



Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»
(ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС МАШИН

№3 (152) 2023

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА КРЫШЕК ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДВИГАТЕЛЕЙ

¹Николай Владимирович Титов, кандидат технических наук, доцент, e-mail: ogau@mail.ru;

¹Владимир Николаевич Логачев, кандидат технических наук, доцент;

²Александр Викторович Коломейченко, доктор технических наук, профессор;

¹Иван Сергеевич Кузнецов, кандидат технических наук, доцент;

¹Николай Сергеевич Чернышов, кандидат технических наук, доцент

¹Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина,
г. Орел, Российская Федерация

²Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный
институт «НАМИ», Москва, Российская Федерация

Реферат. Современным способом упрочнения деталей из алюминиевых сплавов служит микродуговое оксидирование. Технологические рекомендации по формированию упрочняющих покрытий способом микродугового оксидирования на рабочих поверхностях крышек газораспределительного механизма двигателей из алюминиевых сплавов, восстановленных способом сверхзвукового газодинамического напыления, пока еще остаются в недостаточной степени разработанными. (Цель исследования) Разработать комбинированную технологию восстановления крышек газораспределительного механизма двигателей из алюминиевых сплавов способом сверхзвукового газодинамического напыления с последующим упрочнением способом микродугового оксидирования, позволяющую значительно увеличить их ресурс в условиях эксплуатации. (Материалы и методы) Использовали для сверхзвукового газодинамического напыления порошковые материалы марок А-80-13, А-20-11, выпускаемые Обнинским центром порошкового напыления. Отметили, что основными компонентами данных порошковых материалов служат алюминий и цинк, а также неметаллические керамические компоненты. Применяли при микродуговом оксидировании силикатно-щелочной электролит типа «KOH-Na₂SiO₃» как наиболее доступный, широко используемый и легко утилизируемый. (Результаты и обсуждение) Разработали комбинированную технологию восстановления с упрочнением рабочих поверхностей крышек газораспределительного механизма двигателей из алюминиевых сплавов, которая включает следующие основные операции: очистку крышек; их дефектацию; предварительную механическую обработку; сверхзвуковое газодинамическое напыление изношенных поверхностей; их последующее упрочнение микродуговым оксидированием; финишную механическую обработку покрытия и контроль. (Выводы) Предложенная комбинированная технология позволит в среднем в 2,4 раза повысить ресурс крышек в условиях рядовой эксплуатации. Данная технология универсальная, а возможность восстановления крышек зарубежных двигателей особенно актуальна в связи с необходимостью широкомасштабного импортозамещения.

Ключевые слова: сверхзвуковое газодинамическое напыление, микродуговое оксидирование, крышка газораспределительного механизма, восстановление, упрочнение, алюминиевые сплавы, ресурс.

Для цитирования: Титов Н.В., Логачев В.Н., Коломейченко А.В., Кузнецов И.С., Чернышов Н.С. Технология повышения ресурса крышек газораспределительного механизма двигателей // Технический сервис машин. 2023. Т. 61. N3(152). С. 69-75. DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-3-69-75. LEGHYI.

INCREASING THE SERVICE LIFE OF THE COVERS OF THE GAS DISTRIBUTION MECHANISM

¹Nikolay V. Titov, Ph.D.(Eng.), associate professor;

¹Vladimir N. Logachev, Ph.D.(Eng.), associate professor;

²Aleksandr V. Kolomeichenko, Dr.Sc.(Eng.), professor;

¹Ivan S. Kuznetsov, Ph.D.(Eng.), associate professor;

¹Nikolay S. Chernyshov, Ph.D.(Eng.), associate professor

¹Orlov State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Orel, Russian Federation

²Central Research Automobile and Automotive Institute «NAMI», Moscow, Russian Federation

Abstract. Micro-arc oxidation is a modern method of hardening aluminum alloy parts. Technological recommendations for the formation of reinforcing coatings by micro-arc oxidation on the working surfaces of the covers of the gas distribution mechanism of engines made of aluminum alloys recovered by the supersonic gas dynamic spraying method are still insufficiently developed. (Research purpose) The research purpose is developing a technology for restoring the covers of the gas distribution mechanism of engines made of aluminum alloys by supersonic gas-dynamic spraying with hardening by micro-arc oxidation, which allows significant increasing their service life. (Materials and methods) Powder materials of grades A-80-13, A-20-11 produced by the Obninsk Powder Spraying Center were used for supersonic gas dynamic spraying. It was noted that the main components of these powder materials are aluminum and zinc, as well as non-metallic ceramic components. A silicate-alkaline electrolyte of the «KOH-Na₂SiO₃» type was used for microarc oxidation as the most affordable, widely used and easily disposed of. (Results and discussion) We have developed a combined recovery technology with hardening of the working surfaces of the covers of the gas distribution mechanism of engines made of aluminum alloys, which includes the following basic operations: cleaning of the covers; their defecation; preliminary mechanical treatment; supersonic gas-dynamic spraying of worn surfaces; their subsequent hardening by micro-arc oxidation; finishing mechanical treatment of the coating and control. (Conclusions) The developed combined technology will allow an average of 2.4 times to increase the life of the covers in ordinary operation. This technology is universal, and the possibility of restoring the covers of foreign engines is especially relevant due to the need for large-scale import substitution.

Keywords: supersonic gas dynamic spraying, micro-arc oxidation, cover of a gas distribution mechanism, restoration, hardening, aluminum alloys, resource.

For citation: Titov N.V., Logachev V.N., Kolomeychenko A.V., Kuznetsov I.S., Chernyshov N.S. Tekhnologiya povysheniya resursa kryshek gazoraspredeletel'nogo mekhanizma dvigateley [Increasing the service life of the covers of the gas distribution mechanism]. Tekhnicheskii servis mashin. 2023. Vol. 61. N3(152). 69-75 (In Russian). DOI 10.22314/2618-8287-2023-61-3-69-75. LEGHYI.

В узлах и механизмах сельскохозяйственной техники широко используются детали из алюминиевых сплавов. Данные сплавы имеют комплекс ценных свойств, которые выгодно отличают их от других материалов [1-3].

Среди деталей из алюминиевых сплавов широкое распространение получили крышки газораспределительного механизма двигателей внутреннего сгорания. В то же время агрессивные жидкости (тосол, антифриз), используемые в системе охлаждения современных двигателей, приводят к значительным коррозионным разрушениям рабочих поверхностей данных деталей (рис. 1).

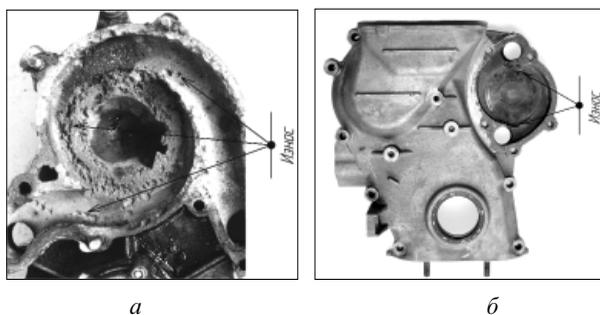


Рис. 1. Изношенные поверхности под крыльчатку водяного насоса крышки газораспределительного механизма двигателей: а – семейства ЗМЗ-511/523; б – семейства ЗМЗ-406.10

Детали из алюминиевых сплавов в ремонтном производстве чаще всего восстанавливают аргон-

нодуговой сваркой и наплавкой или высокотемпературной пайкой [4-6].

Однако данные технологии имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение для восстановления крышек газораспределительного механизма двигателей. Одним из перспективных способов восстановления деталей из алюминиевых сплавов в настоящее время служит сверхзвуковое газодинамическое напыление (СГДН) [7-11].

Способ СГДН 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. Однако несмотря на перспективность данного способа, при его использовании не обеспечивается высокая износостойкость восстановленных деталей. Это связано с тем, что при СГДН используют порошковые материалы преимущественно из пластичных металлов – алюминия, меди, цинка, никеля, олова и т. д. Все это приводит к необходимости использования упрочняющих технологий для повышения ресурса деталей из алюминиевых сплавов, восстановленных с использованием технологии СГДН.

В настоящее время инновационным способом упрочнения деталей из алюминиевых сплавов служит микродуговое окисление (МДО). Данный

способ – перспективный и востребованный, о чем говорит значительное количество публикаций как отечественных, так и зарубежных ученых [12-20].

Вместе с тем остаются не в полной мере разработанными технологические рекомендации по формированию упрочняющих покрытий способом МДО на рабочих поверхностях деталей, восстановленных СГДН.

Цель исследования – разработать комбинированную технологию восстановления крышек газораспределительного механизма двигателей из алюминиевых сплавов способом СГДН с последующим упрочнением МДО, позволяющую значительно увеличить их ресурс в условиях эксплуатации.

Материалы и методы. Для СГДН покрытий использовали порошки марок А-80-13 ТУ 1791-011-40707672-00 и А-20-11 ТУ 1721-031-40707672-00, выпускаемые Обнинским центром порошкового напыления (ОЦПН). Как показал проведенный анализ литературы, а также собственные предварительные исследования, данные порошковые материалы являются наиболее целесообразными для восстановления различных дефектов деталей из алюминиевых сплавов [9-11]. Основными компонентами данных порошковых материалов служат алюминий и цинк, а также неметаллические керамические компоненты.

При проведении исследований применили анодно-катодное МДО. Для МДО согласно рекомендациям работ использовали силикатно-щелочной электролит типа КОН- Na_2SiO_3 как наиболее доступный и широко используемый многими учеными, а также легко утилизируемый [12, 14-16, 19-21]. В составе данного электролита гидроксид калия КОН служит главным образом для создания электропроводности дистиллированной воды. Натриевое жидкое стекло Na_2SiO_3 (второй компонент электролита) добавляют в основном для стабилизации раствора, оно позволяет в определенных пределах увеличить линейные размеры оксидируемой детали.

Результаты и обсуждение. Учитывая перспективность способа СГДН, на основе комплекса проведенных исследований нами разработана комбинированная технология восстановления с упрочнением рабочих поверхностей крышек газораспределительного механизма двигателей из алюминиевых сплавов, позволяющая значительно повысить их ресурс [22, 23].

Технология включает следующие основные операции: очистку крышек, их дефектацию, предварительную механическую обработку, СГДН изношенных поверхностей, их последующее упрочнение МДО, финишную механическую обработку покрытия и контроль восстановленных и упрочненных деталей.

Крышки газораспределительного механизма,

поступающие на восстановление, очищают от грязи и масла с помощью моющих средств типа Лабомид или МС. Затем детали промывают в теплой воде, имеющей температуру не ниже 30-35 °С, и высушивают. Очищенные крышки подвергают дефектации, используя при этом микрометрические глубиномеры типа ГМ (ГОСТ 7470) и штангенциркули типа ШЦ-I-160-0,1 (ГОСТ 166). Предварительную механическую обработку изношенных поверхностей целесообразно осуществлять с использованием ручных шлифовальных машин, например, для этих целей можно использовать машины типа ПМШ 170.

Далее осуществляют СГДН изношенных рабочих поверхностей крышек, используя одну из установок торговой марки ДИМЕТ. Например, ДИМЕТ-404, 405 или 421. По результатам предварительно проведенных исследований в качестве напыляемого материала наиболее целесообразно использовать порошок марки А-20-11. Структура покрытия, получаемого при его использовании, является плотной и практически не имеет пор (рис. 2).

Покрытие обладает плотной границей раздела с основным металлом восстанавливаемой детали без зазоров, пор или полостей. Это обеспечивает его высокую прочность сцепления и низкую газопроницаемость. СГДН восстанавливаемых крышек газораспределительного механизма целесообразно вести на следующих рациональных режимах: давление сжатого воздуха – 0,55-0,60 МПа, температура нагрева воздуха в напылительном блоке – 400 °С, скорость полета частиц напыляемого материала – 420-450 м/с, дистанция напыления – 10-15 мм.

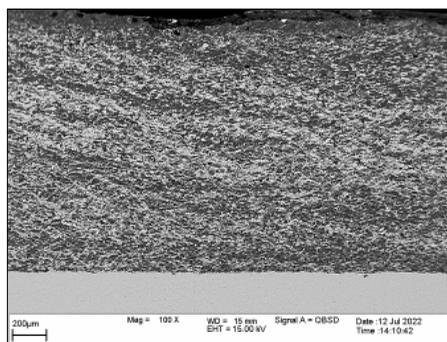


Рис. 2. Структура покрытия, полученного при СГДН

После СГДН плоскость разъема восстанавливаемой крышки фрезеруют на вертикально-фрезерном станке типа 6Р12. Затем обрабатывают восстанавливаемые рабочие поверхности крышки с использованием координатно-расточного станка типа 2450 или вертикально-фрезерного станка типа 6Р12. Обработку производят с учетом припуска под покрытие, формируемое МДО. Это обеспечивает образование упрочненного слоя покрытия не только внутри крышки, но и наружу, позволяя увеличить толщину упрочненного слоя и снизить

класс точности механической обработки, что уменьшает количество бракуемых деталей. Далее крышку обезжиривают в водном растворе, содержащем 5-10 г/л $NaOH$, 40-50 г/л Na_3PO_4 и 3-5 г/л Na_2SiO_3 , при температуре 60-70 °С, в течение 1,0-1,5 мин. Затем ее промывают водой, нагретой до температуры 40-50 °С, в течение 3-5 мин, после чего поверхности, не подлежащие упрочнению, изолируют. Подготовленную крышку монтируют на подвеску, устанавливают электроды и размещают в ванне-электролизере проточной установки для МДО (рис. 3).

При работе установки включается щелочестойкий насос 4, приводимый в движение электродвигателем 5, который засасывает электролит из ванны-электролизера 2 и нагнетает его через трубопровод 8, охладитель 6 и подводную трубу 7 во внутреннюю полость упрочняемой поверхности крышки. В это же время открывается кран и через входной патрубок в секцию охлаждения охладителя 6 подается охлаждающий реагент, который после заполнения секции охлаждения отводится через выходной патрубок. Когда оксидируемая поверхность крышки окажется полностью заполненной электролитом и он вновь начинает сливаться в ванну-электролизер 2, включается источник питания установки МДО. Использование охладителя позволяет поддерживать температуру электролита в интервале 30-35 °С, что способствует улучшению физико-механических свойств формируемых покрытий.

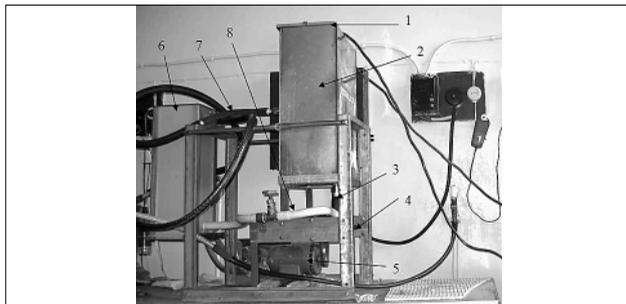


Рис. 3. Общий вид проточной установки для МДО крышек газораспределительного механизма двигателей: 1 – подвеска; 2 – ванна-электролизер; 3 – отводная труба; 4 – щелочестойкий насос; 5 – электродвигатель; 6 – охладитель; 7 – подводная труба; 8 – трубопровод

МДО ведут в электролите следующего состава: KOH – 3 г/л, Na_2SiO_3 – 10 г/л. Оксидирование необходимо начинать при плотности тока 30- 35 А/дм², а после выхода процесса на режим снижать ее до рабочей – 20 А/дм². Продолжительность оксидирования составляет 90-100 мин. После МДО крышку снимают с подвески, промывают проточной водой комнатной температуры, сушат и осуществляют финишную механическую обработку покрытия с

помощью эластичного абразивного инструмента.

Упрочняющие покрытия, сформированные при МДО, подвергают контролю по внешнему виду на наличие пор, вздутий и кратеров при помощи лупы 10х. Толщину покрытия определяют неразрушающим методом с помощью вихретокового толщиномера типа ВТ-201.

Крышку газораспределительного механизма двигателя ЗМЗ-511/523, прошедшую все этапы разработанного технологического процесса восстановления и упрочнения, представили на рисунке 4.

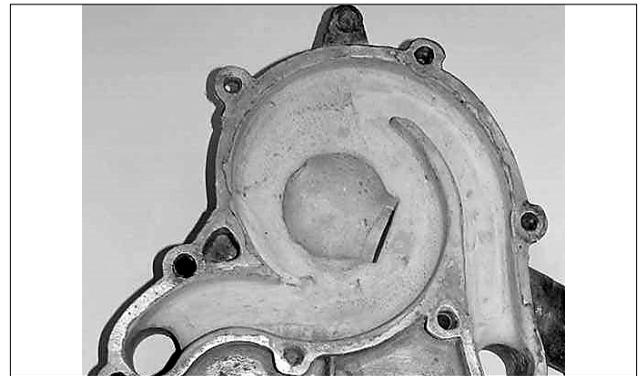


Рис. 4. Поверхность под крыльчатку водяного насоса крышки газораспределительного механизма двигателя ЗМЗ-511/523, восстановленная СГДН и упрочненная МДО по разработанной технологии

В результате предварительно проведенных исследований установили, что себестоимость C_B восстановления с упрочнением крышки газораспределительного механизма двигателя ЗМЗ-511/523 составляет 6780 руб., стоимость C_H новой крышки составляет в среднем 9500 руб. Тогда экономическую эффективность \mathcal{E}_B разработанной технологии можно определить с использованием следующего соотношения [22, 23]:

$$\mathcal{E}_B = \left(\frac{C_H - C_{ост}^H}{P_H} - \frac{C_B - C_{ост}^B}{P_B} \right) P_B, \text{ руб.},$$

где $C_{ост}^H$, $C_{ост}^B$ – остаточная стоимость после эксплуатации новых и восстановленных с упрочнением крышек, руб. (определяется обычно по цене металлолома с учетом массы изношенной детали и материала, из которого она изготовлена);

P_H , P_B – ресурс новой и восстановленной с упрочнением крышки, тыс. км:

$$\mathcal{E}_B = \left(\frac{9500 - 89,3}{100} - \frac{6780 - 89,3}{240} \right) \cdot 240 = 15894 \text{ руб.}$$

Выводы. Разработанная комбинированная технология восстановления с упрочнением рабочих поверхностей крышек газораспределительного механизма двигателей из алюминиевых сплавов с использованием способов СГДН и МДО позволит в среднем в 2,4 раза повысить ресурс деталей данного типа в условиях рядовой эксплуатации. Пред-

ставленная технология позволяет восстанавливать крышки различных размеров и формы как отечественных, так и зарубежных двигателей с минимальной переналадкой используемого при ее реализации технологического оборудования. Возможность восстановления крышек зарубежных двигателей с использованием предлагаемой технологии в настоящее время особенно актуальна в связи с необходимостью широкомасштабного импортозамещения.

Библиографический список

1. 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. N4(52). С. 22-31.

2. Абрамов А.А. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Достижения и перспективы. Ч. I. Классификация и особенности высокопрочных литейных алюминиевых сплавов // Литейное производство. 2021. N2. С. 13-19.

3. Абрамов А.А. Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. Достижения и перспективы. Ч. II. Технологические процессы // Литейное производство. 2021. N3. С. 2-8.

4. Черноиванов В.И., Лялякин В.П., Голубев И.Г. Организация и технология восстановления деталей машин. М.: Росинформагротех. 2016. 568 с.

5. Корнеев В.М., Новиков В.С., Кравченко И.Н., Очковский Н.А., Петровский Д.И. Технология ремонта машин. М.: ИНФРА-М. 2018. 312 с.

6. Михальченков А.М., Тюрева А.А., Козарез И.В. Ресурсосберегающие технологии ремонта сельскохозяйственной техники. Брянск: Брянский ГАУ. 2018. 249 с.

7. Буздыгар Т.В., Каширин А.И., Клюев О.Ф., Шкодкин А.В. Применение газодинамического напыления металлов в ремонте автотракторной техники // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 105. С. 167-169.

8. Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. N8(90). С. 77-93.

9. Назаркин А.С., Сахаров А.Ю., Земсков А.М., Ионов П.А. Поиск рациональных технологических режимов холодного газодинамического напыления // Технический сервис машин. 2019. Т. 57. N3(136). С. 106-113.

10. Чавдаров А.В., Толкачев А.А. Восстановление внутренних поверхностей цилиндрических деталей малых диаметров холодным газодинамическим напылением // Технический сервис машин. 2020. Т. 58. N3(140). С. 128-136.

11. 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.

12. 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. N1. С. 72-80.

13. 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. Vol. 21. N1. С. 115-124.

14. 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.

15. Криштал М.М., Ивашин П.В., Полунин А.В. Микродуговое оксидирование алюминиево-кремниевых сплавов. Тольятти: Изд-во ТГУ. 2016. 128 с.

16. Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Титов Н.В. Повышение ресурса деталей машин с использованием микродугового оксидирования // Технология машиностроения. 2014. N9. С. 34-38.

17. Милованов Д.А., Чавдаров А.В. Исследование свойств МДО-покрытий для цилиндрической группы ДВС при нанолегировании // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 132. С. 176-181.

18. 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.

19. Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Титов Н.В. Комбинированные способы восстановления и упрочнения деталей машин с использованием МДО-покрытий // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 115. С. 150-157.

20. Чавдаров А.В. Экспериментальное исследование по определению оптимального состава и толщины напыляемого слоя для дальнейшего проведения процесса МДО // Технический сервис машин. 2021. Т. 59. N4(145). С. 156-160.

21. Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Титов Н.В., Кравченко И.Н. Повышение надежности деталей машин комбинированными методами с применением микродугового оксидирования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2014. N9. С. 17-23.

22. Кузнецов Ю.А., Баширцев В.И., Баширцев Ю.В. Технико-экономическое обоснование внедрения мероприятий научно-технического прогресса в АПК. М.: Российская инженерная академия менеджмента и агробизнеса. 2015. 91 с.

23. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / Под ред. А.В. Шпилько. М.: Прогресс-Академия. 1998. 219 с.

References

1. Mironov A.E., Gershman I.S., Gershman E.I. Novyye alyuminiyevyye antifriktsionnyye splavy vzamen bronz

dlya monometallicheskih 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).

2. Abramov A.A. Vysokoprochnyye liteynyye alyuminiyevyye splavy. Dostizheniya i perspektivy. Ch. I. Klassifikatsiya i osobennosti vysokoprochnyykh liteynyykh alyuminiyevyykh 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).

3. Abramov A.A. Vysokoprochnyye liteynyye 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).

4. Chernov Ivanov V.I., Lyalyakin V.P., Golubev I.G. Organizatsiya i tekhnologiya vosstanovleniya detaley mashin [Organization and technology of restoration of machine parts]. Moscow: Rosinformagrotekh. 2016. 568 (In Russian).

5. Korneyev V.M., Novikov V.S., Kravchenko I.N., Ochkovskiy N.A., Petrovskiy D.I. Tekhnologiya remonta mashin [Machine repair technology]. Moscow: INFRA-M. 2018. 312 (In Russian).

6. Mikhal'chenkov A.M., Tyureva A.A., Kozarez I.V. Resursoberegayushchiye tekhnologii remonta sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Resource-saving technologies for agricultural machinery repair]. Bryansk: Bryanskiy GAU. 2018. 249 (In Russian).

7. 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).

8. 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).

9. Nazarkin A.S., Sakharov A.Yu., Zemskov A.M., Ionov P.A. Poisk ratsional'nykh tekhnologicheskikh rezhimov kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniya [Search for rational technological modes of cold gas dynamic spraying]. Tekhnicheskyy servis mashin. 2019. Vol. 57. N3(136). 106-113 (In Russian).

10. 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).

11. Kolomeychenko A.V., Logachev V.N., Titov N.V. Kombinirovannaya tekhnologiya vosstanovleniya i

uprochneniya vtulok shesterennykh gidromotorov c ispol'zovaniyem gazodinamicheskogo napyleniya [Combined technology of restoration and hardening of gear motor bushings using gas dynamic spraying]. Tekhnicheskyy servis mashin. 2022. Vol. 60. N4(149). 68-77 (In Russian).

12. 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).

13. 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. Vol. 21. N1. 115-124.

14. 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: MGТУ «STANKIN». 2020. 94 (In Russian).

15. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Polunin A.V. Mikrodogovoye oksidirovaniye alyuminiyevokremniyevyykh splavov [Microarc oxidation of aluminum-silicon alloys]. Tol'yatti: Izd-vo TGU. 2016. 128 (In Russian).

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

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

18. 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.

19. Kolomeychenko A.V., Logachev V.N., Titov N.V. Kombinirovannyye sposoby vosstanovleniya i uprochneniya detaley mashin s ispol'zovaniyem MDO-pokrytiy [Combined methods of restoration and hardening of machine parts using MDO coatings]. Trudy GOSNITI. 2014. Vol. 115. 150-157 (In Russian).

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

21. Kolomeychenko A.V., Logachev V.N., Titov N.V.,

Kravchenko I.N. Povysheniye nadezhnosti detaley mashin kombinirovannymi metodami s primeneniym mikrodogovogo oksidirovaniya [Improving the reliability of machine parts by combined methods using microarc oxidation]. Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya. 2014. N9. 17-23 (In Russian).

22. *Kuznetsov Yu.A., Bashkirtsev V.I., Bashkirtsev Yu.V. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye vnedreniya meropriyatiy nauchno-tekhnicheskogo progressa v APK [Feasibility of introducing scientific and technological progress measures in the agro-industrial complex]. Moscow: Rossiyskaya inzhenernaya akademiya menedzhmenta i agrobiznesa. 2015. 91 (In Russian).*

23. *Metodika opredeleniya ekonomicheskoy effektivnosti tekhnologii i sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Methodology for determining the economic efficiency of technologies and agricultural machinery]. Ed. by A.V. Shpil'ko. Moscow: Progress–Akademiya. 1998. 219 (In Russian).*

Заявленный вклад соавторов

Титов Н.В. – научное руководство, анализ и доработка текста;

Логачев В.Н. – подготовка текста;

Коломейченко А.В. – подготовка текста, анализ данных;

Кузнецов И.С. – редактирование текста;

Чернышов Н.С. – подготовка и анализ литературных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contributions of the coauthors

Titov N.V. – scientific guidance, analysis and revision of the manuscript;

Logachev V.N. – manuscript preparation;

Kolomeichenko A.V. – manuscript preparation, data analysis;

Kuznetsov I.S. – manuscript editing;

Chernyshov N.S. – preparation and analysis of literary data.

All the authors have read and approved the final manuscript.