

Научная статья

УДК 691.735: 669.017.15: 620.183

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29406>



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

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

✉ nguyenvanh190596@gmail.com

МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛИ ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ

Аннотация. В настоящее время одним из эффективных способов повышения износостойкости элементов машин, применяемых в горнодобывающей промышленности, добыче полезных ископаемых, обрабатывающей промышленности, сельском хозяйстве, является плазменное легирование. В работе проведены исследования образцов после плазменного легирования бором с различными параметрами тока 120А, 140А и 160А на стали 20. Проведены исследования микроструктуры, измерение микротвердости, определение химического состава и анализ фазового состава легированных слоев. По результатам исследований отмечено, что возможно получить легированные боридные слои на стали методом плазменного легирования. Установлено, что в поверхности стали после легирования имеет различные зоны: заэвтектическая, эвтектическая и доэвтектическая. Легированный слой с током 120А обладает наибольшим значением микротвердости, составляющей 1265 НV. В легированном слое наблюдали выделение борцементита вокруг первичных боридов железа, ориентированных перпендикулярно плоскости шлифа. Кроме того, повышение силы тока плазменной дуги приводит к уменьшению доли первичных боридов в поверхностном слое после легирования, следовательно, приводит к снижению микротвердости.

Ключевые слова: плазменное легирование, карбид бора, микротвердость, боридные слои, борцементит.

Для цитирования:

Нгуен В.В., Балановский А.Е., Астафьева Н.А. Микроструктура и свойства стали после плазменного легирования бором // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 97–106. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29406>



V.V. Nguyen ✉, A.E. Balanovsky, N.A. Astafieva

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia

✉ nguyenvanh190596@gmail.com

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF STEEL AFTER PLASMA ALLOYING WITH BORON

Abstract. Currently, one of the effective ways to increase the wear resistance of machine elements used in the mining industry, mineral extraction, manufacturing industry, and agriculture is plasma alloying. The work studies samples after plasma alloying with boron with various current parameters of 120A, 140A and 160A on steel 20. Microstructure studies, microhardness measurements, determination of the chemical composition and analysis of the phase composition of the alloyed layers were carried out. Based on the research results, it was noted that it is possible to obtain alloyed boride layers on steel using the plasma alloying method. It has been established that the surface of steel after alloying has different zones: hypereutectic, eutectic and hypoeutectic. The alloyed layer with a current of 120A has the highest microhardness value of 1265 HV. In the alloyed layer, the precipitation of boron cementite was observed around primary iron borides oriented perpendicular to the plane of the section. In addition, an increase in the plasma arc current leads to a decrease in the proportion of primary borides in the surface layer after alloying, and thus, to a decrease in microhardness.

Keywords: plasma alloying, boron carbide, microhardness, boride layers, boron cementite.

Citation:

V.V. Nguyen, A.E. Balanovsky, N.A. Astafieva, Microstructure and properties of steel after plasma alloying with boron, *Global Energy*, 29 (04) (2023) 97–106, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29406>

Введение. Некоторые детали машин, применяемые в горнодобывающей отрасли при добыче полезных ископаемых: обрабатывающая промышленность, сельское хозяйство, а также ряде других отраслях – в процессе эксплуатации подвергаются экстремальному износу. Износ приводит к ухудшению состояния поверхности изделий и увеличению производственных затрат [1].

Поверхностное легирование – это метод модификации поверхности, который можно использовать для повышения твердости и износостойкости элементов машин за счет изменения химического состава поверхностного слоя металлов путем введения легирующих элементов (Cr, Ni, C, N, B и т.д.).

Бор является распространенным легирующим элементом в сплавах на основе Fe. Из-за его ограниченной растворимости в α -Fe и γ -Fe боридные фазы с высокой твердостью будут выделяться в матрице при высоком содержании бора, тем самым повышая твердость и износостойкость сплавов на основе Fe [2]. В настоящее время существуют различные способы поверхностного легирования, и для получения поверхностных слоев с благоприятными свойствами часто применяются методы использующие высококонцентрированные источники нагрева на основе лазерного излучения, электронного луча и плазмы [3–5]. Среди этих методов наиболее эффективным является плазменное легирование. При использовании плазменного легирования возможно получать легированные слои различных толщин при относительно невысокой длительности процесса [6–8]. Кроме того, после плазменного легирования боридные слои имеют мелкокристаллическую структуру и твердость, постепенно снижающуюся к подложке [9–11]. Необходимо отметить, что

основными преимуществами плазменного поверхностного легирования перед лазерным и электронно-лучевым являются точное управление столбом плазменной дуги, отказ от использования охлаждающих сред, простота автоматизации, экологичность процесса, а также низкая энергоемкость и материалоемкость. К недостаткам процесса плазменного легирования следует отнести возможность образования трещин или газовые поры, грубую и волнистую поверхность [12].

В работе [13] проведено испытание на износ покрытий железо-бор и железо-хром-бор, полученных методом плазменно-дугового легирования. Отмечено, что коэффициент трения борированной стали, зависит от приложенной нагрузки и изменяется от 0,2 до 0,8; а с порошком CrB_2 слабо, зависит от приложенной нагрузки и имеет значение менее 0,15. Авторы [14] также получили боридные покрытия методом плазменного легирования. Результаты показали, что увеличение содержания бора в зоне плавления позволяет перейти от доэвтектической микроструктуры к заэвтектической, состоящей из различных боридов железа FeB , Fe_2B и небольшого количества эвтектики феррит- Fe_2B . Кроме того, авторы отметили, что полностью исключить эвтектическую составляющую для получения чистого Fe_2B не удалось, так как дальнейшее добавление бора приводило к локальному образованию FeB и межкристаллитному растрескиванию. Испытания на износ различных боридных покрытий (TiC , $\text{M}_2\text{C}/\text{M}_6\text{C}$, Fe-B и Fe-Cr-B) проведено в работах [15, 16]. Показано, что покрытие Fe-B имеет наиболее высокую скорость изнашивания в основном из-за его хрупкости, связанной с присутствием боридов типа FeB . Переплав покрытия порошком TiB_2 [17, 18] привел к возникновению эвтектической смеси фаз $\alpha\text{-Fe}$ и TiB_2 с выделениями боридов TiB_2 и карбонитридов Ti(C,N) в легированной зоне низкоуглеродистой стали.

Целью работы является исследование борированных слоев покрытий, полученных на низкоуглеродистой, стали методом поверхностного плазменного легирования карбидом бора. В ходе изучения были проведены металлографические исследования, анализ фазового состава, измерение микротвердости легированных слоев и определение химического состава в локальных местах.

Методы и материалы исследований

В качестве основного материала для проведения поверхностного плазменного легирования использовалась сталь 20. Образцы для легирования были вырезаны в виде пластин размерами $75 \times 15 \times 15$ мм. Поверхности образцов отшлифовали от ржавчины и грязи наждачной бумагой. В качестве легирующего элемента использовался карбид бора. Подготовка суспензии выполнялась путем смешивания порошка карбида бора с клеем БФ-2 в соотношении 1:1. Затем подготовленная суспензия была нанесена на поверхность образцов. Для удаления влаги из обмазки образцы нагревали в сушильном шкафу при температуре 60°C в течение 2-х часов. Схема проведения плазменного легирования показана на рис. 1.

Режимы процесса поверхностного плазменного легирования карбидом бора приведены в табл. 1. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе MET-2. Для определения химического состава и особенности строения борированных слоев использовали двухлучевой сканирующий микроскоп JIB-4500. Анализ фазового состава материалов после плазменного легирования бором был проведен методом рентгеновской дифракции на Shimadzu XRD-7000 с применением $\text{Cu-K}\alpha$ излучения. Пошаговое сканирование на образце изменяется в диапазоне $5^\circ\text{--}85^\circ$ с шагом 5° с напряжением 40 кВ и током 40 мА. Измерение уровня микротвердости легированных слоев после обработки осуществлялось с помощью микротвердомера SHIMADZU HNV-2T с системой автоматического считывания размеров отпечатков.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 представлена микроструктура поверхностного слоя первого образца. В результате высокоэнергетического воздействия плазменной дуги в поверхностном легированном слое была сформирована явно выраженная гетерогенная микроструктура. Это объясняется тем, что интен-

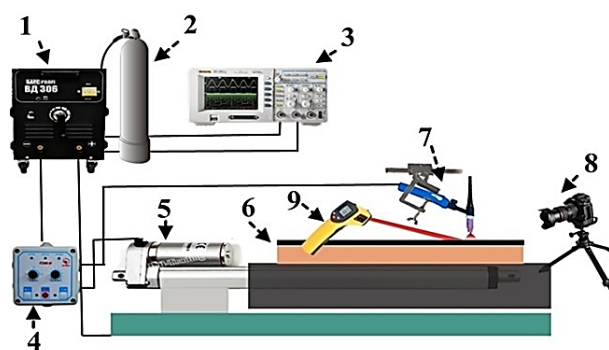


Рис. 1. Схема плазменной обработки: 1 – источник питания; 2 – баллон с аргонem; 3 – осциллограф; 4 – блок управления; 5 – электрический двигатель; 6 – образец с обмазкой, 7 – горелка; 8 – фотоаппарат, 9 – инфракрасный термометр

Fig. 1. Plasma processing scheme: 1 – power source; 2 – argon bottle; 3 – oscilloscope; 4 – control block; 5 – electric motor; 6 – sample with paste, 7 – torch; 8 – camera, 9 – infrared thermometer

сивное перемешивание легирующего материала с основным металлом при плазменном легировании происходило за счет конвекции и вихревых движений. Кроме того, разная скорость нагрева и охлаждения на поверхности и внутри стали также влияет на микроструктуру стали после легирования. Отмечено, что легированный слой характеризуется различными зонами. В первой зоне наблюдались первичные бориды железа с различной морфологией в эвтектической матрице (рис. 2 б и в). Эта зона обладает заэвтектическим строением. При перемещении к основному металлу в следующей зоне было зафиксировано наличие эвтектической матрицы. Рядом с основным материалом была зафиксирована область доэвтектического строения, в которой присутствуют первичные дендриты в эвтектической матрице. В основном металле наблюдалась зона термического влияния, представленная укрупнением зерен, причина которого связана с нагревом выше A_{c3} . Далее под ЗТВ исходная структура основного металла не изменялась после плазменного легирования, так как она не подвергалась влиянию высокой температуры. В легированном слое была зафиксирована трещина. Возможно это связано с высокой скоростью охлаждения после плазменного легирования и разницей остаточных напряжений при кристаллизации боридов железа.

Таблица 1

Параметры процесса плазменного легирования

Table 1

Plasma alloying process parameters

№ образца	Состав обмазки	Ток, А	Напряжение, В	Скорость обработки, мм/с	Расход газа, л/мин
1	40% В4С + 10% Fe	120	25	4	15
2		140			
3		160			

Во втором образце микроструктура поверхностного слоя стали значительно изменилась (рис. 3). Видно, что объем боридов уменьшается. В легированном слое второго образца наблюдались первичные бориды железа в виде ветви (рис. 3б) в эвтектической матрице. Дефекты в виде пор и трещин не выявлены. На границе с основным металлом также наблюдались дендритные кристаллы.

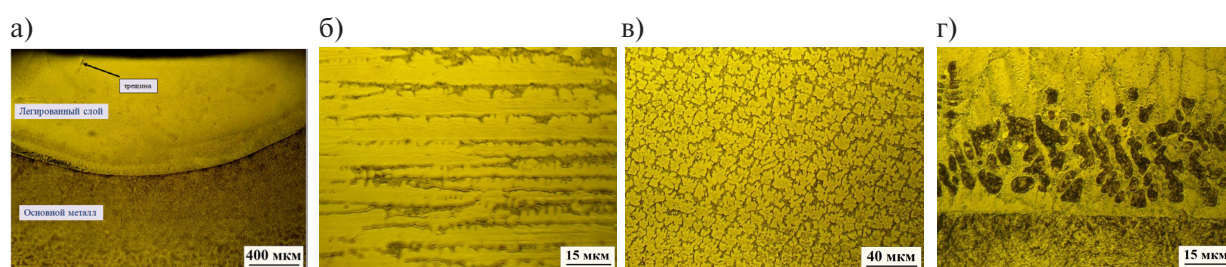


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя после плазменного легирования с током 120 А:
 а – общий вид; б, в – бориды железа с различной морфологией; г – доэвтектическая зона
 Fig. 2. Microstructure of the surface layer after plasma alloying with 120 A current:
 a – general view; b, c – iron borides with different morphologies; d – hypoeutectic zone

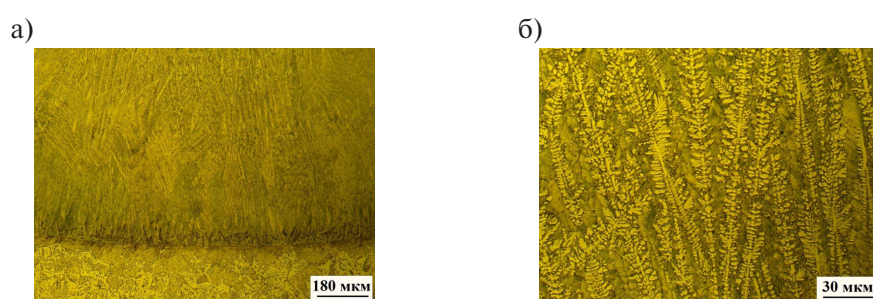


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя после плазменного легирования с током 140 А:
 а – общий вид; б – бориды железа в виде ветви
 Fig. 3. Microstructure of the surface layer after plasma alloying with 140 A current:
 a – general view; b – iron borides in the form of a branch

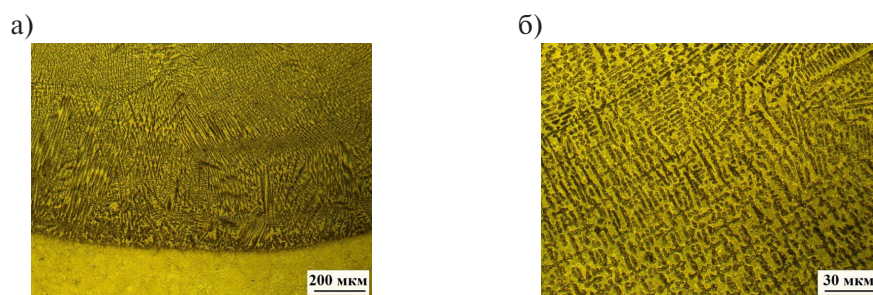
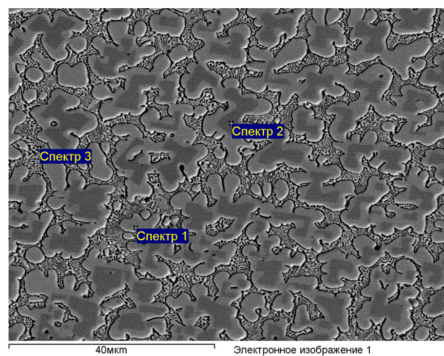


Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя после плазменного легирования с током 160 А:
 а – общий вид; б – область с первичными дендритами
 Fig. 4. Microstructure of the surface layer after plasma alloying with 160 A current:
 a – general view; b – area with primary dendrites

В третьем образце при увеличении тока до 160 А происходит увеличение глубины легированного слоя и изменение структуры поверхностного слоя стали после плазменного легирования (рис. 4). Микроструктура легированного слоя характеризуется доэвтектическим типом. В легированном слое не были зафиксированы первичные бориды железа. Это связано с тем, что повышение тока плазменной дуги до 160А приводит к значительному увеличению содержанию железа из основного металла, следовательно, количество бора недостаточно для формирования в легированном слое первичных боридов железа. После плазменного легирования в поверхностном слое стали выделяются дендритные кристаллы твердого раствора бора в Fe, вокруг кото-



Химический состав, ат. %			
	Fe	B	C
Спектр 1	87,32	7,82	4,86
Спектр 2	84,65	15,35	—
Спектр 3	88,26	5,68	6,06

Рис. 5. Результаты анализа химического состава в локальных местах легированного слоя
 Fig. 5. Results of chemical composition analysis in local areas of the alloyed layer

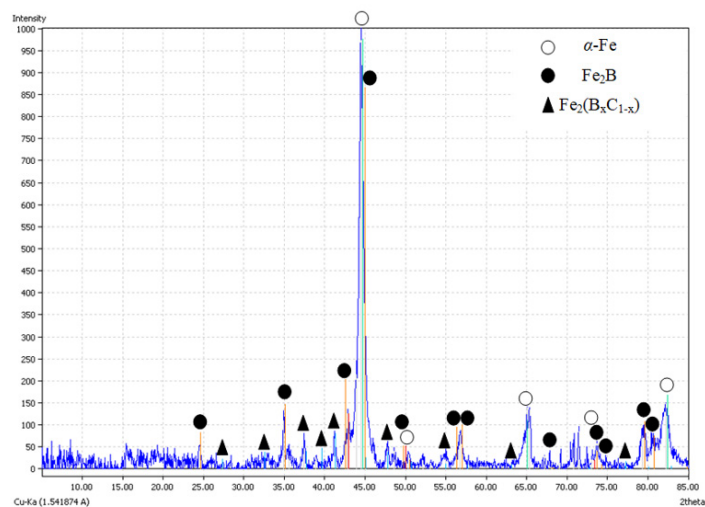


Рис. 6. Рентгенограммы поверхностного слоя, полученного после плазменного легирования 40% B4C + 10% Fe с током 120A
 Fig. 6. X-ray diffraction patterns of the surface layer obtained after plasma alloying with 40% B4C + 10% Fe with 120 A current

рых располагались эвтектики боридов. Дефекты в виде пор и трещин не выявлены. На границе с основным металлом не наблюдалось расслоений.

В ходе металлографического исследования был определен химический состав в легированном слое стали. Результаты измерения представлены на рис. 5. Наблюдала область вокруг боридов, которая отличается по степени травимости (рис. 5). По результатам анализа отмечено, что в легированном слое присутствует борцементит вокруг первичных боридов железа, ориентированных перпендикулярно плоскости шлифа. По стехиометрическому соотношению формула борцемен-

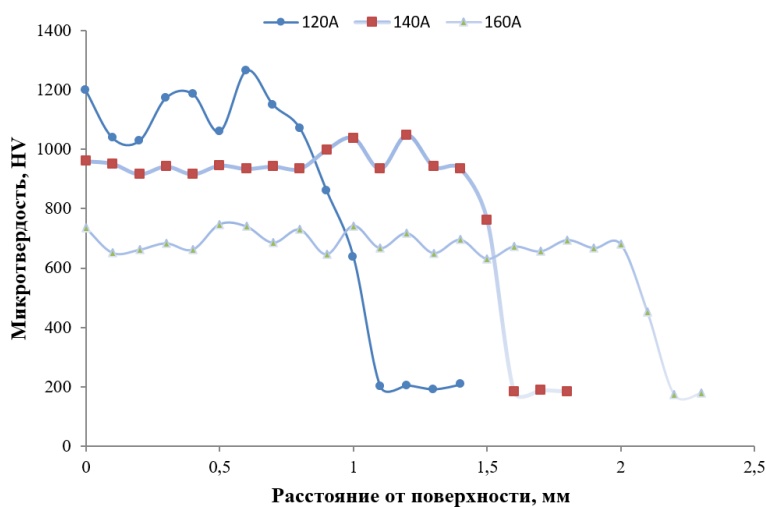


Рис. 7. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя после плазменного легирования
 Fig. 7. Distribution of microhardness along the depth of the surface layer after plasma alloying

тита соответствует фазам $Fe_3B_{0,3}C_{0,2}$. Результаты рентгенограммы показали наличие борцементит в слое поверхности стали после плазменного легирования (рис. 6).

На рис. 7 представлено распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя после плазменного легирования. Отмечено, что легированный слой, полученный после легирования с током 120А, обладает наиболее высоким значением по микротвердости и составляет 859...1265 HV. С увеличением тока до 140А микротвердость легированного слоя снижается и составляет 761...1048 HV. Повышение тока до 160А приводит к значительно уменьшению микротвердости поверхностного слоя и она составляет 452...747 HV. Известно, что объем долей боридов железа определяет степень упрочнения поверхности стали. Повышение силы тока плазменной дуги приводит к уменьшению доли первичных боридов в поверхностном слое после легирования, следовательно, приводит к снижению микротвердости.

Заключение

Установлено, что боридные покрытия возможно получить методом плазменного легирования бором. При воздействии плазменной дугой в поверхностном слое была сформирована явно выраженная гетерогенная микроструктура. Легированный слой имеет характерные зоны: заэвтектическая, эвтектическая и доэвтектическая. Повышение тока приводит к значительному изменению микроструктуры поверхностного слоя и снижению микротвердости легированного слоя. Наиболее высокой микротвердостью обладает поверхностный слой после плазменного легирования с током 120А и достигает 1265 HV.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Шин В.И., Москвин П.В., Воробьев М.С., Девятков В.Н., Дорошкевич С.Ю., Коваль Н.Н. Повышение электрической прочности ускоряющего зазора в источнике электронов с плазменным катодом, Приборы и техника эксперимента (2021) – № 2. – С. 69–75.
- [2] Li Q., Zhang Y.L., Zhang L., Wang Q., Zhao Z., Chen D.X., Jin H., Wang Y.Y., Zhang J.W. Effect of boron on the microstructural evolution and wear resistance of high-hardness Fe-based alloy coatings prepared by laser cladding, Surface and Coatings Technology. 458 (2023).

- [3] **Vinodh Kumar S., Surya Raj G., Prince M.** Effects of pack boriding and induction boriding on the dry sliding wear behavior of high speed steel, *Materials Today: Proceedings*, 59 (2022) 1105–1110.
- [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).
- [5] **Bushueva E., Ryabinkina P., Gorovenko P.** Boron-doped coatings on stainless steel formed by the electron beam processing, *Materials Today: Proceedings*. 12 (1) (2019) 155–158.
- [6] **Sezgin C.T., Hayat F.** The effects of boriding process on tribological properties and corrosive behavior of a novel high manganese steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 300 (2022).
- [7] **Dongya Zhang, Yue Li, Xin Du, Hongwei Fan, Feng Gao.** Microstructure and tribological performance of boride layers on ductile cast iron under dry sliding conditions, *Engineering Failure Analysis*, 134 (2022) 106080.
- [8] **Sireli G.K., Bora A.S., Timur S.** Evaluating the mechanical behavior of electrochemically borided low-carbon steel, *Surface and Coatings Technology*, 381 (2020).
- [9] **Liu Y., Wang T., Li Z., Zhang J.** Heat treatment for microstructure and mechanical properties improvement of powder plasma arc melted 17Cr-2Ni steel containing boron, *Surface and Coatings Technology*, 427 (2021).
- [10] **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.
- [11] **Fernández-Valdés D., Vásquez-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.
- [12] **Jefferson L.J., Anael P.K., Christian P., Ivandro B., Rodrigo da S., Julio C.G.M., Cesar Edil da C.** Microstructural, mechanical characterizations and corrosion behaviour of borides layers on Inconel 718 superalloy, *Results in Engineering*, 16 (2022) 100783.
- [13] **Bourithis L., Papadimitriou G.** Boriding a plain carbon steel with the plasma transferred arc process using boron and chromium diboride powders: microstructure and wear properties, *Materials Letters*. 57 (12) (2003) 1835–1839.
- [14] **Bourithis L., Papaefthymiou S., Papadimitriou G.D.** Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties, *Applied Surface Science*, 20 (2002) 203–218.
- [15] **Bourithis L., Papadimitriou G.** Three body abrasion wear of low carbon steel modified surfaces, *Wear*, 258 (2005) 1775–1786.
- [16] **Bourithis L., Papadimitriou G.D.** The effect of microstructure and wear conditions on the wear resistance of steel metal matrix composites fabricated with PTA alloying technique, *Wear*, 266 (2009) 1155–1164.
- [17] **Darabara M., Papadimitriou G.D., Bourithis L.** Tribological evaluation of Fe–B–TiB₂ metal matrix composites, *Surface and Coatings Technology*, 202 (2) (2007) 246–253.
- [18] **Cao R., Liu R., Ye X., Xu M., Shan Z., Cui Y., Yang R.** Influence of boron content on boride characteristics in cast Ti-45Al-2Mn-2Nb-xB alloys, *Materials & Design*, 224 (2022).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

E-mail: nguyenvanh190596@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] **V.I. Shin, P.V. Moskvina, M.S. Vorobyev, V.N. Devyatkov, S.Yu. Doroshkevich, N.N. Koval**, Povysheniye elektricheskoy prochnosti uskoryayushchego zazora v istochnike elektronov s plazmennym katodom, *Pribory i tekhnika eksperimenta* (2021) — № 2. — S. 69–75.
- [2] **Q. Li, Y.L. Zhang, L. Zhang, Q. Wang, Z. Zhao, D.X. Chen, H. Jin, Y.Y. Wang, J.W. Zhang**, Effect of boron on the microstructural evolution and wear resistance of high-hardness Fe-based alloy coatings prepared by laser cladding, *Surface and Coatings Technology*. 458 (2023).
- [3] **S. Vinodh Kumar, G. Surya Raj, M. Prince**, Effects of pack boriding and induction boriding on the dry sliding wear behavior of high speed steel, *Materials Today: Proceedings*, 59 (2022) 1105–1110.
- [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).
- [5] **E. Bushueva, P. Ryabinkina, P. Gorovenko**, Boron-doped coatings on stainless steel formed by the electron beam processing, *Materials Today: Proceedings*. 12 (1) (2019) 155–158.
- [6] **C.T. Sezgin, F. Hayat**, The effects of boriding process on tribological properties and corrosive behavior of a novel high manganese steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 300 (2022).
- [7] **Dongya Zhang, Yue Li, Xin Du, Hongwei Fan, Feng Gao**, Microstructure and tribological performance of boride layers on ductile cast iron under dry sliding conditions, *Engineering Failure Analysis*, 134 (2022) 106080.
- [8] **G.K. Sireli, A.S. Bora, S. Timur**, Evaluating the mechanical behavior of electrochemically borided low-carbon steel, *Surface and Coatings Technology*, 381 (2020).
- [9] **Y. Liu, T. Wang, Z. Li, J. Zhang**, Heat treatment for microstructure and mechanical properties improvement of powder plasma arc melted 17Cr-2Ni steel containing boron, *Surface and Coatings Technology*, 427 (2021).
- [10] **R.C. Morón, L. Melo-Máximo, I. Campos-Silva, D.V. Melo-Máximo, I. Arzate-Vázquez, N. López-Perrusquia, J. Solís-Romero**, Dry and grease-lubricated reciprocating wear resistance of borided AISI 52100 steel, *Materials Letters*, 320 (2022) 132404.
- [11] **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.
- [12] **L.J. Jefferson, P.K. Anael, P. Christian, B. Ivandro, da S. Rodrigo, C.G.M. Julio, da C. Cesar Edil**, Microstructural, mechanical characterizations and corrosion behaviour of borides layers on Inconel 718 superalloy, *Results in Engineering*, 16 (2022) 100783.
- [13] **L. Bourithis, G. Papadimitriou**, Boriding a plain carbon steel with the plasma transferred arc process using boron and chromium diboride powders: microstructure and wear properties, *Materials Letters*. 57 (12) (2003) 1835–1839.

- [14] **L. Bourithis, S. Papaefthymiou, G.D. Papadimitriou**, Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties, *Applied Surface Science*, 20 (2002) 203–218.
- [15] **L. Bourithis, G. Papadimitriou**, Three body abrasion wear of low carbon steel modified surfaces, *Wear*, 258 (2005) 1775–1786.
- [16] **L. Bourithis, G.D. Papadimitriou**, The effect of microstructure and wear conditions on the wear resistance of steel metal matrix composites fabricated with PTA alloying technique, *Wear*, 266 (2009) 1155–1164.
- [17] **M. Darabara, G.D. Papadimitriou, L. Bourithis**, Tribological evaluation of Fe–B–TiB₂ metal matrix composites, *Surface and Coatings Technology*, 202 (2) (2007) 246–253.
- [18] **R. Cao, R. Liu, X. Ye, M. Xu, Z. Shan, Y. Cui, R. Yang**, Influence of boron content on boride characteristics in cast Ti-45Al-2Mn-2Nb-xB alloys, *Materials & Design*, 224 (2022).

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.