

УДК 669.35.5:621.793

Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь—сталь

В.Е. Архипов¹, Л.И. Куksenova^{1,2}, М.С. Пугачев¹, Д.А. Козлов¹, Г.В. Москвитин¹

¹Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
М. Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва 101000, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, г. Москва 105005, Россия

Поступила в редакцию 03.05.2023.

После доработки 25.07.2023.

Принята к публикации 10.08.2023.

Проанализированы особенности структурных и триботехнических характеристик медных сплавов и покрытий при трении пары сталь—сталь. Экспериментально исследованы покрытия на основе меди, полученные методом газодинамического напыления. Определены износостойкость и микрогеометрические характеристики поверхности сталей с покрытиями состава $\text{Cu}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 55:45$ (мас. %) и $\text{Cu}:\text{Zn}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 35:35:30$ (мас. %). Из порошковой смеси меди и корунда формируется покрытие, преимущественно состоящее из меди. Корунд присутствует в форме частиц размером 0,05 мкм в количестве менее 1 %. Покрытие обладает высокой работоспособностью при испытаниях в условиях трения и износа: интенсивность изнашивания I_h (покрытия) $\approx (1,1—1,5) \cdot 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx (0,3—0,4) \cdot 10^{-11}$ при трении в минеральном масле И-20А; I_h (покрытия) $\approx (2—5) \cdot 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx 0,2 \cdot 10^{-11}$ при трении в пластичном смазочном материале Литол-24. В основе механизма контактного взаимодействия стали с покрытием $\text{Cu-Zn-Al}_2\text{O}_3$ в паре со сталью ШХ15 лежит процесс массопереноса в зоне поверхностной пластической деформации, который минимизирует уровень поверхностного разрушения пары в целом, сведя его к практической безызносности при высоких внешних давлениях. Деформация, диффузия и массоперенос в зоне контактного взаимодействия при трении указывают на эффект «классической безызносности», отличительной особенностью которого является формирование не сервовитной плёнки меди (с особым структурным состоянием), а медно-цинкового третьего тела с вкраплениями корунда, обладающего способностью перехода с образца на контртело и наоборот, обеспечивая защиту поверхностных слоёв от разрушения. Высокая износостойкость материалов пары трения достигается благодаря плёнкам фрикционного массопереноса.

Ключевые слова: износ, структура, поверхностные слои, модифицирование, газодинамическое напыление, медные сплавы, безызносность, интенсивность изнашивания, термическая обработка, корунд.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334

Адрес для переписки:

М.С. Пугачев
Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
М. Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва 101000, Россия
e-mail: pugachevmax@mail.ru

Address for correspondence:

M.S. Pugachev
Institute of Mechanical Engineering named after A.A. Blagonravov RAS,
M. Kharitonevsky per., 4, Moscow 101000, Russia
e-mail: pugachevmax@mail.ru

Для цитирования:

В.Е. Архипов, Л.И. Куksenova, М.С. Пугачев, Д.А. Козлов,
Г.В. Москвитин
Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на
работоспособность пар трения скольжения сталь—сталь.
Трение и износ.
2023. — Т. 44, № 4. — С. 322—334.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334

For citation:

V.E. Arkhipov, L.I. Kuksenova, M.S. Pugachev, D.A. Kozlov, and
G.V. Moskvitin
[Influence of Surface Layers Modified with Copper on the
Performance of Steel—Steel Sliding Friction Couples].
Trenie i Iznos.
2023, vol. 44, no. 4, pp. 322—334 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334

Influence of Surface Layers Modified with Copper on the Performance of Steel–Steel Sliding Friction Couples

V.E. Arkhipov¹, L.I. Kuksenova^{1,2}, M.S. Pugachev¹, D.A. Kozlov¹, and G.V. Moskvitin¹

¹Institute of Mechanical Engineering named after A.A. Blagonravov RAS,
M. Kharitonovskiy per., 4, Moscow 101000, Russia

²MSTU named after N.E. Bauman,
st. 2nd Baumanskaya, 5, Moscow 105005, Russia

Received 03.05.2023.

Revised 25.07.2023.

Accepted 10.08.2023.

Abstract

The features of the structural and tribotechnical characteristics of copper alloys and coatings during friction of a steel–steel pair are analyzed. Copper-based coatings obtained by gas-dynamic spraying have been experimentally studied. The wear resistance and microgeometric characteristics of the surface of steels with coatings of the composition Cu:Al₂O₃ = 55:45 (wt. %) and Cu:Zn:Al₂O₃ = 35:35:30 (wt. %) are determined. A coating is formed from a powder mixture of copper and corundum, mainly consisting of copper. Corundum is present in the form of particles with a size of 0.05 μm² in an amount of less than 1 %. The coating has a high performance when tested under friction and wear conditions: wear intensity I_h (coating) $\approx (1.1—1.5) \cdot 10^{-10}$ and I_h (counterbody) $\approx (0.3—0.4) \cdot 10^{-11}$ at friction in mineral oil I-20A; I_h (coatings) $\approx (2—5) \cdot 10^{-10}$ and I_h (counterbodies) $\approx 0.2 \cdot 10^{-11}$ during friction in Litol-24 grease. Heat treatment of such a coating causes diffusion of zinc into copper with the formation of a solid solution of zinc in copper (α -phase) and an electron-type solid solution based on CuZn is also formed. The mechanism of contact interaction of steel coated with Cu-Zn-Al₂O₃ in a pair with steel ShKh15 is based on the process of mass transfer in the zone of surface plastic deformation, which minimizes the level of surface destruction of the pair as a whole, reducing it to practical wearlessness at high external pressures. Deformation, diffusion and mass transfer in the zone of contact interaction during friction point to the effect of “classical wearlessness”, a distinctive feature of which is the formation of not a servovite copper film (with a special structural state), but a copper-zinc third body interspersed with corundum, which has the ability to transfer from the sample on the counterbody and vice versa, providing protection of the surface layers from destruction. High wear resistance of friction pair materials is achieved due to frictional mass transfer films.

Keywords: wear, structure, surface layers, modification, gas-dynamic spraying, copper alloys, wear-free, wear intensity, heat treatment, corundum.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334

Адрес для переписки:

М.С. Пугачев
Институт Машиностроения им. А.А. Благонравова РАН,
М. Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва 101000, Россия
e-mail: pugachevmax@mail.ru

Для цитирования:

В.Е. Архипов, Л.И. Куksenova, М.С. Пугачев, Д.А. Козлов,
Г.В. Москвитин
Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на
работоспособность пар трения скольжения сталь–сталь.
Трение и износ.
2023. — Т. 44, № 4. — С. 322–334.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334

Address for correspondence:

M.S. Pugachev
Institute of Mechanical Engineering named after A.A. Blagonravov RAS,
M. Kharitonovskiy per., 4, Moscow 101000, Russia
e-mail: pugachevmax@mail.ru

For citation:

V.E. Arkhipov, L.I. Kuksenova, M.S. Pugachev, D.A. Kozlov, and
G.V. Moskvitin
[Influence of Surface Layers Modified with Copper on the
Performance of Steel–Steel Sliding Friction Couples].
Trenie i Iznos.
2023, vol. 44, no. 4, pp. 322–334 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-322-334

Список использованных источников

1. Дьячкова Л.Н., Фельдштейн Е.З., Витязь П.А., Блох Б.М., Воронцовская Л.Я. Влияние содержания меди на трибологические характеристики композитов Fe-C-Cu // Трение и износ. — 2018 (39), № 1, 5—10
2. Шелег В.К., Леванцевич М.А., Пилипчук К.В., Дема Р.Р. Исследование работоспособности медных покрытий, сформированных методами гальванического осаждения и деформационного плакирования гибким инструментом // Трение и износ. — 2018 (39), № 1, 11—17
3. Сачек Б.Я., Мерзин А.М., Архипов В.Е., Лондарский А.Ф. Модифицирование поверхности трибосопряжений напылением металлических покрытий для повышения фреттингостойкости // Трение и износ. — 2018 (39), № 4, 376—381
4. Потапов Г.К., Балабанов В.И. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) гильз цилиндров и шеек коленчатых валов двигателей // Эффект безызносности и триботехнологии. — 1994, № 3-4, 48—53
5. Саврай Р., Малышина И.Ю., Макаров А.В., Осинцева А.Л., Роговая С.А., Колобылин Ю.М. Влияние лазерного легирования поршковыми смесями Cu-Zn-Ti и Si-Cu на структуру и свойства литейного алюминиевого сплава // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). — 2019 (21), № 4, 70—84
6. Михайлов В.В., Агафий В.И., Янакевич А.И. Опыт применения электроискрового легирования для повышения износостойкости пар трения из нержавеющей стали X18H9T // Труды ГОСНИТИ. — 2013 (111), № 2, 63—65
7. Kuksenova L.I., Kozlov D.A., and Alekseeva M.S. Operational Properties of Steel Friction Units with Copper-Alloy Antifriction Coating Formed via Electric Spark Alloying // Inorganic Materials: Applied Research. — 2022 (13), no. 3, 745—753
8. Кужаров А.С., Бурлакова В.Э., Задосенко Е.Г., Кужаров А.А., Бурлов А.С., Ураев А.И., Кравчик К., Гарновский А.Д. Триботехнические возможности координационных соединений меди при трении бронзы по стали // Трение и износ. — 2005 (26), № 6, 628—637
9. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий. — М.: КРАСАНД. — 2017
10. Wenyuan Chena, Yuan Yua, Xudong Suia, Shengyu Zhua, Guosheng Huangc, and Jun Yang. Tribological behavior of the Low-Pressure Cold Sprayed (Cu-5Sn)/Al₂O₃-Ag Solid-Lubricating Coating in Artificial Seawater // Surface & Coatings Technology. — 2020, no. 403, 1—10
11. Qin Chen, Min Yu, Kai Cao, and Hui Chen. Thermal Conductivity and Wear Resistance of Cold Sprayed Cu-Ceramic Phase Composite Coating // Surface & Coatings Technology. — 2022, no. 434,

1—14

12. Kostoula I. Triantou, Dimitris I. Pantelis, Vincent Guipont, and Michel Jeandin. Microstructure and Tribological Behavior of Copper and Composite Copper+Alumina Cold Sprayed Coatings for Various Alumina Contents // Wear. — 2015, nos. 336-337, 96—107
13. Архипов В.Е., Муравьёва Т.И., Пугачев М.С., Щербакова О.О. Структурно-фазовые превращения в покрытия на основе частиц меди и цинка, нанесённом газодинамическим напылением // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2020, № 4, 32—36
14. Алексеев Н.М. Металлические покрытия опор скольжения. — М.: Наука. — 1973

References

1. Dyachkova L.N., Feldshtein E.Z., Vityaz P.A., Bloch B.M., and Voronetskaia L.Ya. Effect of Copper Content on Tribological Characteristics of Fe-C-Cu Composites // Journal of Friction and Wear. — 2018 (39), no. 1, 1—5
2. Shelekh V.K., Levantsevich M.A., Pilipchuk K.V., and Dema R.R. Investigation of the Performance of Copper Coatings Formed by the Methods of Galvanic Deposition and Deformation Cladding with a Flexible Tool // Friction and wear. — 2018 (39), no. 1, 11—17 (in Russian)
3. Sachek B.Ya., Merzin A.M., Arkhipov V.E., and Londarsky A.F. Modification of the Tribocouplings by Spraying Metal Coatings to Improve Their Fretting Resistance // Journal of Friction and Wear. — 2018 (39), no. 4, 299—303
4. Potapov G.K., Balabanov V.I. Finishing anti-friction non-abrasive treatment (FABO) of cylinder liners and journals of crankshafts of engines // Effect of wearlessness and tribotechnology. — 1994, nos. 3-4, 48—53 (in Russian)
5. Savray R., Malysheva I.Yu., Makarov A.V., Osintseva A.L., Rogovaya S.A., Kolobylin Yu.M. Influence of laser alloying with Cu-Zn-Ti and Si-Cu powder mixtures on the structure and properties of a cast aluminum alloy // Processing of metals (technology, equipment, tools). — 2019 (21), no. 4, 70—84 (in Russian)
6. Mikhailov V.V., Agafii V.I., Yanakevich A.I. Experience in the use of electrospark alloying to improve the wear resistance of friction pairs from Kh18N9T stainless steel // Transactions of GOSNITI. — 2013 (111), no. 2, 63—65 (in Russian)
7. Kuksenova L.I., Kozlov D.A., Alekseeva M.S. Operational Properties of Steel Friction Units with Copper-Alloy Antifriction Coating Formed via Electric Spark Alloying // Inorganic Materials: Applied Research. — 2022 (13), no. 3, 745—753 (in Russian)
8. Kuzharov A.S., Burlakova V.E., Zadoshenko E.G., Kuzharov A.A., Burlov A.S., Uraev A.I., Kravchik K., and Garnovsky A.D. Tribotechnical Possibilities of Coordinating Compounds of Copper

- During Friction of Bronze on Steel // Journal of Friction and Wear. — 2005 (26), no. 6, 59—66
9. **Arkhipov V.E., Londarsky A.F., Moskvitin G.V., Pugachev M.S.** Gas dynamic spraying. Structure and properties of coatings. — M.: KRASAND. — 2017 (in Russian)
 10. **Wenyuan Chena, Yuan Yua, Xudong Suia, Shengyu Zhua, Guosheng Huangc, and Jun Yang.** Tribological Behavior of the Low-Pressure Cold Sprayed (Cu-5Sn)/Al₂O₃-Ag Solid-Lubricating Coating in Artificial Seawater // Surface and Coatings Technology. — 2020, no. 403, 1—10
 11. **Qin Chen, Min Yu, Kai Cao, and Hui Chen.** Thermal Conductivity and Wear Resistance of Cold Sprayed Cu-Ceramic Phase Composite Coating // Surface & Coatings Technology. — 2022, no. 434, 1—14
 12. **Kostoula I. Triantou, Dimitris I. Pantelis, Vincent Guipont, and Michel Jeandin.** Microstructure and Tribological behavior of Copper and Composite Copper+Alumina Cold Sprayed Coatings for Various Alumina Contents // Wear. — 2015, nos. 336-337, 96—107
 13. **Arkhipov V.E., Muravyova T.I., Pugachev M.S., Shcherbakova O.O.** Structural-phase transformations in a coating based on copper and zinc particles applied by gas-dynamic spraying // Metal Science and Thermal Processing of Metals. — 2020, no. 4, 32—36 (in Russian)
 14. **Alekseev N.M.** Metal coatings of sliding bearings. — M.: Nauka. — 1973 (in Russian)

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11
Full text of articles can be purchased from the editorial office.
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11
E-mail: FWJ@tut.by