
МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ/MACHINES, UNITS AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.100> EDN: YQLMTV**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ТВЕРДОСТИ**

Научная статья

Корнеев А.А.^{1,*}, Береснева В.Л.²¹ ORCID : 0000-0001-9883-780X;^{1,2} Российский Государственный Университет имени А. Н. Косыгина, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vso3[at]yandex.ru)

Предложена: 23.04.2026; Принята: 15.06.2026; Опубликовано: 17.08.2026

Аннотация

В статье представлены результаты исследования по влиянию медных покрытий, сформированных одним из методов фрикционного плакирования, на интенсивность изнашивания стальных поверхностей с различной исходной твердостью. Установлено, что такие медные покрытия имеют толщину до 2 мкм и обладают пористой структурой и дендритным строением. Показано, что износостойкость неподвижных образцов при их трении по медному покрытию превышает показатели износостойкости неподвижных образцов при их трении без медного покрытия в 1,6–2,7 раза в зависимости от их твердости. Определено, что для максимального ресурса пары трения "ШХ15 по ШХ15" следует применять закаленные до высокой твердости (HRC 63) элементы с дополнительным медным покрытием.

Ключевые слова: медное покрытие, фрикционное плакирование, износостойкость, твердость образца, трибологические свойства, интенсивность изнашивания.

A STUDY OF THE EFFECT OF COPPER COATING ON THE WEAR INTENSITY OF STEEL SURFACES OF VARYING HARDNESS

Research article

Korneev A.A.^{1,*}, Beresneva V.L.²¹ ORCID : 0000-0001-9883-780X;^{1,2} The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (vso3[at]yandex.ru)

Suggested: 23.04.2026; Accepted: 15.06.2026; Published: 17.08.2026

Abstract

The article presents the results of a study on the effect of copper coatings, formed using one of the friction cladding methods, on the wear rate of steel surfaces with varying initial hardness. It has been established that such copper coatings are up to 2 μm thick and possess a porous structure and a dendritic structure. It is shown that the wear resistance of stationary samples when rubbed against a copper coating exceeds the wear resistance of stationary samples when rubbed without a copper coating by a factor of 1.6–2.7, depending on their hardness. It has been determined that, to maximise the service life of the 'HCBS15 on HCBS15' friction pair, elements hardened to high hardness (HRC 63) with an additional copper coating should be used.

Keywords: copper coating, frictional cladding, wear resistance, sample hardness, tribological properties, wear intensity.

Введение

Актуальность снижения интенсивности изнашивания трущихся деталей является фундаментальной и не теряющей своей остроты проблемой для всех отраслей промышленности. Это связано с прямым влиянием износа на ключевые экономические и эксплуатационные показатели: надежность, долговечность, стоимость владения оборудованием и эффективность производства в целом [1].

Одним из решений этой проблемы является модифицирование трущихся поверхностей. Этот комплексный подход направлен на изменение свойств поверхностного слоя материала для улучшения его трибологических характеристик (снижение коэффициента трения, повышение износостойкости и сопротивления схватыванию). Существующие методы можно разделить на три большие группы: изменение геометрии поверхности, нанесение покрытий и изменение структуры и свойств самого поверхностного слоя [2].

Один из наиболее эффективных методов обеспечения надёжности и высокой долговечности узлов трения машин и механизмов — нанесение покрытий трибологического назначения на контактирующие поверхности сопряжённых деталей этих узлов [3]. В связи с этим широкое распространение получили методы фрикционного плакирования — формирование на трущихся поверхностях покрытий из мягкого металлического материала, как правило, меди, или медных сплавов в процессе трения [4], [5].

Именно эти покрытия способны создавать предпосылки для реализации положительного градиента механических свойств по толщине поверхностного слоя и, следовательно, локализовать в нем физико-химические и деформационные процессы, ответственные за формирование частиц износа [6].

Вопросами фрикционного плакирования (металлоплакирования) занимались в течение длительного времени как в нашей стране, так и за рубежом [7], [8], [9], [10]. Было разработано множество методов под конкретные задачи. Все их можно разделить на [8]:

1. Фрикционно-механические (формирование покрытия происходит в процессе контактного взаимодействия поверхностей и механическим переносом материала инструмента на поверхность детали);
2. Фрикционно-химические (формирование покрытия происходит в процессе контактного взаимодействия поверхностей и химической реакцией между материалом поверхности и технологической средой);
3. Фрикционно-электромеханические (формирование покрытия происходит в процессе контактного взаимодействия поверхностей при прохождении через них электрического тока);
4. Фрикционно-электрохимические (формирование покрытия происходит в процессе контактного взаимодействия поверхностей и электрохимических процессов, протекающих в зоне контакта в присутствии технологической среды).

В рассматриваемых условиях наиболее универсальным методом формирования медного покрытия с хорошими трибологическими свойствами является фрикционно-химический.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью установления закономерностей влияния медных покрытий, полученных фрикционно-химическим методом, на износостойкость стальных поверхностей с различной исходной твердостью, т.к. этот вопрос изучен недостаточно подробно.

Цель исследования — установить количественные закономерности влияния медного покрытия, полученного фрикционно-химическим методом, на интенсивность изнашивания стали ШХ15 с разной твердостью.

Методы и принципы исследования

Подвижные образцы для трибологических испытаний были выполнены в виде колец диаметром 40 мм и шириной 11 мм из стали ШХ15 с твердостью HRC 63. Неподвижные образцы — шарики из той же стали с твердостью HRC 63 и твердостью HRC 20.

Фрикционное плакирование колец медью выполнялось фрикционно-химическим методом с помощью вращающегося ролика из полимерного материала (скорость в зоне контакта 5 м/с, удельное давление около 1 МПа, время обработки 10 секунд). В качестве технологической жидкости использовался состав, состоящий из 2% хлорида меди (II), 2% Аэросила 300 и 96% абсолютный изопропиловый спирт [8]. Толщина покрытия и его микроструктура определялась с помощью металлографического микроскопа 4XB.

Исследования трибологических характеристик медного покрытия проводились на машине трения по схеме «шар-кольцо» (рис. 1) при нагрузке на образец — 90 Н и частотой вращения кольца 300 об/мин. Смазка образцов происходила погружением в индустриальное масло И-20А.



Рисунок 1 - Общий вид испытательной установки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.100.1>

Трибологические испытания проводились согласно разработанной методике. Трущиеся образцы нагружались с усилием 90 Н в течение определенного времени (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 120, 150 и 180 минут) после чего машина трения останавливалась, и определялись геометрические размеры пятна контакта. Каждое испытание проводилось по пять раз, чтобы определить сходимость результатов исследования. Обработка результатов испытаний проводилась по ГОСТ Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения».

Интенсивность изнашивания определялась по формуле 1.

$$I = \frac{h}{s} = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2\pi L n t} \quad (1)$$

где h — линейный износ, мм;

s — путь трения, мм;

D — диаметр шарика, мм;

d — средний диаметр пятна износа, мм;

L — диаметр кольца, мм;

n — частота вращения кольца, об/мин;

t — время испытания, мин

Основные результаты и их обсуждение

Металлографические исследования показали, что толщина сформированного медного покрытия на кольцах составила 1–2 мкм.

Микроструктура медной пленки, полученной на стальной подложке фрикционно-химическим методом имеет ярко выраженные особенности, которые напрямую вытекают из механизма ее образования (рис. 2).

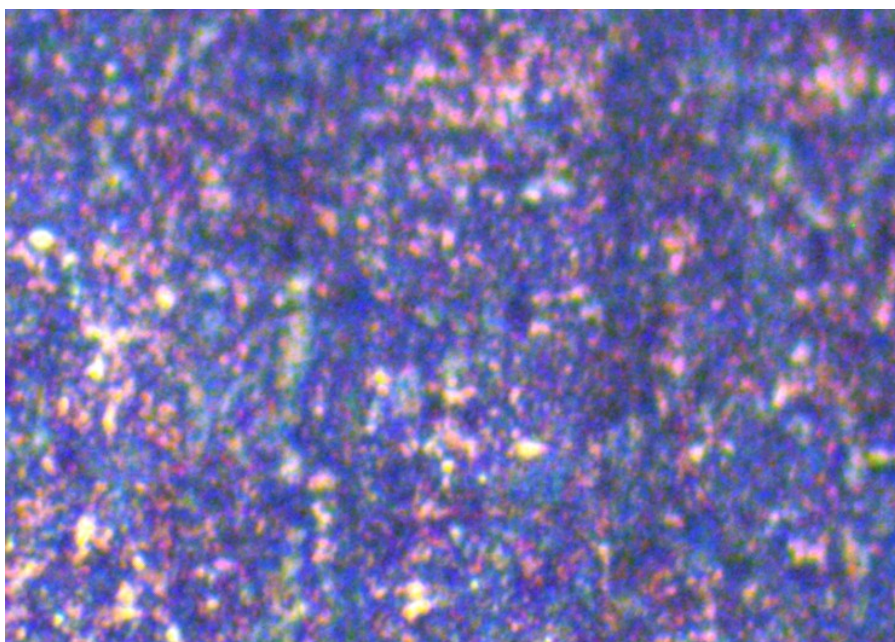


Рисунок 2 - Микроструктура медного покрытия, нанесенного фрикционно-химическим методом

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.100.2>

Примечание: увеличение в 400 раз

Одна из этих особенностей — пористость медного покрытия. Она связана с тем, что процесс осаждения идет одновременно с процессом растворения подложки, и атомы меди не успевают занять все места в кристаллической решетке, образуя пустоты (поры). Это подтверждает результаты, полученные исследователями ранее [11].

Другой особенностью является дендритная структура покрытия. Это связано с тем, что скорость роста кристалла в благоприятном направлении (вдоль градиента концентрации ионов) значительно выше, чем скорость зарождения новых кристаллов. При этом структура пленки не статична. По мере увеличения времени обработки происходит процесс уплотнения: поры частично зарастают, а дендритный слой становится более массивным и менее разветвленным.

По результатам проведенных трибологических испытаний построены графики зависимости интенсивности изнашивания неподвижного образца от пути трения за испытание (рис. 3).

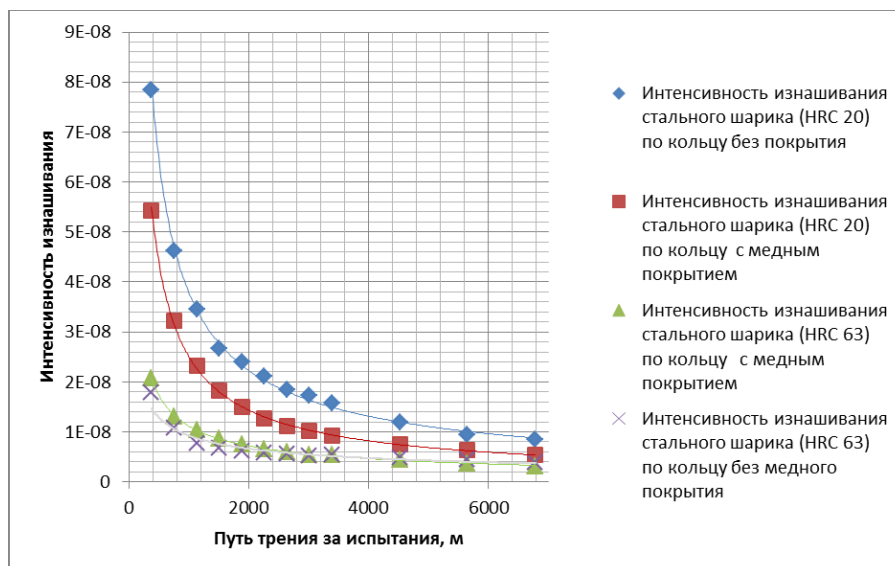


Рисунок 3 - Графики зависимостей интенсивности изнашивания стального шарика из материала ШХ15 от пути трения за испытания

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.100.3>

Примечание: нагрузка 90 Н

Как видно на рисунке 3, для всех четырех комбинаций наблюдается классическая кривая приработки. Интенсивность изнашивания максимальна в начале и постепенно снижается, стабилизируясь к концу испытаний. Это указывает на успешное формирование равновесной поверхности трения.

Наибольший износ на всем протяжении эксперимента был выявлен у стального шарика с минимальной твердостью при трении по кольцу без медного покрытия. Наличие медного покрытия на кольце существенно снижает износ такого шарика. У твердого шарика идет резкое увеличение его износостойкости. Но наилучший результат показывает трение твердого стального шарика по медному покрытию. Рейтинг износостойкости представлен в табл. 1 на основании конечных значений интенсивности изнашивания.

Таблица 1 - Рейтинг износостойкости исследуемых пар трения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.170.100.4>

Место	Комбинация (Твердость шарика / Покрытие)	Интенсивность изнашивания (I)	Относительное улучшение (по сравнению с худшим вариантом)
1	Твердый шарик (HRC 63) по кольцу с медным покрытием	$3,14 \times 10^{-9}$	Улучшение в 2,68 раза
2	Твердый шарик (HRC 63) по кольцу без покрытия	$3,96 \times 10^{-9}$	Улучшение в 2,12 раза
3	Мягкий шарик (HRC 20) по кольцу с медным покрытием	$5,41 \times 10^{-9}$	Улучшение в 1,55 раза
4	Мягкий шарик (HRC 20) по кольцу без покрытия	$8,40 \times 10^{-9}$	1 (базовый уровень)

Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Твердость материала шарика оказывает более сильное влияние на износостойкость, чем наличие покрытия на кольце (при прочих равных). Твердый шарик без покрытия изнашивается меньше, чем мягкий шарик с покрытием.

2. Медное покрытие стабильно снижает интенсивность изнашивания как для мягких, так и для твердых шариков. Эффект более выражен на мягкой подложке, но также значим и на твердой, особенно при длительной работе узла трения.



3. Наилучший результат достигается при комбинации высокой твердости (HRC 63) и медного покрытия. Это говорит о том, что эти два фактора работают в сумме, не мешая друг другу: твердая основа сопротивляется внедрению, а покрытие оптимизирует фрикционный контакт.

4. Для максимального ресурса пары трения «ШХ15 по ШХ15» следует применять закаленные до высокой твердости (HRC 63) элементы с дополнительным медным покрытием.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Aithal V.S. Revolutionizing Tribology: The Impact of Nanoparticle Coatings on Modern Engineering. / V.S. Aithal, M.A. Khan, A.R. Shetty // J Bio Tribo Corros. — 2025. — 11. — URL: <https://doi.org/10.1007/s40735-025-01020-w> (accessed: 30.03.26).
2. Шарая О.А. Инженерия поверхности упрочненных деталей / О.А. Шарая, А.Г. Пастухов, И.Н. Кравченко. — Москва: ИНФРА-М, 2024. — 124 с.
3. Буяновский И.А. Сравнение трибологических свойств DLC совместно со сталью / керамикой при сухом трении и граничной смазке / И.А. Буяновский, В.Д. Самусенко, Ю.И. Щербаков // Научные технологии в машиностроении. — 2024. — 5. — С. 31–39.
4. Григорович К.В. Исследование покрытий, полученных методом фрикционного плакирования гибким инструментом / К.В. Григорович, С.И. Платов, Р.Р. Дема. — Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. — 103 с.
5. Скобелев С.Б. Экспериментальные исследования влияния параметров нанесения тонкослойного покрытия на основе меди методом магнетронного распыления на износостойкость образцов из стали 18Х2Н4ВА / С.Б. Скобелев, Г.Г. Бурый, И.К. Потеряев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — 7. — С. 156–163.
6. Kuksenova L.I Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media / L.I Kuksenova, V.I. Savenko // Friction and Wear. — 2023. — 6. — P. 333–345.
7. Белевский Л.С. Упрочнение поверхности и нанесение функциональных покрытий вращающимися проволоочными щетками / Л.С. Белевский, Р.Р. Дема, М.А. Леванцевич // Механическое оборудование металлургических заводов. — 2019. — 1. — С. 53–63.
8. Корнеев А.А. Формирование модифицированного поверхностного слоя трущихся деталей технологического оборудования фрикционно-химическим способом / А.А. Корнеев, В.Л. Береснева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии.. — 2025. — 2. — С. 26–31.
9. Корнеев А.А. Финишная антифрикционная обработка деталей узлов трения машин / А.А. Корнеев, А.К. Прокопенко, А.П. Голубев и др. — Москва: Московский государственный университет дизайна и технологии, 2015. — 98 с.
10. Ипатов А.Г. Разработка технологии получения антифрикционного покрытия методом ФАБО и анализ свойств покрытия / А.Г. Ипатов, С.Н. Шмыков, В.И. Ширококов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. — 2024. — 1. — С. 79–85.
11. Безруков П.А. Особенности морфологии микро- и нанопористых пленок меди и серебра для фотокаталитического применения, синтезированных с использованием реакции замещения / П.А. Безруков, А.В. Нащекин, Н.В. Никоноров и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2021. — 4. — С. 457–462.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Aithal V.S. Revolutionizing Tribology: The Impact of Nanoparticle Coatings on Modern Engineering. / V.S. Aithal, M.A. Khan, A.R. Shetty // J Bio Tribo Corros. — 2025. — 11. — URL: <https://doi.org/10.1007/s40735-025-01020-w> (accessed: 30.03.26).
2. Sharaya O.A. Inzheneriya poverxnosti uprochnenny'x detalej [Surface Engineering of Hardened Parts] / O.A. Sharaya, A.G. Pastukhov, I.N. Kravchenko. — Moscow: INFRA-M, 2024. — 124 p. [in Russian]
3. Buyanovskij I.A. Sravnenie tribologicheskix svojstv DLC sovmestno so stal'yu / keramikoj pri suxom trenii i granichnoj smazke [Comparison of the tribological properties of DLC with steel/ceramic under dry friction and boundary lubrication] / I.A. Buyanovskij, V.D. Samusenko, Yu.I. Shherbakov // Science-intensive technologies in mechanical engineering. — 2024. — 5. — P. 31–39. [in Russian]
4. Grigorovich K.V. Issledovanie pokry'tij, poluchenny'x metodom frikcionnogo plakirovaniya gibkim instrumentom [Study of coatings obtained by friction cladding with a flexible tool] / K.V. Grigorovich, S.I. Platov, R.R. Dema. — Magnitogorsk: Magnitogorskij gosudarstvenny'j texnicheskij universitet im. G.I. Nosova, 2022. — 103 p. [in Russian]



5. Skobelev S.B. E'ksperimental'ny'e issledovaniya vliyaniya parametrov nanoseniya tonkoslojnogo pokry'tiya na osnove medi metodom magnetronnogo raspy'leniya na iznosostojkost' obrazczov iz stali 18X2N4VA [Experimental studies of the effect of parameters of applying a thin-layer coating based on copper by magnetron sputtering on the wear resistance of 18Kh2N4VA steel samples] / S.B. Skobelev, G.G. Buryj, I.K. Poteryaev // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. — 2020. — 7. — P. 156–163. [in Russian]
6. Kuksenova L.I Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media / L.I Kuksenova, V.I. Savenko // Friction and Wear. — 2023. — 6. — P. 333–345.
7. Belevskij L.S. Uprochnenie poverxnosti i nanosenie funkcional'ny'x pokry'tij vrashhayushhimisya provolochny'mi shhetkami [Surface hardening and application of functional coatings using rotating wire brushes] / L.S. Belevskij, R.R. Dema, M.A. Levancevich // Mechanical equipment of metallurgical plants. — 2019. — 1. — P. 53–63. [in Russian]
8. Korneev A.A. Formirovanie modificirovannogo poverxnostnogo sloya trushhixsya detalej texnologicheskogo oborudovaniya frikcionno-ximicheskim sposobom [Formation of a modified surface layer of rubbing parts of technological equipment by the friction-chemical method] / A.A. Korneev, V.L. Beresneva // Bulletin of the Saint Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies.. — 2025. — 2. — P. 26–31. [in Russian]
9. Korneev A.A. Finishnaya antifrikcionnaya obrabotka detalej uzlov treniya mashin [Finishing antifriction treatment of machine friction unit parts] / A.A. Korneev, A.K. Prokopenko, A.P. Golubev et al. — Moscow: Moskovskij gosudarstvennyj universitet dizajna i texnologii, 2015. — 98 p. [in Russian]
10. Ipatov A.G. Razrabotka texnologii polucheniya antifrikcionnogo pokry'tiya metodom FABO i analiz svoystv pokry'tiya [Development of a technology for obtaining an antifriction coating using the FABO method and analysis of the coating properties] / A.G. Ipatov, S.N. Shmy'kov, V.I. Shirobokov // Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy. — 2024. — 1. — P. 79–85. [in Russian]
11. Bezrukov P.A. Osobennosti morfologii mikro- i nanoporisty'x plenok medi i serebra dlya fotokataliticheskogo primeneniya, sintezirovanny'x s ispol'zovaniem reakcii zameshheniya [Morphology of micro- and nanoporous copper and silver films for photocatalytic applications synthesized using the substitution reaction] / P.A. Bezrukov, A.V. Nashhekin, N.V. Nikonorov et al. // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics, and Optics. — 2021. — 4. — P. 457–462. [in Russian]