

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА БОРСОДЕРЖАЮЩЕЙ АКТИВНОЙ СРЕДЫ В ВИДЕ ОБМАЗКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНА

© 2022 г. А.М. Гурьев^{1,2}, С.Г. Иванов¹, М.А. Гурьев¹,
В.Б. Деев^{2,3}, М.В. Логинова¹

¹ Алтайский государственный технический университет (АлтГТУ) им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, Россия

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

³ Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС»,
г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 01.07.21 г., доработана 03.10.21 г., подписана в печать 05.10.21 г.

Аннотация: Проведено сравнительное исследование способов борирования, карбоборирования и боросилицирования титана ВТ1-0 с целью повышения износостойкости в условиях агрессивных сред и повышенных температур. Исследована микроструктура диффузионных покрытий, определена их толщина и микротвердость. Диффузионное насыщение образцов из титана ВТ1-0 размерами 10×10×25 мм проводили из насыщающих обмазок на основе карбида бора. Режим насыщения: температура процесса – 950 °С, время насыщения – 1,5 ч. По окончании высокотемпературной выдержки образцы извлекали из печи, охлаждали на воздухе до комнатной температуры, очищали от насыщающей обмазки деревянными шпателями и кипятили в мыльно-содовом растворе в течение 1 ч. На поверхности титана образуется непрерывный диффузионный слой толщиной 80–100 мкм. Боросилицированный диффузионный слой, полученный насыщением титана из обмазки состава (%) 45В₄С–5Na₂В₄О₇–22Si–5NaF–3NaCl–20CrB₂, имеет более высокую микротвердость (1520 HV_{0,1}) против карбоборидного покрытия (1280 HV_{0,1}) и боридного (1120 HV_{0,1}). При этом у боридного и карбоборидного покрытий, полученных, соответственно, насыщением из обмазок состава (%) 45В₄С–5Na₂В₄О₇–5NaF–25Al₂О₃–20CrB₂ и 70В₄С–5Na₂В₄О₇–5NaF–20CrB₂, наблюдается ярко выраженное зональное строение. Верхняя зона этих покрытий, обладая повышенной микротвердостью, также имеет высокие показатели хрупкости, что не позволяет точно измерить распределение микротвердости в силу выкрашивания и трещинообразования в местах измерения. Рентгенографические исследования качественного состава покрытий на титане проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6 в фильтрованном CuK_α-излучении (λ = 1,5418 Å) в интервале углов 2θ = 20÷80°. В диффузионном покрытии наблюдаются рефлексы карбида титана, боридов хрома и титана, некоторое количество интерметаллида Cr₂Ti. Боридные фазы хрома и титана относятся к высокобористым фазам с высоким удельным содержанием бора: TiB, CrB, Ti₂B₃, Ti₃B₄ и Cr₂B₃.

Ключевые слова: титан, упрочнение, структура, борирование, химико-термическая обработка.

Гурьев А.М. — докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Начертательная геометрия и графика» АлтГТУ (656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46); проф. факультета машиностроения и автоматизации Уханьского текстильного университета (Textile Road, 1, Hongshan District, Wuhan, 430073, P.R. China).
E-mail: guriyevam@mail.ru.

Иванов С.Г. — докт. техн. наук, вед. науч. сотр. научного управления АлтГТУ. E-mail: serg225582@mail.ru.

Гурьев М.А. — канд. техн. наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» АлтГТУ.
E-mail: guriyevma@mail.ru.

Деев В.Б. — докт. техн. наук, проф., гл. науч. сотр. лаборатории «Ультрамелкозернистые металлические материалы», проф. кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4); проф. факультета машиностроения и автоматизации Уханьского текстильного университета.
E-mail: deev.vb@mail.ru.

Логинова М.В. — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. проблемной научно-исследовательской лаборатории самораспространяющегося высокотемпературного синтеза АлтГТУ. E-mail: logi_m@mail.ru.

Для цитирования: Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Деев В.Б., Логинова М.В. Влияние состава борсодержащей активной среды в виде обмазки на структуру и свойства диффузионного слоя деталей из титана. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 1. С. 60–66. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-1-60-66.

Influence of the composition of a boron-containing active medium in the form of a coating on the structure and properties of a diffusion layer on titanium parts

A.M. Guryev^{1,2}, S.G. Ivanov¹, M.A. Guryev¹, V.B. Deev^{2,3}, M.V. Loginova¹

¹ Polzunov Altai State Technical University (ASTU), Barnaul, Russia

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

³ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

Received 01.07.2021, revised 03.10.2021, accepted for publication 05.10.2021

Abstract: A comparative study of VT-1.0 titanium boriding, carboboronizing and borosiliconizing methods was carried out in order to increase wear resistance in aggressive environments at elevated temperatures. The microstructure of diffusion coatings was investigated, their thickness and microhardness were determined. Diffusion saturation of $10 \times 10 \times 25$ mm VT-1.0 titanium samples was carried out from saturating coatings based on boron carbide. Process temperature of 950 °C, and saturation time of 1.5 h were used as saturation conditions. At the end of high-temperature exposure, samples were removed from the furnace and cooled in air to room temperature, cleaned from saturating coatings with wooden spatulas, and boiled in the soap and soda solution for 1 h. A continuous diffusion layer 80–100 µm thick forms on the titanium surface. The borosiliconized diffusion layer obtained by titanium saturation from the mixture of 45%B₄C–5%Na₂B₄O₇–22%Si–5%NaF–3%NaCl–20%CrB₂ has a higher microhardness: 1520 HV_{0.1} versus 1280 HV_{0.1} for carboboride one and 1120 HV_{0.1} for boride one. In this case, boride and carboboride coatings, obtained, respectively, by saturation from 45%B₄C–5%Na₂B₄O₇–5%NaF–25%Al₂O₃–20%CrB₂ and 70%B₄C–5%Na₂B₄O₇–5%NaF–20%CrB₂ coatings have a pronounced zonal structure. The upper zone of these coatings having high microhardness also features high brittleness indicators, which makes it impossible to accurately measure microhardness distribution due to chipping and cracking at microhardness measurement points. The qualitative composition of coatings on titanium was studied by X-ray diffraction using the DRON-6 X-ray diffractometer in filtered CuK_α radiation ($\lambda = 1.5418$ Å) in the angle range of $2\theta = 20 \div 80^\circ$. The diffusion coating exhibits reflections of titanium carbide, chromium and titanium borides, and a certain amount of the Cr₂Ti intermetallic compound. Boride phases of chromium and titanium refer to high boron phases with high specific boron content: TiB, CrB, Ti₂B₅, Ti₃B₄ и Cr₂B₃.

Keywords: titanium, hardening, structure, boriding, chemical heat treatment.

Guryev A.M. — Dr. Sci. (Eng.), prof., head of the Department of descriptive geometry and graphics of the Polzunov Altai State Technical University (ASTU) (656038, Russia, Barnaul, Lenin pr., 46); prof. of the School of Mechanical engineering and automation of the Wuhan Textile University (Textile Road, 1, Hongshan District, Wuhan, 430073, P.R. China).
E-mail: guriyevam@mail.ru.

Ivanov S.G. — Dr. Sci. (Eng.), leading researcher of scientific management of the ASTU. E-mail: serg225582@mail.ru.

Guryev M.A. — Cand. Sci. (Eng.), assistant prof. of the Department of mechanical engineering technologies and equipment of the ASTU. E-mail: serg225582@mail.ru.

Deev V.B. — Dr. Sci. (Eng.), chief researcher of the Laboratory «Ultrafine-grained metallic materials», prof. of the Department of metal forming, National University of Science and Technology «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4); prof. of the School of mechanical engineering and automation of the Wuhan Textile University. E-mail: deev.vb@mail.ru.

Loginova M.V. — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the Problem research laboratory for self-propagating high-temperature synthesis of the ASTU. E-mail: logi_m@mail.ru.

For citation: Guryev A.M., Ivanov S.G., Guryev M.A., Deev V.B., Loginova M.V. Influence of the composition of a boron-containing active medium in the form of a coating on the structure and properties of a diffusion layer on titanium parts. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 1. P. 60–66 (In Russ.).
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-1-60-66.

Введение

Титан и его сплавы являются перспективными материалами для изготовления узлов насосов для агрессивных жидкостей, а также быстро движущихся деталей машин (например, кулисы и другие механизмы ткацких станков) за счет уникального сочетания таких свойств, как высокая удельная прочность, коррозионная стойкость и малая удельная масса, по сравнению со сплавами железа и алюминия. Основным недостаток, ограничивающий использование титана и титановых сплавов в

промышленности — высокая стоимость титана в сочетании с трудностью его обработки, что в конечном итоге значительно увеличивает себестоимость деталей.

Существенным фактором, который способен повысить перспективы применения титана и его сплавов в промышленности, является применение различных покрытий, позволяющих в значительной мере улучшить эксплуатационные свойства деталей. К наиболее доступному спо-

собу упрочнения титана и его сплавов относится химико-термическая обработка: цементация, борирование, силицирование и т.п. [1–6]. Карбид титана, а также силициды и бориды титана имеют высокие показатели твердости, износо- и коррозионной стойкости, превышающие таковые для аналогичных соединений железа [7]. Насыщение титановых сплавов углеродом считается малоэффективным процессом из-за малой толщины работоспособных карбидных слоев на поверхности, не превышающей 10–15 мкм. При большей их толщине наблюдаются трещинообразование и скол диффузионных покрытий. Получение диффузионных боридных покрытий на титановых сплавах является достаточно эффективным способом упрочнения: толщина боридных слоев может достигать величины более 100 мкм. Однако боридные слои имеют низкую коррозионную стойкость в условиях агрессивных кислородсодержащих сред при повышенных температурах, поэтому в этих условиях можно рекомендовать использовать силицидные покрытия на титане и его сплавах [5, 8, 9]. Исследование процессов диффузионного многокомпонентного насыщения титановых сплавов бором одновременно с хромом, углеродом и кремнием с целью повышения износостойкости покрытия в условиях агрессивных сред при повышенных температурах является актуальной задачей.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ способов борирования, карбоборирования и боросилицирования титана марки ВТ1-0 с целью повышения износостойкости диффузионных покрытий в условиях агрессивных сред и повышенных температур. Исследована микроструктура покрытий, определена их толщина и микротвердость.

Методика исследований

Диффузионное насыщение образцов из титана ВТ1-0 проводили в камерной печи сопротивления СНОЛ 80/12 (АВ «Umega», Литва). Размеры образ-

цов составляли 10×10×25 мм, насыщение осуществляли из обмазок, составы которых приведены в таблице. Режим насыщения при этом выбирали исходя из рекомендаций [10–17]: температура процесса — 950 °С, время насыщения — 1,5 ч. Печь была оборудована ПИД-контроллером марки «Термодат 16Е3». По окончании высокотемпературной выдержки образцы извлекали из печи и охлаждали на воздухе до комнатной температуры. После остывания насыщающую обмазку счищали с образцов деревянными шпателями, а сами образцы кипятили в мыльно-содовом растворе в течение 1 ч.

Далее образцы разрезались на прецизионном отрезном станке MICRACUT-201 (фирма «Metkon», Турция). Для резки использовали абразивные круги из кубического нитрида бора на бакелитовой связке. Отрезанные темплеты запрессовывали в эпоксидный компаунд на металлографическом прессе METAPRESS (компания «Metapress», Великобритания), затем производили шлифовку и полировку на автоматическом шлифовально-полировальном станке DIGIPREP (SCP Science, Канада) по методикам, описанным в [18–20]. Травление металлографических шлифов выполняли в реактиве Кролла [21]. Фиксацию микроструктуры осуществляли при помощи программно-аппаратного комплекса «Thixomet PRO» и металлографического микроскопа «Zeiss Axio Observer Z1m» (Carl Zeiss, Германия) [22–25]. Рентгенографические исследования качественного состава покрытий на титане проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6 (НПП «Буревестник», г. С.-Петербург) в фильтрованном CuK_α -излучении ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) в интервале углов $2\theta = 20^\circ\div 80^\circ$.

Результаты и их обсуждение

Микроструктура диффузионных слоев на титане ВТ1-0 представлена на рис. 1–3.

Как видно из рис. 1, на поверхности титана образуется непрерывный диффузионный слой тол-

Химический состав использованных насыщающих сред, мас.%

Chemical composition of saturating media used, wt.%

Смесь	B_4C	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}$	NaF	CrB_2	Al_2O_3	Si	NaCl
1	45	5	5	20	25	—	—
2	70	5	5	20	—	—	—
3	45	5	5	20	—	22	3

щиной порядка 80—100 мкм, который можно отчетливо разделить на 3 зоны. Как зоны, так и сам диффузионный слой имеют четкие границы. Показатели распределения микротвердости диффузионных покрытий приведены на рис. 4.



Рис. 1. Боридный слой на титане VT1-0 (смесь 1)
Fig. 1. Boride layer on VT-1.0 titanium (Mixture 1)



Рис. 2. Карбоборидный слой на титане VT1-0 (смесь 2)
Fig. 2. Carboboride layer on VT-1.0 titanium (Mixture 2)

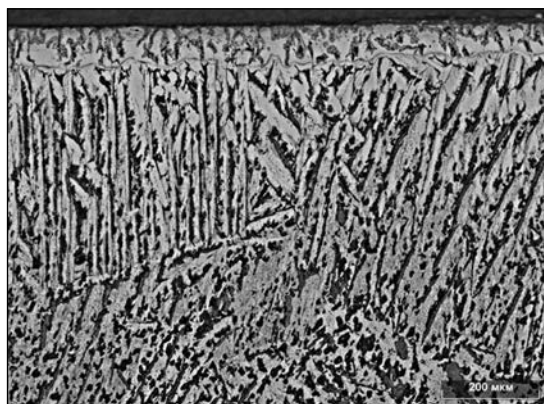


Рис. 3. Боросилицированный слой на титане VT1-0 (смесь 3)
Fig. 3. Borosiliconized layer on VT-1.0 titanium (Mixture 3)

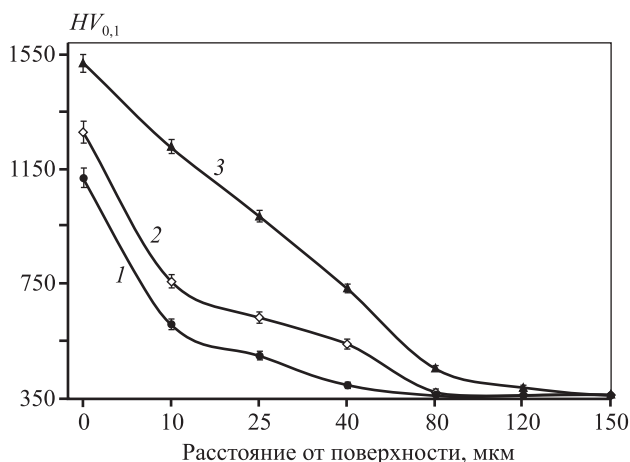


Рис. 4. Распределение микротвердости по сечению диффузионных покрытий на титане VT1-0
Обозначение кривых соответствует номерам смесей

Fig. 4. Microhardness distribution by diffusion coating cross sections on VT-1.0 titanium

Designation of curves corresponds to the numbers of mixtures

Как видно из рис. 1—4, толщина диффузионных покрытий на титане VT1-0 составляет порядка 80 мкм за исключением боросилицированного диффузионного слоя — его толщина достигает 100 мкм. При этом боросилицированный диффузионный слой имеет более высокую микротвердость (1520 $HV_{0.1}$) по сравнению с карбоборидным (1280 $HV_{0.1}$) и боридным (1120 $HV_{0.1}$). Боридное и карбоборидное покрытия характеризуются ярко выраженным зональным строением. Верхняя зона этих покрытий, обладая высокой микротвердостью, также имеет и высокие показатели хрупкости, что не позволяет точно замерить показатели распределения микротвердости в силу выкрашивания и трещинообразования в местах измерения.

Результаты дифрактометрии представлены на рис. 5. Как видно из приведенных рентгенограмм, при насыщении из смеси 1 (рис. 5, а) в диффузионном покрытии наблюдаются рефлексы карбида титана, а также боридов хрома и титана, присутствует также некоторое количество интерметаллида Cr_2Ti . При этом следует отметить, что боридные фазы хрома и титана относятся к высокобористым фазам с высоким удельным содержанием бора: TiB , CrB , Ti_2B_5 . Образование карбида титана TiC , вероятнее всего, произошло в результате высвобождения свободного углерода при распаде карбида бора и последующем его захвате титаном.

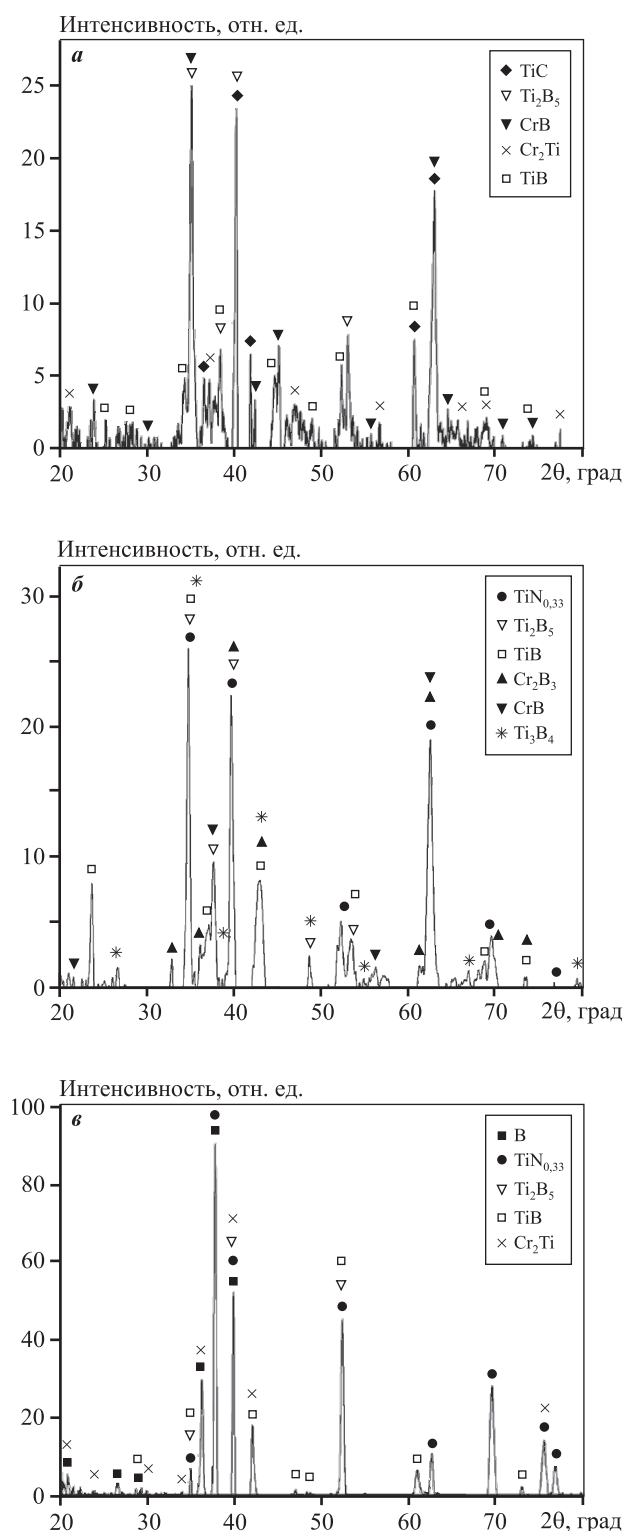


Рис. 5. Дифрактограммы диффузионных покрытий на титане VT1-0 после насыщения из смесей 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

Fig. 5. XRD patterns of diffusion coatings on VT-1.0 titanium after saturation from mixtures 1 (a), 2 (b) and 3 (c)

Исключение из насыщающей смеси инертной добавки оксида алюминия Al_2O_3 (смесь 2) привело к формированию диффузионного покрытия, в котором отсутствует интерметаллид Cr_2Ti , но при этом появляется нитрид титана $\text{TiN}_{0,33}$, который образовался, очевидно, в результате захвата титаном азота воздуха в процессе диффузионного насыщения (рис. 5, б).

Кроме того, в диффузионном покрытии присутствуют преимущественно бориды титана с повышенным содержанием бора: Ti_2B_5 , TiB , Ti_3B_4 , а также бориды хрома с повышенным содержанием бора: CrB и Cr_2B_3 . При замене оксида алюминия порошком кремния (смесь 3) в диффузионном покрытии появляются рефлексы бора (рис. 5, в).

Наиболее вероятно, что бор содержится в поверхностном слое диффузионного покрытия. Так, при шлифовке поверхности боросилицированного образца на глубину 50 мкм рефлексы бора исчезают. Большую толщину диффузионного покрытия на титане VT1-0 в случае боросилицирования, по сравнению с борированием и карбоборированием, можно объяснить тем, что образовавшийся на поверхности образца элементарный бор имеет более высокую диффузионную и химическую активность [26—34].

Выводы

1. Показана возможность получения боридных покрытий на титановом сплаве VT1-0 из обмазок, содержащих в качестве основных насыщающих компонентов карбид бора и диборид хрома.

2. При насыщении титана VT1-0 из обмазок составами (%) $45\text{B}_4\text{C}-5\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7-5\text{NaF}-25\text{Al}_2\text{O}_3-20\text{CrB}_2$ и $70\text{B}_4\text{C}-5\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7-5\text{NaF}-20\text{CrB}_2$ образуются многослойные диффузионные покрытия толщиной 80—100 мкм. Верхний слой этих покрытий, толщиной порядка 20—40 мкм, имеет высокую пористость, хрупкость и поэтому обладает низкими эксплуатационными характеристиками.

3. При насыщении титана VT1-0 из обмазки $45\text{B}_4\text{C}-5\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7-22\text{Si}-5\text{NaF}-3\text{NaCl}-20\text{CrB}_2$, содержащей порошок кремния, получающийся диффузионный слой обладает высокими эксплуатационными свойствами по причине отсутствия высокопористой составляющей.

Все металлографические исследования выполнены в Центре коллективного пользования АлтГТУ (г. Барнаул).

Acknowledgments. All metallographic studies were conducted in the common use center of the Altai State Technical University (Barnaul).

Литература/References

1. Baruwa A.D., Akinlabi E.T., Oladijo O.P. Surface coating processes: from conventional to the advanced methods (A short review). In: *Selected articles from ICMMPPE 2019. Advances manufacturing engineering. Lecture notes in mechanical engineering*. Singapore: Springer, 2020. P. 483—494. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5753-8_44.
2. Ovcharenko P.G., Makhneva T.M., Shabanova I.N., Terebova N.S. Composition of surface layers of titanium alloy after electrospark alloying. *Metal Sci. Heat Treat.* 2020. Vol. 62. P. 195—198. DOI 10.1007/s11041-020-00553-w.
3. Hossam A. Kishawy, Ali Hosseini. Machining difficult-to-cut materials. Basic principles and challenges. Springer Intern. Publ. AG. Part of Springer Nature, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95966-5>.
4. Тюрнина З.Г., Тюрнина Н.Г. Формирование износостойких и коррозионно-стойких покрытий на титане. *Физика и химия стекла*. 2012. Т. 38. №. 6S. С. 905—909.
Tyurnina Z.G., Tyurnina N.G. Formation of wear-resistant and corrosion-resistant coatings on titanium. *Fizika i khimiya stekla*. 2012. Vol. 38. No. 6S. P. 905—909 (In Russ.).
5. Li C., Li M.S., Zhou Y.C. Improving the surface hardness and wear resistance of Ti_3SiC_2 by boronizing treatment. *Surface Coat. Technol.* 2007. No. 201. P. 6005—6011. DOI:10.1016/j.surfcoat.2006.11.008.
6. Lizhi Liu. Surface hardening of titanium alloys by gas phase nitridation under kinetic control: Diss. of PhD. Cleveland: Case Western Reserve University, 2005. URL: https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_etd/send_file/send?accession=case1094223428&disposition=inline (accessed: 29.07.2021).
7. Liu Y., Xu X., Xiao Y., Niu T., Tabie T., Li Chong, Li Chen. High-temperature oxidation behavior of Al-modified boronized coating prepared on Ti—6Al—4V by thermal diffusion. *J. Mater. Eng. Perform.* 2020. Vol. 29. P. 6503—6512. DOI: 10.1007/s11665-020-05170-5.
8. Matsushita M. Boronization and carburization of superplastic stainless steel and titanium-based alloys. *Materials*. 2011. Vol. 4. P. 1309—1320. DOI: 10.3390/ma4071309.
9. Li Y., Su K., Bai P. Effect of TiBCN content on microstructure and properties of laser cladding Ti/TiBCN composite coatings. *Met. Mater. Int.* 2019. Vol. 25. P. 1366—1377. DOI: 10.1007/s12540-019-00287-2.
10. Kobeleva L.I., Bolotova L.K., Kalashnikov I.E., Mikheev R.S., Kolmakov A.G. Effect of microcrystalline boron particles on structure and tribological properties of welded B83 babbitt layers. *Inorg. Mater.: Appl. Res.* 2020. Vol. 11. P. 1—6. DOI: 10.1134/S2075113320010207.
11. Ivanov S.G., Guriev A.M., Starostenkov M.D., Ivanova T.G., Levchenko A.A. Special features of preparation of saturating mixtures for diffusion chromoborating. *Russ. Phys. J.* 2014. Vol. 57. P. 266—269.
12. Ivanov S.G., Guriev M.A., Loginova M.V., Deev V.B., Guriev A.M. Boriding of titanium OT4 from powder saturating media. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2017. Vol. 58. P. 244—249. DOI: 10.3103/S1067821217030051.
13. Guryev A., Ivanov S., Guryev M., Mei S., Quan Z. Complex diffusion saturation of carbon steel 1045 with boron, chromium, titanium and silicon. *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.* 2021. Vol. 1100. P. 012048. DOI: 10.1088/1757-899X/1100/1/012048.
14. Garmaeva I.A., Guriev A.M., Ivanova T.G. Comparative study of saturating power boriding media of different composition. *Lett. Mater.* 2016. Vol. 6. P. 262—265. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-4-262-265.
15. Hüseyin Ç., Kemal Ö.M., Hasan A., Mehmet L.A. Boriding titanium alloys at lower temperatures using electrochemical methods. *Thin Solid Films*. 2007. No. 515. P. 5348—5352. DOI:10.1016/j.tsf.2007.01.020.
16. Song Jz., Tang W., Huang Jw., Wang Zk., Fan Xm., Wang Kh. Effects of boronizing treatment on microstructural development and mechanical properties of additively manufactured TC4 titanium alloys. *J. Iron Steel Res. Int.* 2019. Vol. 26. P. 329—334. DOI: 10.1007/s42243-018-0216-y.
17. Fenghua L., Xiaohong Y., Jinglei Z., Zhanguo F., Dianting G., Zhengping X. Growth kinetics of titanium boride layers on the surface of Ti_6Al_4V . *Acta Metall. Sin. A*. 2010. Vol. 23. P. 293—300.
18. Иванов С.Г., Гурьев М.А., Гурьев А.М., Романенко В.В. Фазовый анализ боридных комплексных диффузионных слоев на углеродистых сталях при помощи цветного травления. *Фундам. пробл. современного материаловедения*. 2020. Т. 17. №. 1. С. 74—77.
Ivanov S.G., Guryev M.A., Guryev A.M., Romanenko V.V. Phase analysis of boride complex diffusion layers on carbon steels using color etching. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2020. Vol. 17. No 1. P. 74—77 (In Russ.).
19. Kazakov A.A., Ryaboshuk S.V., Lyubochko D.A., Chigintsev L.S. Research on the origin of nonmetallic inclusions in high-strength low-alloy steel using automated feature analysis. *Microsc. Microanal.* 2015. Vol. 21. P. 1755—1756. DOI: 10.1017/S1431927615009551.
20. Vander Voort G.F., Pakhomova O., Kazakov A. Evaluation

- of normal versus non-normal grain size distributions. *Mater. Perform. Character.* 2016. Vol. 5. P. 521–534. DOI: 10.1520/MPC20160001.
21. ASM Handbook. Vol. 9: Metallography and microstructures. Ed. G.F. Vander Voort. ASM International, 2004. DOI: 10.31399/asm.hb.v09.9781627081771.
22. Kazakov A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure. *Metallogr. Microstruct. Anal.* 2016. Vol. 5. P. 294–301. DOI 10.1007/s13632-016-0289-6.
23. Vander Voort G.F. Computer-aided microstructural analysis of specialty steels. *Mater. Character.* 1991. Vol. 27. P. 241–260. DOI: 10.1016/1044-5803(91)90040-B.
24. Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I. Methodological features of microstructural heterogeneity estimation by the thickness of steel plates. *Chernye Metally.* 2021. No. 7. P. 65–75. DOI: 10.17580/chm.2021.07.06.
25. Kazakov A., Kovalev P., Ryaboshuk S. Metallurgical expertise as the base for determination of nature of defects in metal products. *CIS Iron Steel Rev.* 2007. Vol. 1–2. P. 7.
26. Liu Y., Chai L., Ma X., Cui Y., Chen Z., Xiang Z. Effect of boron addition methods on microstructure and mechanical properties of a near- α titanium alloy. In: *Physics and engineering of metallic materials. CMC 2018. Springer proceedings in physics.* Vol. 217. Singapore: Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-981-13-5944-6_6.
27. Chkhartishvili L., Tsagareishvili O., Mikeladze A., Chedia R., Kvatchadze V., Ugrehelidze V. Highly stable boron carbide based nanocomposites. In: *Handbook of nanomaterials and nanocomposites for energy and environmental applications.* Springer, Cham., 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-11155-7_81-1.
28. Jiancheng G. High-pressure sintering of boron carbide-titanium diboride composites and its densification mechanism. *J. Wuhan Univer. Technol-Mater. Sci.* 2020. Vol. 35. DOI 10.1007/s11595-020-2264-y.
29. Biplab Sarma. Accelerated kinetics and mechanism of growth of boride layers on titanium under isothermal and cyclic diffusion: Diss. of PhD. Utah: University of Utah, 2011. URL: <https://www.proquest.com/docview/858204585> (accessed: 29.07.2021).
30. Huang Y.G., Chen J.R., Zhang M.L., Zhong X.X., Wang H.Q., Li Q.Yu. Electrolytic boronizing of titanium in $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ –20% K_2CO_3 . *Mater. Manufact. Proces. A.* 2013. Vol. 28. P. 1310–1313.
31. Vadchenko S.G. Dependence of the burning rates of tapes of Ti + xB mixtures on boron concentration. *Combust. Explos. Shock Waves.* 2019. Vol. 55. P. 177–183. DOI: 10.1134/S0010508219020060.
32. Aich S., Chandran K.S., Ravi Ch. TiB Whisker coating on titanium surfaces by solid-state diffusion: synthesis, microstructure, and mechanical properties. *Metall. Mater. Trans.* 2002. Vol. 33A. P. 3489–3498.
33. Malkin I., Klyuev V., Popov D., Ryazantseva A., Savenko V. Physical and chemical mechanics of the synthesis of boron-containing composite powders. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2020. Vol. 94. P. 490–495. DOI: 10.1134/S0036024420030206.
34. Sanders A., Tikekar N., Lee C., Chandran K. Surface hardening of titanium articles with titanium boride layers and its effect on substrate shape and surface texture. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2010. Vol. 131. P. 1–8.