

Научная статья

УДК 691.735: 669.017.15: 620.183

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29408>



*В.В. Нгуен* ✉, *А.Е. Балановский*, *Н.А. Астафьева*

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия

✉ [nguyenvanh190596@gmail.com](mailto:nguyenvanh190596@gmail.com)

## **СТРУКТУРА И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ БОРИДНЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ**


*Аннотация.* Большинство отказов деталей машин происходят из-за процессов деградации, таких как усталость, коррозия и износ, происходящих на поверхности материалов. В настоящее время существуют различные методы процесса модификации поверхностного слоя. Для модификации используются концентрированные источники нагрева, технологические лазеры, плазменные и электронно-лучевые установки. В работе проведено плазменное легирование поверхности низкоуглеродистой стали. Установлено, что борированные слои на стали 20 можно получить методом плазменного легирования. Увеличение содержания бора в зоне плавления позволяет перейти от доэвтектической микроструктуры к заэвтектической, состоящей из первичных боридов Fe<sub>2</sub>B и небольшого количества эвтектики феррит – Fe<sub>2</sub>B. Наибольший уровень микротвердости характерен для боридного легированного слоя, полученного при легировании с использованием порошковой смеси 40% В + 10% Fe, и составляет 1000...1300 HV. По сравнению с образцами, полученными по технологии цементации, зафиксировано примерно трехкратное повышение стойкости сплава.

*Ключевые слова:* поверхностное легирование, легированные покрытия, боридные слои, износостойкость.

*Для цитирования:*

Нгуен В.В., Балановский А.Е., Астафьева Н.А. Структура и износостойкость боридных слоев, полученных методом поверхностного плазменного легирования // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 120–131. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29408>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29408>V.V. Nguyen , A.E. Balanovsky, N.A. AstafievaIrkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia [nguyenvanh190596@gmail.com](mailto:nguyenvanh190596@gmail.com)

## STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF BORIDE LAYERS OBTAINED BY SURFACE PLASMA ALLOYING METHOD

*Abstract.* Most failures of machine parts occur due to degradation processes such as fatigue, corrosion and wear occurring on the surface of the materials. Currently, there are various methods to modify the surface layer. For modification, concentrated heating sources, technological lasers, plasma and electron beam installations are used. In this work, plasma alloying of the surface of low-carbon steel was carried out. It has been established that borated layers on steel 20 can be obtained by plasma alloying. An increase in boron content in the melting zone makes it possible to move from a hypoeutectic microstructure to a hypereutectic one, consisting of primary Fe<sub>2</sub>B borides and a small amount of eutectic ferrite-Fe<sub>2</sub>B. The highest level of microhardness is characteristic of the boride alloyed layer obtained by alloying using a powder mixture of 40% B + 10% Fe, and amounts to 1000...1300 HV. Compared to samples obtained using carburizing technology, we recorded an approximately threefold increase in the resistance of the alloy.

*Keywords:* surface alloying, alloyed coatings, boride layers, wear resistance.

*Citation:*

V.V. Nguyen, A.E. Balanovsky, N.A. Astafieva, Structure and wear resistance of boride layers obtained by surface plasma alloying method, *Global Energy*, 29 (04) (2023) 120–131, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29408>

**Введение.** Большинство отказов деталей машин происходят из-за процессов деградации, таких как усталость, коррозия и износ, происходящих на поверхности материалов [1–3]. Поэтому разработка материалов с оптимальными свойствами поверхности для применения в сельском хозяйстве, горнодобывающей, нефтяной и нефтехимической промышленности является важной задачей. Среди коммерчески доступных сплавов стали очень привлекательны для таких применений, благодаря их свойствам и низкой стоимости [4, 5]. Однако обычные низколегированные стали не отвечают требованиям работы в некоторых агрессивных средах, где необходима высокая поверхностная износостойкость.

Бор является распространенным легирующим элементом в сплавах на основе железа [6, 7]. Благодаря ограниченной растворимости в  $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Fe [8] боридные фазы с высокой твердостью будут выделяться в матрице при высоком содержании бора, тем самым улучшая твердость и износостойкость сплавов на основе Fe. Борирование – один из наиболее распространенных методов термохимической обработки после цементации и азотирования. Эта технология широко изучается в последние десятилетия. Обладая высокой твердостью, бориды железа (Fe<sub>2</sub>B и FeB) позволяют значительно повысить износостойкость в условиях трения скольжения, повысить стойкость к истиранию, снизить коэффициенты трения и повышают коррозионную стойкость при комнатных и повышенных температурах [9–11]. Среди многочисленных существующих методов насыщения поверхностных слоев бором наиболее изученными являются борирование в порошкообразных смесях, борирование из расплавов боросодержащих солей и борирование из газовой фазы [12–15]. Необходимый для этих технологий температурный диапазон составляет 700–1000 °C в течение 1–12 ч [16], что не позволяет сохранить исходную структуру подложки. Еще одним недостатком

вышеупомянутых технологий является небольшая глубина слоя борида железа, которая обычно не превышает 200 мкм. Однако существует ряд практических случаев, например, в горнодобывающей и нефтегазовой промышленности, когда допустимый износ компонентов может превышать сотни микрон. Замена изношенного оборудования приводит к остановке производства и большим экономическим потерям [17].

В настоящее время существуют различные способы модификации поверхностного слоя материала с использованием высококонцентрированных источников нагрева, например, плазмы, лазера и электронного луча [18–21], с их помощью можно повысить глубину легированного слоя покрытия. Кроме того, благодаря высокой скорости нагрева и охлаждения при обработке длительность процесса модификации поверхностного слоя значительно сокращается.

*Целью данной работы* является получение боридных легированных покрытий на стали 20 методом поверхностного плазменного легирования. В работе представлены микроструктура, микротвердость, химический и фазовый состав легированных слоев после борирования и результаты испытания на трение в абразивном условии и на адгезию с подложкой.

### **Материалы и методы исследования**

В качестве материала подложки использовалась сталь 20 с твердостью 180 HV. Были вырезаны образцы в виде пластины 75x15x10 мм и поверхности образцов очищены от ржавчины и грязи с помощью шлифования наждачной бумагой до зернистости 1200. Изготовление суспензии было проведено путем смешивания легирующего порошка аморфного бора со связующим веществом клеем БФ-6. Готовая суспензия была нанесена на поверхности образцов кисточкой, затем просушена при температуре 60°C в течение 30 минут. Процесс плазменного легирования схематически представлен на рис. 1. Состав обмазки и режимы обработки показаны в табл. 1. После плазменного легирования были проведены металлографические исследования с помощью оптического и электронного микроскопа, рентгеноструктурного анализа и определения микротвердости.

Таблица 1

**Режим процесса плазменного легирования**

Table 1

**Plasma alloying process mode**

<b>№ образцов</b>	<b>Состав обмазки, % вес.</b>	<b>Ток, А</b>	<b>Напряжение, В</b>	<b>Скорость обработки, мм/с</b>	<b>Расход газа, л/мин.</b>
1	10% В + 40% Fe + 50% БФ-2	120	24	4	10
2	25% В + 25% Fe + 50% БФ-2				
3	40% В + 10% Fe + 50% БФ-2				

Испытание на износ проведено по схеме на рис. 2. В процессе испытания образцы полностью прижимается с нагрузкой 20 Н к абразивной шкурке с зернистостью 220, закрепленной на вращающемся диске со скоростью 200 об/мин. В качестве эталонного образца был использован образец из цементированной стали, износостойкость которой равна единице. До испытания поверхности образцов были отшлифованы до шероховатости  $Ra \leq 1,25$  мкм. После каждого испытания взвешивание было проведено с помощью аналитических весов с точностью до 0,001 мг. Скорость изнашивания материалов была определена по потерянной массе через определенное время. Испытывали не менее 3 образцов по каждому покрытию материалов. После этого вычисляли относительную износостойкость по формуле:

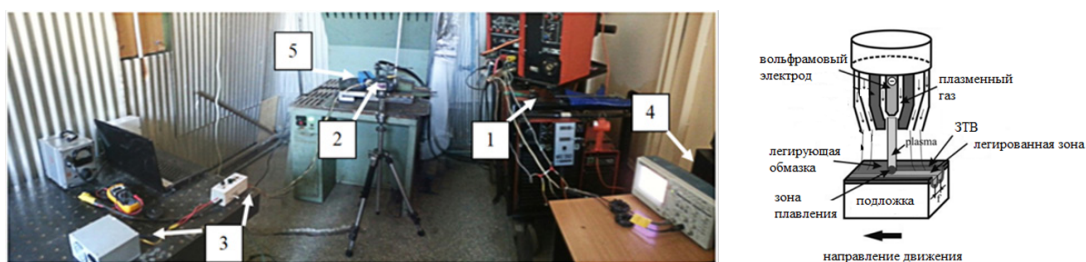


Рис. 1. Процесс плазменного легирования: 1 – источник; 2 – фотокамера; 3 – блок управления; 4 – осциллограф; 5 – скоростная камера

Fig. 1. Plasma alloying process: 1 – source; 2 – camera; 3 – control unit; 4 – oscilloscope; 5 – speed camera

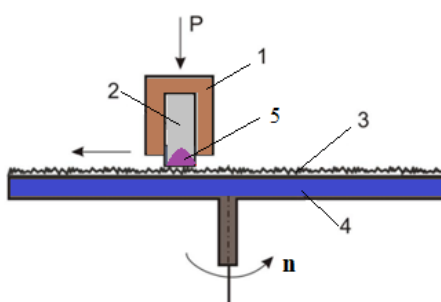


Рис. 2. Схема испытания на износ в абразивном условии: 1 – держатель; 2 – образец; 3 – абразивная шкурка; 4 – стальной диск; 5 – легированный слой

Fig. 2. Scheme of wear test in abrasive condition: 1 – holder; 2 – sample; 3 – abrasive sandpaper; 4 – steel disk; 5 – alloyed layer

$$\varepsilon = \frac{\Delta m_m}{\Delta m_m} \times \frac{\rho_m}{\rho_m},$$

где  $\rho_{и}$ ,  $\rho_{э}$  – плотность исследуемого материала и эталона;  $\Delta m_{э}$ ,  $\Delta m_{и}$  – потери массы эталона и исследуемого образца.

Испытание на адгезию по Роквеллу-С приводит к повреждению слоя, примыкающего к границе вмятины [22]. Тип и объем зоны разрушения покрытия показывают адгезию слоя и его хрупкость. Индентор вызывает экстремальные напряжения сдвига на границе раздела фаз. Покрытия с хорошей адгезией способны выдерживать напряжения сдвига и предотвращают длительное отслоение по окружности от вмятины. Более того, обширное отслоение вблизи вмятины указывает на плохую межфазную адгезию. После индентирования использовали оптический микроскоп для оценки теста. Повреждение покрытия сравнивали с определенным качеством адгезионной прочности, как показано на рис. 3. Виды HF1–HF4 определяют достаточную адгезию, тогда как HF5 и HF6 представляют недостаточную адгезию.

### Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктура боридного легированного слоя образца 1 является дендритной и состоит из небольшого количества первичного феррита и междендритной эвтектической составляющей.

Эту микроструктуру можно увидеть на оптической микрофотографии рис. 4а и при большем увеличении на микрофотографии СЭМ рис. 4б. Структура соответствует доэвтектическому составу. Исходя из диаграммы железо-бор, эвтектика феррит –  $Fe_2B$  возникает при 3,8% бора.

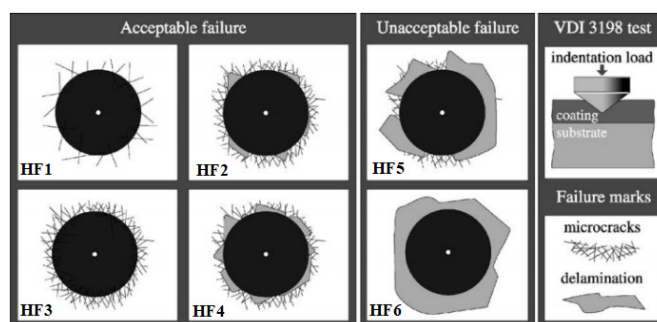


Рис. 3. Контроль качества адгезии боридного слоя

Fig. 3. Quality control of boride layer adhesion

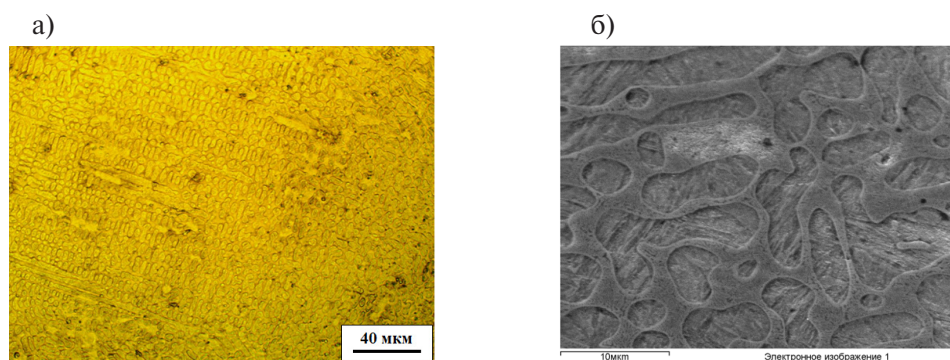


Рис. 4. Образец 1: а – оптическая микрофотография борированной поверхности, показывающая доэвтектические дендриты феррита, окруженные боридной эвтектикой; б – СЭМ-микрофотография той же микроструктуры

Fig. 4. Sample 1: а – optical micrograph of a borated surface showing hypo-eutectic ferrite dendrites surrounded by boride eutectic material; б – SEM micrograph of the same microstructure

Борированный слой образцов 2 имеет первичные бориды с различной морфологией в эвтектической матрице и соответствует заэвтектическому составу. На рис. 5а представлена микроструктура расплавленной зоны. Можно увидеть первичные бориды различной ориентации. Эвтектика между ними состоит из феррита и  $Fe_2B$ , как показано на рис. 5б. Микроструктура борированного слоя образца 3 состоит, как и в случае образца 2, из первичных боридов и эвтектики между ними, но эвтектики теперь меньше рис. 6а.

Все отложения заэвтектического состава (образцы 2 и 3) представляют собой переходную зону к стальной подложке, показанную на рис. 7а. Эта зона имеет эвтектическую микроструктуру, как видно на рис. 7б, г и имеет толщину 40 – 60 мкм, незначительно увеличивающуюся со снижением содержания бора в образцах. Как и ожидалось, в легированном слое образца 1, имеющем доэвтектический состав, эвтектическая переходная зона отсутствует. Микрофотография на рис. 7 также показывает превосходное сцепление борированных слоев с подложкой.

Рентгенограммы легированных слоев материалов после обработки представлены на рис. 8. Результаты показали, что в боридном легированном слое поверхностей образцов 2 и 3 присутствуют первичные бориды железа  $Fe_2B$  и небольшое количество  $FeB$ , которые располагаются в эвтектической боридной матрице  $\alpha-Fe$  и  $Fe_2B$ . На поверхности образца 1 после плазменного легирования не были зафиксированы первичные бориды (рис. 4), а рефлекс  $Fe_2B$  на рентгенограмме свидетельствует о том, что  $Fe_2B$  находится в боридной эвтектике. Следует также обратить вни-

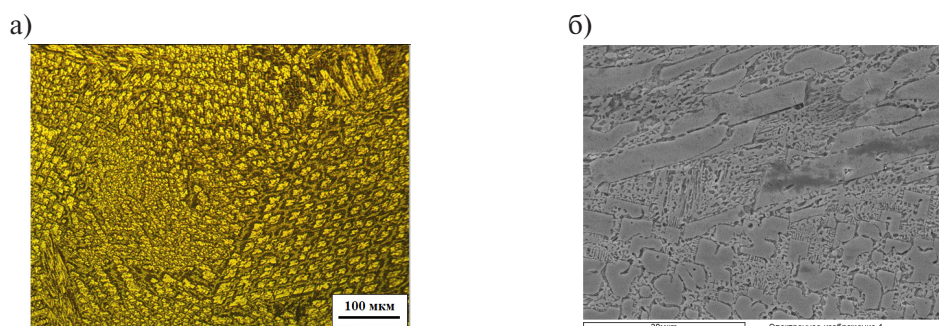


Рис. 5. Образец 2: а – оптическая микрофотография борированной поверхности, показывающая первичные бориды различной ориентации в эвтектической матрице; б – микрофотография СЭМ, показывающая мелкую эвтектическую составляющую

Fig. 5. Sample 2: a – optical micrograph of a borated surface showing primary borides of various orientations in the eutectic matrix; b – SEM micrograph showing the fine eutectic component

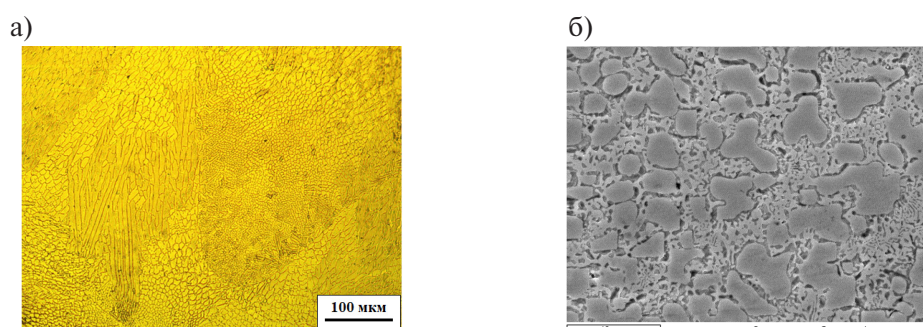


Рис. 6. Образец 3: а – преимущественно первичные бориды  $Fe_2B$  и между ними эвтектические области; б – микрофотография СЭМ

Fig. 6. Sample 3: a – predominantly primary  $Fe_2B$  borides and eutectic regions between them; b – SEM micrograph

мание на то, что в плазменных обработках получились только равновесные бориды  $Fe_2B$  и  $FeB$ , а метастабильная фаза  $Fe_3B$  отсутствует, в отличие от других исследований, например [23, 24], где использовалось лазерное оплавление малой мощности.

Отмечено, что наличие метастабильных фаз (таких как  $Fe_3B$ ) следует отнести к неравновесным условиям, связанным с чрезвычайно высокими скоростями охлаждения, преобладающими при лазерной обработке поверхности. Напротив, при плазменной обработке объем ванны больше, а скорость охлаждения медленнее, что позволяет получить стабильные фазы  $Fe_2B$  и  $FeB$  и лучше контролировать микроструктуру затвердевших слоев.

На рис. 9 представлено распределение микротвердости легированных слоев после борирования. Экспериментально установлено, что наибольший уровень микротвердости характерен для боридного легированного слоя, полученного при легировании с использованием порошковой смеси 40% В + 10% Fe, и составляет 1000...1300 HV. Значения микротвердости легированного слоя образца (25 % Fe и 25 % В) и образца 3 (40 % Fe и 10 % В) составляют 800...1050 HV и 550...650 HV. Видно, что снижение содержания бора приводит к уменьшению микротвердости легированного слоя. Степень упрочнения определяется объемной долей высокопрочной фазы, которой являются частицы бориды железа.

На рис. 10 представлены результаты испытаний на износ при трении в абразивном условии покрытий, полученных по технологии плазменного легирования бором. В качестве эталонного

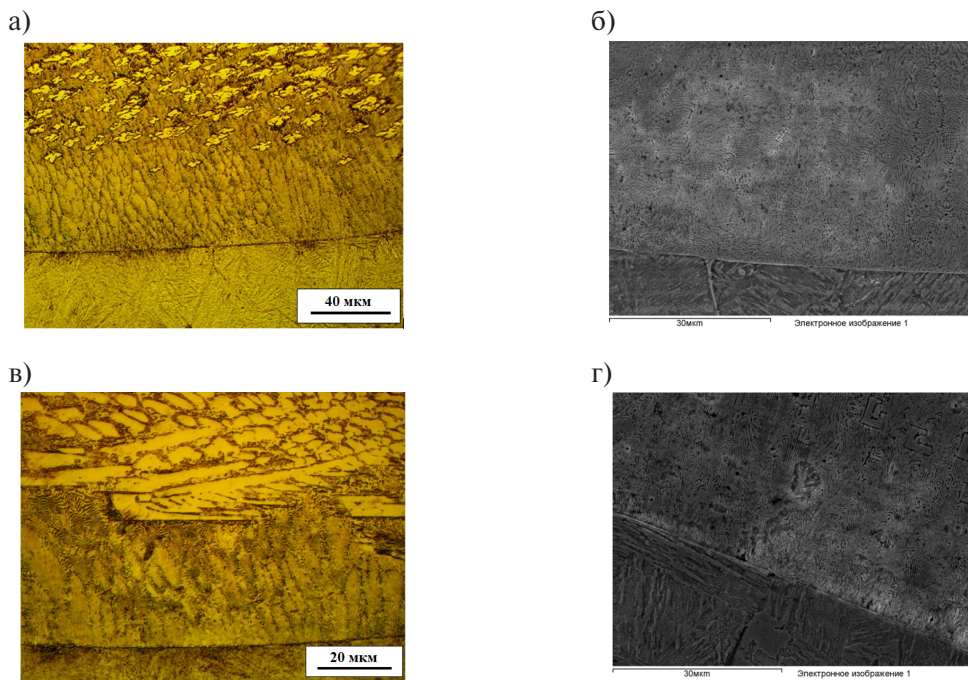


Рис. 7. Переходная зона: а, б – образец 2; в, г – образец 3  
 Fig. 7. Transition zone: a, b – sample 2; c, d – sample 3

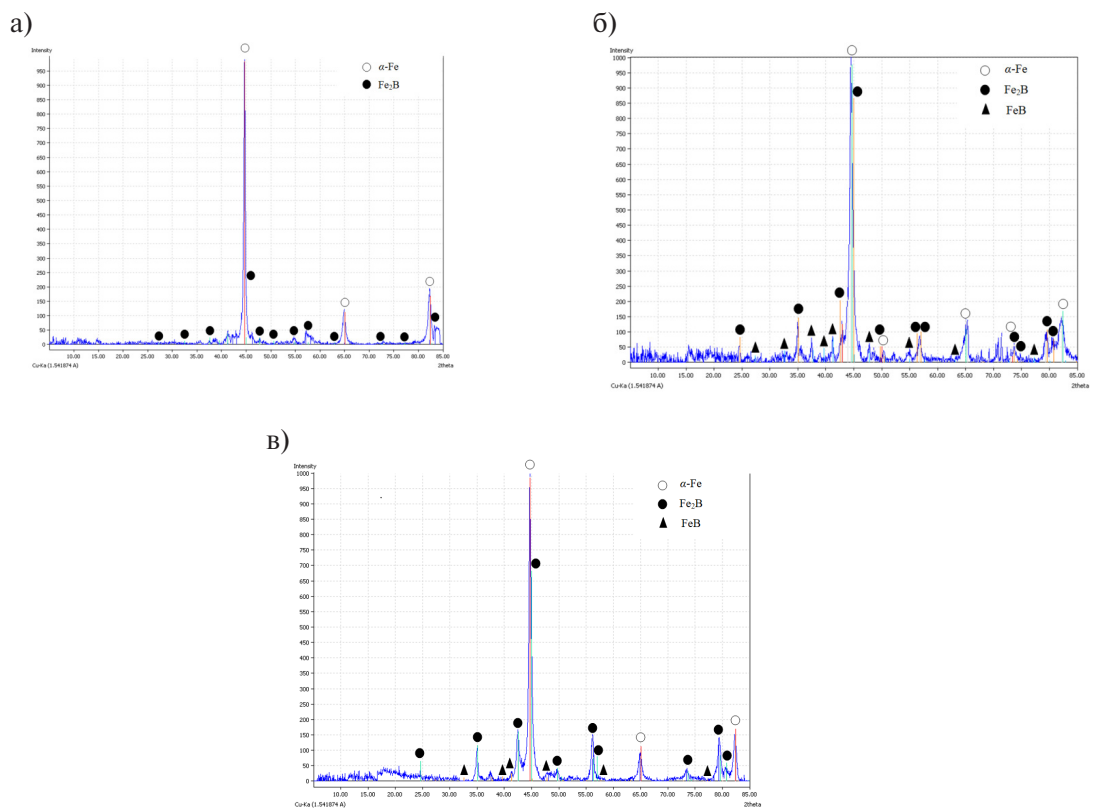


Рис. 8. Рентгенограмма борированных поверхностей: а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3  
 Fig. 8. X-ray diffraction pattern of borated surfaces: a – sample 1; b – sample 2; c – sample 3

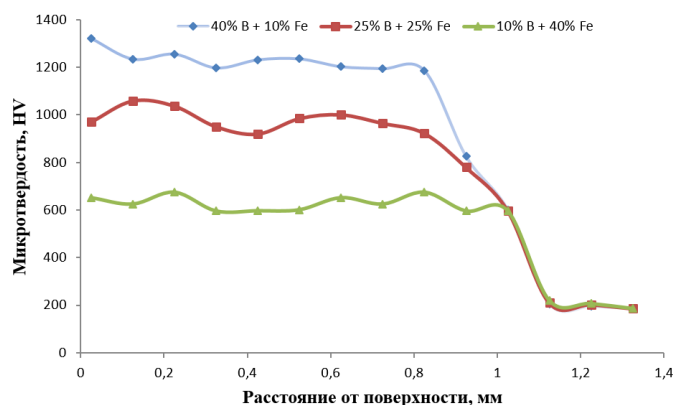


Рис. 9. Распределение микротвердости по глубине легированных слоев

Fig. 9. Distribution of microhardness along the depth of alloyed layers

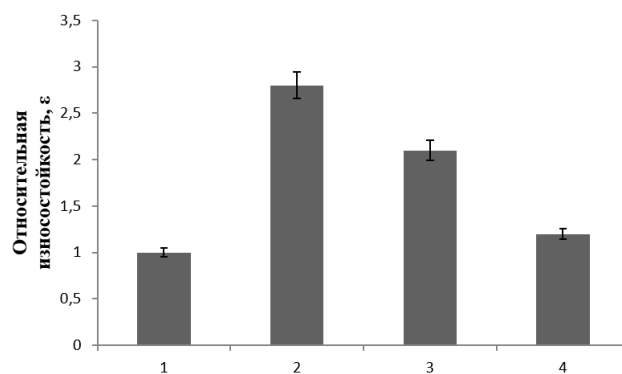


Рис. 10. Относительная износостойкость боридных покрытий после плазменного легирования:

1 – эталон; 2 – 40% В + 10% Fe; 3 – 25% В + 25% Fe; 4 – 10% В + 40% Fe

Fig. 10. Relative wear resistance of boride coatings after plasma alloying: 1 – standard sample;

2 – 40% В + 10% Fe; 3 – 25% В + 25% Fe; 4 – 10% В + 40% Fe

образца применен образец из стали 20, подвергнутой цементации. Износостойкость эталона была принята за единицу. Видно, что легированный боридный слой покрытия 40% В + 10% Fe обладает лучшей износостойкостью после испытания на износ в абразивном условии. По сравнению с цементированным образцом покрытие из 40% В + 10% Fe наблюдали примерно повышение стойкости сплава к износу в 3 раза. Высокопрочные частицы боридов железа в виде каркасов располагались в легированном слое, и не позволяют удалить материал в результате воздействия абразивных частиц на шкурке. Установлено, что значение микротвердости легированного слоя тесно взаимосвязано с уровнем стойкости в условиях абразивного изнашивания. После плазменного легирования стали 25% В + 25% Fe было получено покрытие с износостойкостью в 2 раза выше по сравнению эталоном.

Отмечено, что содержание бора в легированном слое значительно влияет на скорость изнашивания материалов. В слое покрытия после плазменного легирования 10% В + 40% Fe не были зафиксированы первичные бориды железа, которые обладают высокой микротвердостью. Кроме того, эвтектика недостаточно для сопротивления процесса изнашивания под действия абразивных частиц. Поэтому износостойкость покрытия из 10% В + 40% Fe близки к эталону.



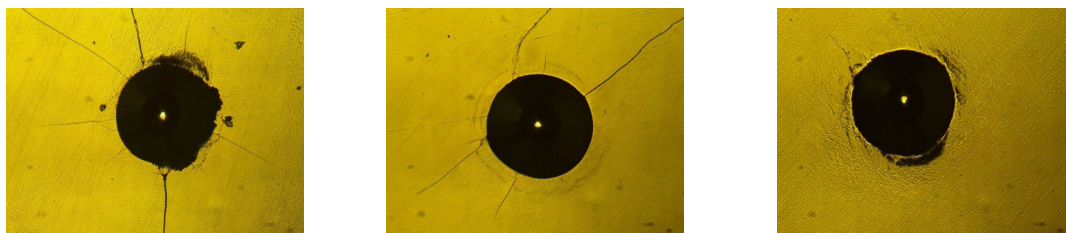


Рис. 11. Испытание на адгезию покрытий после борирования  
 Fig. 11. Test for adhesion of coatings after boriding

Испытание на адгезию по Роквеллу-С приводит к повреждению слоя, примыкающего к границе вмятины. Тип и объем зоны разрушения покрытия показывают адгезию слоя и его хрупкость. На рис. 11 представлены результаты испытания на адгезию по Роквеллу-С. По сравнению с контрольным качеством (рис. 3) покрытия после борирования обладают качеством HF1. Отмечено, что покрытия с хорошей адгезией способны выдерживать эти напряжения сдвига, и предотвращают длительное отслоение по окружности от вмятины.

#### Заключение

Борированные слои на стали 20 можно получить методом плазменного легирования. Увеличение содержания бора в зоне плавления позволяет перейти от доэвтектической микроструктуры к заэвтектической, состоящей из первичных боридов  $Fe_2B$  и небольшого количества эвтектики феррит- $Fe_2B$ . Полностью исключить эвтектическую составляющую для получения чистого  $Fe_2B$  не удалось, поскольку дальнейшее добавление бора приводит к локальному образованию  $FeB$ . Микротвердость борированного слоя зависит от содержания бора. Наибольший уровень микротвердости характерен для боридного легированного слоя, полученного при легировании с использованием порошковой смеси 40% B + 10% Fe, и составляет 1000...1300 HV. Легированный боридный слой покрытия 40% B + 10% Fe обладает лучшей износостойкостью после испытания на износ в абразивном условии, по сравнению с цементированным образцом покрытие из 40% B + 10% Fe наблюдается повышение стойкости сплава к износу в 3 раза.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Anil K.D.** Recent developments in TIG torch assisted coating on austenitic stainless steel: A critical review, *Materials Today: Proceedings*, 57 (2022) 1846–1851.
- [2] **David D.S. Silva, Alexandre R.C. Nascimento, Guilherme Y. Koga, Guilherme Zepon, Claudio S. Kiminami, Walter J. Botta, Claudemiro Bolfarini.** Alloy design for microstructural-tailored boron-modified ferritic stainless steel to ensure corrosion and wear resistance, *Journal of Materials Research and Technology*, 24 (2023) 418–429.
- [3] **Yusuf K., Afra K.** Effect of diffusion annealing on wear and cohesion behaviours of boronized AISI 1040 steel, *Tribology International*, 184 (2023) 108428.
- [4] **Salloom R., Joshi S.S., Dahotre N.B., Srinivasan S.G.** Laser surface engineering of B4C/Fe nano composite coating on low carbon steel: Experimental coupled with computational approach, *Materials & Design*, 190 (2020) 108576.
- [5] **Altaf Hussain G. Momin, Bharatlal C. Khatri, Mrunalkumar Chaudhari, Shah U.V., Janak V.** Parameters for cladding using plasma transfer arc welding – A critical, *Materials Today: Proceedings*, 77 (2023) 614–618.
- [6] **Wu Y., Lu Y., Duan Y., Zhou X., Peng M., Wang X., Zheng S.** Microstructure and wear properties of powder-pack borided Ti–5Al–2.5Sn alloy, *Journal of Materials Research and Technology*, 2023 (23) 4032–4043.

[7] **Ying W., Xiaolong Z., Xinyu W., Yaoping L., Mingjun P., Yonghua D.** Microstructure and some properties of powder-pack borided Ti–5Mo–5V–8Cr–3Al alloy with special attention to the microstructure at the interface TiB/substrate, *Ceramics International* 2022 (48) 24346–24354.

[8] **Makuch N.** Influence of nickel silicides presence on hardness, elastic modulus and fracture toughness of gas-borided layer produced on Nisil-alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2021 (31) 764–778.

[9] **Huan Y., Zongan L., Yuhao W., Yingying F., Guangming X., Misra R.D.K.** Influence of Ni content on the microstructure and reciprocating wear of Fe-based/B<sub>4</sub>C composite coating by vacuum cladding, *Surface and Coatings Technology*, 423 (2021) 127604.

[10] **Rajeev R., Anil K.D.** Protection from corrosion and wear by different weld cladding techniques: A review, *Materials Today: Proceedings*, 57 (2022) 1687–1693.

[11] **Vattikuti M.G., Arulvel S.** A review on the steels, alloys/high entropy alloys, composites and coatings used in high temperature wear applications, *Materials Today: Proceedings*, 43 (2021) 817–823.

[12] **Kul M., Danacı I., Gezer Ş., Karaca B.** Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel, *Materials Letters*, 279 (2020) 128510.

[13] **Nguyen V.V., Nguyen V.T., Balanovskiy A.E., Anatolievna A.N.** Structure and Properties of Boride Coatings Obtained by the Plasma-Arc Method, *Tribology in Industry*, 45 (2023) 387–395.

[14] Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки борсодержащей обмазки / А.Е. Балановский, В.В. Нгуен, Н.А. Астафьева, Р.Ю. Гусев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 93–103.

[15] **Morón R.C., Melo-Máximo L., Campos-Silva I., Melo-Máximo D.V., Arzate-Vázquez I., López-Perusquia N., Solis-Romero J.** Dry and grease-lubricated reciprocating wear resistance of borided AISI 52100 steel, *Materials Letters*, 320 (2022) 132404.

[16] **Kulka M., Pertek A.** Laser surface modification of carburized and borocarbided 15CrNi6 steel. *Materials Characterization* 2007 (58) 461–470.

[17] **Mehtap Arslan, Alaaddin Cem Ok, Guldem Kartal Sireli, Servet Timur.** Investigation on structural and tribological properties of borided gear steel after phase homogenization, *Surface and Coatings Technology*, 429 (2022) 127967.

[18] **Novakova A.A., Sizov I.G., Golubok D.S., Kiseleva T.Yu., Revokatov P.O.** Electron-beam boriding of low-carbon steel. *Journal of Alloys and Compounds* 2004 (383) 108–112.

[19] **Eroglu M.** Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness. *Surface and Coatings Technology* 2009 (203) 2229–2235.

[20] **Bourithis L., Papaefthymiou S., Papadimitriou G.D.** Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties. *Applied Surface Science* 2002 (200) 203–218.

[21] **Bushueva E., Ryabinkina P., Gorovenko P.** Boron-doped coatings on stainless steel formed by the electron beam processing. *Materials Today: Proceedings* 2019 (12) 155–158.

[22] **Arslan D., Uzun R.O.** Adhesive Behavior of the Pack-Borided AISI 304L Steel with Microwave Hybrid Heating, *Celal Bayar University Journal of Science*, 2021 (17) 181–191.

[23] **Fernández-Valdés D., Vázquez-De la Rosa O., Rodríguez-Castro G.A., Meneses-Amador A., López-Liévano A., Ocampo-Ramírez A.** A numerical-experimental study of AISI 316L borided steels under cyclic contact loading, *Surface and Coatings Technology*, 423 (2021) 127556.

[24] **Arun Kumar Rai, Paul C.P., Mishra G.K., Rashmi Singh, Rai S.K., Bindra K.S.** Study of microstructure and wear properties of laser borided Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, 298 (2021) 117298.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НГУЕН Ван Винь** — аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, без степени.

E-mail: nguyenvanvinh190596@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6514-9015>

**БАЛАНОВСКИЙ Андрей Евгеньевич** — заведующий кафедрой материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет, канд. техн. наук.

E-mail: fuco.64@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6466-6587>

**АСТАФЬЕВА Наталья Анатольевна** — преподаватель, Иркутский национальный исследовательский технический университет, канд. техн. наук.

E-mail: anstella@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4957-9597>

## REFERENCES

[1] **K.D. Anil**, Recent developments in TIG torch assisted coating on austenitic stainless steel: A critical review, *Materials Today: Proceedings*, 57 (2022) 1846–1851.

[2] **David D.S. Silva, Alexandre R.C. Nascimento, Guilherme Y. Koga, Guilherme Zepon, Claudio S. Kiminami, Walter J. Botta, Claudemiro Bolfarini**, Alloy design for microstructural-tailored boron-modified ferritic stainless steel to ensure corrosion and wear resistance, *Journal of Materials Research and Technology*, 24 (2023) 418–429.

[3] **K. Yusuf, K. Afra**, Effect of diffusion annealing on wear and cohesion behaviours of boronized AISI 1040 steel, *Tribology International*, 184 (2023) 108428.

[4] **R. Salloom, S.S. Joshi, N.B. Dahotre, S.G. Srinivasan**, Laser surface engineering of B4C/Fe nano composite coating on low carbon steel: Experimental coupled with computational approach, *Materials & Design*, 190 (2020) 108576.

[5] **Altaf Hussain G. Momin, Bharatlal C. Khatri, Mrunalkumar Chaudhari, U.V. Shah, V. Janak**, Parameters for cladding using plasma transfer arc welding – A critical, *Materials Today: Proceedings*, 77 (2023) 614–618.

[6] **Y. Wu, Y. Lu, Y. Duan, X. Zhou, M. Peng, X. Wang, S. Zheng**, Microstructure and wear properties of powder-pack borided Ti–5Al–2.5Sn alloy, *Journal of Materials Research and Technology*, 2023 (23) 4032–4043.

[7] **W. Ying, Z. Xiaolong, W. Xinyu, L. Yaoping, P. Mingjun, D. Yonghua**, Microstructure and some properties of powder-pack borided Ti–5Mo–5V–8Cr–3Al alloy with special attention to the microstructure at the interface TiB/substrate, *Ceramics International* 2022 (48) 24346–24354.

[8] **N. Makuch**, Influence of nickel silicides presence on hardness, elastic modulus and fracture toughness of gas-borided layer produced on Nisil-alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2021 (31) 764–778.

[9] **Y. Huan, L. Zongan, W. Yuhao, F. Yingying, X. Guangming, R.D.K. Misra**, Influence of Ni content on the microstructure and reciprocating wear of Fe-based/B4C composite coating by vacuum cladding, *Surface and Coatings Technology*, 423 (2021) 127604.

[10] **R. Rajeev, K.D. Anil**, Protection from corrosion and wear by different weld cladding techniques: A review, *Materials Today: Proceedings*, 57 (2022) 1687–1693.

[11] **M.G. Vattikuti, S. Arulvel**, A review on the steels, alloys/high entropy alloys, composites and coatings used in high temperature wear applications, *Materials Today: Proceedings*, 43 (2021) 817–823.

- [12] **M. Kul, I. Danacı, Ş. Gezer, B. Karaca**, Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel, *Materials Letters*, 279 (2020) 128510.
- [13] **V.V. Nguyen, V.T. Nguyen, A.E. Balanovskiy, A.N. Anatolievna**, Structure and Properties of Boride Coatings Obtained by the Plasma-Arc Method, *Tribology in Industry*, 45 (2023) 387–395.
- [14] Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки бороводержащей обмазки / A.Ye. Balanovskiy, V.V. Nguyen, N.A. Astafyeva, R.Yu. Gusev // *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 93–103.
- [15] **R.C. Morón, L. Melo-Máximo, I. Campos-Silva, D.V. Melo-Máximo, I. Arzate-Vázquez, N. López-Perrusquia, J. Solis-Romero**, Dry and grease-lubricated reciprocating wear resistance of borided AISI 52100 steel, *Materials Letters*, 320 (2022) 132404.
- [16] **M. Kulka, A. Pertek**, Laser surface modification of carburized and borocarbided 15CrNi6 steel. *Materials Characterization* 2007 (58) 461–470.
- [17] **Mehtap Arslan, Alaaddin Cem Ok, Guldem Kartal Sireli, Servet Timur**, Investigation on structural and tribological properties of borided gear steel after phase homogenization, *Surface and Coatings Technology*, 429 (2022) 127967.
- [18] **A.A. Novakova, I.G. Sizov, D.S. Golubok, T.Yu. Kiseleva, P.O. Revokatov**, Electron-beam boriding of low-carbon steel. *Journal of Alloys and Compounds* 2004 (383) 108–112.
- [19] **M. Eroglu**, Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness. *Surface and Coatings Technology* 2009 (203) 2229–2235.
- [20] **L. Bourithis, S. Papaefthymiou, G.D. Papadimitriou**, Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties. *Applied Surface Science* 2002 (200) 203–218.
- [21] **E. Bushueva, P. Ryabinkina, P. Gorovenko**, Boron-doped coatings on stainless steel formed by the electron beam processing. *Materials Today: Proceedings* 2019 (12) 155–158.
- [22] **D. Arslan, R.O. Uzun**, Adhesive Behavior of the Pack-Borided AISI 304L Steel with Microwave Hybrid Heating, *Celal Bayar University Journal of Science*, 2021 (17) 181–191.
- [23] **D. Fernández-Valdés, O. Vásquez-De la Rosa, G.A. Rodríguez-Castro, A. Meneses-Amador, A. López-Liévano, A. Ocampo-Ramírez**, A numerical-experimental study of AISI 316L borided steels under cyclic contact loading, *Surface and Coatings Technology*, 423 (2021) 127556.
- [24] **Arun Kumar Rai, C.P. Paul, G.K. Mishra, Rashmi Singh, S.K. Rai, K.S. Bindra**, Study of microstructure and wear properties of laser borided Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, 298 (2021) 117298.

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Van V. NGUYEN** – *Irkutsk National Research Technical University.*

E-mail: nguyenvanvinh190596@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6514-9015>

**Andrey E. BALANOVSKY** – *Irkutsk National Research Technical University.*

E-mail: fuco.64@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6466-6587>

**Natalia A. ASTAFIEVA** – *Irkutsk National Research Technical University.*

E-mail: anstella@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4957-9597>

Поступила: 26.10.2023; Одобрена: 26.11.2023; Принята: 27.11.2023.

Submitted: 26.10.2023; Approved: 26.11.2023; Accepted: 27.11.2023.