

УДК 621.762; 537.523.4

Осаждение износостойкого Cr–Fe–Al₂O₃ покрытия на сталь 35 с использованием порошка оксида алюминия

А.А. Бурков¹, М.А. Кулик¹, А.Ю. Быцур¹, М.А. Ермаков²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Институт Материаловедения Дальневосточного отделения Российской академии наук,
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск 680042, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тихоокеанский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТОГУ»),
ул. Тихоокеанская, 136, г. Хабаровск 680035, Россия

Поступила в редакцию 25.07.2023.

После доработки 28.11.2023.

Принята к публикации 12.12.2023.

Методом электроискрового легирования были получены Cr–Fe–Al₂O₃ покрытия на стали 35 в смеси стальных гранул с порошками хрома и оксида алюминия. Структуру покрытий изучали методами рентгеновского дифракционного анализа, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Жаростойкость покрытий исследовалась в течение 100 часов при температуре 700 °С на воздухе. Исследование механических свойств покрытий включало испытание на микротвёрдость при нагрузке 0,5 Н и изнашиваемость режиме сухого трения при нагрузке 25 Н. По данным рентгенофазового анализа в составе покрытия преобладал феррохром и небольшое количество оксида алюминия. По данным ЭДС анализа распределение элементов в покрытии было равномерным по толщине покрытия с концентрацией хрома около 60 ат. %, железа — 30 ат. % и алюминия — 3,4 ат. %. Результаты указывают на равномерное распределение мелкодисперсных частиц оксида алюминия в объёме осаждённого слоя. Показано, что металлический порошок в четыре раза активнее участвует в формировании покрытия по сравнению с гранулами. Испытание на жаростойкость показало, что с ростом добавки порошка Al₂O₃ в анодной смеси средняя скорость высокотемпературного привеса образцов увеличивалась. В целом, применение Cr–Fe–Al₂O₃ покрытий повышает жаростойкость стали 35 от 2,4 до 4 раз. Средние значения коэффициента трения покрытий находились диапазоне от 0,76 до 0,83, с минимумом у образца, осаждённого с применением минимальной добавки Al₂O₃. Износ образцов монотонно снижался от 3,3·10⁻⁶ до 1,8·10⁻⁶ мм³/(Н·м) при уменьшении концентрации оксида алюминия в анодной смеси. В целом, нанесение Cr–Fe–Al₂O₃ покрытий по предложенной методике позволяет повысить износостойкость поверхности стали 35 от 11 до 20 раз.

Ключевые слова: покрытие, Cr–Fe–Al₂O₃, электроискровое легирование, износ, жаростойкость, твёрдость.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-521-531

Адрес для переписки:

М.А. Кулик
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Хабаровский Федеральный исследовательский центр Институт
Материаловедения Дальневосточного отделения
Российской академии наук,
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск 680042, Россия
e-mail: marijka80@mail.ru

Address for correspondence:

M.A. Kulik
Khabarovsk Federal Research Center Institute of Materials Science of
the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tikhookenskaya St., 153, Khabarovsk 680042, Russia
e-mail: marijka80@mail.ru

Для цитирования:

А.А. Бурков, М.А. Кулик, А.Ю. Быцур, М.А. Ермаков
Осаждение износостойкого Cr–Fe–Al₂O₃ покрытия на сталь 35 с
использованием порошка оксида алюминия.
Трение и износ.
2023. – Т. 44, № 6. – С. 521–531.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-521-531

For citation:

A.A. Burkov, M.A. Kulik, A.Y. Bytsura, and M.A. Ermakov
[Deposition of Wear-Resistant Cr–Fe–Al₂O₃ Coatings on Steel 35
Using Alumina Powder].
Trenie i Iznos.
2023, vol. 44, no. 6, pp. 521–531 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-521-531

Deposition of Wear-Resistant Cr–Fe–Al₂O₃ Coatings on Steel 35 Using Alumina Powder

A.A. Burkov¹, M.A. Kulik¹, A.Y. Bytsura¹, M.A. Ermakov²

¹*Khabarovsk Federal Research Center Institute of Materials Science of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tikhookenskaya St., 153, Khabarovsk 680042, Russia*

²*Pacific National University,
Tikhookenskaya St., 136, Khabarovsk 680053, Russia*

Received 25.07.2023.

Revised 28.11.2023.

Accepted 12.12.2023.

Abstract

Cr–Fe–Al₂O₃ coatings on steel 35 in a mixture of steel granules with chromium and alumina powders were obtained by electrospark deposition. The structure of the coatings was examined by X-ray diffraction, scanning electron microscopy and X-ray dispersion spectrometry. The oxidation resistance of the coatings was examined for 100 hours at a temperature of 700 °C in the air. The investigation of the mechanical properties of coatings included testing for microhardness at a load of 0.5 N and wear rate at dry friction mode at 25 N load. According to X-ray phase analysis, ferrochrome and a small amount of alumina predominated in the coating's composition. According to the EDS analysis, the distribution of elements in the coating was uniform over the coating thickness with a concentration of chromium about 60 at. %, iron — 30 at. % and aluminum — 3.4 at. %. The results indicate a uniform distribution of fine alumina particles in the volume of the deposited layer. It is shown that the metal powder is four times more actively involved in the coating formation compared to granules. The oxidation resistance test showed that with an increase in the addition of Al₂O₃ powder in the anode mixture, the average rate of high-temperature weight gain of samples increased. In general, the use of Cr–Fe–Al₂O₃ coatings increases the oxidation resistance of steel 35 surface from 2.4 to 4 times. The average values of the coefficient of friction of the coatings ranged from 0.76 to 0.83, with a minimum in the sample deposited with the use of a minimal additive Al₂O₃. The wear of the samples monotonically decreased from 3.3·10⁻⁶ to 1.8·10⁻⁶ mm³/(N·m) with a decrease in the concentration of alumina in the anode mixture. In general, the application of Cr–Fe–Al₂O₃ coatings according to the proposed method makes it possible to increase the wear resistance of the surface of steel 35 from 11 to 20 times.

Keywords: Cr–Fe–Al₂O₃, coating, electrospark deposition, wear, oxidation resistance, hardness.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-521-531

Адрес для переписки:

М.А. Кулик
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Хабаровский федеральный исследовательский центр Институт
Материаловедения Дальневосточного отделения
Российской академии наук,
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск 680042, Россия
e-mail: marijka80@mail.ru

Address for correspondence:

M.A. Kulik
Khabarovsk Federal Research Center Institute of Materials Science of
the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tikhookenskaya St., 153, Khabarovsk 680042, Russia
e-mail: marijka80@mail.ru

Для цитирования:

А.А. Бурков, М.А. Кулик, А.Ю. Быцюра, М.А. Ермаков
Осаждение износостойкого Cr–Fe–Al₂O₃ покрытия на сталь 35 с
использованием порошка оксида алюминия.
Трение и износ.
2023. – Т. 44, № 6. – С. 521–531.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-521-531

For citation:

A.A. Burkov, M.A. Kulik, A.Y. Bytsura, and M.A. Ermakov
[Deposition of Wear-Resistant Cr–Fe–Al₂O₃ Coatings on Steel 35
Using Alumina Powder].
Trenie i Iznos.
2023, vol. 44, no. 6, pp. 521–531 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-521-531

Список использованных источников

1. **Sherman D.** The Mechanical Behavior of Layered Brazed Metal/Ceramic Composites // *Materials Letters*. — 1998 (33), nos. 5–6, 255—260. DOI: 10.1016/S0167-577X(97)00116-X
2. **Абызов А.М.** Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (Обзор). Часть 1. Свойства Al_2O_3 и промышленное производство дисперсного Al_2O_3 // *Новые огнеупоры*. — 2019 (1), 16—23. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-1-16-23/>
3. **Yazdi M.S. et al.** Tribological and Corrosion Behavior of St37 Steel by Electrochemically Deposited Ni-Fe/ Al_2O_3 // *Coating*. — 2022. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1811021/v1>
4. **Ke-Ning S. et al.** Electrodeposited Cr Al_2O_3 composite coating for wear resistance // *Wear*. — 1996 (196), nos. 1–2, 295—297. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06860-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06860-0)
5. **Baghani M., Aliofkhaezrai M., and Poursalehi R.** Microwave-Assisted Sintering of Fe- Al_2O_3 Nanocomposites: Study of Corrosion and Wear Properties // *Procedia Materials Science*. — 2015 (11), 689—694. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.033>
6. **Gerashchenkov D.A. et al.** Tribological Study of Cermet Coatings Al–Sn–Zn– Al_2O_3 for Friction Couples // *Journal of Friction and Wear*. — 2018 (39), 522—527. DOI: 10.3103/S106836661806003X
7. **Huang J. et al.** Preparation and Properties of FeAl/ Al_2O_3 Composite Tritium Permeation Barrier Coating on Surface of 316L Stainless Steel // *Surface and Coatings Technology*. — 2020 (383), 125282. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125282>
8. **Burkov A.A.** Improving Oxidation Resistance of Titanium Alloy VT20 by Forming Composite Electrospark Ti_3Al+Al/Al_2O_3 Coatings // *Letters on Materials*. — 2015 (5), no. 4, 371—375. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2015-4-371-375>
9. **Nikolenko S.V., Pyachin S.A., and Burkov A.A.** Formation of Electrospark Coatings of the VK8 Hard Alloy with the Al_2O_3 Additive // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. — 2011 (52), 56—61. DOI: 10.3103/S1067821211010184
10. **Бурков А.А.** Износостойкость электроискровых WC-CO покрытий с различной концентрацией железа // *Трение и износ*. — 2016 (37), № 4, 491—495. DOI: 10.3103/S1068366616040048
11. **Бурков А.А., Крутикова В.О., Быцур А.Ю., Хе В.К.** Ti-Cr-Cu электроискровые покрытия на стали Ст3 // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2023, № 1, 93—104. DOI: 10.54826/19979258_2023_1_93
12. **Бурков А.А., Кулик М.А.** Электроискровое осаждение металлокерамического Fe–Al/HfC покрытия на сталь 35 // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. — 2023 (66), № 3, 302—310. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-302-310>
13. **Cao G., Zhang X., Tang G., and Ma X.** Microstructure and Corrosion Behavior of Cr Coating on M50 Steel Fabricated by Electrospark Deposition // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2019 (28), no. 7, 4086—4094. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04148-2>
14. **de Arellano-López A.R. and Faber K.T.** Microstructural Characterization of Small-Particle Plasma Spray Coatings // *Journal of the American Ceramic Society*. — 1999 (82), no. 8, 2204—2208
15. **Saowanee S., Rachpech V., and Sutham N.** Effect of Substrate Conditions on Fe- Al_2O_3 Composite Coating // *Advanced Materials Research*. — 2012 (488), 447—451
16. **Darbeida A. et al.** Comparative Tribological Study of Chromium Coatings with Different Specific Hardness // *Surface and Coatings Technology*. — 1994 (68), 582—590. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90221-6](https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90221-6)
17. **Guangxiong C. et al.** Effect of Surface Topography on Formation of Squeal under Reciprocating Sliding // *Wear*. — 2002 (253), nos. 3-4, 411—423. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00161-8
18. **Torabinejad V., Aliofkhaezrai M., Rouhghadam A.S., Allahyarzadeh M.H., Kasama T., and Alimadadi H.** Mechanical Properties of Multilayer Ni-Fe and Ni-Fe- Al_2O_3 Nanocomposite Coating // *Materials Science and Engineering: A*. — 2017 (700), no. 3, 448—456. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.009>
19. **Бурков А.А., Крутикова В.О., Быцур А.Ю., Хе В.К.** Ti-Cr-Cu электроискровые покрытия на стали Ст3 // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2023, № 1, 93—104. DOI 10.54826/19979258_2023_1_93

References

1. **Sherman D.** The Mechanical Behavior of Layered Brazed Metal/Ceramic Composites // *Materials Letters*. — 1998 (33), nos. 5–6, 255—260. DOI: 10.1016/S0167-577X(97)00116-X
2. **Abyzov A.M.** Oksid aliuminiya i alyumooksidnaya keramika (Obzor). Chast' 1. Svoystva Al_2O_3 i promyshlennoe proizvodstvo dispersnogo Al_2O_3 // *Novye ogneupory*. — 2019 (1), 16—23. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-1-16-23/> (in Russian)
3. **Yazdi M. S. et al.** Tribological and Corrosion Behavior of St37 Steel by Electrochemically Deposited Ni-Fe/ Al_2O_3 // *Coating*. — 2022. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1811021/v1>
4. **Ke-Ning S. et al.** Electrodeposited Cr Al_2O_3 Composite Coating for Wear Resistance // *Wear*. — 1996 (196), nos. 1–2, 295—297. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)06860-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06860-0)
5. **Baghani M., Aliofkhaezrai M., and Poursalehi R.** Microwave-Assisted Sintering of Fe- Al_2O_3 Nanocomposites: Study of Corrosion and Wear Properties // *Procedia Materials Science*. — 2015 (11), 689—694. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.033>
6. **Gerashchenkov D.A. et al.** Tribological Study of

- Cermet Coatings Al–Sn–Zn–Al₂O₃ for Friction Couples // Journal of Friction and Wear. — 2018 (39), 522—527. DOI: 10.3103/S106836661806003X
7. **Huang J. et al.** Preparation and Properties of FeAl/Al₂O₃ Composite Tritium Permeation Barrier Coating on Surface of 316L Stainless Steel // Surface and Coatings Technology. — 2020 (383), 125282. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125282>
 8. **Burkov A.A.** Improving Oxidation Resistance of Titanium Alloy VT20 by Forming Composite Electrospark Ti₃Al+Al/Al₂O₃ Coatings // Letters on Materials. — 2015 (5), no. 4. 371—375. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2015-4-371-375>
 9. **Nikolenko S.V., Pyachin S.A., and Burkov A.A.** Formation of Electrospark Coatings of the VK8 Hard Alloy with the Al₂O₃ Additive // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. — 2011 (52), 56—61. DOI: 10.3103/S1067821211010184
 10. **Burkov A.A.** Wear Resistance of Electrospark WC–CO Coatings with Different Iron Contents // Трение и Износ. — 2016 (37), no. 4, pp. 491—495. DOI: 10.3103/S1068366616040048
 11. **Burkov A.A., Krutikova V.O., Bytsura A.Yu., Khe V.K.** Ti–Cr–Cu Electrospark Coatings on Steel St3 // Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya. — 2023, № 1, 93—104. DOI: 10.54826/19979258_2023_1_93 (in Russian)
 12. **Burkov A.A., Kulik M.A.** Elektroiskrovoye osazhdenie metallokeramicheskogo Fe–Al/HfC pokrytiya na stal' 35 // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Chernaya Metallurgiya. — 2023 (66), № 3, 302—310. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-302-310> (in Russian)
 13. **Cao G., Zhang X., Tang G., and Ma X.** Microstructure and Corrosion Behavior of Cr Coating on M50 Steel Fabricated by Electrospark Deposition // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2019 (28), no. 7, 4086—4094. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04148-2>
 14. **de Arellano-López A.R. and Faber K.T.** Microstructural Characterization of Small-Particle Plasma Spray Coatings // Journal of the American Ceramic Society. — 1999 (82), no. 8, 2204—2208
 15. **Saowanee S., Rachpech V., and Sutham N.** Effect of Substrate Conditions on Fe–Al₂O₃ Composite Coating // Advanced Materials Research. — 2012 (488), 447—451
 16. **Darbeida A. et al.** Comparative Tribological Study of Chromium Coatings with Different Specific Hardness // Surface and Coatings Technology. — 1994 (68), 582—590. [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(94\)90221-6](https://doi.org/10.1016/0257-8972(94)90221-6)
 17. **Guangxiang C. et al.** Effect of Surface Topography on Formation of Squeal under Reciprocating Sliding // Wear. — 2002 (253), nos. 3-4, 411—423. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00161-8.
 18. **Torabinejad V., Aliofkhaezai M., Rouhaghdam A.S., Allahyarzadeh M.H., Kasama T., and Alimadadi H.** Mechanical Properties of Multilayer Ni–Fe and Ni–Fe–Al₂O₃ Nanocomposite Coating // Materials Science and Engineering: A. — 2017 (700), no. 3, 448—456. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.06.009>
 19. **Burkov A.A., Krutikova V.O., Bycura A.Yu., He V.K.** Ti–Cr–Cu elektroiskrovoye pokrytiya na stali St3 // Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya. — 2023, № 1, 93—104. DOI 10.54826/19979258_2023_1_93 (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