

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №5 (167). С.42-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P.42-48.

Научная статья

УДК 621.891

doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-42-48

Повышение износостойкости поверхности деталей в прецизионных парах трения сельскохозяйственных машин методом финишной антифрикционной безабразивной обработки

Владимир Анатольевич Погоньшев¹, д.т.н.

Илья Алексеевич Мокшин², магистр

Дина Алексеевна Погоньшева³, д.п.н.

Татьяна Викторовна Бычкова⁴, к.п.н.

^{1, 2, 3, 4} Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Россия

¹ pog@bgsha.com, <https://orcid.org/0009-0008-8799-5974>

² imokshin_1998@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3161-8700>

³ dpogonysheva32@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3149-0976>

⁴ tanyabychkova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7457-8783>

Аннотация. Представлены результаты исследования, которые направлены на создание защитных адгезионных наноплёночных покрытий из алюминия, которые наносятся на сталь марки 45 с использованием фрикционного метода. Для этого применяется прутковый инструмент, закреплённый в специальном устройстве и находящийся под давлением. В качестве образцов для сравнительных испытаний использовалась сталь 45 по ГОСТ 1050-2013, предварительно обезжиренная бензолом (ГОСТ Р 58415-2019, С6Н6) или спиртом (ГОСТ Р 55878-2013, С2Н5ОН). После этого с поверхности образцов удаляли окисный слой с помощью абразивного материала (ГОСТ 6456-82), а для сохранения ювенильной поверхности сразу наносили слой глицерина (ГОСТ 6824-96, СН₂(ОН)-СН(ОН)-СН₂ОН) с последующим покрытием медно-алюминиевой плёнкой. В работе изучено взаимодействие плёнок, нанесённых на поверхность образцов методом финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО). Исследованы защитные свойства алюминия как покрытия. В ходе экспериментов были определены условия, необходимые для формирования сплошного алюминиевого слоя, а также зафиксировано изменение массы стальных образцов до и после нанесения покрытия. Полученное композиционное покрытие демонстрирует повышенную износостойкость, антикоррозионные свойства и снижает коэффициент трения

Ключевые слова: коррозия, трение, износ, коэффициент трения, машина трения, биения, триботехнические характеристики

Для цитирования: Погоньшев В.А., Мокшин И.А., Погоньшева Д.А., Бычкова Т.В. Повышение износостойкости поверхности деталей в прецизионных парах трения сельскохозяйственных машин методом ФАБО // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-42-48

Surface wear resistance increase for parts in precision friction pairs of agricultural machines under final antifriction nonabrasive machining

Vladimir A. Pogonyshev¹, D.Eng.

Ilya A. Mokshin², Mgr.

Dina A. Pogonysheva³, EdD

Tatiana V. Bychkova⁴, Cand. Sci. Ed.

^{1, 2, 3, 4} Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia

¹ pog@bgsha.com

² imokshin_1998@mail.ru

³ dpogonysheva32@mail.ru

⁴ tanyabychkova@mail.ru

Abstract. The results of a study aimed at creating protective adhesive thin-film coatings made of aluminum, which are applied to grade 45 steel using the friction method, are presented. For this purpose, a bar tool is used, fixed in a special device and being subjected to pressure. 45 steel according to GOST 1050-2013, previously degreased with benzene (GOST R 58415-2019, C₆H₆) or alcohol (GOST R 55878-2013, C₂H₅OH), was used as samples for comparative tests. After that, the oxide layer was removed from the surface of the samples using an abrasive material (GOST 6456-82), and a layer of glycerin (GOST 6824-96, CH₂(OH)-CH(OH)-CH₂OH) was immediately applied to preserve the juvenile surface, then followed by coating with a copper-aluminum film. The interaction of films deposited on the surface of samples by the final antifriction nonabrasive machining (FANaM) is studied. The protective properties of aluminum as a coating are investigated. During the experiments, the conditions necessary for the formation of a solid aluminum layer were determined, and a change in the mass of steel samples before and after coating was recorded. The resulting composite coating proves increased wear resistance, anti-corrosion properties and reduced friction coefficient.

Keywords: corrosion, friction, wear, friction coefficient, friction machine, runout, tribotechnical characteristics

For citation: Pogonyshev V.A., Mokshin I.A., Pogonysheva D.A., Bychkova T.V. Surface wear resistance increase for parts in precision friction pairs of agricultural machines under final antifriction nonabrasive machining / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 42–48. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-42-48

Введение

Основными направлениями экономического и социального развития агропромышленного комплекса (АПК) РФ предусматривается совершенствование ремонтного производства для обеспечения надежной работы техники и оборудования машинно-тракторного парка (МТП) [1].

Работоспособность и срок службы техники в значительной степени зависят от интенсивности износа трущихся деталей. По данным эксплуатационных наблюдений, от 82 до 92 % деталей машин выходят из строя именно из-за износа [2]. Одним из наиболее распространённых видов изнашивания является фреттинг – механическое повреждение соприкасающихся поверхностей, вызванное колебательными микросмещениями. Особое внимание уделяется фреттинг-коррозии – коррозионно-механическому изнашиванию, которое возникает при малых колебательных перемещениях и усугубляется воздействием окружающей среды [3]. Этот процесс сопровождается отделением

микрочастиц материала и образованием оксидов, которые могут действовать как абразивы, усиливая износ и приводя к дальнейшему разрушению поверхностей.

Для предотвращения фреттинг-коррозии и снижения износа важно правильно выбирать материалы для трущихся поверхностей, а также применять защитные покрытия и смазочные материалы. Например, использование композиционных покрытий на основе пластичных металлов, таких как медь и алюминий, позволяет значительно повысить износостойкость и долговечность деталей [4 – 6]. Кроме того, современные методы обработки поверхностей, такие как финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО), способствует снижению коэффициента трения и предотвращению задиоров, что особенно важно для узлов трения, работающих в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред [7 – 9].

Таким образом, изучение процессов фреттинга и фреттинг-коррозии, а также разработка методов защиты от них, являются ключевыми направлениями в повышении надёжности и

долговечности техники. Это особенно актуально для сельскохозяйственных машин, работающих в условиях повышенной запылённости и влажности, где износ деталей происходит особенно интенсивно.

Методика эксперимента

Для создания наноплёнок толщиной в несколько микрометров (табл. 1) применялся метод фрикционного нанесения – ФАБО. Этот метод обладает экологическими и экономическими преимуществами, особенно в условиях мелкосерийного производства [8 – 10]. В качестве основы использовались стальные пористые покрытия, полученные методом

электродугового напыления (табл. 2 и 3). Поверхности предварительно очищались от оксидов (рис. 1, а), после чего на них наносилась медная плёнка (рис. 1, б и 1, в), выполняющая роль подслоя для алюминиевой плёнки толщиной 0,2...0,5 мкм (рис. 1, г).

Комбинация алюминиевого покрытия на медном основании стальной подложки способствует снижению износа на 25...30 %, что, в свою очередь, обеспечивает защиту стальной поверхности от взаимодействия с окислительной средой. Медный подслой улучшает адгезию алюминиевой плёнки и усиливает её защитные свойства, что делает данный метод эффективным для повышения износостойкости и долговечности деталей.

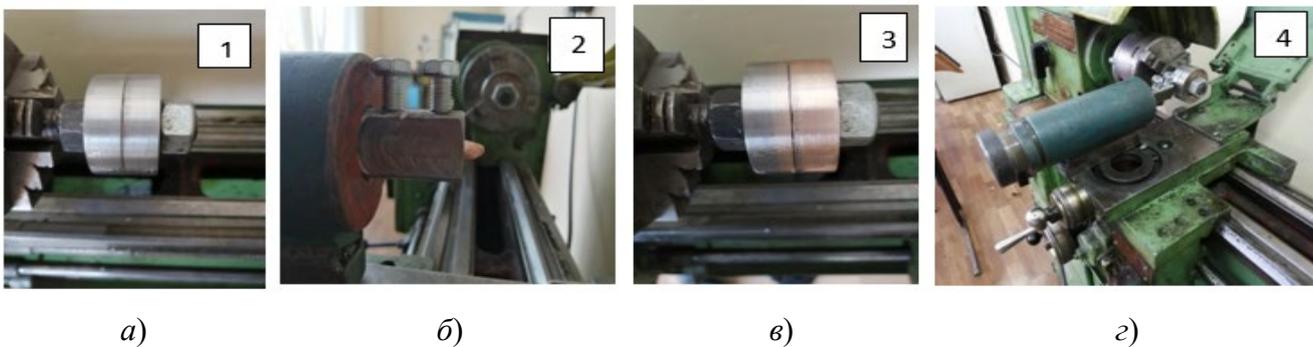


Рис. 1. Нанесение алюминиевых плёнок методом ФАБО:

а – подготовка поверхности для ФАБО; б – устройство с закреплённым медным прутком; в – нанесённый медный подслой; г – нанесение алюминия на подслой меди

Fig. 1. Application of aluminum films by the FANaM method: а – preparation of the surface for FANaM; б – a device with a fixed copper rod; в – applied copper sublayer; г – application of aluminum to a copper sublayer

Нанесение покрытий осуществлялось на токарном станке ТВ-7 с использованием фрикционно-механического метода. Для этого применялся прутковый инструмент, который с усилием 100 кгс прижимался к вращающимся цилиндрическим поверхностям образца цилиндрической формы. В процессе нанесения

материал покрытия передавался на поверхность образца за счёт трения и давления, что обеспечивало формирование равномерного и адгезионно-прочного слоя. Этот метод позволяет эффективно наносить защитные покрытия на детали, улучшая их износостойкость и долговечность.

1. Параметры ФАБО

1. FANaM Parameters

Пластичный металл пруткового инструмента	Частота вращения шпинделя v , м/с	Давление P , МПа	Продольная подача, мм/об	Толщина покрытия, мкм
Медь	0,50	24	5,5	0,30...0,40
Алюминий	0,45	22	4,5	0,25...0,35

Для сравнительных испытаний использовались образцы из стали 45 по ГОСТ 1050-2013. Перед нанесением покрытий образцы обезжиривали в бензоле (ГОСТ Р 58415-2019, C₆H₆) или спирте (ГОСТ Р 55878-2013, C₂H₅OH), после чего удаляли окисную плёнку с помощью абразивного материала (ГОСТ 6456-82). Для сохранения ювенильной поверхности (свободной от оксидов и загрязнений) образцы сразу покрывали слоем глицерина (ГОСТ 6824-96, CH₂(OH)-CH(OH)-CH₂OH), а затем наносили медно-алюминиевую плёнку (рис. 1).

Исходные данные эксперимента по фрикционному нанесению плёнок: диаметр стального образца $50 \cdot 10^{-3}$ м; масса стального образца ≈ 143 г; частота оборотов шпинделя станка 300...500 об/мин; давление при обработке 20...60 МПа.

После нанесения защитного алюминиевого покрытия (с использованием алюминиевого прутка диаметром 8 мм, марка АК6 по ГОСТ 21488-97) масса стального образца увеличилась до 143,87 г. Полученное покрытие обладало необходимой сплошностью и равномерностью.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Сталь на воздухе во влажной атмосфере быстро окисляется, покрываясь слоем оксидов, что делает её непригодной для использования в качестве самостоятельного покрытия без

дополнительной обработки. Поэтому было принято решение нанести слой алюминия, который обладает высокими антикоррозийными свойствами.

Исследовались триботехнические характеристики композиционных покрытий, полученных методом натирания. Испытанию подвергались от трех до шести образцов для каждого варианта покрытия с целью подтверждения воспроизводимости результатов [7, 8]. Параметры покрытий: шероховатость $Ra = 20...40$ мкм; толщина покрытия после обработки 0,25...0,35 мкм.

Основной целью испытаний была оценка триботехнических свойств покрытий (табл. 3) и их способности к схватыванию. Полученные результаты показали, что алюминиевые покрытия эффективно защищают стальные поверхности от коррозии и износа, что делает их перспективными для применения в условиях повышенной влажности и агрессивных сред.

Для борьбы с фреттинг-коррозией нами были применены следующие методы: использование защитных покрытий на основе мягких металлов (медь, алюминий), которые снижают трение и предотвращают окисление, а также были использованы смазки и антифрикционные составы, уменьшающие трение и защищающие поверхности от коррозии, что, в свою очередь, способствовало оптимизации конструкции: уменьшению амплитуды колебательных движений и улучшению геометрии контактирующих поверхностей.

2. Физико-механические характеристики вариантов композиционных покрытий

2. Physical and mechanical characteristics of composite coating options

Номер образцов	Основные химические элементы (материалы)	Температура масла T , К		Время приработки t , ч	Шероховатость, Ra , мкм		Верхний предел рабочих температур
		1 режим	2 режим		Исходная	После испытаний	
К 27-30	Al, Sn(40%), Sb	310	310	1,10	0,70	0,65	373
К 31-35	Al, Sn(40%), Sb	298	315	0,40	0,65	0,70	410

3. Триботехнические характеристики вариантов композиционных покрытий

3. Tribotechnical characteristics of composite coating options

Номер образцов	Основные химические элементы (материалы)	Коэффициент трения				Износ колодки I, мкм	Износ покрытия I, мкм
		1 режим		2 режим			
		Начальный	Установившийся	Начальный	Установившийся		
К 27-30	Al, Sn(40%), Sb	0,037	0,005	0,025	0,002	0,66	3,0
К 31-35	Al, Sn(40%), Sb	0,022	0,003	0,018	0,004	1,22	8,0

Выводы

ФАБО является высокоэффективным методом нанесения приработочного покрытия. На заключительном этапе технологической обработки (после шлифовки) при натирании алюминиевым прутком в среде глицерина с использованием специального устройства поверхность алюминиевого сплава равномерно пластифицируется на обрабатываемой детали, а оксидная плёнка на стали разрыхляется. Частицы алюминиевого сплава переносятся на сталь, образуя приработочный слой толщиной 2...3 мкм, что оптимизирует процесс приработки контактирующих деталей в прецизионных парах трения.

В ходе эксперимента была подтверждена возможность нанесения алюминиевых покрытий (с использованием алюминиевого прутка диаметром 8 мм марки АК6 по ГОСТ 21488-97) фрикционным способом на стальные поверхности с медным подслоем. Медь обладает высокой адгезией к железу, а алюминий, согласно классификации Мак-Лина [4], хорошо сваривается с медью, что обеспечивает прочное и равномерное покрытие.

Исследования опытных образцов на машине трения показали, что при увеличении нагрузки между алюминиевым диском и стальной колодкой коэффициент трения снижается на 30 % по сравнению со стальными образцами без покрытий. Полученные композиционные покрытия демонстрируют повышенную износостойкость, антикоррозийные свойства и снижение коэффициента трения.

К преимуществам метода ФАБО относятся: низкий расход материала, низкий расход механической энергии, экологическая безопасность, короткая продолжительность нанесения покрытия (от нескольких секунд до минут), стабильное и высокое качество покрытия, защита обрабатываемой поверхности от окислительного воздействия окружающей среды, возможность замены дорогостоящих методов обработки поверхности.

Применение ФАБО в сельскохозяйственной технике имеет ряд преимуществ: позволяет значительно увеличить долговечность и износостойкость деталей в узлах трения, что достигается за счёт исключения задиров на поверхностях трения, снижения механических потерь на трение на 7 – 10 %, уменьшения содержания продуктов износа (железа) в пробах моторного масла почти в 4,23 раза, снижения коэффициента трения и, как следствие, уменьшения расхода топлива двигателями внутреннего сгорания на 3 %.

Таким образом, метод ФАБО является перспективным и экономически выгодным решением для повышения эксплуатационных характеристик деталей в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред.

Заключение

Повышение уровня механизации и внедрение инноваций в сельском хозяйстве невозможно без использования достижений триботехники. Изучение процессов трения, износа и обработки материалов позволяет

разрабатывать сельскохозяйственную технику, которая не только отличается высокой производительностью, но и способствует снижению эксплуатационных затрат. Современные методы, такие как ФАБО и применение плёночных покрытий, открывают новые возможности для повышения работоспособности сельскохозяйственной техники. Это особенно важно в условиях обеспечения технологического суверенитета, так как позволяет увеличить долговечность и эффективность оборудования, снизить износ деталей и минимизировать затраты на обслуживание.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Мокшин, И. А.** Технологические проблемы в сельском хозяйстве // Проблемы энергетики, природопользования, безопасности жизнедеятельности и экологии: сборник материалов студенческой научно-практической конференции института энергетики и природопользования, Брянск, 11 марта 2021 года. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2021. С. 197-202.
2. **Суслов А.Г.** Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения / Суслов А.Г., Фёдоров В.П., Горленко О.А., Ильицкий В.Б., Тотай А.В., Хандожко А.В., Горленко А.О., Федонин О.Н., Прокофьев А.Н., Бишутин С.Г., Петрешин Д.И., Говоров И.В., Гуров Р.В., Шалыгин М.Г., Тихомиров В.П., Шец С.П., Нагоркин М.Н., Стешков А.Е., Хохлов В.М., Симкин А.З. и др. Москва, 2022. 552 с.
3. **Погоньшев В.А.** Триботехнические процессы при фреттинг-износе / В. А. Погоньшев, И. А. Мокшин, Д. А. Погоньшева // Наука в центральной России. 2022. № 3(57). С. 84-91. DOI 10.35887/2305-2538-2022-3-84-91. 88 с.
4. **Ващишина А.П., Шалыгин М.Г., Ващишин С.П.** Исследование физико-химических характеристик пластичного смазочного материала различной концентрации / Трибология - машиностроению. Труды XV Международной научно-технической конференции. Москва, 2024. С. 32-34.
5. **Tribotechnical characteristics of composite coatings deposited by spraying / V. A. Pogonyshev, N. M. Belous, V. E. Torikov // Materials Today: Proceedings, Sevastopol, 07-11 сентября 2020 года. Sevastopol, 2021. P. 1849-1851. DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.434.**
6. **Кузьменко И.В., Будко С.И., Самусенко В.И.** Фрикционное натирание медью как способ восстановления размеров и борьбы с фреттинг-коррозией корпусных деталей подшипниковых сопряжений // Технология металлов. 2022. № 8. С. 53-55.

7. **Тихомиров В.П., Измеров М.А., Шалыгин М.Г.** Проектирование и технология производства поверхности деталей машин с заданными эксплуатационными свойствами / Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2024. Материалы 1-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 136-144.

8. **Шалыгин М.Г., Горленко А.О., Болдырев Д.А.** Повышение износостойкости мартенситной стали изменениями в поверхностном слое // Сталь. 2024. № 12. С. 28-32.

9. **Шалыгин М.Г., Евтух Е.С.** Трение, износ, смазка: специальные области трибологии. Курск, 2024. 123 с.

10. **Шалыгин М.Г., Суслов А.Г.** Модель изнашивания наногеометрии поверхностей трения и технология уменьшения периода приработки фрикционной пары/ Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2024. Материалы 1-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 302-309.

REFERENCES

1. Mokshin I. A. Technological problems in agriculture // Problems of energy, nature management, life safety and ecology: proceedings of the student scientific and practical conference of the Institute of Energy and Nature Management, Bryansk, March 11, 2021. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2021. pp. 197-202.
2. Suslov A.G. Fundamental bases ensuring reliability of machine building products / Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A., Ilyitsky V.B., Totai A.V., Khandozhko A.V., Gorlenko O.A., Fedonin O.N., Prokofiev A.N., Bishutin S.G., Petreshin D.I., Govorov I.V., Gurov R.V., Shalygin M. G., Tikhomirov V. P., Shets S.P., Nagorkin M.N., Steshkov A.Ye., Khokhlov V.M., Simkin A.S. et al. Moscow, 2022, 552 p.
3. Pogonyshev V. A. Tribotechnical processes during fretting wear / V. A. Pogonyshev, I. A. Mokshin, D. A. Pogonysheva // Science in central Russia. 2022, no. 3(57), pp. 84-91. DOI 10.35887/2305-2538-2022-3-84-91. 88 p.
4. Vashchishina A.P., Shalygin M.G., Vashchishin S.P. Investigation of physico-chemical characteristics of plastic lubricants of various concentrations / Tribologiya - mashinostroenie. Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference. Moscow. 2024. pp. 32-34.
5. Tribotechnical characteristics of composite coatings deposited by spraying / V. A. Pogonyshev, N. M. Belous, V. E. Torikov // Materials Today: Proceedings, Sevastopol. 2021. P. 1849-1851. DOI 10.1016/j.matpr.2020.08.434.
6. Kuzmenko I.V., Budko S.I., Samusenko V.I. Friction rubbing with copper as a method for restoring dimensions and combating fretting corrosion of housing parts of bearing joints. 2022. no. 8. pp. 53-55.

7. Tikhomirov V.P., Izmerov M.A., Shalygin M.G. Design and production technology of the surface of machine parts with specified performance properties/ Intelligent tribology in mechanical engineering: BALT TRIBO 2024. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. Saint Petersburg. 2024. pp. 136–144.

9. Shalygin M.G., Gorlenko A.O., Boldyrev D.A. Increasing the wear resistance of martensitic steel by changes in the surface layer // Steel. 2024. no. 12. pp. 28–32.

9. Shalygin M.G., Evtukh E.S. Friction, wear, lubrication: special areas of tribology. Kursk. 2024. 123 p.

10. Shalygin M.G., Suslov A.G. The wear model of the nanogeometry of friction. Surfaces and the technology of reducing the run-in period / Intelligent tribology in mechanical engineering: BALT TRIBO 2024. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. Saint Petersburg. 2024. pp. 302–309.

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 редакцию 25.02.2025; одобрена после рецензирования 06.03.2025; принята к публикации 27.03.2025.

The article was submitted 25.02.2025; approved after reviewing 06.03.2025; accepted for publication 27.03.2025.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор А.Ю. Кленичева. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.05.2025. Выход в свет 30.05.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

