

УДК 621.793

Субструктурные изменения в поверхностных слоях композиционных газотермических покрытий Cu–(Al–Si) при трении в различных условиях

А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила в редакцию 26.01.2024.

После доработки 15.06.2024.

Принята к публикации 18.06.2024.

Исследована структура, фазовый состав, твердость и триботехнические свойства композиционных газотермических покрытий 50 % Cu – 50 % (Al–Si) в различных условиях трения. Показано, что в процессе высокоскоростной металлизации происходит активное взаимодействие расплавленных алюминиевых и медных частиц, приводящее к образованию твердых растворов и интерметаллидных соединений в напыленных покрытиях. В частности, в покрытиях 50 % Cu – 50 % (Al–Si) помимо матричных фаз Cu и Al, регистрируются интерметаллиды Cu_9Al_4 , CuAl_2 , Cu_3Al . Твердость и микротвердость композита составляют 180 HV 1 и 180—190 HV 0,025, соответственно. Установлено, что композиционное покрытие из 50 % Cu – 50 % (Al–Si) имеет более высокую износостойкость в различных условиях трения, чем широко используемое покрытие из антифрикционной бронзы БрОФ10-1, полученное центробежной индукционной наплавкой. В частности, в среде смазочного материала И-20А износостойкость композиционного покрытия превышает износостойкость бронзы в $\approx 1,2$ раз, в среде пластичного смазочного материала Литол-24 — в $\approx 1,4$ раза, а при сухом трении до $\approx 2,8$ раз. Показано, что в процессе граничного трения в алюминиевых частицах композита происходит накопление дислокаций, а в медных частицах при повышенных давлениях испытаний протекает преимущественное образование субзеренной структуры. На основании проведенных исследований сделано заключение, что повышенная износостойкость композита обусловлена наличием в нем твердых интерметаллидных соединений, твердорастворным упрочнением, присутствием кремния в алюминиевых прослойках, а также дислокационным упрочнением алюминиевых прослоек и образованием субзеренной структуры в медных прослойках.

Ключевые слова: антифрикционные материалы, композиционные покрытия, высокоскоростная металлизация, интерметаллидные соединения, износостойкость, субструктура, физическое уширение дифракционных линий, плотность дислокаций, размер кристаллитов.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-3-210-219

Адрес для переписки:

А.Н. Григорчик
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: GrigorchikAN@gmail.com

Address for correspondence:

A.N. Grigorchik
Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of
Sciences of Belarus,
Akademicheskaya Street, 12, Minsk 220072, Belarus
e-mail: GrigorchikAN@gmail.com

Для цитирования:

А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко.
Субструктурные изменения в поверхностных слоях композиционных газотермических покрытий Cu–(Al–Si) при трении в различных условиях.
Трение и износ.
2024. – Т. 45, № 3. – С. 210–219.
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-3-210-219

For citation:

A.N. Grigorchik and V.A. Kukareko.
[Substructural Changes in the Surface Layers of Composites Gas-Thermal Cu–(Al–Si) Coatings During Friction under Various Conditions].
Trenie i Iznos.
2024, vol. 45, no. 3, pp. 210–219 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-3-210-219

Substructural Changes in the Surface Layers of Composites Gas-Thermal Cu–(Al–Si) Coatings During Friction under Various Conditions

A.N. Grigorchik and V.A. Kukareko

Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya Street, 12, Minsk 220072, Belarus

Received 26.01.2024.

Revised 15.06.2024.

Accepted 18.06.2024.

Abstract

The structure, phase composition, hardness and tribological properties of composite gas-thermal coatings 50 % Cu – 50 % (Al–Si) under various friction conditions were studied. It has been shown that during the process of high-speed metallization, active interaction of molten aluminum and copper particles occurs, leading to the formation of solid solutions and intermetallic compounds in sprayed coatings. In particular, in 50 % Cu – 50 % (Al–Si) coatings, in addition to the matrix phases Cu and Al, intermetallic compounds Cu₉Al₄, CuAl₂, Cu₃Al are recorded. The hardness and microhardness of the composite are 180 HV 1 and 180—190 HV 0.025, respectively. It has been established that a composite coating of 50 % Cu – 50 % (Al–Si) has higher wear resistance under various friction conditions than the widely used coating of antifriction bronze CuSn11P-C, obtained by centrifugal induction surfacing. In particular, in the environment of the lubricant I-20A, the wear resistance of the composite coating exceeds the wear resistance of bronze by ≈ 1,2 times, in the environment of the plastic lubricant Litol-24 — by ≈ 1,4 times, and with dry friction up to ≈ 2,8 once. It has been shown that during boundary friction, dislocations accumulate in aluminum particles of the composite, while in copper particles at elevated test pressures, a predominant formation of a subgrain structure occurs. Based on the studies conducted, it was concluded that the increased wear resistance of the composite is due to the presence of solid intermetallic compounds in it, solid solution strengthening, the presence of silicon in aluminum interlayers, as well as dislocation strengthening of aluminum interlayers and the formation of a subgrain structure in copper interlayers.

Keywords: antifriction materials, composite coatings, high-speed metallization, intermetallic compounds, wear resistance, substructure, physical broadening of diffraction lines, dislocation density, crystallite size.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-3-210-219

Адрес для переписки:

А.Н. Григорчик
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: GrigorchikAN@gmail.com

Address for correspondence:

A.N. Grigorchik
Joint Institute of Mechanical Engineering, National Academy of
Sciences of Belarus,
Akademicheskaya Street, 12, Minsk 220072, Belarus
e-mail: GrigorchikAN@gmail.com

Для цитирования:

А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко.
Субструктурные изменения в поверхностных слоях
композиционных газотермических покрытий Cu–(Al–Si) при
трении в различных условиях.
Трение и износ.
2024. – Т. 45, № 3. – С. 210–219.
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-3-210-219

For citation:

A.N. Grigorchik and V.A. Kukareko.
[Substructural Changes in the Surface Layers of Composites Gas-
Thermal Cu–(Al–Si) Coatings During Friction under Various
Conditions].
Trenie i Iznos.
2024, vol. 45, no. 3, pp. 210–219 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-3-210-219

Список использованных источников

1. **Кордикова Е.И.** Триботехника: конспект лекций; Белорусский государственный технологический университет. — Минск: Изд-во БГТУ. — 2013
2. **Белоцерковский М.А.** Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. — Минск: Технопринт. — 2004
3. **Kukareko V.A., Belotserkovskii M.A., Grigorichik A.N., and Sosnovskii A.V.** Structure and Tribological Properties of a Ti-TiN Coating Obtained by Hypersonic Metallization // *Journal of Friction and Wear*. — 2022 (43), no. 5, 300—304
4. **Селиверстов И.А., Троцан Г.Н., Смирнов И.В., Селиверстова С.Р.** Исследование структуры и свойств плазменных покрытий на основе Fe-Al // *Научный вестник Херсонской государственной морской академии*. — 2014, № 1(10), 249—254
5. **Филиппов М.А., Шешуков О.Ю.** Трение и антифрикционные материалы: учебное пособие; М-во науки и высш. образования РФ. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2021
6. **Astrashab E.V., Grigorichik A.N., Kukareko V.A., Belotserovskii M.A.** Effect of Heat Treatment on the Structure, Phase Composition, and Wear Resistance of Thermal Spray Coatings of the Pseudoalloy 08G2S+AK12 // *Journal of Friction and Wear*. — 2020 (41), no. 1, 6—11
7. **Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуйев Л.Н.** Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. — М.: Металлургия. — 1982
8. **Кононов А.Г., Кукареко В.А., Белый А.В., Шаркеев Ю.П.** Ионно-модифицированные субмикрорекристаллические титановые и циркониевые сплавы для медицины и механики // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2013, № 1(22), 47—53
9. **Конева Н.А., Тришкина Л.И., Черкасова Т.В., Соловьев А.Н., Черкасов Н.В.** Эволюция микроструктуры и ее параметров с деформацией в поликристаллических сплавах медь-алюминий с разной энергией дефекта упаковки // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2021, № 7(64), 43—47
10. **Тришкина Л.И., Черкасова Т.В., Соловьев А.Н., Черкасов Н.В.** Субструктурные превращения и фазовые переходы дислокационной структуры в сплавах Cu-Mn // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. — 2021, № 3, 59—65
11. **Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И.** Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. — Томск: НТЛ. — 2004
12. **Ким А.В.** Влияние термомеханических обработок на микроструктуру и механические свойства аустенитной стали ЭК-164 / Выпускная квалификационная работа бакалавра. — Томск. — 2022
13. **Новиков И.И.** Дефекты кристаллического строения металлов: учеб. пособие. — М.: Металлургия. — 1983
14. **Марков Д.П., Келли Д.** Адгезионно-иницируемые типы катастрофического изнашивания // *Трение и износ*. — 2002 (23), № 5, 483—493
15. **Кукареко В.А.** Субмикроскопическая структура Ni-Cr дисперсионно-твердеющих сплавов и их триботехнические свойства в условиях адгезионного взаимодействия // *Трение и износ*. — 2003 (24), № 2, 192—202

References

1. **Kordikova E.I.** Tribotechnics: lecture notes. Belarusian State Technological University. — Minsk: Izd-vo BGTU. — 2013 (in Russian)
2. **Belotserovskii M.A.** Technologies of activated gas flame spraying of antifriction coatings. — Minsk: Tekhnoprint. — 2004 (in Russian)
3. **Kukareko V.A., Belotserkovskii M.A., Grigorichik A.N., and Sosnovskii A.V.** Structure and Tribological Properties of a Ti-TiN Coating Obtained by Hypersonic Metallization // *Journal of Friction and Wear*. — 2022 (43), no. 5, 300—304
4. **Selyverstov I.A., Trotsan G.N., Smirnov I.V., Seliwerstova S.R.** Study of the structure and properties of plasma coatings based on Fe-Al // *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*. — 2014, № 1(10), 249—254 (in Russian)
5. **Filippov M.A., Sheshukov O.Yu.** Friction and antifriction materials. — Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta. — 2021 (in Russian)
6. **Astrashab E.V., Grigorichik A.N., Kukareko V.A., and Belotserovskii M.A.** Effect of Heat Treatment on the Structure, Phase Composition, and Wear Resistance of Thermal Spray Coatings of the Pseudoalloy 08G2S+AK12 // *Journal of Friction and Wear*. — 2020 (41), no. 1, 6—11
7. **Umansky Ja.S., Skakov YU.A., Ivanov A.N., Rastorguyev L.N.** Crystallography, radiography and electron microscopy. — Moscow: Metallurgiya. — 1982 (in Russian)
8. **Kononov A.G., Kukareko V.A., Belyy A.V., Sharkeyev Yu.P.** Ion-modified submicrocrystalline titanium and zirconium alloys for medicine and mechanics // *Mechanics of machines, mechanisms and materials*. — 2013, № 1(22), 47—53 (in Russian)
9. **Koneva N.A., Trishkina L.I., Cherkasova T.V., Solov'yev A.N., Cherkasov N.V.** Evolution of the microstructure and its parameters with deformation in polycrystalline copper-aluminum alloys with different packing defect energies // *Bulletins of higher educational institutions. Physics*. — 2021, № 7(64), 43—47 (in Russian)
10. **Trishkina L.I., Cherkasova T.V., Solov'yev A.N., Cherkasov N.V.** Substructural transformations and phase transitions of the dislocation structure in Cu-

- Mn alloys // Herald of PNIPU. Mechanical engineering, materials science. — 2021, № 3, 59—65 (in Russian)
11. **Didenko A.N., Sharkeyev YU.P., Kozlov E.V., Ryabchikov A.I.** Long-range effects in ion-implanted metallic materials. — Tomsk: NTL. — 2004 (in Russian)
 12. **Kim A.V.** The influence of thermomechanical treatments on the microstructure and mechanical properties of austenitic steel EK-164 / Bachelor's graduation thesis. — Tomsk. — 2022 (in Russian)
 13. **Novikov I.I.** Defects in the crystalline structure of metals. — Moscow: Metallurgiya. — 1983 (in Russian)
 14. **Markov D.P. and Kelli D.** Adhesion-Initiated Types of Catastrophic Wear // Journal of Friction and Wear. — 2002 (**23**), no. 5, 483—493
 15. **Kukareko V.A.** Submicroscopic Structure of Ni-Cr Dispersion-Hardening Alloys and Their Tribotechnical Properties under Conditions of Adhesive Interaction // Journal of Friction and Wear. — 2003 (**24**), no. 2, 192—202

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