

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.791:621.771

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.015

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДИФфуЗИОННЫХ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЦЕМЕНТОВАННОЙ СТАЛИ 30ХГСА

Сергей Геннадьевич Иванов^{1†}, Алексей Михайлович Гурьев², Михаил Алексеевич Гурьев³, Иван Владимирович Сентябов⁴, Евгения Владимировна Черных⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, 656038, Барнаул, Россия

² Уханьский текстильный университет, ул. ФангЖи, 1, 430073, Ухань, КНР

¹ serg225582@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

² gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

³ gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

⁴ ru.0908@mail.ru

⁵ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

Аннотация. В работе представлены исследования микроструктуры и микротвердости многокомпонентных диффузионных боридных покрытий, формирующихся на поверхности предварительно цементованной стали 30ХГСА. Диффузионные покрытия на предварительно цементованной стали 30ХГСА получены одновременным диффузионным насыщением бором, хромом, титаном и кремнием. Металлографический анализ осуществляли при помощи металлографического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer Z1m» и программного комплекса «TixioMet PRO». Показана целесообразность применения совмещенного с цементацией процесса многокомпонентного борирования. Предварительная цементация стали 30ХГСА позволяет получить более высокие показатели микротвердости, чем в случае комплексного бор-хром-титаносилицирования без предварительной цементации. При термической обработке поверхностная микротвердость диффузионного покрытия уменьшается с 1980 до 1160 HV_{0,1}. При этом толщина диффузионного покрытия увеличивается в 3 раза.

Ключевые слова: цементация, борирование, боросилицирование, химико-термическая обработка, диффузионный слой, упрочнение, сталь, износостойкость, микротвердость.

Благодарности: Исследования выполнены в Центре коллективного пользования АлтГТУ.

Для цитирования: Иванов С.Г., Гурьев А.М., Гурьев М.А., Сентябов И.В., Черных Е.В. Исследование структуры и свойств многокомпонентных диффузионных боридных покрытий, формирующихся на поверхности цементованной стали 30ХГСА // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 2. С. 267–275. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.015.

Original article

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTICOMPONENT DIFFUSION BORIDE COATINGS FORMED ON THE SURFACE OF CEMENTED STEEL 30KhGSA

Sergey G. Ivanov^{1†}, Alexey M. Guryev², Mikhail A. Guryev³, Ivan V. Sentyabov⁴, Evgeniya V. Chernykh⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} I.I. Polzunov Altai State Technical University, Lenin Pr., 46, Barnaul, 656038, Russia

² Wuhan Textile University, FangZhi Road, 1, Wuhan, 430073, China

¹ serg225582@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-5965-0249>

² gurievam@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7570-8877>

³ gurievma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9191-1787>

⁴ ru.0908@mail.ru

⁵ jane_5@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1128-8471>

Abstract. The paper presents studies of the microstructure and microhardness of multicomponent diffusion boride coatings formed on the surface of pre-hardened 30KhGSA steel. Diffusion coatings on pre-hardened 30KhGSA steel were obtained by simultaneous diffusion saturation with boron, chromium, titanium, and silicon. Metallographic analysis was carried out using metallographic microscope «Carl Zeiss Axio Observer Z1m» and the «ThixoMet PRO» software package. The expediency of using the multicomponent boriding process combined with cementation is shown. Preliminary carburizing of 30KhGSA steel makes it possible to obtain higher microhardness indices than in the case of complex boron-chromium-titanosiliconation without preliminary carburizing. During heat treatment, the surface microhardness of the diffusion coating decreases from 1980 to 1160 HV_{0.1}. In this case, the thickness of the diffusion coating is increased by 3 times.

Keywords: carburizing, boriding, borosiliconizing, chemical-thermal treatment, diffusion layer, hardening, steel, wear resistance, microhardness.

Acknowledgements: The studies were carried out at the Center for Collective Use of AltSTU.

For citation: Ivanov, S. G., Guryev, A. M., Guryev, M. A., Sentyabov, I. V. & Chernykh, E. V. (2022). Investigation of the structure and properties of multicomponent diffusion boride coatings formed on the surface of cemented steel 30KhGSA. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(19), 267–275. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.015.

Введение

Технический прогресс во многих областях науки и техники непосредственно связан с повышением качеством стали. По данным международного металлургического общества значительные экономические потери в основном происходят из-за трения, коррозии и износа ответственных стальных деталей и инструмента. Для обеспечения новых высоких свойств сталей необходимо улучшать качество их поверхностных слоев, поскольку именно поверхность испытывает максимальные нагрузки и в наибольшей степени разрушается вследствие коррозии. В этой связи разработка и внедрение эффективных защитных покрытий, в том числе диффузионных является приоритетной задачей физического материаловедения.

В ряде случаев химико-термическая обработка (ХТО) оказывается единственно возможным средством получения требуемых эксплуатационных свойств детали и изделия в целом [1-3]. Наиболее предпочтительным методом ХТО является диффузионное борирование из-за своего широкого спектра применения в промышленности. При таком процессе поверхностного упрочнения образуется многофазный слой, состоящий из железа и боридов металлов. Формирование боридных слоев улучшает поверхностные свойства стали: твердость, износостойкость с точки зрения адгезии, истирания, поверхностная усталость, коррозионная стойкость в некоторых кислотных или щелочных средах.

Следует заметить, что наиболее эффективные износостойкие и коррозионностойкие слои

могут быть получены за счет многокомпонентного диффузионного боридного насыщения поверхности стали различными химическими элементами [4-9].

Так, например, авторами [10-12] теоретически и экспериментально проработана технология химико-термической обработки сталей с применением совмещенного диффузионного насыщения бором, хромом и титаном, что позволило достигнуть повышения механических и служебных свойств диффузионного слоя по сравнению с двухкомпонентным насыщением бором и хромом.

Результаты, полученные в [13] показали целесообразность дополнительного насыщения борированных слоев сталей легирующими элементами (Cr, V и Ti) с целью повышения коррозионной стойкости.

В работах [14, 15] изучены особенности кинетики формирования диффузионных слоев на поверхности углеродистых сталей в процессе боросилицирования. По сравнению с борированием использование боросилицирования более эффективно, так как повышает сопротивлению хрупкому разрушению диффузионно-упрочненных поверхностей деталей при их работе в условиях динамических воздействий в процессе изнашивания, а также значительного повышения коррозионной стойкости.

Целью настоящей работы являлось исследование структуры и свойств многокомпонентных диффузионных боридных покрытий, формирующихся на поверхности предварительно цементованной стали 30ХГСА. Данная работа

является продолжением исследований, начатых в [16].

В отличие от предыдущих исследований [16] получение комплексного многокомпонентного диффузионного насыщения происходило последовательно в два этапа. На первом этапе была произведена предварительная цементация стали 30ХГСА для повышения эксплуатационных характеристик диффузионного покрытия за счет создания более протяженной диффузионной зоны, полученной в процессе цементации. Далее, в ходе второго этапа химико-термической обработки проводилось многокомпонентное диффузионное насыщение поверхности стали, включающее нагрев и одно-временное насыщение такими элементами как бор, хром, титан и кремний.

Методика и материалы

Диффузионные покрытия на предварительно цементованных цилиндрических образцах из стали 30ХГСА диаметром 25 мм и высотой 40 мм получены одновременным диффузионным насыщением бором, хромом, титаном и кремнием.

Предварительную цементацию проводили в древесноугольном карбюризаторе по ГОСТ 2407-83. Процесс цементации производили в герметичном жаростойком контейнере в предварительно нагретой до 920 °С камерной печи типа СНОЛ, оснащенной ПИД-регулятором «Термодат 16-Е3», время насыщения составило 5 ч. После окончания времени насыщения, контейнер извлекали из печи, охлаждали на воздухе до комнатной температуры, распаковывали, извлекали цементованные образцы и промывали их в кипящем мыльно-содовом растворе. Затем промытые образцы шлифовали на шлифовальном станке со снятием слоя 0,1 мм для удаления дефектного поверхностного слоя, образующегося на поверхности сталей в процессе цементации [17]. После шлифовки опять промывали в кипящем мыльно-содовом растворе для удаления остатков СОЖ и протравливали в 15 % водном растворе соляной кислоты, затем в

10 % растворе каустической соды для активации поверхности.

В качестве насыщающей среды для процесса комплексного насыщения бором, хромом, титаном и кремнием использовали аналогичную, как и в предыдущей работе, обмазку следующего состава [16]: 45 масс. % B_4C +15 масс. % TiB_2 +25 масс. % CrB_2 +10 масс. % SiC +5 масс. % NH_4Cl , разведенную в воде. На образцы наносили слой обмазки толщиной 5 мм и просушивали на воздухе в течение 24 ч. Насыщение проводили в предварительно нагретой до 950 °С камерной печи типа СНОЛ, оснащенной ПИД-регулятором «Термодат 16-Е3». Время выдержки при температуре насыщения составляло 2,5 ч. По окончании выдержки часть образцов извлекали из печи и охлаждали на спокойном воздухе, другую часть подвергали закалке с температуры насыщения с последующим низким отпуском при температуре 200 °С в течение 2 ч. После остывания образцов, остатки насыщающей обмазки смывали водой, затем образцы промывали в кипящем мыльно-содовом растворе [17-22].

Из приготовленных образцов вырезали темплеты для металлографического анализа. Вырезку темплетов осуществляли на прецизионном отрезном станке «Microcut-201», затем осуществляли запрессовку темплетов в бакелитовый компаунд при помощи металлографического прессы «MetaPress». Шлифовку и полировку осуществляли на автоматическом шлифовально-полировальном станке «DigiPrep-P».

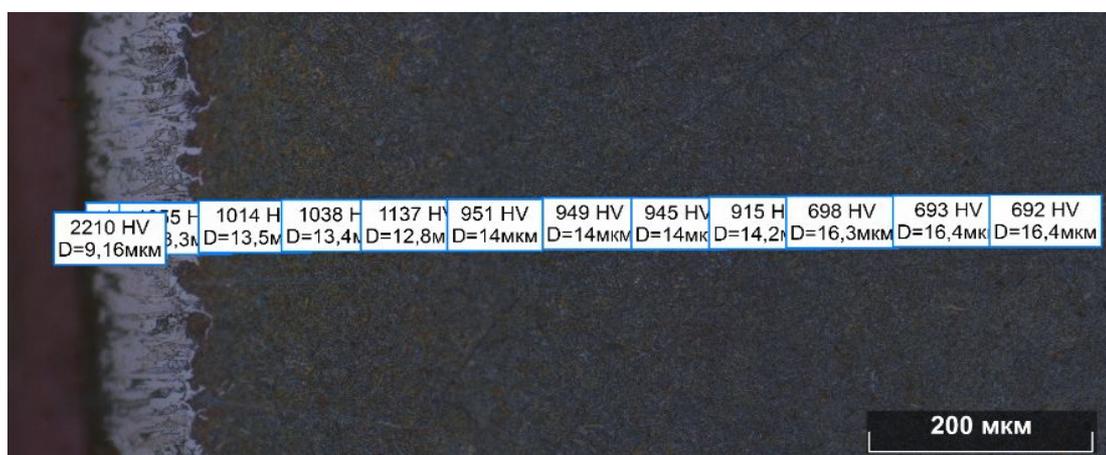
Металлографический анализ осуществляли при помощи металлографического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer Z1m» и программного комплекса «ThixoMet PRO» по методикам [23-29].

Результаты и обсуждения

Микроструктура полученных диффузионных покрытий представлена на рисунках 1 и 2. Графики распределения микротвердости по сечению диффузионного слоя представлены на рисунке 3.



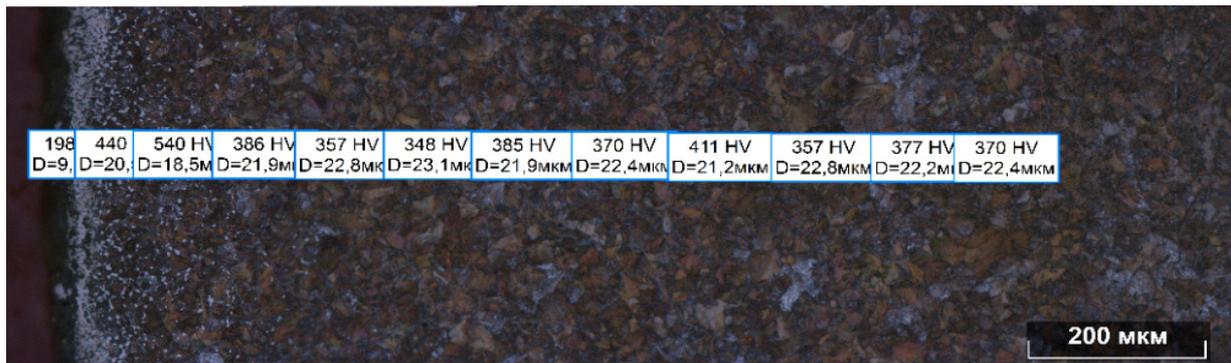
а)



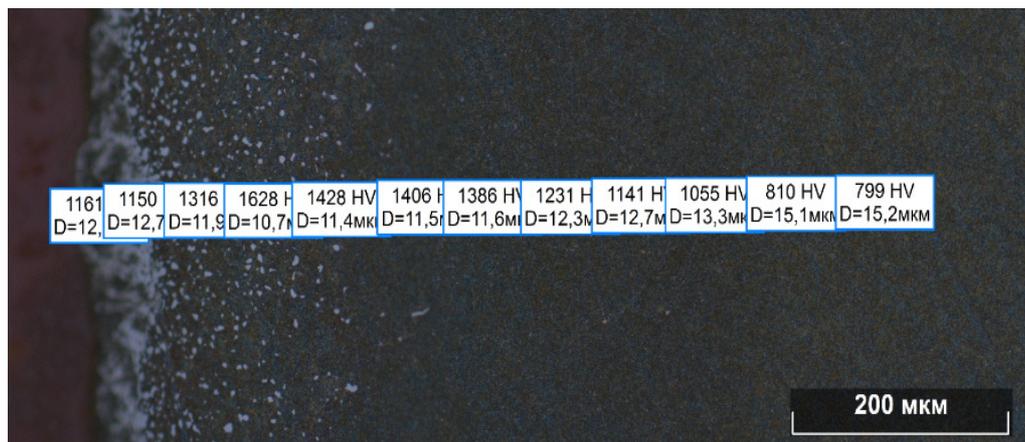
б)

Рис.1. Микроструктура диффузионного покрытия, полученного одновременным насыщением бором, хромом и титаном с отметками значений микротвердости по сечению диффузионного покрытия на предварительно цементованной стали 30ХГСА: а) образцы, охлажденные на воздухе, б) образцы, после закалки и отпуска

Fig.1. The microstructure of the diffusion coating obtained by simultaneous saturation with boron, chromium and titanium with marks of microhardness values along the cross section of the diffusion coating on pre-hardened steel 30KhGSA: a) samples cooled in air, b) samples after quenching and tempering



а)



б)

Рис.2. Микроструктура диффузионного покрытия, полученного одновременным насыщением бором, хромом, титаном и кремнием с отметками значений микротвердости по сечению диффузионного покрытия на предварительно цементованной стали 30ХГСА: а) образцы, охлажденные на воздухе, б) образцы, после закалки и отпуска

Fig.2. The microstructure of the diffusion coating obtained by simultaneous saturation with boron, chromium, titanium and silicon with marks of microhardness values along the cross section of the diffusion coating on pre-hardened steel 30KhGSA: a) samples cooled in air, b) samples after quenching and tempering

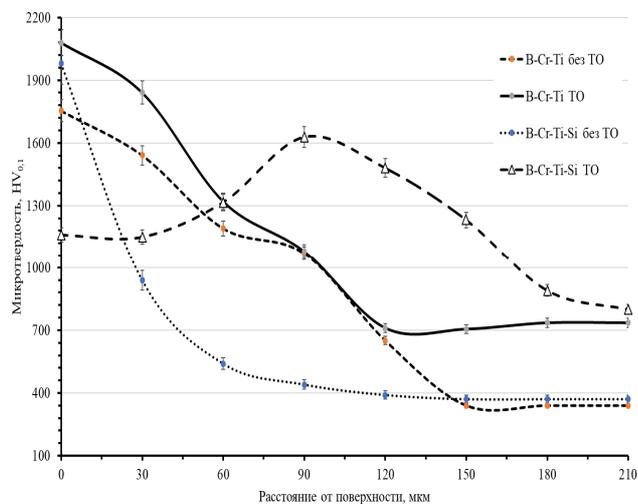


Рис.3. Распределение микротвердости по сечению диффузионного покрытия на предварительно цементованной стали 30ХГСА

Fig.3. Distribution of microhardness over the cross section of the diffusion coating on pre-hardened steel 30KhGSA

Заключение

Как видно из приведенных фотографий микроструктуры и графика распределения микротвердости, предварительная цементация стали 30ХГСА позволяет получить более высокие показатели микротвердости, чем в случае комплексного бор-хром-титаносилицирования без предварительной цементации. Кроме того, распределение микротвердости бор-хром-титаносилицированного слоя на предварительно цементованной стали 30ХГСА снижается от поверхности к сердцевине по экспоненциальному закону. В случае проведения последующей термической обработки, заключающейся в закалке с повторного нагрева до температуры 880 °С и охлаждении в масле с последующим низким отпуском при температуре 220 °С в течение 2 ч, поверхностная микротвердость диффузионного покрытия уменьшается с 1980 до 1160 HV_{0,1}. При этом толщина диффузионного покрытия увеличивается с 60 до 180 мкм, т.е. в 3 раза. Кроме того, необходимо отметить, что распределение микротвердости на предварительно цементованном бор-хром-титаносилицированном диффузионном покрытии после закалки плавно возрастает в направлении от поверхности к сердцевине и имеет максимум 1630 HV_{0,1} на глубине 90 мкм от поверхности, затем также плавно убывает. Такое распределение микротвердости более благоприятно с точки зрения повышения эксплуатационных характеристик упрочненных деталей бурового оборудования из стали 30ХГСА, так как позволяет высокопрочному диффузионному покрытию изнашиваться в первоначальные периоды эксплуатации, увеличивая, таким образом, площадь прилегания к контртелу, что позволяет снизить удельные поверхностные нагрузки на единицу площади контакта. В свою очередь, это благоприятно сказывается на повышении общего ресурса работы упрочненных деталей и всего механизма в целом.

Список литературы

1. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гармаева И.А. Диффузионные покрытия сталей и сплавов. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. 221 с.
2. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
3. Ворошнин Л.Г. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Спр. / Под ред. Л. С. Ляховича. М.: Металлургия, 1981. 424 с.
4. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов: справочное пособие. Мн.: «Беларусь», 1981. 205 с.
5. Ляхович Л.С., Ворошнин Л.Г., Панич Г.Г., Щербаков Э.Д. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1974. 288 с.
6. 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 // Russian Physics Journal. 2014. V. 57, N 2. P. 266–269.
7. Sizov I.G., Mishigdorzhijn U.L., Makharov D.M. A study of thermocycling boronizing of carbon steels // Metal Science and Heat Treatment. 2012. V. 53, N 11-12. P. 592–597.
8. Сизов И.Г., Полянский И.П., Мишигдоржийн У.Л., Махаров Д.М. Влияние состава насыщающих обмазок на структуру и свойства бороалитированного слоя // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2013. № 1 (58). С. 22–25.
9. Сизов И.Г., Смирнягина Н.Н., Семенов А.П., Прусаков Б.А., Новакова А.А., Коробков Н.В., Целовальников Б.И. Способ комбинированного борирования углеродистой стали. Патент. RU 2210617, 20.08.2003.
10. Иванов С.Г. Развитие теоретических и технологических основ химико-термической обработки сталей и сплавов с применением совмещенного диффузионного насыщения бором, хромом и титаном: дис. ... докт. технич. наук. Барнаул, 2020. 356 с.
11. Ivanov S.G., Garmayeva I.A., Guriev M.A., Guriev A.M., Starostenkov M.D. Features of multicomponent saturation alloyed by steels // Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series. Cham. 2015. С. 49–53.
12. Гурьев М.А., Гурьев А.М., Иванов С.Г., Черных Е.В. Влияние химического состава стали на структуру и свойства диффузионных покрытий, полученных одновременным насыщением бором, хромом и титаном конструкционных сталей // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18, № 2. С. 236–243.
13. Тельдеков В.А., Гуревич Л.М. Структура и свойства формирующихся в расплавах многокомпонентных боридных и карбидных покрытий // Известия ВолГТУ. 2020. № 4(239). С. 69–75.

14. Ситкевич М.В., Старовойтова Е.М. Диффузионное насыщение стальных деталей элементами комплексов B-Si, B-C-N в порошках и обмазках без использования специального оборудования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 11 (23). С. 19–24.
15. Ситкевич М.В., Старовойтова Е.М., Кузменко Н.Н. Использование борирования и боросилицирования при различных параметрах для повышения свойств сталей // Металлургия : республиканский межведомственный сборник научных трудов / редкол.: В. И. Тимошпольский (гл. ред) [и др.]. Минск : БНТУ, 2008. Вып. 31. С. 342–349.
16. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Гурьев М.А., Сентябов И.В., Черных Е.В. Исследование влияния термодиффузионного боросилицирования на структуру и свойства стали 30ХГСА // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 1. С. 132–139.
17. ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures. 2004. P. 493–512.
18. Власова О.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Гурьев А.М. Повышение прочности диффузионных карбоборидных покрытий термоциклированием в процессе их получения // В сб.: Наука и молодежь – 2007 (НиМ – 2007). 2007. С. 110–112.
19. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Иванова Т.Г. Химико-термическая обработка материалов для режущего инструмента. Известия высших учебных заведений // Черная металлургия. 2015. Т. 58, № 8. С. 578–582.
20. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Лыгденев Б.Д., Земляков С.А., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей. Пат. RU 2345175 С1, 27.01.2009. Заявл. № 2007112368/02 от 03.04.2007.
21. Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Гурьев А.М. Влияние добавок легирующих элементов в обмазку на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного насыщения стали // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 7. С. 170–172.
22. Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М. Оценка скорости диффузии бора и хрома при различных режимах диффузионного упрочнения поверхности стали Ст3 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. Т. 9, № 2. С. 248–251.
23. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Русакова А.В., Гурьев М.А., Старостенков М.Д. Микроструктура поверхности многокомпонентных диффузионных покрытий на основе бора // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10, № 1. С. 130–133.
24. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А., Романенко В.В. Особенности методики подготовки образцов для автоматического анализа карбидной фазы стали x12ф1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса "Thixomet PRO" // Ползуновский вестник. 2020. № 2. С. 165–168.
25. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Черных Е.В. Выявление фазового состава боридных покрытий методами цветного травления // Ползуновский альманах. 2020. № 3. С. 19–23.
26. 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 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. Т. 17, № 1. С. 74–77.
27. Guriev A.M., Mei S.Q., Guriev M.A., Chernykh E.V., Ivanov S.G. Investigation of the microstructure of diffusion coatings of carbon steel obtained by simultaneous diffusion saturation with boron, chromium and titanium // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 012077.
28. Гурьев А.М., Гурьев М.А., Земляков С.А., Иванов С.Г. Выявление особенностей морфологии и фазового состава сталей методами специального металлографического травления // В сб. тезисов XVI Международной школы-семинара «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах». Под ред. М.Д. Старостенкова. 2020. С. 83–84.
29. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А. Методика пробоподготовки образцов высоколегированных сталей для автоматического анализа карбидной фазы // Ползуновский вестник. 2020. № 3. С. 102–105.

Информация об авторах

С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, заведующий лабораторией микроскопии Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

А. М. Гурьев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, профессор Уханьского текстильного университета.

М. А. Гурьев – кандидат технических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

И. В. Сентябов – студент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Е. В. Черных – кандидат физико-математических наук, доцент Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

References

- Gur'yev, A. M., Ivanov, S. G. & Garmayeva, I. A. (2013). Diffuzionnyye pokrytiya staley i splavov. Barnaul: Izd-vo AltGTU. P. 221. (In Russ.).
- Lakhtin, Yu. M. & Arzamasov, B. N. (1985). Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov. M.: Metallurgiya. P. 256. (In Russ.).
- Voroshnin, L. G. (1981). Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov. Spr. Pod red. L. S. Lyakhovicha. M.: Metallurgiya. P. 424. (In Russ.).
- Voroshnin, L. G. (1981). Boriding of industrial steels and cast irons: a reference guide. Mn.: "Belarus". P. 1981. (In Russ.).
- Lyakhovich, L. S., Voroshnin, L. G., Panch, G. G. & Shcherbakov, E. D. (1974). Mnogokomponentnyye diffuzionnyye pokrytiya. Minsk: Nauka i tekhnika. P. 288. (In Russ.).
- Ivanov, S. G., Guriev, A. M., Starostenkov, M. D., Ivanova, T. G. & Levchenko A. A. (2014). Special features of preparation of saturating mixtures for diffusion chromoborating. *Russian Physics Journal*, 57(2), 266–269.
- Sizov, I. G., Mishigdorzhijn, U. L. & Makharov, D. M. (2012). A study of thermocycling boroaluminizing of carbon steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 53(11-12), 592–597.
- Sizov, I. G., Polyanskiy, I. P., Mishigdorzhijn, U. L. & Makharov, D. M. (2013). Vliyaniye sostava nasyshchayushchikh obmazok na strukturu i svoystva boroalitivogo sloya. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 58(1). 22–25. (In Russ.).
- Sizov, I. G., Smirnyagina, N. N., Semenov, A. P., Prusakov, B. A., Novakova, A. A., Korobkov N. V. & Tseloval'nikov, B. I. Sposob kombinirovannogo borirovaniya ughlerodistoy stali. Patent. RU 2210617, 20.08.2003. (In Russ.).
- Ivanov, S. G. (2020). Razvitiye teoreticheskikh i tekhnologicheskikh osnov khimiko-termicheskoy obrabotki staley i splavov s primeniyem sovmeshchennogo diffuzionnogo nasyshcheniya borom, khromom i titanom: dis. dokt. tekhnich. nauk. Barnaul. P. 356. (In Russ.).
- Ivanov, S. G., Garmayeva, I. A., Guriev, M. A., Guriev, A. M. & Starostenkov, M. D. (2015). Features of multicomponent saturation alloyed by steels. *Advances in Mechanical Engineering. Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series. Cham.*, 49–53.
- Guriev, M. A., Guriev, A. M., Ivanov, S. G. & Chernykh, E. V. (2021). Vliyaniye khimicheskogo sostava stali na strukturu i svoystva diffuzionnykh poverkhnostey, odnovremennym nasyshcheniyem borom, khromom i titanom. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 18(2), 236–243. (In Russ.).
- Tel'dekov, V. A. & Gurevich, L. M. (2020). Struktura i svoystva formiruyushchikhsya v rasplavakh mnogokomponentnykh boridnykh i karbidnykh pokrytiy. *Izvestiya VolGTU*, 4(239), 69–75. (In Russ.).
- Sitkevich, M. V. & Starovoytova, E. M. (2006). Diffuzionnoye nasyshcheniye stal'nykh ukrasheniy kompleksov B-Si, B-C-N v poroshkakh i obmazkakh bez ispol'zovaniya spetsial'nogo oborudovaniya. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*, 23(11), 19–24. (In Russ.).
- Sitkevich, M. V., Starovoytova, E. M. & Kuz'menko, N. N. (2008). Ispol'zovaniye borirovaniya i borosilitsirovaniya pri razlichnykh parametrah dlya priyema svoystv staley. *Metallurgiya: respublikanskiy mezhdvostvennyy sbornik nauchnykh trudov. Minsk: BNTU*. 31, 342–349. (In Russ.).
- Ivanov, S. G., Guryev, A. M., Guryev, M. A., Sentyabov, I. V. & Chernykh, E. V. (2022). Study of the influence of thermal diffusion borosiliconization on the structure and properties of steel 30KhGSA. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 19(1), 132–139.
- (2004). ASM Handbook, Volume 9: Metallography and Microstructures. P. 493–512.
- Vlasova, O. A., Ivanov, S. G., Guriev, M. A., Kosheleva, E. A. & Guriev, A. M. (2007). Povysheniye prochnosti diffuzionnykh karboboridnykh pokrytiy termotsiklirvaniyem v protsesse ikh polucheniya. V sb.: Nauka i molodezh – 2007 (NiM – 2007). C. 110–112.
- Guriev, A. M., Ivanov, S. G., Guriev, M. A., Chernykh, E. V. & Ivanova, T. G. (2015). Khimiko-termicheskaya obrabotka materialov dlya rezhushchego instrumenta. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 58(8), 578–582. (In Russ.).

20. Guriev, A. M., Ivanov, S. G., Lygdenov, B. D., Zemlyakov, S. A., Vlasova, O. A., Kosheleva, E. A. & Guriev, M. A. Sposobnost' uprochneniya detaley iz konstruksionnykh i instrumental'nykh staley. Pat. RU 2345175 S1, 27.01.2009. Zayavl. N 2007112368/02 ot 03.04.2007. (In Russ.).
21. Ivanov, S. G., Guriev, M. A., Ivanov, A. G. & Guriev, A. M. (2010). Ispol'zovaniye vkladyeniya legal'nykh elementov v obmazku protsessov kompleksnogo mnogokomponentnogo diffuzionnogo nasyshcheniya stali. *Sovremennyye naukoemykiye tekhnologii*, (7), 170–172. (In Russ.).
22. Ivanov, S. G., Garmayeva, I. A. & Guriev, A. M. (2012). Otsenka skorosti diffuzii bora i khroma pri razlichnykh rezhimakh diffuzionnogo uprochneniya poverkhnosti stali St3. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 9(2), 248–251. (In Russ.).
23. Ivanov, S. G., Guriev, A. M., Rusakova, A. V., Guriev, M. A. & Starostenkov, M. D. (2013). Mikrostruktura poverkhnosti mnogokomponentnykh diffuzionnykh pokrytiy na osnove bora. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 10(1), 130–133. (In Russ.).
24. Ivanov, S. G., Guriev, A. M., Zemlyakov, S. A., Guriev, M. A. & Romanenko, V. V. (2020). Osobennosti metodiki podgotovki obraztsov dlya avtomaticheskogo analiza karbidnoy fazy kh12f1 posle tsementatsii v vakuume s primeneniym slozhnogo kompleksa "Thixomet PRO". *Polzunovskiy vestnik*, (2), 165–168. (In Russ.).
25. Guriev, M. A., Ivanov S. G., Guriev A. M., Kosheleva E. A. & Chernykh E.V. (2020). Vyyavleniye sostava boridnykh poroshkov tsvetnogo travleniya. *Polzunovskiy al'manakh*, (3), 19–23. (In Russ.).
26. Ivanov, S. G., Guriev, M. A., Guriev, A. M. & Romanenko, V. V. (2020). Fazovyy analiz boridnykh kompleksnykh diffuzionnykh sloeyev na uglerodistykh stalyakh pri pomoshchi tsvetnogo travleniya. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 17(1), 74–77. (In Russ.).
27. Guriev, A. M., Mei, S. Q., Guriev, M. A., Chernykh, E. V. & Ivanov, S. G. (2019). Investigation of the microstructure of diffusion coatings of carbon steel obtained by simultaneous diffusion saturation with boron, chromium and titanium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012077.
28. Guriev, A. M., Guriev, M. A., Zemlyakov, S. A. & Ivanov, S. G. (2020). Vyyavleniye osobennostey morfologii i sochetaniya sostava staleyemi chastnykh metallograficheskikh travleniy. Sbornik tezisev XVI Mezhdunarodnoy shkoly-seminara «Evolutsiya defektnykh struktur v kondensirovannykh sredakh». Pod red. M.D. Starostenkova, 83–84. (In Russ.).
29. Ivanov, S. G., Guriev, A. M., Zemlyakov, S. A. & Guriev, M. A. (2020). Metodika probopodgotovki obraztsov vysokolegirovannykh staley dlya avtomaticheskogo analiza karbidnoy fazy. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 102–105. (In Russ.).

Information about the authors

S. G. Ivanov – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Associate Professor, Head of the Laboratory of Microscopy, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

A. M. Guryev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department, I.I. Polzunov Altai State Technical University, Wuhan Textile University.

M. A. Guryev – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

I. V. Sentyabov – Student, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

E. V. Chernykh – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 27.04.2022; одобрена после рецензирования 10.05.2022; принята к публикации 17.05.2022.

The article was received by the editorial board on 27 Apr. 22; approved after reviewing on 10 May. 22; accepted for publication on 17 May. 22.