

УДК 669.058.66

Структура и абразивная износостойкость поверхностных слоев хромоникелевой аустенитной стали легированных бором

Е.Г. Бушуева¹, Е.А. Дробяз¹, М.Г. Голковский², В.А. Батаев¹, Е.В. Домаров²,
А.А. Дударева¹

¹Новосибирский государственный технический университет,
проспект К. Маркса, 20, г. Новосибирск 630072, Россия

²Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН,
проспект Академика Лаврентьева, 11, г. Новосибирск 630090, Россия

Поступила в редакцию 09.08.2023.

После доработки 28.11.2023.

Принята к публикации 12.12.2023.

Изучены структура, микротвёрдость и триботехнические свойства покрытий, полученных в процессе наплавки порошковых смесей электронным пучком, выведенным в воздушную атмосферу. Для наплавки использовали порошковую смесь, содержащую аморфный бор и смачивающий компонент, роль которого выполняли частицы порошка Fe, Cr и Ni. Функцию защиты расплавленного материала от воздушной атмосферы выполнял флюс MgF_2 . Толщина наплавленных покрытий достигала 2,3—2,8 мм. Максимальный уровень микротвёрдости покрытий достигает ~ 1500 HV. Основным механизмом упрочнения таких покрытий обусловлен присутствием в материале до 90 % (объёмных) частиц упрочняющей фазы. Показано, что для всех наплавляемых порошковых систем характерно формирование в модифицированном слое боридов хрома Cr_2B и $(Fe,Cr)_2B$, выполняющих роль упрочняющей фазы и γ -фазы (твёрдый раствор Ni, Fe). Находясь в наплавочной смеси или диффундируя из основного металла, в процессе электронно-лучевого воздействия, хром способствует образованию наиболее стойких боридов, поскольку имеет большее сродство к бору, чем никель или железо. Установлено, что покрытия, содержащие в качестве смачивающего компонента хром, обладают максимальной износостойкостью в различных условиях абразивного воздействия. При трении о закреплённые частицы абразива износостойкость покрытий возросла в 5 раз. По сравнению со сталью 12X18H9T в условиях газо- и гидроабразивного воздействия при малых углах атаки (15, 20°) износостойкость упрочнённых слоёв увеличилась в 6 и 2 раза соответственно.

Ключевые слова: износостойкость, вневакуумная электронно-лучевая наплавка, высокопрочные частицы, многокомпонентные покрытия, структура, микротвёрдость, гидроабразивное изнашивание.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-532-543

Адрес для переписки:

Е.А. Дробяз
Новосибирский государственный технический университет,
проспект К. Маркса, 20, г. Новосибирск 630072, Россия
e-mail: ekaterina.drobbyaz@yandex.ru

Address for correspondence:

E.A. Drobyaz
Novosibirsk State Technical University,
K. Marksa prospect, 20, Novosibirsk 630072, Russia
e-mail: ekaterina.drobbyaz@yandex.ru

Для цитирования:

Е.Г. Бушуева, Е.А. Дробяз, М.Г. Голковский, В.А. Батаев,
Е.В. Домаров, А.А. Дударева
Структура и абразивная износостойкость поверхностных слоев
хромоникелевой аустенитной стали легированных бором.
Трение и износ.
2023. — Т. 44, № 6. — С. 532—543.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-532-543

For citation:

E.G. Bushueva, E.A. Drobyaz, M.G. Golkovsky, V.A. Bataev,
E.V. Domarov, and A.A. Dudareva
[Structure and Abrasive Wear Resistance of Stainless Steel Surface
Layers Alloyed with Boron].
Trenie i Iznos.
2023, vol. 44, no. 6, pp. 532—543 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-532-543

Structure and Abrasive Wear Resistance of Stainless Steel Surface Layers Alloyed with Boron

E.G. Bushueva¹, E.A. Drobyaz¹, M.G. Golkovsky², V.A. Bataev¹, E.V. Domarov², and A.A. Dudareva¹

¹Novosibirsk State Technical University,
K. Marksa prospect, 20, Novosibirsk 630072, Russia

²Institute of Nuclear Physics named after G.I. Budker of the Siberian Branch of the
Russian Academy of Sciences,
Akademika Lavrentiev Avenue, 11, Novosibirsk 630090, Russia

Received 09.08.2023.

Revised 28.11.2023.

Accepted 12.12.2023.

Abstract

The structure, microhardness and tribological properties of coatings obtained in the process of surfacing of powder mixtures by an electron beam ejected into an air atmosphere are studied. The powder mixture of amorphous boron and Fe, Cr, and Ni particles, MgF₂ for cladding was used. The magnesium fluoride is a flux for protecting of the molten material from the air atmosphere. Metal particles as wetting component were used. The thickness of the formed coatings reached 2.3—2.8 mm. The maximum level of microhardness of coatings reaches ~ 1500 HV. The main mechanism of hardening of such is due to the presence in the material of up to 90 % (volume) particles of the hardening phase. It is shown that chromium borides Cr₂B and (Fe,Cr)₂B play the role of a hardening phase in γ -phase (Ni, Fe solid solution). Chromium is contained in the alloying powder mixture and the base material. During the cladding process, chromium diffuses and forms of borides. This process occurs due to the greater affinity of chromium for boron than nickel and iron. It has been established that chromium containing coatings have maximum wear resistance under various abrasive conditions. The wear resistance of that coatings increased by 5 times compared to stainless steel 12X18H9T at friction fixed abrasive particles. The wear resistance of hardened layers under conditions of gas and hydro-abrasive action at low angles of attack (15, 20°) increased by 6 and 2 times, respectively.

Keywords: wear resistance, non-vacuum electron beam cladding, high-strength particles, multicomponent coatings, structure, microhardness, hydroabrasive wear.

DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-532-543

Адрес для переписки:

Е.А. Дробяз
Новосибирский государственный технический университет,
проспект К. Маркса, 20, г. Новосибирск 630072, Россия
e-mail: ekaterina.drobyaz@yandex.ru

Address for correspondence:

E.A. Drobyaz
Novosibirsk State Technical University,
K. Marksa prospect, 20, Novosibirsk 630072, Russia
e-mail: ekaterina.drobyaz@yandex.ru

Для цитирования:

Е.Г. Бушueva, Е.А. Дробяз, М.Г. Голковский, В.А. Батаев,
Е.В. Домаров, А.А. Дударева
Структура и абразивная износостойкость поверхностных слоев
хромоникелевой аустенитной стали легированных бором.
Трение и износ.
2023. — Т. 44, № 6. — С. 532—543.
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-532-543

For citation:

E.G. Bushueva, E.A. Drobyaz, M.G. Golkovsky, V.A. Bataev,
E.V. Domarov, and A.A. Dudareva
[Structure and Abrasive Wear Resistance of Stainless Steel Surface
Layers Alloyed with Boron].
Trenie i Iznos.
2023, vol. 44, no. 6, pp. 532—543 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-6-532-543

Список использованных источников

1. **Freitas Brenda Juliet Martins, de Oliveira Vini-
cius Antonio, Gargarella Piter, Koga Guilherme
Yuuki, and Bolfarini Claudemiro.** Microstructural
Characterization and Wear Resistance of Boride-Re-
inforced Steel Coatings Produced by Selective Laser
Melting (SLM) // *Surface & Coatings Technol-
ogy*. — 2021 (426), 127779.
DOI:10.1016/j.surfcoat.2021.127779
2. **Kayali Y., Büyüksagis A., and Yalcin Y.** Corro-
sion and Wear Behaviors of Boronized AISI316L
Stainless Steel // *Metals and Materials Interna-
tional*. — 2013 (19), 1053—106.
doi.org/10.1007/s12540-013-5019-x
3. **Koumatos K. and Muehlemann A.** A Theoretical
Investigation of Orientation Relationships and
Transformation Strains in Steels // *Acta Crystallo-
graphica Section A: Foundations and Advances*. —
2017 (73), no. 2, 115—123. doi:
10.1107/S2053273316020350.
4. **Soyama J., Zepon G., Lopes T.P., Beraldo L. [et.
al.].** Microstructure Formation and Abrasive Wear
Resistance of a Boron-Modified Superduplex Stain-
less Steel Produced by Spray Forming // *Journal of
Materials Research*. — 2016 (31), no. 19, 2987—
2993. doi.org/10.1557/jmr.2016.323
5. **Zong X., Jiang W., and Fan Z.** A Study of the Mi-
crostructures and Performance of Chromium Boride
Coatings on AISI 52100 Steel // *Materials and Tech-
nology*. — 2018 (52), no. 2, 225—229.
DOI:10.17222/mit.2017.151
6. **Kumar K.Phanendra, Mohant Aveek, Lin-
gappa M. Shashank, Srinath M.S., and Panigra-
hia S.K.** Enhancement of Surface Properties of Aus-
tenitic Stainless Steel by Nickel Based Alloy Clad-
ding Developed Using Microwave Energy Tech-
nique // *Materials Chemistry and Physics*. — 2020
(256), 123657. doi.org/10.1016/j.matchem-
phys.2020.123657
7. **Krylova T.A., Ivanov K.V., Chumakov Y.A., and
Trotsenko R.V.** Corrosion and Wear Resistance of
Coatings Produced by Nonvacuum Electron Beam
Cladding of Refractory Carbides on Low-Carbon
Steel // *Inorganic Materials*. — 2020 (56), no. 3,
328—332. DOI: 10.1134/S0020168520030097
8. **Poletika I.M., Tetyutskaya M.V., and Maka-
rov S.A.** Formation of Bifunctional Coatings with
Superdispersed Structure by the Method of Electron-
Beam Surfacing in Free Air // *Inorganic Materials:
Applied Research*. — 2015 (6), no. 3, 249—254.
DOI: 10.1134/S2075113315030089
9. **Matts O.E., Lazurenko D.V., Bataev V.A., Rash-
kovets M.V., Emurlaev K.I., Tarasov S.Y., Filip-
pov A.V., Domenichini B., and Chakin I.K.** Tribo-
Oxidation of Ti-Al-Fe AND Ti-Al-Mn Cladding
Layers Obtained by Non-Vacuum Electron Beam
Treatment // *Surface and Coatings Technology*. —
2021 (421), 127442. DOI: 10.1016/j.surf-
coat.2021.127442

10. **Ruktuev A.A., Lazurenko D.V., Bataev V.A.,
Ivanov I.V., Thömmes A., Bataev I.A., and Gol-
kovski M.G.** Ti-Ta-NB Clads Produced by Electron
Beam Surface Alloying in Regular Air at Atmos-
pheric Pressure: Fabrication, Structure, and Prop-
erties // *Materials Characterization*. — 2021 (179),
111375. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111375
11. **Батаев И.А., Курлаев Н.В., Ленивцева О.Г.,
Бутыленкова О.А., Лосинская А.А.** Морфоло-
гия боридов железа в поверхностном слое,
наплавленном электронным лучом // *Обработка
металлов (технология, оборудование, инстру-
менты)*. — 2012, № 1(54), 85—89
12. **Arteaga-Hernandez L.A., Cuao-Moreu C.A.,
Gonzalez-Rivera C.E., Alvarez-Vera M., Ortega-
Saenz J.A., and Hernandez-Rodriguez M.A.L.**
Study of Boriding Surface Treatment in the Tribo-
logical Behavior of an AISI 316L Stainless Steel //
Wear. — 2021 (477), — 203825.
DOI:10.1016/j.wear.2021.203825
13. **Установка и способ испытания материалов и
покрытий на гидроабразивный износ: Патент
№ 2509295 Российская Федерация, МПК6
G1N3/56. № 2012108987/22 : опубл. 10.03.2014 /
Б.Е. Гринберг, А.А. Штерцер**
14. **Виноградов В.Н., Сорokin Г.М., Колокольни-
ков М.Г.** Абразивное изнашивание. — Москва:
Машиностроение. — 1990
15. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника (износ и безызнос-
ность): учебник. — Москва: Изд-во МСХА. —
2001

References

1. **Freitas Brenda Juliet Martins, de Oliveira Vini-
cius Antonio, Gargarella Piter, Koga Guilherme
Yuuki, and Bolfarini Claudemiro.** Microstructural
Characterization and Wear Resistance of Boride-Re-
inforced Steel Coatings Produced by Selective Laser
Melting (SLM) // *Surface & Coatings Technol-
ogy*. — 2021 (426), 127779.
DOI:10.1016/j.surfcoat.2021.127779
2. **Kayali Y., Büyüksagis A., and Yalcin Y.** Corro-
sion and Wear Behaviors of Boronized AISI316L
Stainless Steel // *Metals and Materials Interna-
tional*. — 2013 (19), 1053—106.
doi.org/10.1007/s12540-013-5019-x
3. **Koumatos K. and Muehlemann A.** A Theoretical
Investigation of Orientation Relationships and
Transformation Strains in Steels // *Acta Crystallo-
graphica Section A: Foundations and Advances*. —
2017 (73), no. 2, 115—123. doi:
10.1107/S2053273316020350.
4. **Soyama J., Zepon G., Lopes T.P., Beraldo L. [et.
al.].** Microstructure Formation and Abrasive Wear
Resistance of a Boron-Modified Superduplex Stain-
less Steel Produced by Spray Forming // *Journal of
Materials Research*. — 2016 (31), no. 19, 2987—
2993. doi.org/10.1557/jmr.2016.323

5. **Zong X., Jiang W., and Fan Z.** A Study of the Microstructures and Performance of Chromium Boride Coatings on AISI 52100 Steel // *Materials and Technology*. — 2018 (52), no. 2, 225—229. DOI:10.17222/mit.2017.151
6. **Kumar K.Phanendra, Mohant Aveck, Lingappa M. Shashank, Srinath M.S., and Panigraha S.K.** Enhancement of Surface Properties of Austenitic Stainless Steel by Nickel Based Alloy Cladding Developed Using Microwave Energy Technique // *Materials Chemistry and Physics*. — 2020 (256), 123657. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123657
7. **Krylova T.A., Ivanov K.V., Chumakov Y.A., and Trotsenko R.V.** Corrosion and Wear Resistance of Coatings Produced by Nonvacuum Electron Beam Cladding of Refractory Carbides on Low-Carbon Steel // *Inorganic Materials*. — 2020 (56), no. 3, 328—332. DOI: 10.1134/S0020168520030097
8. **Poletika I.M., Tetyutskaya M.V., and Makarov S.A.** Formation of Bifunctional Coatings with Superdispersed Structure by the Method of Electron-Beam Surfacing in Free Air // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2015 (6), no. 3, 249—254. DOI: 10.1134/S2075113315030089
9. **Matts O.E., Lazurenko D.V., Bataev V.A., Rashkovets M.V., Emurlaev K.I., Tarasov S.Y., Filipov A.V., Domenichini B., and Chakin I.K.** Tribo-Oxidation of Ti-Al-Fe AND Ti-Al-Mn Cladding Layers Obtained by Non-Vacuum Electron Beam Treatment // *Surface and Coatings Technology*. — 2021 (421), 127442. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127442
10. **Ruktuev A.A., Lazurenko D.V., Bataev V.A., Ivanov I.V., Thömmes A., Bataev I.A., and Golkovski M.G.** Ti-Ta-NB Clads Produced by Electron Beam Surface Alloying in Regular Air at Atmospheric Pressure: Fabrication, Structure, and Properties // *Materials Characterization*. — 2021 (179), 111375. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111375
11. **Bataev I.A., Kurlaev N.V., Lenivceva O.G., Buty`lenkova O.A., Losinskaya A.A.** Morfologiya boridov zheleza v poverxnostnom sloe, naplavlennom e`lektronny`m luchom // *Obrabotka metallov (texnologiya, oborudovanie, instrumenty`)*. — 2012, № 1(54), 85—89 (in Russian)
12. **Arteaga-Hernandez L.A., Cuao-Moreu C.A., Gonzalez-Rivera C.E., Alvarez-Vera M., Ortega-Saenz J.A., and Hernandez-Rodriguez M.A.L.** Study of Boriding Surface Treatment in the Tribological Behavior of an AISI 316L Stainless Steel // *Wear*. — 2021 (477), — 203825. DOI:10.1016/j.wear.2021.203825
13. **Ustanovka i sposob ispy`taniya materialov i pokry`tij na gidroabrazivny`j iznos: Patent № 2509295 Rossijskaya Federaciya, MPK6 G1N3/56. № 2012108987/22 : opubl. 10.03.2014 / B.E. Grinberg, A.A. Shtercer (in Russian)**
14. **Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol`nikov M.G.** Abrazivnoe iznashivanie. — Moskva: Mashinostroenie. — 1990 (in Russian)
15. **Garkunov D.N.** Tribotexnika (iznos i bezy`zmosnost`): uchebnik. — Moskva: Izd-vo MSXA. — 2001 (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