filkova*¹
*Oleg R. Luzanov*²

¹Siberian Fire and Rescue Academy, Zheleznogorsk, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

<https://orcid.org/0000-0003-1885-5747>

Corresponding author: Alexandra A. Snezhko, golenkova.aleksa@mail.ru

Abstract. The paper analyzes the causes of wear and methods of hardening of fire equipment parts. The results of studies of the influence of technological parameters on the structure and properties of oxide coatings (hardness, thickness, wear resistance) are presented. The influence of the chemical

composition of the base material on the geometry and performance characteristics of parts after microarc oxidation is discussed.

Keywords: micro-arc oxidation, wear-resistant coatings, piston group parts, fire pumps

For citation: Snezhko A.A., Volkova A.P., Luzanov O.R. Increasing the service life of fire equipment parts // Siberian Fire and Rescue Bulletin 2022. № 2 (25). С. 96-102.

Введение

Трение рабочих поверхностей деталей машин, в том числе и пожарной техники, – основная причина их изнашивания. Выделяют несколько видов изнашивания. Наиболее простыми случаями являются истирание рабочих поверхностей, то есть их схватывание (молекулярно-механическое изнашивание) и питтинг (осповидное разрушение) [1].

При этом с поверхностями сопряженных деталей при трении удаляется металл, изменяются размеры деталей, увеличиваются величины зазоров между ними. Потери массы изнашивающейся детали незначительны (несколько десятков граммов) и практически не сказываются на прочности деталей, а вот зазоры, образующиеся в сопряженных деталях, не обеспечивают нормальной работы механизмов. Например, изнашивание поршневых колец и гильз цилиндров, клапанов, коленчатого вала, шатунных и коренных подшипников коленчатого вала приводит к невозможности пуска двигателей (увеличение зазоров) и уменьшению развиваемой ими мощности, а деталей уплотнения пожарных насосов приводит к невозможности создавать в них требуемую величину вакуума для забора воды и т.д.

Износы гильз цилиндров, поршневых колец и других деталей поршневой группы зависят не только от скоростных нагрузочных режимов двигателя, но и от температурного режима двигателя, а также наличия в воздухе пыли (абразива) и влаги.

При высоких температурах охлаждающей жидкости износ гильз цилиндров увеличивается вследствие уменьшения вязкости масла. С понижением температуры вязкость масла увеличивается, но параллельно с этим в 4 – 5 раз увеличивается износ, что обусловлено коррозионными процессами вследствие конденсации продуктов сгорания. В их состав входят окислы серы, образующиеся из сернистых соединений, содержащихся в топливе. Они с влагой образуют кислоты, особенно активные в дизелях [1].

В основу борьбы с износом положен ряд технологических приемов, среди которых наиболее эффективным является модифицирование рабочей поверхности через воздействие высокоэнергетическими источниками или формирование защитных покрытий. Важную роль при этом играет материал детали. Блоки цилиндров изготавливаются литьем из серого легированного чугуна или высококремнистых алюминиевых сплавов (силуминов). Кроме того, практикуется производство блоков из металлокерамики. Блоки цилиндров двигателя с жидкостным охлаждением имеют двойные стенки («рубашка охлаждения»). Пространство между стенками заполняется охлаждающей жидкостью. Блоки цилиндров двигателей с воздушным охлаждением цилиндров имеют ребристую поверхность и заключены в кожух, через который вентилятором системы охлаждения прокачивается воздух [2].

Головки блоков цилиндров бензиновых и дизельных двигателей легковых автомобилей отливаются из алюминиевых сплавов и реже из чугуна. При этом, зачастую, имеют моноблочную конструкцию, т.е. на один ряд цилиндров двигателя используется одна, единая для всех цилиндров, головка [3].

Идея о замене «тяжелых» чугунных блоков на «легкие» и сплавы из алюминия в ДВС малой и средней мощности остается актуальной и на сегодняшний день. С одной стороны, теплопроводность алюминиевых сплавов в три раза выше чугунных, это способствует более эффективной работе системы охлаждения двигателя. С другой стороны, алюминий обладает более высоким коэффициентом температурного расширения и это требует более строгого контроля за зазорами между деталями двигателя. Компромиссным решением стала «загильзовка» чугунных втулок в блок из «легких» сплавов. Причем, эти гильзы тонкостенные

несъемные и, как правило, блок ремонту не подлежит. Создание еще более легкой и более дешевой конструкции тормозило трение «мягких» поршней при движении по цилиндру.

Решением проблемы оказалось нанесение твердого покрытия на «мягкую» поверхность цилиндров алюминиевого блока. Подобные блоки цилиндров с твердым покрытием применяют уже давно на базе никелевого покрытия толщиной 0,1-0,2 мм со сверхтвердыми частицами карбида кремния SiC размером 3 мкм [4].

Никель-кремниевое (никасил) покрытие на блоках цилиндров нашло применение на различной двухтактной мото- и авиатехнике (мотоциклы, квадроциклы, снегоходы и парапланы).

Имеющиеся данные [4], указывают, что в условиях отечественной эксплуатации "Никасил (Nicasil)" со временем почти гарантированно разрушается. При этом восстановление подобной технологией не предусмотрено, а, значит, изношенный блок цилиндров придется менять.

Причиной разрушения никель-кремниевого покрытия является низкое качество отечественного бензина, содержащего различные антидетонационные добавки, которые в Аи 95 обнаруживаются чаще, чем в Аи 92. Также, некоторые промывочные препараты могут способствовать быстрому изнашиванию данного защитного покрытия [4]. Не менее проблематичной является ситуация с дизтопливом на российских АЗС. Действительно, примеси в солярке могут вывести из строя дорогостоящую топливную аппаратуру. Кроме того, существует риск заправиться летним дизтопливом в демисезонный период или при резком похолодании. Впрочем, эти опасения в большей степени касаются регионов [5].

Результативным, постепенно внедряемым в производство, способом защиты алюминиевых сплавов от воздействия различных эксплуатационных факторов, является формирование на их рабочей поверхности оксидных (керамических) покрытий. Микродуговое оксидирование (МДО) – вид поверхностной обработки и упрочнения металлических материалов, происходящий от электрохимического анодирования.

Одним из наиболее эффективных и экономичных способов модифицирования поверхности алюминиевых сплавов, является микродуговое оксидирование (МДО). В основе процесса лежит комплекс высокотемпературных электрохимических реакций, протекающих в условиях горения микродуговых разрядов на поверхности деталей, погруженных в электролит. Технологическим продуктом является образование покрытия большой толщины (до нескольких сотен или тысячи мкм), обладающего высокой твердостью, прочностью [6], низкой химической активностью, тепло- и электропроводностью. Механические параметры покрытия регулируются составом электролита и электрическим режимом обработки.

По результатам ранних исследований [6] установлено, что на твердость покрытий и на толщину твердого слоя влияют, в основном, два фактора: соотношение катодной и анодной составляющих тока и плотность тока.

Материалы и методы

Микродуговое оксидирование образцов на алюминиевых сплавах Д16Т, АМгб, АК9ч проводили в слабощелочном водном электролите, содержащем гидроксид калия КОН с концентрацией 1 г/л и жидкое стекло Na_2SiO_3 (10 г/л, $d=1,41$ г/см²). Покрытия формировали при соотношении катодной и анодной токовых составляющих от 1 до 1,3 и плотности тока в диапазоне от 10 до 30 А/дм² в течение 90 мин с помощью источника питания, позволяющего осуществлять не только независимую регулировку анодной и катодной составляющих тока и одновременно стабилизировать средние величины этих токов. Микротвердость покрытий определяли по стандартной методике на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,981 Н (100 г). Толщину покрытий (общую и твердого слоя) контролировали на поперечных шлифах с использованием оптического микроскопа МБИ-15, микроструктуру покрытий изучали на оптическом микроскопе «Jenavert» при увеличении до 1000 и электронном микроскопе РЭМ 200. Качественный фазовый состав покрытий изучали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-

3.0. Износостойкость покрытия оценивали на машине трения относительно износа закаленной стали У8.

Результаты и обсуждение

Покрытия, сформированные при плотности тока $27,5 \text{ А/дм}^2$ и соотношении $I_K / I_A = 1,3$, характеризуются высокой твердостью (на Д16Т до $24,5 \text{ ГПа}$) в слое, примыкающем к сплаву, что объясняется повышенным содержанием α – фазы Al_2O_3 в покрытии (рис. 1).

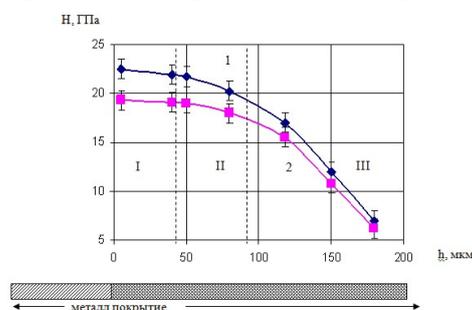


Рис. 1. Распределение микротвердости по толщине покрытия от границы металл – покрытие: 1 – Д16Т, 2 – АМгб.

При анализе построенного графика изменения микротвердости по толщине покрытия были выделены три зоны:

зона I – нижний слой покрытия в интервале толщин $0 \div 40 \text{ мкм}$ характеризуется самыми высокими значениями микротвердости ($18 \div 24 \text{ ГПа}$);

зона II – основной слой покрытия в интервале толщин $40 \div 140 \text{ мкм}$, обладающий достаточной величиной микротвердости ($12 \div 18 \text{ ГПа}$);

зона III – поверхностный слой покрытия, характеризующийся относительно невысокими значениями микротвердости.

При проведении исследования фазового состава покрытия методом рентгеноструктурного анализа было выяснено, что для покрытий, нанесенных на сплавы АМгб и Д16Т, фазовый состав различен.

Упрочненный слой сплава Д16Т состоит из α и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, причем α фаза Al_2O_3 присутствует только во внутренних слоях покрытия, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ присутствует по всей толщине покрытия и на внешнем крае покрытия выявлена фаза муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) и оксид кремния SiO_2 .

Упрочненный слой сплава АМгб состоит в основном из $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и во внешних слоях покрытия присутствует фаза SiO_2 , фаза муллита не выявлена.

Зависимости общей толщины $h_{\text{общ}}$ и плотного слоя покрытия от плотности тока и соотношения I_K / I_A представлены на рис. 2.

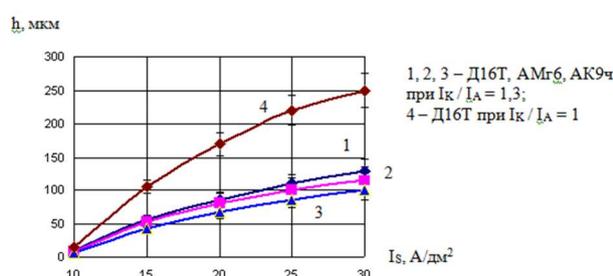


Рис. 2. Зависимость общей толщины покрытия от плотности тока при разных соотношениях I_K / I_A

Общая толщина покрытия суммируется из толщины твердого (внутреннего) и наружного слоев. Очевидно, что при высоких значениях плотности тока для всех трех сплавов закономерно соотношение: $h_T / h_{\text{общ}} = (0,5 \div 0,6)$.

Существенное влияние на твердость покрытий оказывает соотношение анодной и катодной токовых составляющих. Самой высокой твердостью (до 24,5 ГПа на сплаве Д16Т) характеризуются покрытия, сформированные при плотности тока 27,5 А/дм² и соотношении $I_K / I_A = 1,3$.

Катодная составляющая тока поддерживает температуру в канале пробоя, сохраняя электропроводимость практически на том же уровне внутри канала. При уменьшении соотношения I_K / I_A до 1 и менее микротвердость покрытия снижается. Причем, как и в пробной серии экспериментов, выполненной на одном значении плотности тока $I_S = 15$ А/дм², микротвердость возрастает в направлении от наружного края к барьерному слою покрытия.

Износостойкость оксидных покрытий на алюминиевых сплавах значительно превышает износостойкость закаленной стали У8 (на Д16Т в 45÷50 раз, на АМг6 в 25÷27 раз, на АК9ч в 12÷14 раз) при контактном давлении 0,032 МПа и относительной скорости перемещения 1,04 м/с.

Полученные данные по коррозионным испытаниям показывают невысокую коррозионную стойкость данного покрытия, что может быть объяснено его пористостью. Для использования этих покрытий в целях защиты от коррозии необходимо их напыливать наполнителями или снимать верхний муллитный слой (40÷50 мкм) и затем пропитывать наполнителем [40].

Другой способ снижения пористости МДО-покрытий был предложен в работе [7]. Ряд исследований дугового электрофореза с предварительным нанесением CuO порошка на первичное МДО-покрытие показал снижение пористости при том же уровне твердости и повышение ресурса надежности деталей ДВС.

Авторы использовали нанопорошок CuO с фракцией 80...100 нм. Количество нанопорошка CuO в растворе-носителе, определенное экспериментальным путем, составило 160 г/л раствора (силикат натрия – дистиллированная вода).

Оптимальный рекомендуемый состав раствора-носителя нанопорошка CuO и электролита, а также режимы вторичной обработки при модифицировании МДО-покрытия, сформированного на детали из алюминиевого сплава Д16Т, позволяющие включать во внешний упрочненный слой наибольшее количество частиц нанопорошка CuO будут следующими: раствор-носитель - по массе 1 часть нанопорошка CuO + 3 части Na₂SiO₃ + 3 части дистиллированной воды; KOH – 0,5 г/л, Na₂SiO₃ – 2 г/л, плотность тока – 25 А/дм², продолжительность дуговой обработки – 1 мин., температура электролита – 20°С. При этом толщина первичного внешнего упрочненного слоя МДО-покрытия после вторичного воздействия остается неизменной и составляет 65...70 мкм. Измерения микротвердости до и после вторичной обработки МДО показали, что данный параметр покрытия сохраняется и составляет 10 ГПа [7], что уступает результатам наших исследований (24,5 ГПа). Технологический процесс включает в себя следующие основные операции: очистку, дефектацию, механическую обработку, обезжиривание, МДО, промывку в воде, сушку, нанесение раствора-носителя CuO, дуговой электрофорез, финишную механическую обработку, очистку, заключительный контроль. [7].

Создание рабочего слоя с сохранением геометрических параметров упрочняемой детали в заданных пределах без затрат на дополнительную обработку поверхности является важной задачей в технологическом процессе. Материал подложки в комплексе с другими технологическими параметрами, а также толщиной и положением относительно базовых размеров деталей позволяет сформировать комплекс условий для данной задачи, но решить ее полностью до сих пор не удается. Поэтому подбираются частные критерии, успешно реализуемые на практике.

Выбор Д16Т для изготовления поршня в рамках проведения исследований [7] был обусловлен невысоким коэффициентом линейного расширения и значительной прочностью даже при высоких температурах.

Легирование кремнием способствует снижению толщины и химической стойкости оксидного слоя [8]. Поэтому для получения более твердых покрытий МДО лучше проводить на сплавах с меньшим содержанием кремния.

По результатам наших исследований было установлено, что покрытие на сплаве Д16, содержащем медь, на 70 % скрыто вовнутрь относительно первоначальных размеров подложки и на 30 % выходит наружу. Покрытия на сплавах, легированных магнием (АМг6), углублены в подложку на 50 %, а покрытия на сплавах, легированных кремнием (АК9ч) – на 30 %.

Заключение

Низкий коэффициент линейного расширения и значительная прочность даже при высоких температурах, а также лучшие результаты по уровню механических свойств МДО-покрытий на сплаве Д16Т делает его предпочтительным для изготовления деталей поршневой группы и др. Экспериментально определены оптимальные режимы формирования износостойких покрытий на сплаве Д16Т, а именно: плотность тока $27,5 \pm 30$ А/дм², соотношение катодной и анодной токовых составляющих 1,3, состав электролита: гидроксид калия КОН (1 г/л), жидкое стекло Na₂SiO₃ (10 г/л; d=1,41 г/см³).

Проведенный комплекс научных исследований позволит предложить производству пожарной и другой техники разработки по изготовлению деталей из алюминиевых сплавов с упрочнением рабочих поверхностей методом МДО при последующем применении наполнителей или модифицированием МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO. Кроме того, необходимо рекомендовать данную технологию для ремонта изношенных деталей после предварительного восстановления аддитивными технологиями, в частности послойным синтезом из алюминиевых проволоки или порошка.

Список источников

1. Безбородько М. Д. Пожарная техника /М. Д. Безбородько // Издательство Академии ГПС МЧС России, Москва, 2004 год. – 552 с.
2. Вахламов В. К. В222 Автомобили: Основы конструкции: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. К. Вахламов. – 4-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 528 с.
3. Устройство и обслуживание авто – Двигатель [Электронный ресурс]. URL: <https://ustroistvo-avto.ucoz.ru/index/dvigatel/0-27> (дата обращения: 02.04.2022)
4. Suprotec.ru : электронная библиотека [Электронный ресурс]. URL: <https://suprotec.ru/suprotek-stati/nikasil-nicasil-nikasilovoe-pokrytie-suprotek-i-nicasil/> (дата обращения: 12.05.2016)
5. Сборная солярка: история отечественного легкового дизеля URL: <https://www.zr.ru/content/articles/900931-vspominaem-istoriyu-otechestvenn/> дата обращения: 02.04.2022)
6. Голенкова, А. А. Совершенствование технологии формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.02.08/ А. А. Голенкова. – Красноярск, 2006.-125 с.
7. Кузнецов, Ю.А. Восстановление и упрочнение деталей машин и оборудования АПК микродуговым оксидированием [Текст]: автореф. дис.докт. техн. наук / Ю.А. Кузнецов. – М., 2006. – 35 с.
8. Магурова, Ю.В. Влияние катодной составляющей на процесс микроплазменного оксидирования сплавов алюминия переменным током [Текст] / Ю.В. Магурова, А.В. Тимошенко // Защита металлов, 1995. – Т.31, № 4. С. 414 – 418.

List of sources

1. Bezborodko M. D. Fire equipment / M. D. Bezborodko // Publishing House of the Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, 2004. – 552 p.

2. Vakhlamov V. K. V222 Cars: Fundamentals of construction: a textbook for students. higher. studies. institutions / V. K. Vakhlamov. – 4th ed., ster. – М. : Publishing Center "Academy", 2008. – 528 p.

3. The device and maintenance of the car – Engine [Electronic resource]. URL: <https://ustroistvo-avto.ucoz.ru/index/dvigatel/0-27> (accessed: 02.04.2022)

4. Suprotec.ru : electronic library [Electronic resource]. URL: <https://suprotec.ru/suprotek-stati/nikasil-nicasil-nikasilovoe-pokrytie-suprotek-i-nicasil/> (date of reference: 12.05.2016)

5. Combined diesel fuel: the history of domestic passenger diesel URL: <https://www.zr.ru/content/articles/900931-vspominaem-istoriyu-otechestvenn/> / accessed: 02.04.2022)

6. Golenkova, A. A. Improving the technology of forming wear-resistant coatings on aluminum alloys by micro-arc oxidation [Text]: dis. Candidate of Technical Sciences: 05.02.08/ A. A. Golenkova. – Krasnoyarsk, 2006.-125 p.

7. Kuznetsov, Yu.A. Restoration and hardening of parts of machinery and equipment of the agroindustrial complex by microarc oxidation [Text]: abstract. dis.doct. technical sciences / Yu.A. Kuznetsov. – М., 2006. – 35 p.

8. Magurova, Yu. V. The influence of the cathode component on the process of microplasma oxidation of aluminum alloys by alternating current [Text] / Yu. V. Magurova, A.V. Timoshenko // Protection of metals, 1995. – Vol.31, No. 4. pp. 414 – 418.

Информация об авторах

А.А. Снежко - кандидат технических наук

Information about the author

A.A. Snezhko - Ph.D. of Engineering Sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакция 05.05.2022; одобрена после рецензирования 01.06.2022; принята к публикации 30.06.2022.

The article was submitted 05.05.2022, approved after reviewing 01.06.2022, accepted for publication 30.06.2022.