

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 620.179.112

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-61-67>**Теоретические основы фрикционного нанесения антиизносных покрытий****В.И. Балабанов^{1✉}, Н.Н. Ивахненко², Д.В. Добряков³**^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия³ Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований

по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса («Росинформагротех»); р.п. Правдинский, Россия

¹ vbalabanov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>² ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7328-7634>³ dimasdobr@rambler.ru

Аннотация. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) позволяет обеспечить повышенную износостойкость восстановленных поверхностей трения. Повышение износостойкости и задиристости получаемых покрытий требует уточнения и строгого соблюдения режимов нанесения покрытия, а именно давления натирающего инструмента на обрабатываемую поверхность. Цель исследований – теоретическое определение и экспериментальное подтверждение необходимого давления прижатия натирающего инструмента для фрикционного нанесения антиизносного покрытия высокого качества. На основании теоретических исследований разработана математическая зависимость для определения необходимого давления прижатия натирающего инструмента при фрикционно-химическом способе нанесения качественного антиизносного покрытия. Экспериментально подтвердили результаты теоретических расчетов необходимого давления прижатия натирающего инструмента в зоне нанесения антиизносного покрытия, равного 17,5 МПа, которое согласуется с результатами других исследований (10...20 МПа). Финишную антифрикционную безабразивную обработку шеек коленчатого вала проводили на токарно-винторезном станке при следующих режимах: скорость нанесения антиизносного покрытия – 0,25 м/с, необходимое давление прижатия натирающего инструмента – 17...18 МПа, минимальное количество рабочих проходов – 4. В натирающем инструменте использовали два конструкционных материала: латунь Л 63 ГОСТ 15527-2004 и алюминиевый сплав АД-31 ГОСТ 4782-97. Для процесса ФАБО разработана новая технологическая жидкость (среда), проведена оптимизация режимов нанесения и применен новый материал (алюминий) для натирающих инструментов. Результаты исследований указывают на необходимость применения присадок, содержащих химические соединения меди и алюминия, для сохранения антиизносных и антифрикционных свойств обработанных деталей в последующей эксплуатации автотракторной техники.

Ключевые слова: финишная антифрикционная безабразивная обработка; ФАБО; скорость нанесения антиизносного покрытия; давление прижатия натирающего инструмента; количество рабочих проходов; технологическая жидкость (среда)

Для цитирования: Балабанов В.И., Ивахненко Н.Н., Добряков Д.Ю. Теоретические основы фрикционного нанесения антиизносных покрытий // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 61-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-61-67>

ORIGINAL ARTICLE

Theoretical foundations of frictional application of anti-wear coatings**V.I. Balabanov^{1✉}, N.N. Ivakhnenko², D.V. Dobryakov³**^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia³ Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies for Engineering and Technical Support of the Agribusiness Sector; Pravdinsky, Moscow Region, Russia¹ vbalabanov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>² ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7328-7634>³ dimasdobr@rambler.ru

Abstract. Finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT) ensures increased wear resistance of restored friction surfaces. Enhancing the wear resistance and scoring resistance of the resulting coatings requires clarification

and strict adherence to coating application modes, namely, the pressure of the rubbing tool on the surface being treated. The research objective is the theoretical determination and experimental verification of the required pressing pressure of the rubbing tool for frictional application of a high-quality anti-wear coating. Based on theoretical studies, the authors have developed a mathematical relationship to determine the necessary pressing pressure of the rubbing tool in the friction-chemical method of applying a high-quality anti-wear coating. Experimental results confirmed the theoretical calculations of the required application pressure of the rubbing tool in the anti-wear coating application zone, equal to 17.5 MPa, which is consistent with the results of other studies (10 to 20 MPa). Finishing antifriction non-abrasive treatment of crankshaft journals was carried out on a lathe at the following modes: anti-wear coating application speed – 0.25 m/s, required pressing pressure of the rubbing tool – 17 to 18 MPa, minimum number of working passes – 4. Two structural materials were used in the rubbing tool: brass L 63 GOST 15527-2004 and aluminum alloy AD-31 GOST 4782-97. A new technological fluid (medium) has been developed for the FANT process, the application modes have been optimized, and a new material (aluminum) has been used for the rubbing tools. The research results indicate the need to use additives containing chemical compounds of copper and aluminum to preserve the anti-wear and antifriction properties of the treated parts in the subsequent operation of automotive equipment

Keywords: finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT); anti-wear coating; anti-wear coating application speed; application pressure of the rubbing tool; number of working passes; process fluid (medium)

For citation: Balabanov V.I., Ivakhnenko N.N., Dobryakov D.V. Theoretical foundations of frictional application of anti-wear coatings. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):61-67 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-61-67>

Введение

Разработке, исследованию и внедрению технологий восстановления и ремонта деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники методами нанесения антиизносных и противозадирных покрытий посвящены работы А.В. Антипова, Д.Н. Гаркунова, И.Г. Голубева, С.А. Ищенко, М.Н. Ерохина, Л.И. Куксеновой, В.Н. Лозовского, В.А. Погоньшева, В.Я. Сковородина и других известных ученых [1-3].

Анализ источников литературы, технологий ремонта и данных эксплуатации автотракторной техники позволил установить, что наиболее прогрессивными технологиями восстановления шеек коленчатых валов являются плазменное и газопламенное напыления, а самым дешевым и распространенным способом – шлифование под ремонтный размер. В то же время недостаточная износостойкость восстановленных коренных и шатунных шеек приводит к снижению межремонтного ресурса двигателя в целом в 1,5...2 раза [3-5].

Установлено, что повышение износостойкости восстановленных поверхностей трения может быть обеспечено за счет фрикционно-химического (трением в присутствии технологической среды) нанесения антиизносных и антифрикционных покрытий [1, 2, 4, 5].

Метод ФАБО обеспечивает выглаживание обработанной поверхности шеек коленчатого вала с уменьшением их шероховатости; способствует упрочнению подповерхностного слоя за счет наклепа, образованию в результате диффузии пластичной

антиизносной композиционной структуры поверхности; препятствует проникновению свободного водорода во внутренние структуры металла (защита от водородного изнашивания); создает на обработанных поверхностях слой твердосмазочного антифрикционного композиционного покрытия, что благоприятно воздействует на вкладыши коленчатого вала вследствие частичного переноса на них с обработанных шеек пластичного покрытия при их эксплуатации [6, 7].

В результате теоретического анализа источников литературы, освящающих процесс нанесения фрикционных покрытий методом ФАБО, установлен факт повышения износостойкости нанесенных покрытий за счет активизации химического, механического, вакансионно-дислокационного и термического процессов. Для их обеспечения и повышения качества нанесения покрытий разработана новая технологическая жидкость (среда), оптимизированы режимы нанесения и применен более эффективный материал (алюминий) для натирающих инструментов [8-10].

Для дальнейшего повышения износостойкости и задиростойкости получаемых покрытий необходима разработка мероприятий по изменению других составляющих технологии нанесения: применяемых материалов, устройств и режимов (активации механического, вакансионно-дислокационного и термических каналов).

Активация механического канала требует уточнения и последующего строгого соблюдения режимов нанесения покрытия, в большей степени – давления

натирающего инструмента на обрабатываемую поверхность.

Цель исследований: теоретическое определение и экспериментальное подтверждение необходимого давления прижатия натирающего инструмента для фрикционного нанесения качественного антиизносного покрытия.

Материалы и методы

Процесс нанесения фрикционных покрытий осуществляется за счет явления переноса и (или) восстановления металла при трении в присутствии технологической среды, содержащей соли металла покрытий. В натирающем инструменте применяли два конструкционных материала: латунь Л 63 15527-2004 и алюминиевый сплав АД-31 ГОСТ 4782-97. Восстановление и осаждение содержащихся в составе солей металлов позволяют получить более равномерное

покрытие с высокими антифрикционными и антиизносными свойствами.

Для обработки шеек коленчатого вала использовали токарно-винторезный станок, способный удерживать и вращать обрабатываемую деталь.

На токарно-винторезный станок устанавливали коленчатый вал, на одну или несколько шеек коленчатого вала – одно или несколько приспособлений для фрикционно-механического нанесения покрытий (рис. 1, 2). Поверхность обрабатываемой шейки смачивали составом для нанесения покрытий трением, содержащим алюминий (Патент на изобретение RU № 2821971).

Натирающие элементы устройства вводили в соприкосновение с обрабатываемой поверхностью, прижимали с определенным усилием и включали вращающее устройство. Резкий свистящий звук указывал на протекание процесса нанесения покрытия (табл. 1).

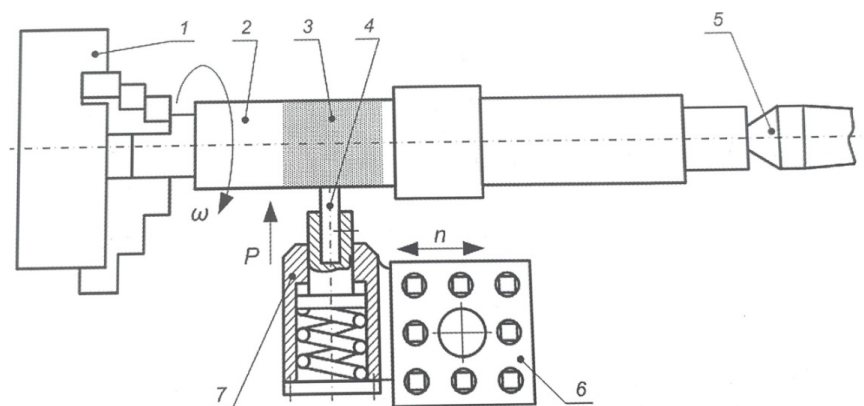


Рис. 1. Принципиальная схема фрикционного алитирования:

1 – привод вращения станка; 2 – деталь; 3 – алюминийсодержащее покрытие;
4 – алюминиевый натирающий инструмент; 5 – подвижный центр задней бабки;
 P – сила прижатия натирающего инструмента; n – продольная подача резцедержателя станка;
 w – угловая скорость детали

Fig. 1. Process diagram of friction alitizing:

1 – machine rotation drive; 2 – component; 3 – aluminum-containing coating;
4 – aluminum rubbing tool; 5 – movable center of tailstock; P – rubbing tool pressing force;
 n – longitudinal feed of machine tool holder; w – angular speed of a component

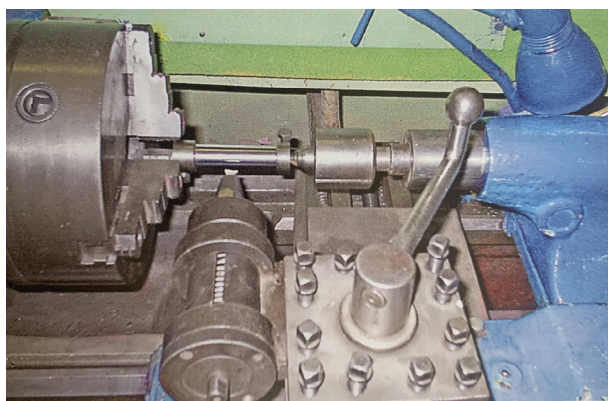


Рис. 2. Внешний вид устройства для нанесения антифрикционных покрытий

Fig. 2. External view of a unit for applying anti-friction coatings

Таблица 1

Режимы нанесения фрикционного покрытия АД-31 и Л 63 на стальную шейку вала

Table 1

Modes of applying friction coating AD-31 and L 63 on a steel bearing journal

Режимы обработки / Processing modes				
Линейная скорость продольной подачи инструмента, V , м/с <i>Linear speed of longitudinal feed of tool, V, m/s</i>	Частота вращения обрабатываемой детали, S , мм/об <i>Speed of the workpiece, S, mm/rev</i>	Давление прижатия, P , МПа <i>Application pressure, P, MPa</i>	Число рабочих проходов, i , ед. <i>Number of working passes, i, units</i>	Технологическая жидкость (среда) ¹ <i>Process fluid (medium)</i>
0,1...0,3	0,2	17...18	3...4	Соли меди, олова, никеля и алюминия, глюкоза, глицерин, вода <i>Copper, tin, nickel and aluminum salts, glucose, glycerin, water</i>

Обработку производили до получения равномерного покрытия без пропусков и крупных частиц перенесенного металла.

Обработанные поверхности мыли 5%-ным водным раствором глицерина и просушивали, после чего привод станка выключали, коленчатый вал снимали со станка.

Результаты и их обсуждение

В работах, освящающих метод ФАБО [2, 9], предлагалось выражение для определения давления прижатия натирающего инструмента, при котором может быть реализовано внешнее трение (образование фрикционного покрытия):

$$P_p \leq (0,125 \sigma_T / \delta^2) (1 - 6\tau_n / \sigma_T)^2, \quad (1)$$

где P_p – расчетное давление, обеспечивающее нанесение качественного антифрикционного покрытия, МПа; σ_T – физический предел текучести, МПа; δ – комплексный параметр, характеризующий шероховатость обрабатываемой поверхности ($0 < \delta < 1$), мм; τ_n – касательные напряжения в зоне контакта натирающего инструмента и обрабатываемой поверхности ($\tau_n = 0,3 \sigma_s$), МПа.

Однако следует учесть, что ряд пластичных материалов, в том числе медные и алюминиевые сплавы, не имеет фактической площадки предела текучести. Поэтому нами предложено использовать параметр предела прочности при растяжении (σ_b) как имеющего реальные значения для применяемых материалов натирающих инструментов и более полно характеризующего напряженное состояние зоны контакта.

Нами произведен проверочный расчет теоретически выведенной зависимости для определения необходимого давления прижатия натирающего

инструмента для нанесения качественных композиционных антифрикционных покрытий трением к конкретным условиям обработки.

С учетом того, что в разработанном нами способе нанесения композиционных антифрикционных покрытий одновременно применяются два конструкционных материала натирающих инструментов, имеющих средние значения пределов прочности при растяжении $\sigma_{b1} = 360$ МПа (латунь Л 63) и $\sigma_{b2} = 200$ МПа (алюминиевый сплав АД-31), для простоты расчетов предлагаем использовать их среднее значение, определяемое по формуле:

$$\sigma_{ср} = \frac{1}{2} (\sigma_{b1} + \sigma_{b2}); \quad (2)$$

$$\sigma_{ср} = \frac{1}{2} (360 + 200) = 280.$$

В этом случае расчетная формула давления прижатия (1) примет следующий вид:

$$P_p \leq K_i \cdot (0,125 \sigma_{ср} / \delta^2) \cdot (1 - 6\tau_n / \sigma_{ср})^2, \quad (3)$$

где $K_i = \frac{1}{n}$ – коэффициент усредненного давления на каждом (i) из двух натирающих инструментов ($n = 2$).

Рассчитаем теоретическое значение необходимого давления в зоне трения по предложенной формуле (3):

$$P_p = \frac{1}{2} (0,125 \cdot 280 / 0,8^2) \cdot (1 - 504 / 280)^2 = 17,5 \text{ МПа.}$$

Следует учесть, что применяемые нами конструкционные материалы покрытия (натирающих инструментов) могут испытывать различную степень деформации, а предел текучести материала подложки может также существенно отличаться от указанных

¹Технологический состав для фрикционно-механического нанесения покрытия натирающим инструментом: Патент № 2821971 С1 Российская Федерация, МПК C23C26/00, C10M 103/06: заявка № 2023122292: заявл. 28.08.2023; Опубл. 28.06.2024 / В.И. Балабанов, Д.В. Добряков. EDN: TPLHVJ.

значений. Все это требует соответствующей корректировки режимов обработки непосредственно в процессе нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала в зависимости от качества обработки, которое может контролироваться посредством сравнения с эталонным образцом² [11, 12].

Производственная отработка режимов нанесения композиционных антифрикционных покрытий с использованием специального устройства (рис. 1), имеющего возможность регулирования давления натирающего инструмента, для ФАБО деталей типа «Вал» позволила подтвердить результаты теоретического расчета необходимого давления прижатия натирающего инструмента в зоне нанесения покрытия ($P_p = 17,5$ МПа), которое согласуется с имеющимися теоретическими данными (10...20 МПа) [1-5].

В эксперименте все покрытия наносили при следующих режимах: скорость нанесения – 0,25 м/с; необходимое давление устанавливалось равным теоретически рассчитанному 17...18 МПа, минимальное количество рабочих проходов $i = 4$.

Коэффициент сходимости (K_{cx}) теоретических и практических данных определялся по формуле:

$$K_{cx} = R_{\text{теоретические}} / R_{\text{опытные}}, \quad (4)$$

где R – значения, показатели, величины.

Приближенный расчет коэффициента степени деформации контактирующих материалов (оптимальных условий образования качественных антифрикционных покрытий), с учетом применения двух различных конструкционных материалов по разработанной технологии нанесения композиционных антифрикционных покрытий на шейки коленчатого вала (приближенное значение $\sigma_m = 250$ МПа), подтверждает выдвинутые нами теоретические предположения:

$$K_{cx} = (280 / 250) = 1,12. \quad (5)$$

Отклонение составляет менее 5%, что допустимо. Однако, как указано выше, снижение производительности в целом не оказывает влияния на антифрикционные свойства нанесенных покрытий.

Исследование разработанной технологии нанесения композиционных антифрикционных покрытий трением и анализ источников литературы позволили разработать критерии оценки качества натирания коленчатых валов на этапе обработки (табл. 2).

Анализ теоретических и практических данных показывает необходимость применения специальных присадок, содержащих химические соединения меди и алюминия, для сохранения антиизносных и антифрикционных свойств обработанных деталей в процессе эксплуатации автотракторной техники^{3,4} [1, 5, 13, 14].

Таблица 2

Критерии оценки качества покрытия коленчатых валов

Table 2

Criteria for assessing the quality of crankshaft coating

Критерий оценки <i>Assessment criterion</i>	Цвет покрытия <i>Coating color</i>	Истирание материала <i>Material abrasion</i>	Пропуски покрытия <i>Coating gaps</i>	Шероховатость покрытия <i>Coating roughness</i>
Отлично <i>Excellent</i>	Красновато-желтый <i>Reddish-yellow</i>	Нет (0,0...0,2 мкм) <i>No (0.0 to 0.2 μm)</i>	Нет <i>No</i>	Ниже исходной <i>Below original</i>
Хорошо <i>Good</i>	Красный <i>Red</i>	Малое (0,3...0,5 мкм) <i>Small (0.3 to 0.5 μm)</i>	Немного <i>A little</i>	На уровне исходной <i>At the original level</i>
Удовлетворительно <i>Satisfactory</i>	С матовыми просветами <i>With matte gaps</i>	Среднее (0,6...0,9 мкм) <i>Average (0.6 to 0.9 μm)</i>	Умеренно <i>Moderate</i>	На уровне исходной <i>At the original level</i>
Плохо <i>Bad</i>	Очень просветленный <i>Very brightened</i>	Большое (более 1 мкм) <i>Large (more than 1 μm)</i>	Очень много <i>Very much</i>	Выше исходной <i>Higher than original</i>
Брак <i>Defective</i>	Покрытия нет <i>No coating</i>	Деформирование стержня <i>Rod deformation</i>	Покрытия нет <i>No coating</i>	Много выше <i>Much higher</i>

² Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 240 с.

³ Балабанов В.И. Нанотехнологии и нанопрепараты для автотракторной техники // Применение нанотехнологий и наноматериалов в АПК: Сборник докладов. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2008. С. 77-81.

⁴ Синельников А.Ф., Балабанов В.И. Автомобильные масла: Краткий справочник. М.: ООО Книжное издательство «За рулем», 2005. 176 с.

Выводы

1. Теоретически разработана и экспериментально подтверждена математическая зависимость позволяющая определить необходимое давление прижатия натирающих инструментов для нанесения качественных антиизносных покрытий методом ФАБО.

2. Расчетное значение необходимого давления прижатия натирающих инструментов для нанесения

качественных антиизносных покрытий методом ФАБО, равное 17,5 МПа, согласуется с теоретическими данными.

3. Разработанный новый способ повышения износостойкости поверхностей трения методом нанесения на шейки коленчатых валов алюминийсодержащих антифрикционных покрытий позволит продлить срок службы деталей автотракторной техники.

Список источников

1. Гаркунов Д.Н. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) поверхностей трения деталей // Ремонт, восстановление и модернизация. 2009. № 2. С. 10-17. EDN: KNXBUH; 2009. № 3. С. 36-41. EDN: KXIXAZ; 2009. № 4. С. 20-24. EDN: KXIXEV; 2009. № 5. С. 24-29. EDN: KXIXKP; 2009. № 6. С. 38-422. EDN: KXIXRN
2. Балабанов В.И., Голубев И.Г., Добряков Д.В. Совершенствование технологического процесса фрикционного нанесения защитных покрытий // Техника и оборудование для села. 2023. № 10 (316). С. 31-34. EDN: FCIBDY
3. Pogonyshev V.A., Belous N.M., Torikov V.E. et al. Tribotechnical characteristics of composite coatings deposited by spraying. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(4):1849-1851. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.434>
4. Погонышев В.А., Логунов В.В. Повышение износостойки шеек коленчатого вала путем нанесения пленок пластичных металлов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 6. С. 47-48. EDN: QAXYQF
5. Ищенко С.А. Диагностирование и восстановление деталей гусеничного движителя рисозерноуборочных комбайнов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. № 12. С. 20-25. EDN: KTNEDP
6. Ипатов А.Г., Шмыков С.Н. Синтез антифрикционных покрытий методом ФАБО // Технический сервис машин. 2021. № 1 (142). С. 140-147. EDN: BKMHLQ
7. Сковородин В.Я., Антипов А.В. Оптимизация режима отделочно-антифрикционной обработки шеек коленчатого вала по параметрам износостойкости поверхности // Известия Международной академии аграрного образования. 2018. № 41-1. С. 31-37. EDN: YQHANJ
8. Ипатов А.Г., Шмыков С.Н. Характеристики работоспособности модифицированных антифрикционных покрытий на основе металлической композиции // Технический сервис машин. 2020. № 1 (138). С. 186-194. EDN: WFPYLE
9. Balabanov V.I. Self-organization of friction conditions when using repair and recovery additives to lubricants. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2019;25(3):805-812. EDN: MBUGSH
10. Ostrikov V.V., Sazonov S.N., Safonov V.V. et al. Study of the mechanism of the transformation and transfer of contact layers in the lubricating medium-surface tribopair system. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018;12(2):336-342. <https://doi.org/10.1134/S1990793118020094>
11. Сковородин В.Я., Антипов А.В. Влияние режима отделочно-антифрикционной обработки шеек коленчатого вала на параметры шероховатости поверхности // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017. № 49. С. 245-251. EDN: YOKAYQ
12. Сковородин В.Я., Антипов А.В. Влияние режима финишной обработки шеек коленчатого вала на антифрикционные свойства поверхности // Известия Международной

References

1. Garkunov D.N. Finishing antifriction abrasive treatment (FANT) of friction surfaces of parts. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2009;2:10-17;2009;3:36-41;2009;4:20-24;2009;5:24-29;2009;6:38-422. (In Russ.)
2. Balabanov V.I., Golubev I.G., Dobryakov D.V. Improving the technological process of frictional application of protective coatings. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;10(316):31-34. (In Russ.)
3. Pogonyshev V.A., Belous N.M., Torikov V.E. et al. Tribotechnical characteristics of composite coatings deposited by spraying. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38(4):1849-1851. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.434>
4. Pogonyshev V.A., Logunov V.V. Improving wear resistance of crankshaft necks by covering them with ductile metal films. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2013;6:47-48. (In Russ.)
5. Ishchenko S.A. Diagnosis and restoration of caterpillar mover parts of rice-grain harvesters. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2008;12:20-25. (In Russ.)
6. Ipatov A.G., Shmykov S.N. Synthesis of antifriction coatings by FANT method. *Machinery Technical Service*. 2021;1(142):140-147. (In Russ.)
7. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. Optimization of mode of finishing antifriction machining of crankshaft journals in the parameters of wear resistance of the surface. *Izvestiya Mezhdunarodnoy Akademii Agrarnogo Obrazovaniya*. 2018;41-1:31-37. (In Russ.)
8. Ipatov A.G., Shmykov S.N. Performance characteristics of modified antifriction coatings based on the metal composition. *Machinery Technical Service*. 2020;1(138):186-194. (In Russ.)
9. Balabanov V.I. Self-organization of friction conditions when using repair and recovery additives to lubricants. *Journal of the Balkan Tribological Association*. 2019;25(3):805-812.
10. Ostrikov V.V., Sazonov S.N., Safonov V.V. et al. Study of the mechanism of the transformation and transfer of contact layers in the lubricating medium-surface tribopair system. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2018;12(2):336-342. <https://doi.org/10.1134/S1990793118020094>
11. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. Influence of the finishing and antifriction treatment of crankshaft journals on the parameters of surface roughness. *Izvestiya Saint Petersburg State Agrarian University*. 2017;49:245-251. (In Russ.)
12. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. Influence of the crankshaft necks finishing mode on the antifriction properties of the surface. *News of the International Academy of Agrarian Education*. 2018;1(41):38-44. (In Russ.)
13. Katkov D.S. On ways of decreasing the intensity of tribounits depreciation. *Nauchnoe obozrenie*. 2012;2:358-363. (In Russ.)
14. Kuzharov A.S., Kuzharov A.A. Again and a little bit differently about metal-cladding, "ANF" and wearless. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2011;13(4(3)):772-775. (In Russ.)

академии аграрного образования. 2018. Т. 1, № 41. С. 38-44. EDN: YQNAHR

13. Катков Д.С. О путях снижения интенсивности трибосопряжений // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 358-363. EDN: PCCVKT

14. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Еще раз и несколько иначе о металлоплакировании, ФАБО и безысности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4-3. С. 772-775. EDN: PCLSJJ

Информация об авторах

¹ **Балабанов Виктор Иванович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой организации и технологий гидромелиоративных и строительных работ; vbalabanov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; SPIN-код: 1885-6817

² **Ивахненко Наталья Николаевна**, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры физики; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7328-7634>; SPIN-код: 5082-0613

³ **Добряков Дмитрий Викторович**, аспирант; dimasdobr@rambler.ru

^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

³ Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса («Росинформагротех»); 141261, Российская Федерация, Московская обл, р.п. Правдинский, ул. Лесная, 60

Вклад авторов

В.И. Балабанов – руководство исследованием, концептуализация, методология;

Н.Н. Ивахненко – формальный анализ, концептуализация, методология, проведение исследований;

Д.В. Добряков – концептуализация, проведение исследований, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 09.04.2025, после рецензирования и доработки 27.08.2025; принята к публикации 29.08.2025

Author Information

Viktor I. Balabanov¹, DSc (Eng), Professor, Head of the Department of Organization and Technologies of Irrigation and Construction Works; vbalabanov@rgau-msha.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0001-6486-6485>; Scopus author ID: 7005293644, Researcher ID: L-7456-2017.

Natalya N. Ivakhnenko², CSc (Phys-Math), the Department of Physics; ivakhnenko_nn@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0002-7328-7634>; Scopus author ID: 6701812393, Researcher ID: AAD-3021-2022.

Dmitry V. Dobryakov³, postgraduate student; dimasdobr@rambler.ru

^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

³ Russian Research Institute of Information and Feasibility Studies for Engineering and Technical Support of the Agribusiness Sector (Rosinformagrotekh); 60, Lesnaya Str., Pravdinsky, Moscow Region, 141261, Russian Federation

Author Contributions

V.I. Balabanov – research supervision, conceptualization, methodology;

N.N. Ivakhnenko – formal analysis, conceptualization, methodology, investigation;

D.V. Dobryakov – conceptualization; investigation; writing – original draft preparation, manuscript review and editing; visualization.

Conflict of interest

Authors declare no conflict of interest and are responsible for plagiarism.

Received 09.04.2025; Revised 27.08.2025; Accepted 29.08.2025