

Received: 25.10.2022

Revised: 30.11.2022

Accepted: 23.12.2022



DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.025-034



## THE EFFECT OF BORON ON THE PROTECTIVE PROPERTIES OF ALUMINIDE COATINGS

N. B. Pugacheva<sup>1, 2, a)</sup> and P. A. Polyakov<sup>1, 2, b), \*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

<sup>2</sup>*Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

a)  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  [nat@imach.uran.ru](mailto:nat@imach.uran.ru);

b)  <https://orcid.org/0000-0002-7779-8546>  [smokie84@mail.ru](mailto:smokie84@mail.ru)

\*Corresponding author. E-mail: [smokie84@mail.ru](mailto:smokie84@mail.ru)

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russian

Tel.: +7 (343) 375 5051; fax: +7 (343) 374 5330

The effect of the formation, microstructure, phase composition, and protective properties of diffusion aluminide coatings alloyed with boron on the EI69 heat-resistant steel and the EI929 nickel alloy is studied. In the course of saturation, boron easily diffuses over the interstices of the B2 crystal lattice of aluminides, thus forming interstitial solid solutions. In this case, the Al content in the coating decreases, thereby implementing the possibility of increasing the plasticity of the coating while maintaining high protective properties. By binding refractory corrosive elements (Mo, W, Nb, etc.) into corrosion-resistant borides, boron increases the overall resistance of the coating in molten Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaCl salts at 700 °C by an order of magnitude and improves the resistance of the surface to erosion wear. This makes it possible to recommend Al-Si-B coatings to be used for protecting the surface of the turbine blades of supercharging turbochargers and diesel exhaust valves.

**Keywords:** Chemical heat treatment, heat-resistant steels and alloys, aluminides, microhardness, corrosion resistance, erosion.

### Acknowledgment

*This work used the equipment of the Plastometriya shared research facilities of the Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. It was performed under a state assignment, theme No. AAAA-A18-118020790145-0.*

### References

1. Sivakumar R., Mordike B.L. High temperature coatings for gas turbine blades: a review. *Surface and Coatings Technology*, 1989, vol. 37, iss. 2, pp. 139–160. DOI: 10.1016/0257-8972(89)90099-6.
2. Abraimov N.V., Eliseev Yu.S. *Khimiko-termicheskaya obrabotka zharoprochnykh staley i splavov* [Thermochemical Treatment of Heat-Resistant Steels and Alloys]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2001, 622 p. (In Russian).
3. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Reinforcing Protective Coatings in Mechanical Engineering]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2004, 244 p. ISBN: 5-7691-1405-3. (In Russian).

4. Muboyadzhan S.A., Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P. Kompleksnyye zashchitnye pokrytiya turbinnykh lopatok aviatsionnykh GTD [Complex protective coatings for turbine blades of aircraft GTE]. Ekaterinburg, Izd. "Kvist" Publ., 2008, 208 p. ISBN: 5-900474-60-7. (In Russian).
5. Triani R.M., Gomes L.F.D.A., Aureliano R.J.T., Neto A.L., Totten G.E., Casteletti L.C., Production of aluminide layers on AISI 304 stainless steel at low temperatures using the slurry process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29 (6), pp. 3568–3574. DOI: 10.1007/s11665-020-04748-3.
6. Liu X.M., Yi D.W., Liu B., Ma Z.W., Wan G.W. Current status and application of hot-dip aluminizing technique. *Mater. Protect.*, 2008, 41 (4), pp. 47–50.
7. Wang X.Y., Du J.J., Ma Z.W. A One-Step Pack Cementation Method for Preparing AlN/Aluminizing Coating with Good Corrosion Resistanc. *Solid State Phenomena*, 2019, vol. 295, pp. 3–8. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.295.3.
8. Pugacheva N.B. Current Trends in the Development of Heat-Resistant Coatings Based on Iron, Nickel and Cobalt Aluminides. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2015, iss. 3, pp. 51–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. Available at: [https://dream-journal.org/DREAM\\_Issue\\_3\\_2015\\_Pugacheva\\_N.\\_B.\\_051\\_082.pdf](https://dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Pugacheva_N._B._051_082.pdf)
9. Samsonov G.V. and Vinnitskii I.M. *Tugoplavkie soedineniya* [High-Melting Compounds]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976.
10. Voroshnin L.G. *Borirovanie promyshlennykh staley i chugunov* [Borating of industrial steels and cast irons]. Minsk, Belarus Publ., 1981, 205 p.
11. Khimushin F.F. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat Resistant Steels and Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969.
12. Movchan B.A., Malashenko I.S. *Zharostoykie pokrytiya, osazhdaemye v vakuume* [Vacuum-Deposited Heat-Resistant Coatings]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1983, 232 p.
13. Lakhtin Yu.M., Borodin V.A., Kogan Ya.D., Kostina L.A., Ivanov E.V. Ocheretin Yu.A. Comparative tests of heat-resistant coatings on nickel alloy ZhS6K. *Zashchita metallov*, 1978, 14 (4), pp. 499–491.
14. Minkevich A.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemical and Thermal Treatment of Metals and Alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965.
15. Borisenok S.G., Vasil'ev L.A., Voroshnin L.G. et al. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov: Spravochnik* [Chemicothermal Treatment of Metals and Alloys: A Handbook]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981.
16. Nakhmanson M.S., Antoshulskiy A.G. A procedure for computer-aided calculation of cell parameters from X-ray diffraction patterns of powders. *Apparatura i Metody Rentgenovskogo Analiza*, 1985, iss. 33, pp. 104–115.
17. Oryshich I.V. Development of methods for testing heat-resistant alloys in molten salts. *Zashchita metallov*, 1981, vol. 17, No. 1, pp. 74–79. (In Russian).
18. Pugacheva N.B., Bykova T.M. A Study of Boriding Methods, An Analysis of the Structure and Properties of the Obtained Coatings. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, iss. 2, pp. 38–60. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.038-060. Available at: [https://dream-journal.org/issues/2020-2/2020-2\\_285.html](https://dream-journal.org/issues/2020-2/2020-2_285.html)
19. Gol'dshmidt Kh. Dzh. *Splavy vnedreniya* [Interstitial alloy, Engl. transl.]. Moscow, Mir Publ., 1971.

Подана в журнал: 25.10.2022

УДК 620.18.186:621.793.6.



DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.025-034



## ВЛИЯНИЕ БОРА НА ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Н. Б. Пугачева<sup>1, 2, а)</sup>, П. А. Поляков<sup>1, 2, б), \*</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», д. 19, ул. Мира, г. Екатеринбург, Российская Федерация

а)  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>  nat@imach.uran.ru;

б)  <https://orcid.org/0000-0002-7779-8546>  smokie84@mail.ru

\*Ответственный автор. Электронная почта: smokie84@mail.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, 620049, Екатеринбург, Российская Федерация

Тел.: +7 (343) 374 50 51

Исследованы особенности формирования, микроструктура, фазовый состав и защитные свойства диффузионных алюминидных покрытий, легированных бором, на жаропрочной стали ЭИ69 и никелевом сплаве ЭИ929. В процессе насыщения бор легко диффундирует по междоузлиям кристаллической решетки В2 алюминидов, образуя твердые растворы внедрения. При этом содержание Al в покрытии уменьшается, тем самым реализуется возможность повышения пластичности покрытия при сохранении высоких защитных свойств. Связывая тугоплавкие коррозионно-активные элементы (Mo, W, Nb и др.) в коррозионно-стойкие бориды, бор на порядок повышает общую стойкость покрытия в расплаве солей Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и NaCl при 700 °С, а также улучшает сопротивление поверхности эрозионному изнашиванию, что позволило рекомендовать покрытие Al-Si-B для защиты поверхности лопаток турбин турбокомпрессоров наддува и выпускных клапанов дизелей.

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка, жаропрочные стали и сплавы, алюминиды, микротвердость, коррозионная стойкость, эрозия.

### 1. Введение

Перевод мощных дизелей на тяжелые сорта топлива с массовым содержанием серы до 3 % и ужесточение условий их эксплуатации ставят задачу защиты деталей горячего тракта дизеля и турбокомпрессора от разрушающего воздействия сульфидной коррозии и газовой эрозии. К таким деталям относятся лопатки турбины турбокомпрессора наддува и выпускные клапаны дизеля. Появление обезлегированной разупрочненной поверхностной зоны, развитие коррозионно-эрозионных повреждений поверхности лопаток часто являются основной причиной появления усталостных трещин, вызывающих в конечном итоге разрушение металла. Для выпускных клапанов характерно адгезионное схватывание поверхности штока и втулки, а также эрозионное повреждение и окисление поверхности.

Наиболее эффективным средством защиты поверхности лопаточного аппарата газовых турбин от высокотемпературной коррозии является нанесение покрытий алюминидного класса. В настоящее время разработана серия таких покрытий применительно к жаропрочным никелевым сплавам [1–7]. Основными направлениями повышения защитных свойств алюминидных покрытий являются следующие: легирование элементами, обеспечивающими стабильность β-фазы NiAl или FeAl, упорядоченной по типу В2; формирование диффузионного барьера на границе «сплав–покрытие», препятствующего взаимодействию покрытия

с основой при высоких температурах; повышение защитных свойств оксидной пенки  $Al_2O_3$  на поверхности [3, 8]. Кремний, например, способствует формированию на границе «сплав–покрытие» эффективного диффузионного барьера из силицидов легирующих элементов сплава – основы. Кроме того, кремний уменьшает дефектность защитной пленки  $Al_2O_3$  и улучшает ее адгезию. Легирование редкоземельными металлами и магнием способствует повышению адгезионного сцепления пленки  $Al_2O_3$  с поверхностью. В настоящее время разработаны составы, позволяющие формировать покрытия как по низкоактивному механизму (с преобладанием диффузии элементов основы к поверхности), так и по высокоактивному механизму (с преобладанием диффузии алюминия вглубь основы). Интерес представляет легирование алюминидных покрытий бором, который обладает малым атомным радиусом (0,086 нм [9]), поэтому может легко диффундировать на всю толщину алюминидного покрытия, изменяя его свойства. Известно, что легирование поверхности сталей и сплавов бором позволяет повысить твердость, износ- и теплостойкость [10]. Легирование бором жаропрочных никелевых сплавов позволяет повысить их пластичность, длительную прочность и фазовую стабильность [3, 11]. Положительное влияние бора проявляется в образовании сегрегаций этого элемента по границам зерен сплавов в местах сочленения кристаллических решеток различной ориентации, что замедляет начало отрыва при разрушающих нагрузках. Кроме того, бориды хрома  $Cr_3B_2$  и  $Cr_5B_3$ , легированные Ni, Co, W, Mo, способствуют замедлению диффузионных процессов по границам зерен, а также оказывают упрочняющее действие. Бориды хрома весьма успешно используются в эрозионностойких плазменных покрытиях [12]. Это дает основания предполагать, что введение бора в термодиффузионные алюминидные покрытия позволит повысить их долговечность. Сведения о легировании покрытий на основе В2 алюминидов бором весьма ограничены. Авторы [13] отмечают положительное влияние добавок бора в покрытия на основе В2 алюминид никеля. Достаточно широко процесс бороалитирования с преобладанием алитирования используется для упрочнения поверхности сталей и сплавов с целью повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости [14, 15]. Однако однозначного объяснения механизма влияния бора на долговечность покрытий на основе В2 алюминидов в литературе пока нет.

Цель работы – установить механизм влияния бора на микроструктуру, фазовый состав, коррозионную и эрозионную стойкость алюминидных покрытий на основе В2 фаз на жаропрочной стали ЭИ69 и никелевом сплаве ЭИ929, используемых для изготовления лопаточного аппарата турбин турбокомпрессора наддува и выпускных клапанов мощных дизелей.

## 2. Материалы и методы исследования

Покрытия наносили методом термодиффузионного насыщения в порошковых смесях. В качестве поставщиков алюминия и кремния использовали комплексные сплавы Fe–Al–Si [3]. Для получения борсодержащих покрытий в порошковую смесь добавляли карбид бора  $B_4C$ . Температуры насыщения в порошковых смесях составили 900 °С для стали и 950 °С для никелевого сплава, длительность выдержки – 8 и 6 ч. соответственно. Химический состав исследованных стали и сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав жаропрочной стали ЭИ69 и никелевого сплава ЭИ929, мас. %

Марка	C	Cr	Al	Ti	Ni	Mo	W	Co	Fe
ЭИ69	0,4–0,5	13–15	0	0	13–15	0,2–0,4	2–2,75	0	Основа
ЭИ929	0,1–0,2	9–12	3,6–4,6	1,4–2,0	Основа	4–6	4,5–5,5	12–16	< 5,0

Микроструктуру полученных покрытий выявляли травлением в реактиве Васильева и изучали на оптическом микроскопе Neophot и микротвердомере Leica при нагрузке 50 г. Рентгеноструктурные исследования проводили на установке ДРОН-2.0 в кобальтовом  $K_\alpha$  излучении. Периоды кристаллических решеток фаз NiAl, (Ni, Fe)Al, (FeNi)<sub>3</sub>Al и  $\alpha$ -Fe определяли в интервале углов  $2\theta = (70-160)^\circ$  по методике [16]. Количественный анализ содержания элементов в покрытиях выполняли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN с волнодисперсионной приставкой для микрорентгеноспектрального анализа OXFORD.

Для ускоренной оценки коррозионной стойкости покрытий использовали методику тигельных испытаний в расплаве смеси сульфата и хлорида натрия [17], мас. %: 75 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 25 NaCl. Этот метод, предъявляющий довольно жесткие требования к покрытиям, позволяет качественно оценить относительную коррозионную стойкость покрытий и определить тенденции их возможного поведения при высокотемпературной коррозии. Температура испытаний 700 °С. Покрытия наносили на образцы размерами  $\varnothing 15 \times 3$  мм. Для сравнения проводили испытания сплава и стали без покрытия и с диффузионным боридным покрытием, нанесенным в порошковой смеси по технологии, подробно описанной в работе [18]. После каждого цикла испытаний образцы тщательно отмывали от продуктов коррозии и остатков солей. Коррозионную стойкость определяли по удельному изменению массы образцов, рассчитываемому следующим образом:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_0}{S_0}, \quad (1)$$

где  $m_1$  – масса образца после испытания;  $m_0$  – масса образца до испытания;  $S$  – площадь поверхности образца. Испытания эрозионной стойкости проводили на экспериментальной установке типа центробежного ускорителя. В качестве абразивного материала использовали кварцевый песок фракций 0,4–0,6 мм. Угол атаки составлял  $\sim 45^\circ$ . Эрозионную стойкость оценивали по убыли массы образцов по формуле:

$$\Delta m = m_1 - m_0. \quad (2)$$

Площадь поверхности образцов, подвергнутых эрозионному воздействию, была одинакова и составляла 78,5 мм<sup>2</sup>.

### 3. Результаты и их обсуждение

Покрытия Al–Si–B имеют характерное для покрытий алюминидного класса строение (рис. 1) и соответствуют полученным ранее для покрытий Al–Si структурам [3, 8]. При легировании этих покрытий бором микроструктура защитного слоя не изменилась. Фазовый состав исследованных покрытий приведен в табл. 2. С увеличением содержания карбида бора в насыщающей смеси уменьшаются толщина и микротвердость покрытий. С помощью микрорентгеноспектрального анализа наличие бора в покрытии зафиксировано уже при введении 5 мас. % В<sub>4</sub>С в порошковую смесь (табл. 2). Кроме того, при увеличении содержания карбида бора в насыщающем составе концентрация алюминия в покрытиях уменьшилась от 27 мас. % в покрытии, полученном из смеси с 5 мас. % В<sub>4</sub>С, до 24 мас. % в покрытии, полученном из смеси 50 мас. % В<sub>4</sub>С. Однако фазовый состав и структура покрытий Al–Si–B при этом не изменились (табл. 2). Следует отметить, что содержание кремния в обоих покрытиях было одинаково и составило 1,5–2 мас. %.

Снижение содержания алюминия в покрытиях с увеличением количества карбида бора в смеси должно сопровождаться уменьшением периода решетки ( $a$ ) алюминидных фаз NiAl и (Fe, Ni)Al. Однако в покрытиях на стали ЭИ69 значение  $a$  для (Fe, Ni)Al увеличивается, а в покрытиях на сплаве ЭИ929  $a$  для NiAl остается постоянным. По-видимому, это обусловлено тем, что бор легирует алюминиды NiAl и (Fe, Ni)Al, образуя твердые рас-



творы внедрения. Изменения параметров решетки фаз  $(Fe,Ni)_3Al$  и  $\alpha-Fe$  в покрытиях на стали ЭИ69 не наблюдали, поэтому их значения не приведены в табл. 2.

В исследуемых покрытиях наиболее сильным боридообразователем является хром, находящийся в стали и сплаве и участвующий в образовании покрытий, поэтому в покрытиях на стали и сплаве образовались бориды хрома. Уже при введении 5 мас. %  $B_4C$  в насыщающую смесь на дифрактограммах, снятых с поверхности полученных на стали ЭИ69 покрытий, появились слабые дифракционные максимумы, идентифицированные как линии соединений  $Cr_2B$  и  $Cr_3B_4$ , а на сплаве ЭИ929 – только линии  $Cr_2B$ .

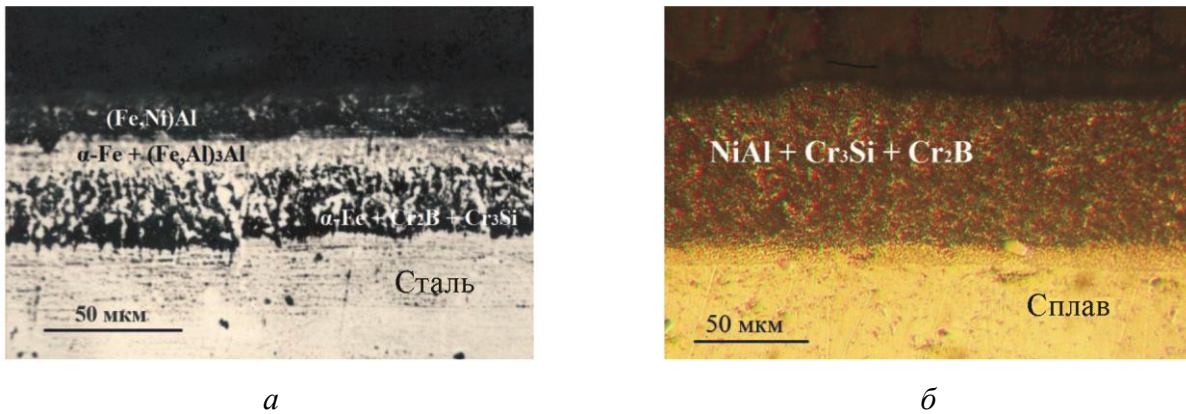


Рис. 1. Микроструктура покрытий Al–Si–B на стали ЭИ69 (а) и никелевом сплаве ЭИ929 (б) после насыщения в порошковой смеси с 25 мас. %  $B_4C$

Таблица 2

Параметры покрытий Al–Si и Al–Si–B на стали ЭИ69 и сплаве ЭИ929

Материал основы	Режим ХТО	Количество $B_4C$ в смеси, мас. %	Толщина покрытия, мкм	Содержание в покрытии, мас. %		$HV_{0,05}$	$\alpha\beta$ , нм	Фазовый состав покрытия
				B	Al			
ЭИ69	900 °С, 8 ч	0	55–60	0	28,0	630	0,2896	$(Fe,Ni)Al$ , $(Fe,Ni)_3Al$ , $\alpha-Fe$
		5	52–58	0,6	27,0	630	0,2896	
		10	50–55	1,0	26,5	650	0,2898	$(Fe,Ni)Al$ , $(Fe,Ni)_3Al$ , $\alpha-Fe$ , $Cr_2B$ , $Cr_3B_4$
		25	45–50	1,4	25,2	560	0,2904	
		50	40–45	1,6	24,0	520	0,2910	
ЭИ929	950 °С, 6 ч	0	55–60	0	28,5	850	0,2877	$NiAl$ , $Cr_3Si$
		5	55–60	0,8	27,2	850	0,2876	$NiAl$ , $Cr_3Si$ , $Cr_2B$
		10	50–55	1,2	26,6	800	0,2876	
		15	50–55	1,8	26,0	750	0,2876	
		25	45–50	2,3	25,2	700	0,2876	
		50	35–40	2,8	24,0	600	0,2878	

Бориды  $M_2B$  имеют структуру типа  $CuAl_2$  (C16), в которой присутствуют слои из тетраэдров, образованных атомами металлов, а атомы бора располагаются в междоузлиях между ними [19]. Кроме того, бориды  $MB_2$ , возможно, тоже являются изоструктурными выделениями из исходной ГЦК-решетки. Это означает, что соединения  $MB_2$  могут обеспечивать дисперсионное упрочнение сплавов, а в нашем случае – алюминидных покрытий. С увеличением содержания бора в бориде могут формироваться бориды с более высоким содержанием

бора  $MВ$ ,  $M_3B_4$ ,  $MВ_2$ ,  $MВ_6$ ,  $MВ_{12}$ . Образование высших боридов в покрытии нежелательно с точки зрения его охрупчивания. Выбранные насыщающие составы и режимы ХТО исключают формирование боридов с высоким содержанием бора.

Чисто боридные покрытия на жаропрочной стали ЭИ69 и никелевом сплаве ЭИ929, нанесенные из насыщающего состава, описанного в работе [15], имели толщину не более 40 мкм. Микротвердость боридного покрытия на стали ЭИ69 составляла 2230  $HV_{0,05}$ , а на сплаве ЭИ929 – 2900  $HV_{0,05}$ . По данным рентгеноструктурного фазового анализа, покрытие на стали состоит из боридов железа  $Fe_2B$  и  $FeB$  с преобладанием боридов  $FeB$ , а на никелевых сплавах – из боридов никеля  $Ni_2B$  и хрома  $Cr_3B_4$ ,  $CrB_2$  с преобладанием боридов  $Ni_2B$ . Микроструктура исследованных боридных покрытий представлена на рис. 2. В условиях испытаний борирование поверхности практически не повлияло на коррозионную стойкость защищаемых сплавов (рис. 3), что обусловлено низкой коррозионной стойкостью боридов в расплаве солей [9, 10], а также малой толщиной покрытий.

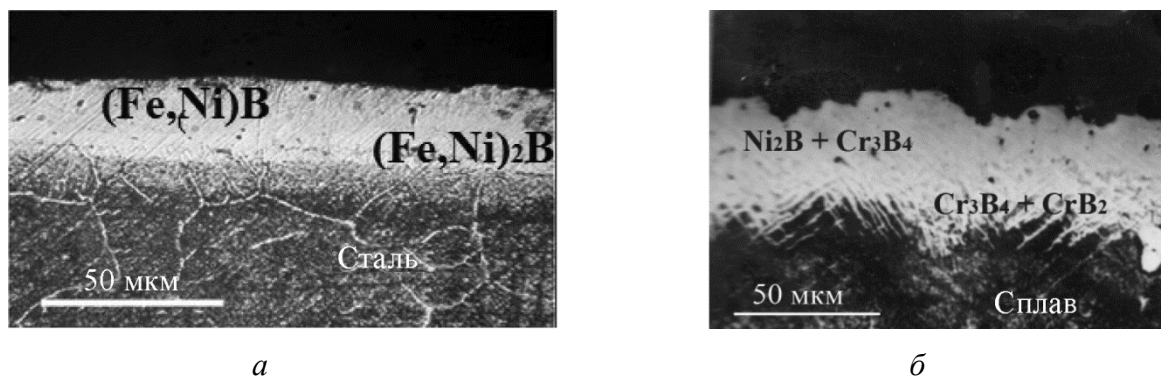


Рис. 2. Микроструктура боридных покрытий на стали ЭИ69 (а) и никелевом сплаве (б)

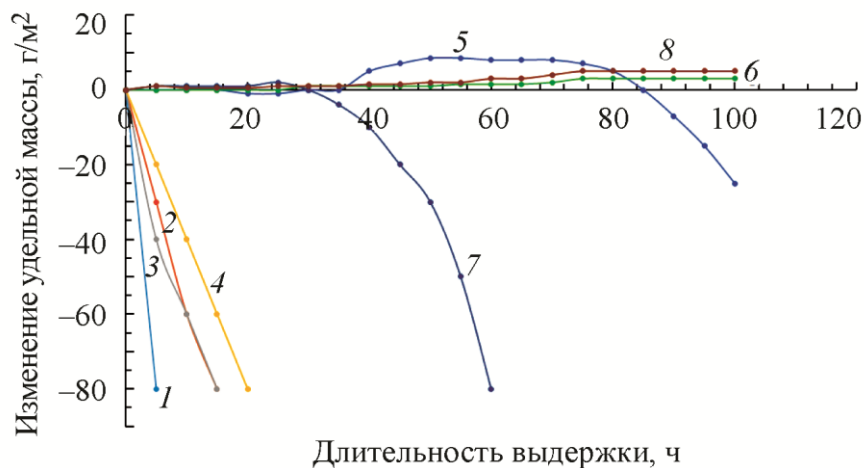


Рис. 3. Изменение массы образцов при коррозионных испытаниях в расплаве солей  $Na_2SO_4$  и  $NaCl$ : 1 – сталь ЭИ69 без покрытия; 2 – сплав ЭИ929 без покрытия; 3 – покрытие В на стали ЭИ69; 4 – покрытие В на сплаве ЭИ929; 5 – покрытие Al-Si на стали ЭИ69; 6 – покрытие Al-Si на сплаве ЭИ929; 7 – покрытие Al-Si-B на стали ЭИ69; 8 – покрытие Al-Si-B на сплаве ЭИ929

Полученные зависимости изменения массы образцов в ходе коррозионных испытаний показали, что покрытия Al-Si и Al-Si-B на никелевом сплаве ЭИ929 выполняют свои защитные свойства на выбранной базе испытаний 100 ч (рис. 3, кривые 6 и 8), тогда как на стали ЭИ 69 долговечность этих покрытий ограничена 80 ч для покрытия Al-Si (рис. 3, кривая 5) и всего 30 ч для покрытия Al-Si-B (рис. 3, кривая 7). Резкое уменьшение массы

образцов с покрытием Al–Si–B на стали ЭИ69 связано с малой толщиной слоя (Fe, Ni)Al (всего 15 мкм) и, следовательно, меньшим запасом алюминия, расходуемого на восстановление поврежденной в ходе испытаний защитной пленки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по сравнению с таким же покрытием на никелевом сплаве.

Структурные изменения в покрытии с бором наименьшие по сравнению с алюминидным покрытием без него при одинаковых выдержках и температурах (рис. 4). В покрытии Al–Si без бора (рис. 4 а) после 100-часовой выдержки в расплаве солей при температуре 700 °С на поверхности начинает образовываться прослойка из менее жаростойкой  $\gamma'$ -фазы Ni<sub>3</sub>Al, более интенсивно увеличивается толщина диффузионной зоны (примерно в 2 раза больше, чем у покрытия Al–Si–B). Присутствие бора в покрытии обеспечивает сохранение В2 фазы NiAl и практически исходной толщины диффузионной зоны (рис. 4 б). Бор влияет на термическую стабильность алюмосилицидного покрытия за счет дополнительного образования боридов Cr<sub>2</sub>B и Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub>, способствующего повышению барьерного действия прослойки вторичных фаз на границе «сплав–покрытие». Не следует исключать возможность растворения бора в карбидах Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> и Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, а также в силицидах Cr<sub>3</sub>Si, что приводит к их термической стабилизации [19].

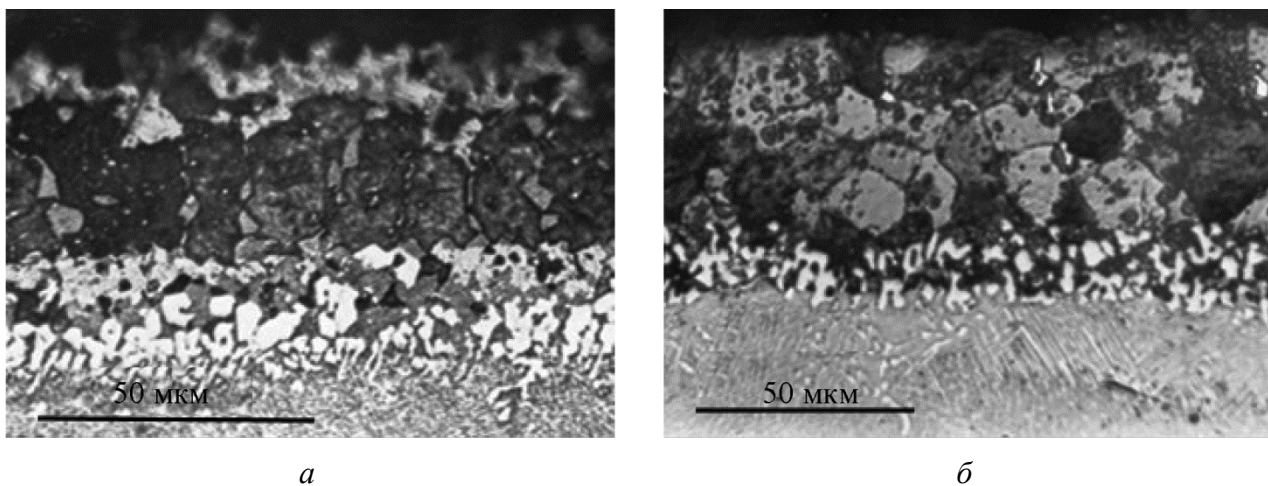


Рис. 4. Микроструктура покрытий Al–Si (а) и Al–Si–B (б) после 100-часовой выдержки при 700 °С в расплаве смеси солей 75 мас. % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 25 мас. % NaCl

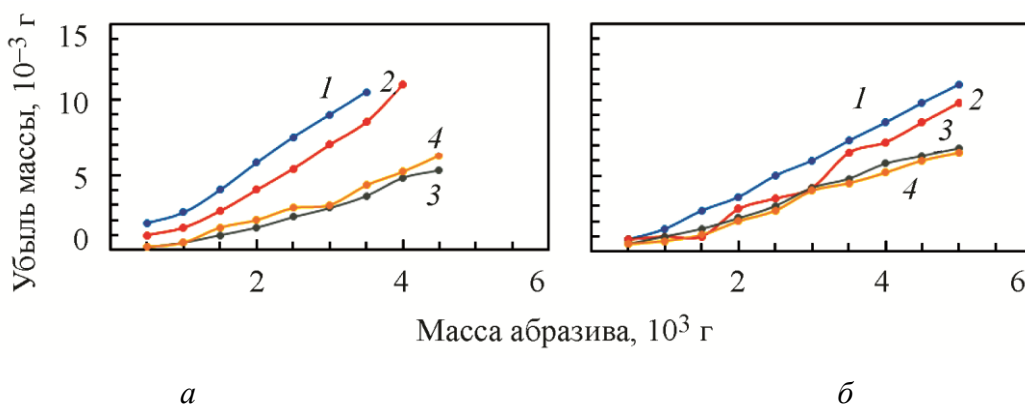


Рис. 5. Изменение массы образцов после испытаний на эрозионную стойкость: а – сталь ЭИ69; б – сплав ЭИ929; 1 – без покрытия; 2 – с покрытием В; 3 – с покрытием Al–Si; 4 – с покрытием Al–Si–B



Высокие значения микротвердости боридных покрытий обеспечивают увеличение контактной износостойкости [9]. Однако обладая малым запасом пластичности и высокой хрупкостью, бориды легко скалываются и выкрашиваются под действием нормальных и касательных напряжений в процессе эрозионных испытаний. Кроме того, толщина борированных слоев была мала – не более 40 мкм. В связи с этим эрозионная стойкость образцов с боридными покрытиями была практически на одном уровне с образцами без покрытий (рис. 5). Покрытия Al–Si и Al–Si–B в условиях испытаний показали максимальную коррозионную и эрозионную стойкость. Бориды хрома  $Me_2B$  и  $Me_3B_4$ , легированные тугоплавкими элементами сплава–основы, оказывают упрочняющее действие в покрытиях Al–S–B, способствуя тем самым увеличению эрозионной стойкости. В большей степени это сказалось на покрытиях, состоящие из алюминидов никеля.

#### 4. Заключение

Выполненные исследования показали, что легирование алюминидных покрытий бором положительно влияют на коррозионную и эрозионную стойкость. Влияние бора на свойства алюминидных покрытий проявляется в следующем:

- 1) обладая малым радиусом, бор в процессе ХТО диффундирует на всю толщину покрытия, легируя B2 фазы;
- 2) входя в решетку B2 фаз, бор способствует снижению содержания в них алюминия, что повышает стойкость к растрескиванию покрытий при эрозионном воздействии;
- 3) бор образует с хромом дисперсные бориды, упрочняющие покрытие, что повышает его эрозионную стойкость;
- 4) бориды хрома в диффузионной зоне увеличивают эффективность барьерного эффекта, что проявляется в снижении диффузионного взаимодействия с основой во время длительных выдержек при высоких температурах.

Экспериментально установлено, что термодиффузионные покрытия Al–Si и Al–Si–B на порядок увеличивают коррозионную стойкость стали ЭИ69 и никелевого сплава ЭИ929 в расплаве солей  $Na_2SO_4$  и  $NaCl$  при 700 °С, а также повышают эрозионную стойкость поверхности не менее чем на 40 %. Это позволило рекомендовать данные покрытия для защиты поверхности лопаток турбин турбокомпрессоров наддува и выпускных клапанов мощных дизелей. Для высокотемпературных деталей из жаропрочной стали ЭИ69 рекомендовано покрытие Al–Si, а в случае использования никелевых сплавов – покрытие Al–Si–B.

#### Благодарность

*Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН в соответствии с государственным заданием по теме № АААА-А18-118020790145-0.*

#### Литература

1. Sivakumar R., Mordike B. L. High temperature coatings for gas turbine blades: a review // Surface and Coatings Technology. – 1989. – Vol. 37, iss. 2 – P. 139–160. – DOI: 10.1016/0257-8972(89)90099-6.
2. Абраимов Н. В., Елисеев Ю. С. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 622 с.
3. Гузанов Б. Н., Косицын С. В., Пугачева Н. Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 244 с. – ISBN: 5-7691-1405-3.
4. Мубояджан С. А., Лесников В. П., Кузнецов В. П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. – Екатеринбург : «Квист», 2008. – 208 с. – ISBN: 5-900474-60-7.
5. Production of aluminide layers on AISI 304 stainless steel at low temperatures using the slurry process / R. M. Triani, L. F. D. A. Gomes, R. J. T. Aureliano, A. L. Neto, G. E. Totten,

- L. C. Casteletti // J. Mater. Eng. Perfor. – 2020. – 29 (6). – С. 3568–3574. – DOI: 10.1007/s11665-020-04748-3.
6. Current Status and Application of Hot-Dip Aluminizing Technique / X. M. Liu, D. W. Yi, B. Liu, Z. W. Ma, G. W. Wang // Mater. Protect. – 2008. – 41 (4).
  7. Wang X. Y., Du J. J., Ma Z. W. A One-Step Pack Cementation Method for Preparing AlN/Aluminizing Coating with Good Corrosion Resistanc // Solid State Phenomena. – 2019. – Vol. 295. – P. 3–8. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.295.3.
  8. Pugacheva N. B. Current Trends in the Development of Heat-Resistant Coatings Based on Iron, Nickel and Cobalt Aluminides // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2015. – Iss. 3. – P. 51–82. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. – URL: [https://dream-journal.org/DREAM\\_Issue\\_3\\_2015\\_Pugacheva\\_N.\\_B.\\_051\\_082.pdf](https://dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Pugacheva_N._B._051_082.pdf)
  9. Самсонов Г. В., Веницкий И. М. Тугоплавкие соединения : справочник. – М. : Металлургия, 1976. – 560 с.
  10. Ворошнин Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. – Минск : Беларусь, 1981. – 205 с.
  11. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. – М. : Металлургия, 1969. – 752 с.
  12. Мовчан Б. А., Малашенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. – Киев : Наукова думка, 1983. – 232 с.
  13. Сравнительные испытания жаростойких покрытий на никелевом сплаве ЖС6К / Ю. М. Лахтин, В. А. Бородин, Я. Д. Коган и др. // Защита металлов. – 1978. – 14 (4). – С. 499–491.
  14. Минкевич А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. – М. : Машиностроение, 1965. – 492 с.
  15. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / Г. В. Борисенко, Л. А. Васильев, Л. Г. Ворошнин и др. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.
  16. Нахмансон М. С., Антошульский А. Г. Методика расчета параметров ячейки по рентгенограммам порошков с помощью ЭВМ // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. – 1985. – Вып. 33. – С. 104–115.
  17. Оришич И. В. Разработка методики испытания жаропрочных сплавов в расплавах солей // Защита металлов. – 1981. – 17 (1). – С. 74–79.
  18. Pugacheva N. B., Vykova T. M. A Study of Boriding Methods, An Analysis of the Structure and Properties of the Obtained Coatings // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2020. – Iss. 2. – P. 38–60. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.038-060. – URL: [https://dream-journal.org/issues/2020-2/2020-2\\_285.html](https://dream-journal.org/issues/2020-2/2020-2_285.html)
  19. Гольдшмидт Х. Дж. Сплавы внедрения / пер. с англ. С. Н. Горина и др. / под ред. Н. Т. Чеботарёва. – Вып. II. – М. : Мир, 1971. – 464 с.