

## КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ВТУЛОК ШЕСТЕРЕННЫХ ГИДРОМОТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

<sup>1</sup>*Александр Викторович Коломейченко, доктор технических наук, профессор;*

<sup>2</sup>*Владимир Николаевич Логачев, кандидат технических наук, доцент, e-mail: vn.logachev@orelsau.ru;*

<sup>2</sup>*Николай Владимирович Тимов, кандидат технических наук, доцент*

<sup>1</sup>*Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, г. Орел, Российская Федерация*

**Реферат.** За последние 10-15 лет значительно увеличилось использование деталей из алюминиевых сплавов в конструкциях узлов гидравлических систем сельскохозяйственной техники. Большая доля подобных деталей приходится на подшипники скольжения (втулки), рабочие поверхности которых при эксплуатации подвергаются значительному изнашиванию. Современным способом упрочнения деталей из алюминиевых сплавов служит микродуговое оксидирование, однако оно не позволяет восстанавливать детали, имеющие износы более 0,15 миллиметров. Для восстановления деталей из алюминиевых сплавов со значительными износами перспективен способ сверхзвукового газодинамического напыления. (Цель исследования) Провести анализ технического состояния изношенных втулок шестеренных гидромоторов REXROTH и разработать комбинированную технологию восстановления их рабочих поверхностей способом сверхзвукового газодинамического напыления с последующим упрочнением микродуговым оксидированием. (Материалы и методы) Выбрали для исследования 60 втулок. Применили цифровой микрометр МКЦ-25-0,001 ГОСТ 6507 для измерения износов. Использовали порошки марок А-80-13 и А-20-11, выпускаемые Обнинским центром порошкового напыления. Применили силикатно-щелочной электролит типа КОН- $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  при микродуговом оксидировании. (Результаты и обсуждение) Разработали по результатам анализа информации об износе комбинированную технологию восстановления с упрочнением торцовых поверхностей втулок шестеренных гидромоторов, которая включает: очистку втулок; их дефектацию; предварительную механическую обработку; сверхзвуковое газодинамическое напыление изношенных поверхностей; их последующее упрочнение микродуговым оксидированием; финишную механическую обработку покрытия и контроль. (Выводы) Разработанная комбинированная технология втулок позволит в 2,2-2,3 раза повысить их износостойкость и значительно увеличить ресурс гидромоторов. Технология универсальна, а возможность восстановления втулок зарубежных гидромоторов с использованием предлагаемой технологии особенно актуальна в связи с необходимостью широкомасштабного импортозамещения.

**Ключевые слова:** подшипники скольжения, втулки гидромотора, сверхзвуковое газодинамическое напыление, микродуговое оксидирование, восстановление, упрочнение.

*Для цитирования:* Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Титов Н.В. Комбинированная технология восстановления и упрочнения втулок шестеренных гидромоторов с использованием газодинамического напыления // Технический сервис машин. 2022. Т. 60. N4(149). С. 68-77. DOI 10.22314/2618-8287-2022-60-4-68-77. VРPKAS.

## COMBINED TECHNOLOGY FOR RESTORATION AND HARDENING OF BUSHINGS OF GEAR HYDRO MOTORS USING GAS-DYNAMIC SPRAYING

<sup>1</sup>Aleksandr V. Kolomeychenko, Dr.Sc.(Eng.), professor;

<sup>2</sup>Vladimir N. Logachev, Ph.D.(Eng.), associate professor;

<sup>2</sup>Nikolay V. Titov, Ph.D.(Eng.), associate professor

<sup>1</sup>Central Research Automotive and Automotive Institute NAMI,  
Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Oryol State Agrarian University named  
after N.V. Parakhin, Orel, Russian Federation

**Abstract.** Over the past 10-15 years, the use of aluminum alloy parts in the structures of hydraulic systems of agricultural machinery has increased significantly. A large proportion of such parts account for sliding bearings (bushings), the working surfaces of which are subjected to significant wear during operation. Micro-arc oxidation is a modern method of hardening aluminum alloy parts, but it does not allow to restore parts with wear greater than 0.15 millimeters. For the restoration of parts made of aluminum alloys with significant wear, the method of supersonic gas dynamic spraying is promising. (Research purpose) The research purpose is analyzing the technical condition of worn bushings REXROTH of gear hydraulic motors and develop a combined technology for restoring their working surfaces by gas-dynamic spraying with subsequent hardening by micro-arc oxidation. (Materials and methods) Sixty bushings were chosen for the study. A digital micrometer MCC-25-0.001 GOST 6507 was used to measure wear. Powders A-80-13 and A-20-11 by Obninsk Powder Spraying Center were used. A silicate-alkaline electrolyte KOH-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> was used for microarc oxidation. (Results and discussion) Based on the information on wear, authors have developed a combined recovery technology with hardening of the end surfaces of gear motor bushings, which includes: cleaning of bushings; fault detection; pre-machining; supersonic gas dynamic spraying of worn surfaces; hardening by micro-arc oxidation; finishing mechanical treatment of the coating and final control. (Conclusions) The developed combined technology of bushings will allow to increase their wear resistance up to 2.2-2.3 times and significantly increase the service life of hydraulic motors. The technology is universal, and the possibility of restoring the bushings of foreign hydraulic motors using the proposed technology is especially relevant due to the need for large-scale import substitution.

**Keywords:** sliding bearings, hydraulic motor bushings, supersonic gas-dynamic spraying, microarc oxidation, restoration, hardening.

**For citation:** Kolomeychenko A.V., Logachev V.N., Titov N.V. Kombinirovannaya tekhnologiya vosstanovleniya i uprochneniya vtulok shesterennykh gidromotorov s ispol'zovaniyem gazodinamicheskogo napyleniya [Combined technology for restoration and hardening of bushings of gear hydro motors using gasdynamic spraying]. Tekhnicheskii servis mashin. 2022. Vol. 60. N4(149). 68-77 (In Russian). DOI 10.22314/2618-8287-2022-60-4-68-77. VРPKAS.

**Введение.** Современная сельскохозяйственная техника как отечественного, так и зарубежного производства имеет большое количество гидрофицированных механизмов и систем управления, в состав которых входят шестеренные гидромоторы [1, 2].

Несмотря на различные конструктивно-технологические мероприятия, используемые производителями техники для повышения их ресурса, износостойкость деталей, входящих в состав гидромоторов, пока еще продолжает оставаться невысокой. Значительное количество деталей, входящих в состав гидромотора, в том числе и втулки, изготавливают из алюминиевых сплавов.

Алюминиевые сплавы имеют комплекс ценных свойств (высокая тепло- и электропроводность, коррозионная стойкость, малый удельный вес, высокая прочность в сочетании с малой плотностью, способность к изменению формы при использовании механической обработки, а также процессов пластического деформирования и литья), которые выгодно отличают их от других материалов [3-5].

В связи с этим восстановление с одновременным упрочнением деталей сельскохозяйственной техники, изготовленных из данных сплавов, особенно актуально и востребовано.

В настоящее время перспективным способом восстановления и упрочнения деталей из алюминиевых сплавов служит микродуговое оксидирование (МДО). Данный способ вызывает интерес, о чем свидетельствует значительное количество публикаций как отечественных, так и зарубежных ученых за последние несколько лет [6-15].

Вместе с тем упрочняющие покрытия, формируемые при МДО, не позволяют восстанавливать детали, имеющие износы более 0,15 мм, что значительно ограничивает их применение.

Для устранения данного недостатка целесообразно использовать комбинированные технологии, при использовании которых для компенсации износа деталей используется один из способов восстановления, позволяющий наносить покрытия значительной толщины с их последующим упрочнением МДО. Одним из современных способов восстановления деталей из алюминиевых сплавов в настоящее время служит сверхзвуковое газодинамическое напыление (ГДН) [16-19].

Способ ГДН обеспечивает существенно меньшую пористость наносимых покрытий, при его использовании значительно снижаются термические нагрузки на материалы детали и покрытия, уменьшается окисление материалов, устраняются процессы неравновесной кристаллизации в наносимом покрытии. Основным российским разработчиком оборудования и порошковых материалов для сверхзвукового ГДН является Обнинский центр порошкового напыления, выпускающий установки для ГДН под торговой маркой ДИМЕТ.

Однако несмотря на перспективность способа ГДН, пока еще остаются не в полной мере разработанными технологические рекомендации по формированию упрочняющих МДО-покрытий на рабочих поверхностях деталей, восстановленных ГДН.

**Цель исследования** – провести анализ технического состояния изношенных втулок шестеренных гидромоторов *REXROTH* и разработать комбинированную технологию восстановления их рабочих поверхностей способом сверхзвукового газодинамического напыления с последующим упрочнением микродуговым оксидированием.

**Материалы и методы.** Для установления количественных величин износов нами был проведен анализ технического состояния изношенных втулок шестеренных гидромоторов *REXROTH* привода вентилятора пневматической

сеялки *Primera DMC-9000* компании *AMAZONE*. Выборка исследуемых деталей составила 60 шт. Выбор плоскостей измерений провели с учетом рекомендаций ГОСТ 18509. Для измерения износов использовали цифровой микрометр МКЦ-25-0,001 ГОСТ 6507 с ценой деления 0,001 мм. Математическую обработку полученных статистических данных проводили с использованием персонального компьютера. Вероятность совпадения теоретического закона распределения с опытной информацией проверяли по критерию согласия Пирсона  $\chi^2$ .

Для ГДН покрытий использовали порошки марок А-80-13 и А-20-11, выпускаемые Обнинским центром порошкового напыления (ОЦПН). Основными компонентами данных порошков служат алюминий и цинк.

При МДО согласно рекомендациям использовали силикатно-щелочной электролит типа  $KOH-Na_2SiO_3$  как наиболее доступный и широко используемый многими учеными, а также легко утилизируемый [8-15, 20-26].

**Результаты и обсуждение.** Рабочие поверхности втулок (подшипников скольжения) шестеренных гидромоторов вследствие различных видов механического и коррозионно-механического воздействия подвергаются интенсивному изнашиванию (рис. 1).

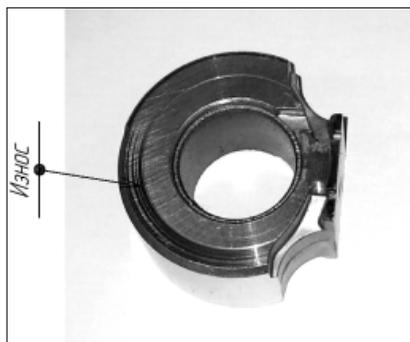


Рис.1. Изнашенная втулка (подшипники скольжения) шестеренного гидромотора *REXROTH* привода вентилятора пневматической сеялки *Primera DMC-9000*

Результаты анализа износной информации втулок шестеренных гидромоторов *REXROTH* пневматических сеялок *Primera DMC-9000* представили в таблице.

Таблица

Результаты анализа износной информации торцовых поверхностей втулок шестеренных гидромоторов *REXROTH*

Показатель	Значение
1. Теоретический закон распределения износов	Закон распределения Вейбулла (ЗРВ)
2. Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , мм	0,103
3. Коэффициент вариации $V$	0,496
4. Средний износ $I_c$ , мм	0,289
5. Максимальный износ $I_{\max}$ , мм	0,420

Учитывая перспективность технологии ГДН, на основе комплекса проведенных исследований мы разработали комбинированную технологию восстановления с упрочнением торцовых поверхностей втулок шестеренного гидромотора *REXROTH* привода вентилятора пневматической сеялки *Primera DMC-9000*. Технология включает очистку втулок, их дефектацию,

предварительную механическую обработку, сверхзвуковое ГДН изношенных поверхностей, их последующее упрочнение МДО, финишную механическую обработку покрытия и контроль восстановленных и упрочненных втулок. Разработанная технология позволит в 2,2-2,3 раза повысить износостойкость втулок и существенно увеличить ресурс гидромоторов данного типа при эксплуатации.

После разборки гидромоторов загрязнения с рабочих поверхностей втулок удаляют в водном растворе технического моющего средства МС-15 с использованием погружной моечной машины типа АМ 500. Затем детали промывают в теплой воде, имеющей температуру не ниже 30-35°C, и высушивают. При дефектации используют цифровые микрометры типа МКЦ. Механическую обработку изношенных поверхностей ведут на токарно-винторезном станке типа 16К20 на следующих режимах: частота вращения втулки – 800 мин<sup>-1</sup>, глубина резания – 0,8 мм, подача – 0,35 мм/об.

Далее осуществляют сверхзвуковое ГДН изношенных рабочих поверхностей втулок, используя одну из установок торговой марки ДИМЕТ, например, ДИМЕТ-404, 405 или 421. В качестве напыляемого материала, по результатам предварительно проведенных исследований, наиболее целесообразно использовать порошок А-20-11. Режимы сверхзвукового ГДН: давление сжатого воздуха – 0,55-0,60 МПа, температура нагрева воздуха в напылительном блоке – 400°C, скорость полета частиц напыляемого материала – 420- 450 м/с, дистанция напыления – 10-15 мм.

После сверхзвукового ГДН проводят механическую обработку торцовых поверхностей втулок, учитывая припуск под покрытие, формируемое МДО. Для этого используют токарно-винторезный станок типа 16К20. Режимы обработки: частота вращения детали – 800 мин<sup>-1</sup>, глубина резания – 0,8 мм, подача – 0,35 мм/об. Далее втулки обезжиривают, изолируют силиконовым герметиком неупрочняемые поверхности и устанавливают в специальное устройство (рис. 2). Устройство позволяет осуществлять одновременное упрочнение всех торцовых поверхностей втулок одного гидромотора.

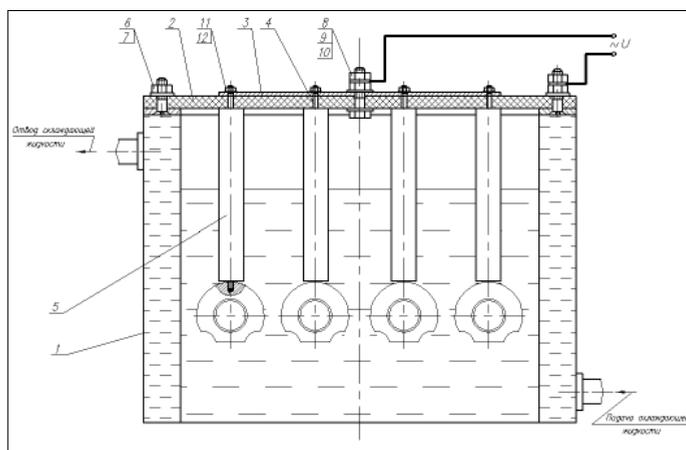


Рис. 2. Схема устройства для МДО втулок:

1 – электролитическая ванна; 2 – опорная пластина; 3 – токопроводящая перемычка; 4 – электрод; 5 – стойка; 6, 10, 11 – гайки; 7, 9, 12 – шайбы; 8 – болт

Устройство содержит четыре электрода 4 из нержавеющей стали, каждый из которых расположен внутри фторопластовой стойки 5. Электроды соединяют между собой токопроводящей перемычкой 3 и крепят к опорной пластине 2 гайками 11 через шайбы 12. Снизу на каждый из электродов

4 устанавливают оксидируемую втулку. Затем опорную пластину 2 с помощью гаек 6 закрепляют на корпусе электролитической ванны 1. После этого ванну заполняют электролитом, включают подачу охлаждающей жидкости и соединяют переключку 3 и корпус ванны 1 с токопроводами. Далее включают источник технологического тока установки МДО.

МДО осуществляют в электролите следующего состава: КОН – 1-2 г/л,  $Na_2SiO_3$  – 10-12 г/л, дистиллированная вода – остальное. Продолжительность МДО составляет 90 мин, плотность тока – 25 А/дм<sup>2</sup>, температура электролита должна находиться в пределах 30-40°С. После МДО втулки промывают в воде, обдувают сжатым воздухом и проводят финишную механическую обработку покрытия с помощью эластичного абразивного инструмента.

Сформированные МДО-покрытия подвергают контролю по внешнему виду на наличие пор, вздутостей и кратеров при помощи лупы 10<sup>x</sup>. Толщину покрытия определяют неразрушающим методом при помощи вихретокового толщиномера типа ВТ-201.

Втулка шестеренного гидромотора *REXROTH* привода вентилятора пневматической сеялки *Primera DMC-9000*, восстановленная и упрочненная с использованием разработанной комбинированной технологии, представлена на *рисунке 3*.



*Рис. 3. Втулка шестеренного гидромотора REXROTH привода вентилятора пневматической сеялки Primera DMC-9000, восстановленная и упрочненная с использованием разработанной комбинированной технологии*

**Выводы.** Разработанная комбинированная технология восстановления и упрочнения втулок шестеренных гидромоторов *REXROTH*, апробированная на примере гидромотора привода вентилятора пневматической сеялки *Primera DMC-9000* компании *AMAZONE*, в 2,2-2,3 раза повышает износостойкость втулок и значительно увеличивает ресурс гидромоторов данного типа. При помощи данной технологии можно восстанавливать втулки различных гидромоторов как отечественного, так и зарубежного производства, а также втулки шестеренных гидронасосов с минимальной переналадкой используемого при ее реализации технологического оборудования. Возможность восстановления втулок зарубежных гидромоторов с использованием предлагаемой технологии в настоящее время является особенно актуальной в связи с необходимостью широкомасштабного импортозамещения. Технология также может быть реализована на предприятиях различных форм собственности – как крупных специализированных, так и относительно небольших.

#### **Библиографический список**

1. Столяров А.В., Червяков С.В., Рогонова О.В. Исследование износов деталей регулируемых аксиально-поршневых насос-моторов // Вестник Рязанского государ-

- ственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2021. Т. 13. №4. С. 159-166.
2. Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Измалков А.А. Анализ причин потери работоспособности и износа деталей гидравлического шестеренного насоса НШ-32А // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2020. №2(26). С. 62-69.
3. Абрамов А.А. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Достижения и перспективы. Ч. I. Классификация и особенности высокопрочных литейных алюминиевых сплавов // *Литейное производство*. 2021. №2. С. 13-19.
4. Абрамов А.А. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Достижения и перспективы. Ч. II. Технологические процессы // *Литейное производство*. 2021. №3. С. 2-8.
5. Миронов А.Е., Гершман И.С., Гершман Е.И. Новые алюминиевые антифрикционные сплавы взамен бронз для монометаллических подшипников, работающих в условиях граничного трения // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016. №4(52). С. 22-31.
6. Дударева Н.Ю., Прокофьева М.А. Исследование влияния керамического покрытия на тепловое состояние гильзы цилиндра // *Двигателестроение*. 2021. №3(285). С. 3-6.
7. Mikhееv A.E., Girn A.V., Ravodina D.V., Elizar'eva I.G. The influence of prefinishing operations at titanium alloys on the characteristics of MAO coatings. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020. Т. 21. №1. 115-124.
8. Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Суминов И.В., Крит Б.Л., Борисов А.М., Григорьев С.Н. Микродуговое оксидирование // М.: МГТУ «СТАНКИН». 2020. 94 с.
9. Кристал М.М., Ивашин П.В., Полунин А.В. Микродуговое оксидирование алюминиево-кремниевых сплавов // *Тольятти: Тольяттинский государственный университет*. 2016. 128 с.
10. Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Титов Н.В. Повышение ресурса деталей машин с использованием микродугового оксидирования // *Технология машиностроения*. 2014. №9. С. 34-38.
11. Милованов Д.А., Чавдаров А.В. Исследование свойств МДО-покрытий для цилиндрической группы ДВС при нанолегировании // *Труды ГОСНИТИ*. 2018. Т. 132. С. 176-181.
12. Malyshev V.N., Volkhin A.M. Antifriction properties increasing of ceramic MAO-coatings. *Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part J. Journal of Engineering Tribology*. 2014. Vol. 228. №4. 435-444.
13. Коломейченко А.В., Чернышов Н.С., Титов Н.В., Логачев В.Н. Исследование коррозионной стойкости изделий из алюминиевых сплавов с защитными покрытиями, сформированными плазменным электролитическим оксидированием // *Электронная обработка материалов*. 2016. Т. 52. №6. С. 25-29.
14. Чавдаров А.В. Экспериментальное исследование по определению оптимального состава и толщины напыляемого слоя для дальнейшего проведения процесса МДО // *Технический сервис машин*. 2021. Т. 59. №4(145). С. 156-160.
15. Марков М.А., Кузнецов Ю.А., Красиков А.В., Быкова А.Д., Фадин Ю.А., Кравченко И.Н., Беляков А.Н., Перевислов С.Н. Исследование характеристик керамических покрытий, полученных микродуговым оксидированием на постоянном и переменном токах в силикатно-щелочном электролите // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2020. №1. С. 72-80.
16. Козлов И.А., Лецев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. №8(90). С. 77-93.
17. Чавдаров А.В., Толкачев А.А. Восстановление внутренних поверхностей цилиндрических деталей малых диаметров холодным газодинамическим напылением // *Технический сервис машин*. 2020. Т. 58. №3(140). С. 128-136.
18. Буздыгар Т.В., Каширин А.И., Клюев О.Ф., Шкодкин А.В. Применение газоди-

намического напыления металлов в ремонте автотракторной техники // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 105. С. 167-169.

19. Кузнецов Ю.А., Гончаренко В.В., Денисьев С.А., Стребков С.В., Слободюк А.П., Бондарев А.В. Восстановление работоспособности радиатора трактора «холодным» газодинамическим напылением // Техника и оборудование для села. 2016. N3. С. 33-36.

20. Коломейченко А.В., Чернышов Н.С., Титов Н.В., Логачев В.Н. Повышение ресурса деталей машин пайкой и микродуговым оксидированием // Курск: ЗАО «Университетская книга». 2020. 191 с.

21. Kolomeichenko A.V., Sharifullin S.N., Logachev V.N., Kuznetsov Yu.A., Kravchenko I.N., Baranov Yu.N. Properties of coatings formed by plasma electrolytic oxidation on plastically deformed aluminum alloy AO3-7. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1328. 012099.

22. Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Титов Н.В., Кравченко И.Н. Микродуговое оксидирование как способ повышения ресурса деталей машин при их производстве или восстановлении // Техника и оборудование для села. 2014. N4. С. 30-35.

23. Kolomeichenko A.V., Kuznetsov Y.A., Logachev V.N., Titov N.V., Sharifullin S.N. Increase of the resource of machine parts working by combined methods using plasma electrolytic oxidation. *Journal of Physics: conference series* 9. Low-temperature lasma during the deposition of functional coatings. 2018. 012074.

24. Титов Н.В. Повышение ресурса головок цилиндров двигателей применением комбинированной технологии // Современные проблемы и направления развития агроинженерии в России: сборник научных статей Международной научно-технической конференции. Курск. 2021. С. 132-135.

25. Ерохин М.Н., Дородов П.В., Дорохов А.С. К вопросу о концентрации напряжений и оптимизации формы переходной поверхности ступенчатого вала // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 3. С. 45-55.

26. Верхотуров А.Д., Иванов В.И., Дорохов А.С. [и др.] Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 3. С. 302-320.

## References

1. Stolyarov A.V., Chervyakov S.V., Rogonova O.V. Issledovaniye iznosov detaley reguliruyemykh aksial'no-porshnevnykh nasos-motorov [Wear of parts of adjustable axial piston pump motors]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2021. Vol. 13. N4. 159-166 (In Russian).

2. Kolomeychenko A.V., Logachev V.N., Izmalkov A.A. Analiz prichin poteri rabotosposobnosti i iznosa detaley gidravlicheskogo shesterennogo nasosa NSH-32A [Causes of failures and wear of parts of the hydraulic gear pump NSH-32A]. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*. 2020. N2(26). 62-69 (In Russian).

3. Abramov A.A. Vysokoprochnyye litynyye alyuminiyevyye splavy. Dostizheniya i perspektivy. Ch. I. Klassifikatsiya i osobennosti vysokoprochnnykh litynykh alyuminiyevykh splavov [High-strength cast aluminum alloys. Achievements and prospects. Part I. Classification and features of high-strength cast aluminum alloys]. *Liteynoye proizvodstvo*. 2021. N2. 13-19 (In Russian).

4. Abramov A.A. Vysokoprochnyye litynyye alyuminiyevyye splavy. Dostizheniya i perspektivy. Ch. II. Tekhnologicheskiye protsessy [High-strength cast aluminum alloys. Achievements and prospects. Part II. Technological processes]. *Liteynoye proizvodstvo*. 2021. N3. 2-8 (In Russian).

5. Mironov A.E., Gershman I.S., Gershman E.I. Novyye alyuminiyevyye antifriktsionnyye splavy vzamen bronz dlya monometallicheskiikh podshipnikov, rabotayushchikh v usloviyakh

granichnogo treniya [New aluminum antifriction alloys instead of bronzes for monometallic bearings operating under conditions of boundary friction]. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. N4(52). 22-31 (In Russian).

6. Dudareva N.Yu., Prokof'yeva M.A. Issledovaniye vliyaniya keramicheskogo pokrytiya na teplovoye sostoyaniye gil'zy tsilindra [The effect of ceramic coating on the thermal state of the cylinder liner]. Dvigatelayeniye. 2021. N3(285). 3-6 (In Russian).

7. Mikheev A.E., Girn A.V., Ravodina D.V., Elizar'eva I.G. The influence of prefinishing operations at titanium alloys on the characteristics of MAO coatings. Siberian Journal of Science and Technology. 2020. T. 21. N1. 115-124.

8. Epel'fel'd A.V., Lyudin V.B., Suminov I.V., Krit B.L., Borisov A.M., Grigor'yev S.N. Mikrodogovoye oksidirovaniye [Microarc oxidation]. Moscow: MGTU «STANKIN». 2020. 94 (In Russian).

9. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Polunin A.V. Mikrodogovoye oksidirovaniye alyuminiyevo-kremniyevykh splavov [Microarc oxidation of aluminum-silicon alloys]. Tol'yatti: Tol'yattinskiy gosudarstvennyy universitet. 2016. 128 (In Russian).

10. Kolomeychenko A.V., Logachev V.N., Titov N.V. Povysheniye resursa detaley mashin s ispol'zovaniyem mikrodogovogo oksidirovaniya [Increasing the service life of machine parts using micro-arc oxidation]. Tekhnologiya mashinostroyeniya. 2014. N9. 34-38 (In Russian).

11. Milovanov D.A., Chavdarov A.V. Issledovaniye svoystv MDO-pokrytiy dlya tsilindro-porshnevoy gruppy DVS pri nanolegirovanii [Properties of micro-arc coatings for the cylinder-piston group of internal combustion engines during nanoloading]. Trudy GOSNITI. 2018. 132. 176-181 (In Russian).

12. Malyshev V.N., Volkhin A.M. Antifriction properties increasing of ceramic MAO-coatings. Proceedings of the institution of mechanical engineers. Part J. Journal of Engineering Tribology. 2014. Vol. 228. N4. 435-444.

13. Kolomeychenko A.V., Chernyshov N.S., Titov N.V., Logachev V.N. Issledovaniye korrozionnoy stoykosti izdeliy iz alyuminiyevykh splavov s zashchitnymi pokrytiyami, sformirovannymi plazmennym elektroliticheskim oksidirovaniyem [Corrosion resistance of aluminum alloy products with protective coatings formed by plasma electrolytic oxidation]. Elektronnaya obrabotka materialov. 2016. Vol. 52. N6. 25-29 (In Russian).

14. Chavdarov A.V. Eksperimental'noye issledovaniye po opredeleniyu optimal'nogo sostava i tolshchiny napylyayemogo sloya dlya dal'neyshogo provedeniya protsessa MDO [Experimental study to assess the optimal composition and thickness of the sprayed layer for further implementation of the micro-arc process]. Tekhnicheskyy servis mashin. 2021. 59. N4(145). 156-160 (In Russian).

15. Markov M.A., Kuznetsov Yu.A., Krasikov A.V., Bykova A.D., Fadin Yu.A., Kravchenko I.N., Belyakov A.N., Perevislov S.N. Issledovaniye kharakteristik keramicheskikh pokrytiy, poluchennykh mikrodogovym oksidirovaniyem na postoyannom i peremennom tokakh v silikatno-shchelochnom elektrolite [Characteristics of ceramic coatings obtained by microarc oxidation at direct and alternating currents in a silicate-alkaline electrolyte]. Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii. 2020. N1. 72-80 (In Russian).

16. Kozlov I.A., Leshchev K.A., Nikiforov A.A., Demin S.A. Kholodnoye gazodinamicheskoye napyleniye pokrytiy (obzor) [Cold gas dynamic coating spraying (overview)]. Trudy VIAM. 2020. N8(90). 77-93 (In Russian).

17. Chavdarov A.V., Tolkachev A.A. Vosstanovleniye vnutrennikh poverkhnostey tsilindricheskikh detaley malykh diametrov kholodnym gazodinamicheskim napyleniyem [Restoration of internal surfaces of cylindrical parts of small diameters by cold gas-dynamic spraying]. Tekhnicheskyy servis mashin. 2020. Vol. 58. N3(140). 128-136 (In Russian).

18. Buzdygar T.V., Kashirin A.I., Klyuyev O.F., Shkodkin A.V. Primeneniye gazodinamicheskogo napyleniya metallov v remonte avtotraktornoy tekhniki [Application of gas-dynamic spraying of metals in the repair of automotive equipment]. Trudy GOSNITI. 2010. Vol. 105. 167-169 (In Russian).

19. Kuznetsov Yu.A., Goncharenko V.V., Denis'yev S.A., Strebkov S.V., Slobodyuk A.P., Bondarev A.V. Vosstanovleniye rabotosposobnosti radiatora traktora «kholodnym» gazodinamicheskim napyleniyem [Restoration of tractor radiator operability by "cold" gas-dynamic spraying]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*. 2016. N3. 33-36 (In Russian).

20. Kolomeychenko A.V., Chernyshov N.S., Titov N.V., Logachev V.N. Povysheniye resursa detaley mashin paykoy i mikro dugovym oksidirovaniyem [Increasing the life of machine parts by soldering and micro-arc oxidation]. *Kursk: ZAO «Universitetskaya kniga»*. 2020. 191 (In Russian).

21. Kolomeichenko A.V., Sharifullin S.N., Logachev V.N., Kuznetsov Yu.A., Kravchenko I.N., Baranov Yu.N. Properties of coatings formed by plasma electrolytic oxidation on plastically deformed aluminum alloy AO3-7. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1328. 012099.

22. Kolomeychenko A.V., Logachev V.N., Titov N.V., Kravchenko I.N. Mikro dugovoye oksidirovaniye kak sposob povysheniya resursa detaley mashin pri ikh proizvodstve ili vosstanovlenii [Microarc oxidation as a way to increase the life of machine parts during their production or restoration]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*. 2014. N4. 30-35 (In Russian).

23. Kolomeichenko A.V., Kuznetsov Y.A., Logachev V.N., Titov N.V., Sharifullin S.N. Increase of the resource of machine parts working by combined methods using plasma electrolytic oxidation. *Journal of Physics: conference series 9. Low-temperature lasma during the deposition of functional coatings*. 2018. 012074.

24. Titov N.V. Povysheniye resursa golovok tsilindrov dvigateley primeneniym kombinirovannoy tekhnologii [Increasing the service life of engine cylinder heads using combined technology]. *Sovremennyye problemy i napravleniya razvitiya agroinzhenierii v Rossii: sbornik nauchnykh statey Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Kursk*. 2021. 132-135 (In Russian).

25. Erokhin M.N., Dorodov P.V., Dorokhov A.S. K voprosu o kontsentratsii napryazheniy i optimizatsii formy perekhodnoy poverkhnosti stupenchatogo vala [On the issue of stress concentration and optimization of the shape of the transition surface of the stepped shaft]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2020. N3. 45-55 (In Russian).

26. Verkhoturov A.D., Ivanov V.I., Dorokhov A.S., et al. Vliyanie prirody elektrodnykh materialov na eroziyu i svoystva legirovannogo sloya. Kriterii otsenki effektivnosti elektroiskrovogo legirovaniya [Influence of the nature of electrode materials on erosion and properties of the alloyed layer. Criteria for evaluating the effectiveness of electric spark alloying]. *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2018. Vol. 28. N3. 302-320 (In Russian).

#### **Заявленный вклад соавторов**

Коломейченко А.В. – научное руководство, анализ и доработка текста;  
Логачев В.Н. – подготовка и анализ литературных данных,  
редактирование текста;

Титов Н.В. – подготовка текста, анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

#### **Contributions of the coauthors**

Kolomeichenko A.V. – scientific guidance, analysis and revision of the manuscript;

Logachev V.N. – preparation and analysis of literary data, editing the manuscript;

Titov N.V. – writing the manuscript, data analysis.

All the authors have read and approved the final manuscript.