

Научный обзор
УДК 621

Способы модернизации трущихся элементов, обеспечивающие повышение их долговечности и эксплуатационной надежности

Вадим Александрович Лапкин

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

lapkin.vadim2203@gmail.com

Аннотация. Значительная часть отказов и простоев техники связана с износом трущихся пар в узлах трения. В условиях роста нагрузок, скоростей и требований к ресурсу, традиционные материалы часто не удовлетворяют современным запросам. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения ресурса работы промышленного оборудования, снижения эксплуатационных затрат и минимизации внеплановых простоев, вызванных износом критических узлов. Представлен комплексный анализ современных методов модернизации материалов, используемых в трущихся элементах машин и механизмов, таких как ХТО, наплавка, напыление, использование специальных материалов.

Ключевые слова: долговечность, износ, износостойкость, напыление, покрытие, сталь, триботехнические испытания.

Для цитирования: Лапкин В.А. Способы модернизации трущихся элементов, обеспечивающие повышение их долговечности и эксплуатационной надежности // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 1 (47).

Original article

Methods for upgrading wearing elements to enhance their durability and operational reliability

Vadim A. Lapkin

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

lapkin.vadim2203@gmail.com

Abstract. A significant proportion of equipment failures and downtime is associated with the wear of friction pairs in tribological assemblies. Under conditions of increasing loads, speeds, and service life requirements, traditional materials often fail to meet modern demands. The

relevance of the research is driven by the need to increase the service life of industrial equipment, reduce operating costs, and minimize unplanned downtime caused by the wear of critical components. A comprehensive analysis of modern methods for upgrading materials used in the wearing elements of machines and mechanisms is presented, such as chemical-thermal treatment (CTT), surfacing, spraying, and the use of special materials.

Keywords: durability, wear, wear resistance, spraying, coating, steel, tribological testing.

For citation: Lapkin V.A. Methods for upgrading wearing elements to enhance their durability and operational reliability. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. № 1 (47).

Введение

Интенсивное изнашивание поверхностей трения является одной из ключевых проблем, определяющих долговечность и надежность деталей машин. Снижение эксплуатационного ресурса вследствие абразивного и адгезионного износа, ударных нагрузок приводит к значительным экономическим потерям, связанным с необходимостью частого восстановления или замены деталей, а также с простоем технологического оборудования.

В связи с этим, разработка и внедрение эффективных методов повышения износостойкости поверхностей трения остаются актуальными научно-техническими задачами. Современные подходы к решению данной проблемы включают в себя широкий спектр технологий нанесения защитных покрытий и методов поверхностного упрочнения, которые позволяют целенаправленно формировать поверхностные слои с заданными триботехническими характеристиками.

Как показывают исследования, представленные в анализируемых работах, среди наиболее эффективных и перспективных направлений можно выделить:

- газотермические и плазменные технологии;
- детонационное напыление керамико-металлических композитов;
- диффузионные методы;

- электромеханические и электроискровые методы упрочнения.

Влияние на износ и износостойкость применения плазменно порошковой наплавки

На основе обобщения данных в литературных источниках определяем наиболее перспективные способы повышения долговечности и надежности трущихся элементов.

В исследовании [1] изучалась абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий, полученных методом плазменно-порошковой наплавки при различных силах тока (80А, 120А, 180А) и двух способах охлаждения: на воздухе и водяным душем.

Результаты триботехнических испытаний показали, что покрытие, нанесенное при токе 80А, имеет наивысшую твердость 3 HRC по сравнению с образцами, наплавленными при 120А и 180А [1]. Наилучшую абразивную износостойкость с коэффициентом 3,2 также продемонстрировало покрытие, созданное при 80А, что объясняется повышенным содержанием карбидной фазы М7С3 [1].

При этом максимальная ударно-абразивная износостойкость с коэффициентом 4,17 была зафиксирована у покрытия, наплавленного при 180А. Авторы [1] связывают этот результат с существенным перегревом сварочной ванны и низкой скоростью кристаллизации, которые привели к формированию аустенитной структуры, способной к упрочнению под ударными нагрузками.

На основании анализа термограмм скоростей охлаждения и результатов работы сделан вывод, что сила тока (а, следовательно, тепловложение и скорость охлаждения) является ключевым фактором, влияющим на структуру и свойства металла. Это позволяет целенаправленно изменять его твердость и износостойкость. Повышение абразивной износостойкости, в частности, обусловлено формированием заэвтектической структуры и равномерным распределением дисперсных нитридов хрома [1].

В отличие от [1], работа [2] сфокусирована на влиянии гранулометрического состава порошковых смесей (ПС-12НВК-01, ВСНГН-35, ПГ-СРЗ + TiC) на адгезию покрытий. Установлено, что неоднородность размеров частиц в смеси приводит к их неравномерному распределению в покрытии, ухудшая износостойкость и стойкость к удару. При оплавлении компоненты смешиваются, образуя композиционное покрытие с высокими показателями плотности, адгезии, твёрдости и ударной вязкости. Наилучшую относительную износостойкость 22% и адгезию показал материал ПГ-СРЗ + TiC. Также для снижения термических деформаций в работе [2] определён оптимальный состав плазмообразующего газа с содержанием азота до 35%.

В исследовании [3] анализировались свойства покрытий, полученных плазменно-порошковой наплавкой на основе порошков: 23% ПР-НХ17СР4 + 73% ПГ-ФБХ6-2 + 4% Al; 50% ПР-Н70Х17С4Р4 + 50% ПГ-ФБХ6-2; ПР-НХ17СР4. Сравнительная оценка относительной износостойкости с эталоном Сталь 45 выявила, что наивысший показатель (4,88) имеет композиция 23% ПР-НХ17СР4 + 73% ПГ-ФБХ6-2 + 4% Al. Далее следуют ПР-НХ17СР4 (1,70) и смесь 50% ПР-Н70Х17С4Р4 + 50% ПГ-ФБХ6-2 (1,48) [3].

Влияние на износ и износостойкость применения детонационного покрытия

В работах [1, 2] исследуется плазменно-порошковая наплавка – технология, предназначенная для упрочнения и восстановления деталей посредством нанесения на их поверхность расплавленного порошка. В отличие от этого подхода, в работе [4] рассматривается иной метод – нанесение детонационных покрытий, где для разгона и нагрева частиц напыляемого порошка используется энергия взрыва газовой смеси.

Эксперименты выполнялись при нанесении покрытия из Al_2O_3 на машине трения УМТ-1 в режиме сухого трения [4].

Анализ полученных данных позволил выявить оптимальные технологические параметры и ключевые особенности процесса напыления, обеспечивающие максимальную износостойкость покрытия. К ним относятся:

- глубина загрузки $l = 405$ мм;
- дистанция напыления $L = 95$ мм;
- грануляция порошка 20–60 мкм;
- коэффициент избытка окислителя $\alpha_{\text{лок}} = 0,6$ (для метано-кислородной смеси) [4].

Низкое значение коэффициента $\alpha_{\text{лок}}$ обусловлено необходимостью минимизировать окислительное воздействие продуктов сгорания на материал порошка. Этого удаётся достичь за счёт подачи дополнительного количества метана в детонационную камеру – при этом сохраняется устойчивая работа оборудования в детонационном режиме.

Влияние на износ и износостойкость применения химико-термической обработки

В работе [5] изучались методы борирования – химико-термической обработки для насыщения поверхности бором с целью повышения прочности и износостойкости. Данное направление отличается от рассмотренной в [1, 2] плазменно-порошковой наплавки и детонационного напыления [4].

Исследование [5] показало, что значительное улучшение износостойкости боридных слоев достигается при их модифицировании алюминием и магнием. Этот эффект особенно выражен при высоких скоростях скольжения, когда износ определяется окислительными процессами. Введение элементов, образующих плотные защитные окислы (такие как $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и MgO), оказалось крайне эффективным. Для легирования покрытий хромом и кремнием авторы предлагают использовать метод естественного легирования из стали-основы, регулируя технологию формирования слоя.

Сходная тематика – повышение износостойкости борированием – рассматривается и в работе [6]. В ней проведены испытания по диффузионному бороникелированию сталей У8 и 20 с использованием обмазки на основе аморфного бора ($B_{ам}$), никеля, бентонита и активатора NaF. Эксперименты с различным соотношением карбида бора и никеля позволили определить оптимальное содержание никеля – 30% от массы обмазки. Превышение этой концентрации ухудшает физико-механические свойства слоя. Полученные бороникелированные слои продемонстрировали высокую износостойкость (коэффициент износа 0,5), что свидетельствует о перспективности их применения в условиях сухого трения.

Влияние на износ и износостойкость применения газотермического напыления

Применение порошковой смеси (порошок стали X18H9 – 30,0-33,0; порошок меди – 17,0-20,0, порошок ПГ – ФБХ6-2 – остальное) для газотермического напыления износостойкого покрытия [7], способствует повышению износостойкости и снижению пористости покрытия. Величина износа составляет 13 мкм [7], в то время, как в работе [8] износ составил 2,03 мкм.

В работе [9] описывается способ газотермического покрытия из проволоочной высокохромистой стали 20X13, напыленного с использованием установки АДМ-10 и применением высокоэнтальпийного газа (МАФ) при различных давлениях воздуха, подаваемого на его горение. Давление воздуха по различным режимам составляет 0,1; 0,2 и 0,3 МПа. Толщина напыленных покрытий составляет 1,0–1,2 мм.

По результатам данного метода выявлено повышение износостойкости в 1,4 раза и интенсивность изнашивания 20,2 мг/м [12].

Влияние на износ и износостойкость применения электромеханической и электрофизической обработки

В отличие от предыдущих рассмотренных работ в работе [8] повышение износостойкости достигается имплантацией карбида вольфрама.

Технология включает двухэтапную электромеханическую обработку (ЭМО): сначала частицы карбида вольфрама внедряются (имплантируются) в поверхностный слой, создавая армированную структуру, а затем следует этап упрочняющей ЭМО. Модификация поверхности стали 45 по этому комбинированному методу (ИКЭМО) привела к существенному улучшению триботехнических свойств, о чём свидетельствует величина износа 2,03 мкм, зафиксированная в ходе испытаний [8].

В качестве другого метода усиления рассмотрено электроискровое легирование (ЭИЛ) для нержавеющей стали X18H9T [10]. Трибоиспытания выявили слабую износостойкость исходного материала: высокий коэффициент трения ($\sim 0,65$) и появление задиров при нагрузке 78,4 Н. Оптимальным среди изученных покрытий оказалась бронза БрОФ65-0,15, которая обеспечила коэффициент трения 0,11 (для сравнения, в [11] заявлено 0,003) и выдерживала нагрузки до 220,5 Н. Однако износ этого покрытия (9 мг) значительно превысил показатель в 0,0006 мг, полученный в исследовании [11].

Заключение

Проведенный обзор современных методов модернизации трущихся элементов показал, что повышение их долговечности и эксплуатационной надежности может быть достигнуто за счет применения широкого спектра технологий, направленных на формирование поверхностных слоёв с улучшенными триботехническими характеристиками.

Наиболее эффективными и перспективными являются следующие направления:

Термические и газотермические методы (плазменно-порошковая наплавка, газотермическое напыление), позволяющие варьировать структуру и свойства покрытий за счёт изменения режимов наплавки, состава порошков и условий охлаждения.

Детонационное напыление, которое обеспечивает высокую адгезию и износостойкость за счёт кинетической энергии частиц, ускоряемых в детонационной волне.

Химико-термическая обработка (борирование, бороникелирование), способствующая формированию твёрдых и износостойких поверхностных слоёв, особенно при легировании алюминием, магнием, хромом и кремнием.

Электромеханические и электрофизические методы (имплантирование карбидов, электроискровое легирование), которые позволяют армировать поверхность и значительно повышать её износостойкость.

Каждый из рассмотренных методов имеет свои преимущества и области рационального применения, а их выбор должен определяться конкретными условиями эксплуатации, требованиями к ресурсу и экономической эффективностью. Комбинирование нескольких методов часто позволяет достичь синергетического эффекта и максимально повысить долговечность трущихся элементов.

Список источников

1. Определение абразивной и ударно-абразивной износостойкости твердых наплавленных покрытий / Р. Н. Амиров, С. П. Нефедьев, С. А. Халина, В. В. Митрофанова // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2014. – № 3(3). – С. 95-98. – EDN TFOEYD.
2. Жачкин, С. Ю. Применение технологии плазменного напыления для повышения эксплуатационной надежности сельхозмашин / С. Ю. Жачкин, Н. А. Пеньков, Г. И. Трифонов // Наука в центральной России. – 2017. – № 4(28). – С. 131-136. – EDN ZDQTYR.
3. Патент № 2803172 С1 Российская Федерация, МПК С23С 4/134, С23С 4/08, С23С 24/04. способ плазменного напыления : № 2022128163 : заявл. 28.10.2022 : опубл. 07.09.2023 / Г. И. Трифонов, И. Н. Кравченко, С. Ю. Жачкин [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина". – EDN CZWLUI.
4. Разработка технологии нанесения детонационных покрытий для повышения износостойкости трущихся поверхностей / В. А. Попов, Э. Д. Браун, Ю. Н. Киселев [и др.] // Теплоэнергетика. – 1997. – № 5. – С. 53-57. – EDN WKEGHZ.

5. Пугачева, Н. Б. Исследование методов борирования, анализ структуры и свойств получаемых покрытий / Н. Б. Пугачева, Т. М. Быкова // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2020. – № 2. – С. 38-60. – DOI 10.17804/2410-9908.2020.2.038-060. – EDN QIRSBP.
6. Определение износостойкости диффузионных покрытий после химико-термической обработки в обмазке на основе карбида бора с добавлением никеля / Ж. В. Самаев, В. И. Мосоров, Б. С. Цыдыпов [и др.] // *Ползуновский альманах*. – 2019. – № 3. – С. 51-54. – EDN TLAMYM.
7. Патент № 2379375 С2 Российская Федерация, МПК С23С 4/06, В22F 1/00. порошковая смесь для газотермического напыления износостойкого покрытия : № 2008113078/02 : заявл. 08.04.2008 : опубл. 20.01.2010 / А. В. Демидов, А. В. Новоселов, В. К. Фролов, А. В. Овечкин ; заявитель Открытое акционерное общество "Российские железные дороги". – EDN QVUKDX.
8. Горленко, А. О. Повышение износостойкости поверхностей трения имплантацией карбида вольфрама / А. О. Горленко, М. Ю. Шевцов // *Наука и мир*. – 2017. – № 8(48). – С. 39-42. – EDN KZLANK.
9. Астрашаб, Е. В. Структура и износостойкость газотермических покрытий из высокохромистой стали 20X13, напыленных по различным режимам / Е. В. Астрашаб, А. Н. Григорчик // *Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : Тезисы докладов V Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, Гомель, 12–14 ноября 2018 года*. – Гомель: Государственное научное учреждение Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, 2018. – С. 61-63. – EDN XCYIFP.
10. Опыт применения электроискрового легирования для повышения износостойкости пар трения из нержавеющей стали X18H9T / В. В. Михайлов, В. М. Ревуцкий, В. И. Агафий, А. И. Янакевич // *Труды ГОСНИТИ*. – 2013. – Т. 111, № 2. – С. 063-065. – EDN PYVIPV.
11. Повышение износостойкости валов дифференциалов за счет применения технологии алмазного выглаживания / П. В. Пучков, В. П. Зарубин, В. В. Киселев [и др.] // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. – 2022. – № 4(72). – С. 55-61. – DOI 10.6060/snt.20227204.0008. – EDN URSHOF.

References

1. Amirov R.N., Nefed'yev S.P., Khalina S.A., Mitrofanova V.V. *Mekhanicheskoye oborudovaniye metallurgicheskikh zavodov*, 2014, no. 3(3), pp. 95-98.
2. Zhachkin S.Yu., Pen'kov N.A., Trifonov G.I. *Nauka v tsentral'noy Rossii*, 2017, no. 4(28), pp. 131-136.
3. Trifonov G.I., Kravchenko I.N., Zhachkin S.Yu., Kartsev S.V., Kukarskikh L.A. Patent RU 2803172 C1, 07.09.2023.

4. Popov V.A., Brown E.D., Kiselev Yu.N., Kovler M.L., Mironov E.A. *Теплоэнергетика*, 1997, no. 5, pp. 53-57.
5. Pugacheva N.B., Bykova T.M. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2020, no. 2, pp. 38-60, doi 10.17804/2410-9908.2020.2.038-060.
6. Samaev Zh.V., Mosorov V.I., Tsydyrov B.S., Lygdenov B.D., Gurev A.M. *Polzunovskiy al'manakh*, 2019, no. 3, pp. 51-54.
7. Demidov A.V., Novoselov A.V., Frolov V.K., Ovechkin A.V. Patent RU 2379375 C2, 20.01.2010.
8. Gorlenko A.O., Shevtsov M.Yu. *Nauka i mir*, 2017, no. 8(48), pp. 39-42.
9. Astrashab Ye.V., Grigorchik A.N. *Novyye funktsional'nyye materialy, sovremennyye tekhnologii i metody issledovaniya, Tezisy dokladov*, Gomel', Gosudarstvennoye nauchnoye uchrezhdeniye Institut mekhaniki metallopolimernykh sistem imeni V.A. Belogo NAN Belarusi, 2018, pp. 61-63.
10. Mikhaylov V.V., Revutskiy V.M., Agafiy V.I., Yanakevich A.I. *Trudy GOSNITI*, 2013, vol. 111, no. 2, pp. 063-065.
11. Puchkov P.V., Zarubin V.P., Kiselev V.V., Toporov A.V., Kolobov M.Yu. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. Regional'noye prilozheniye*, 2022, no. 4(72), pp. 55-61, doi 10.6060/snt.20227204.0008.

Рецензент: Р.И. Нигметзянов, д-р техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторе

Лапкин Вадим Александрович, магистрант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин», МАДИ.

Information about the author

Lapkin Vadim A., undergraduate student of the Department of Production and Repair of Automobiles and Road Machines, MADI.

Статья поступила в редакцию 15.02.2026; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 28.03.2026.

The article was submitted 15.02.2026; approved after reviewing 17.02.2026; accepted for publication 28.03.2026.