

Оригинальная статья

УДК 66.094.55

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-1(43)-59-65

**МОРФОЛОГИЯ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ДИФфуЗИОННОГО БОРИДНОГО СЛОЯ
НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СТАЛИ 45**

© 2023 г. С. Г. Иванов¹, А. М. Гурьев^{1,2}, Б. Д. Лыгденов³, М. А. Гурьев¹

¹Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Россия, 656038, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, 46)

²Уханьский Текстильный университет (Китай, 430200, Провинция Хубэй, Ухань, Саншин авеню, 1)

³Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (Россия, 670033, Респ. Бурятия, Улан-Удэ, ул. Ключевская 40В, стр. 1)

Аннотация. Химико-термическая обработка в целом и борирование являются высокоэффективными способами повышения ресурса работы рабочих органов и деталей машин (инструмента). При этом необходимо подбирать марки сталей, которые предпочтительно подвергать борированию в зависимости от поставленной цели. Для решения практических задач в целях контроля качества боридного диффузионного покрытия имеется потребность определения прочностных и морфологических характеристик боридного слоя и его фазового состава. Высокобористая фаза FeB имеет низкие эксплуатационные характеристики (высокая хрупкость, создает на поверхности растягивающие напряжения, приводящие к трещинообразованию и сколам в боридном слое), в большинстве случаев содержание фазы FeB в покрытии ограничивают верхним пределом (не более 10 – 15 % от толщины слоя боридов). Определение фазового состава боридных слоев предпочтительно вести методами электронной микроскопии, однако в условиях производства это является трудоемкой задачей. Одним из вариантов анализа структуры и морфологии полученных результатов является визуализация фазового состава боридных диффузионных слоев с использованием «цветного» травления с возможностью оценки структурно-фазового состояния при помощи оптической микроскопии. Показано, что предложенный метод электролитического травления в насыщенном водном растворе щелочного пикрата натрия позволяет получить высококонтрастные изображения микроструктуры боридного слоя, которые в последующем могут быть автоматически обработаны в современных программных комплексах металлографического анализа с целью качественной и количественной оценки структурно-фазового состояния. По сравнению с химическими методами «цветного» травления, метод электрохимического травления не требует высокой квалификации персонала и может быть использован в условиях производственной лаборатории.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, структурно-фазовый состав, сталь, диффузионный слой, металлография, цветное травление, идентификация фаз

Благодарности. Металлографические исследования выполнены в лаборатории микроскопических исследований ИЦ «ХимБиоМаш» ФБГОУ ВО АлтГТУ.

Для цитирования: Иванов С.Г., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Гурьев М.А., Морфология и фазовый состав диффузионного боридного слоя на основе металлографического анализа стали 45 // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 1 (43). С. 59–65. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-59-65](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-59-65)

Original article

**MORPHOLOGY AND PHASE COMPOSITION OF DIFFUSION BORIDE LAYER
BASED ON METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF STEEL 45**

© 2023 S. G. Ivanov¹, A. M. Guryev^{1, 2}, B.D. Lygdenov³, M. A. Guriyev¹

¹Polzunov Altai State Technical University (Lenin Av., 46, Barnaul, Altay Region, 656038, Russian Federation)

²Wuhan Textile University (Sanshin Avenue, 1, Wuhan, Hubei province, 430200, People's Republic of China)

³East Siberian State University of Technology and Management (Klyuchevskaya st. 40B, build. 1, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670033, Russian Federation)

Abstract. Chemical-thermal treatment in general and borating in particular are highly effective ways to increase the service life of working bodies and machine parts, as well as tools. At the same time, it is necessary to select possible grades of steels, which are preferably subjected to boriding, depending on the goal. To solve practical problems in order to control the quality of a boride diffusion coating, there is a need to determine the strength and morphological characteristics of the boride layer and its phase composition. Since the high-boride FeB phase has low performance characteristics (high brittleness, creates tensile stresses on the surface, leading to cracking and spalling in the boride layer), in most cases the content of the FeB phase in the coating is limited to an upper limit of no more than 10–15 % of the thickness of the boride layer. Determination of the phase composition of boride layers is preferably carried out by electron microscopy methods, however, under production conditions, this is a laborious task. One of the options for analyzing the structure and morphology of the results obtained is the visualization of the phase composition of boride diffusion layers using "color etching" with the possibility of assessing the structural-phase state using optical microscopy. It is shown that the electrolytic etching method proposed in this work in a saturated aqueous solution of alkaline sodium picrate makes it possible to obtain high-contrast images of the microstructure of the boride layer, which can subsequently be automatically processed in modern software systems for metallographic analysis in order to qualitative and quantitative assessment of the structural-phase state. Compared to the chemical methods of "color etching", the electrochemical etching method does not require highly skilled personnel and can be used in a production laboratory.

Keywords: chemical-thermal treatment, structural-phase composition, steel, diffusion layer, metallography, color etching, phase identification

Acknowledgements. Metallographic studies were carried out in the laboratory of microscopic studies of the R&D Center "ChemBioMash" AltSTU.

For citation: Ivanov S.G., Guryev A.M., Lygdenov B.D., Guryev M.A. Morphology and phase composition of diffusion boride layer based on metallographic analysis of steel 45. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 1 (43), pp. 59–65. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-59-65](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-59-65)

Введение

Бор, карбид бора, нитрид бора и бориды переходных металлов имеют много положительных свойств (высокую температуру плавления, твердость, хорошие износостойкость, коррозионную стойкость, электропроводность и другие) [1]. Появляются возможности для повышения поверхностных свойств металлов и керамики путем нанесения покрытия, образованного из рассматриваемых материалов. Также необходимо отметить, что большое количество исследований по поверхностному упрочнению стали связано именно с бором и его соединениями.

Известно, что легирующие элементы влияют на формирование фазового состава боридного слоя. Исходя из этого, необходимо подбирать возможные стали, которые предпочтительно подвергать борированию в зависимости от поставленной цели. Большое количество исследований посвящено теоретическим основам химико-термической обработки в целом (борированию, с использованием тон-

ких методов исследований). Эти исследования являются энерго- и трудоемкими, зачастую дорогостоящими. Для решения практических задач совершенно нет необходимости в проведении таких исследований. Одним из вариантов анализа структуры и морфологии полученных результатов является визуализация боридных диффузионных слоев с использованием «цветного» травления.

В настоящей работе приведены микроструктуры, подвергнутые избирательному «цветному» электрохимическому и химическому травлению диффузионных борированных слоев. Цель настоящей работы – демонстрация возможностей методов цветной оптической микроскопии как альтернативы электронной микроскопии для качественного и количественного анализа структурно-фазового состояния диффузионных боросодержащих покрытий.

Методы и принципы исследования

Проводили травление борированных образцов (размером 25×40×50 мм, температура насы-

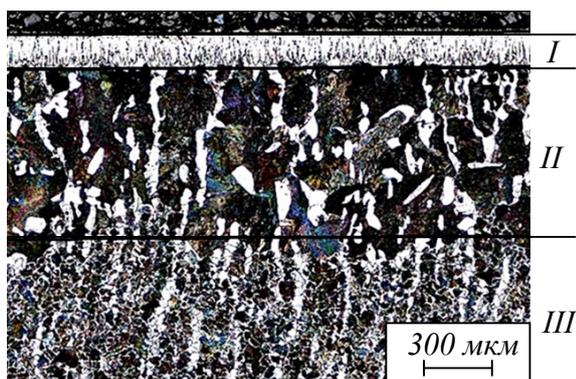


Рис. 1. Микроструктура диффузионного боридного слоя на стали марки 45 (травление Ниталем для качественного анализа переходной зоны)

Fig. 1. Microstructure of the diffusion boride layer on steel 45 (etched of Nital for a qualitative analysis of the transition zone)

щения 950 °С, время насыщения 2,5 ч) из стали марки 45, подвергнутых комплексному диффузионному насыщению одновременно бором, хромом и титаном [1– 8]. Насыщение вели в камерной печи, оснащенной ПИД-контроллером Термодат-16ЕЗ.

Металлографические темплеты вырезали на прецизионном отрезном станке MICRO CUT-201, которые затем запрессовывали в электропроводный бакелитовый компаунд при помощи металлографического прессы METAPRESS. Пробоподготовку проводили при помощи автоматического шлифовально-полировального станка DIGIPREP с применением алмазных шлифовальных дисков зернистостью 120, 54, 15 и 6 мкм. Для полировки использовали сукно MET-FOX с алмазной суспензией из поликристаллических алмазов зернистостью 1 мкм.

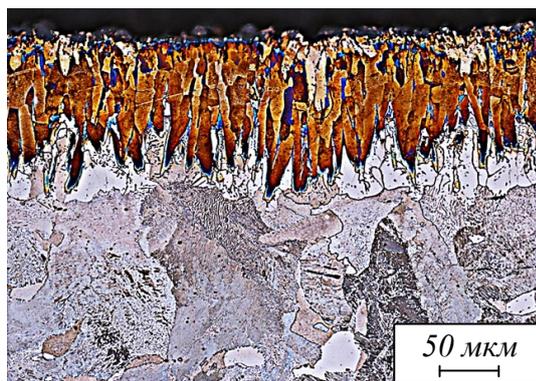


Рис. 3. Микроструктура диффузионного слоя на стали 45 (электролитическое травление в щелочном пикрате натрия для дифференциации и идентификации боридных фаз, выявления зоны подборидных фаз и ориентационной картины боридных игл)

Fig. 3. Microstructure of the diffusion layer on steel 45 (electrolytic etching in alkaline sodium picrate for differentiation and identification of boride phases, identification of phases in the transition zone and orientation pattern of boride needles)

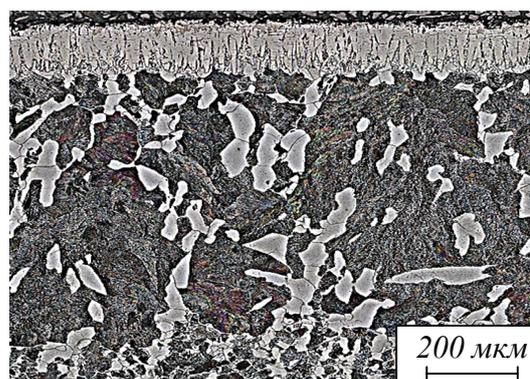


Рис. 2. Микроструктура диффузионного слоя на стали 45 (травление Ниталем и реактивом Берахи для определения количественного состава феррита в переходной зоне)
Fig. 2. Microstructure of the diffusion layer on steel 45 (etching with Nital and Beraha's reagent to determine the quantitative composition of ferrite in the transition zone)

Дальнейшую суперфинишную полировку осуществляли на сукне MET-Mambo с нейтральной эмульсией SiO₂ зернистостью 0,05 мкм [9 – 15]. Отполированные металлографические шлифы травлили в одном случае химически (в 4 %-ом растворе азотной кислоты в этиловом спирте (Ниталь) с последующим «цветным» травлением в реактиве Берахи [12]), в другом случае – электролитически (в насыщенном водном растворе щелочного пикрата натрия [16 – 24] при помощи установки электролитической полировки и травления Pulitrol). При электролитическом травлении напряжение составляло 2,7 В, плотность тока – 0,25 А/см².

Химическое травление составом «Ниталь» позволяет визуализировать морфологию и микроструктуры основных фазовых составляющих слоя боридов и основного материала. Для дополнительной визуализации фазового состава слоя боридов возможно последующее травление в кипящем растворе щелочного пикрата натрия [10 – 13, 19]. В этом случае фаза FeB окрасится в синий цвет, тогда как фаза Fe₂B останется коричневого цвета.

В качестве альтернативы рассматриваемому способу использовали электролитическое травление образца в насыщенном водном растворе щелочного пикрата натрия при комнатной температуре. Такое травление позволяет не только визуализировать морфологию и фазовый состав боридного слоя и основного материала (рис. 1), но также дополнительно визуализировать ориентацию боридных игл относительно плоскости шлифа (рис. 2, 3).

Основные результаты

Микроструктура (рис. 1) наглядно показывает четкое распределение структурно-фазового

состава в зависимости от зоны (*I* – непосредственно диффузионный боридный слой; *II* – переходная зона, выявлены зерна феррита (белый цвет), перлита; *III* – основной материал).

В работе [2] на основе тонкого метода исследования установлено, что металл основы имеет высокодисперсную структуру, которая обусловлена влиянием бора, образующего твердый раствор в железе вместе с углеродом.

Процесс диффузии бора протекает преимущественно по границам зерен и блоков [3 – 7]. При термической обработке (закалка) материал переходной зоны претерпевает мартенситное превращение. Рассматриваемый мартенсит имеет твердость несколько меньшую, чем твердость цемента, но большую, чем нижележащий мартенсит. В результате покрытие состоит из нескольких слоев, твердость которых уменьшается при переходе от поверхности вглубь материала [2].

На рис. 2 показано послойное строение борированного материала и отчетливо выявлены зерна феррита и перлитные образования, что позволяет количественно оценить фазовое соотношение. Однако качественный и количественный анализы структурно-фазового состояния диффузионного слоя затруднен в силу того, что яркость и контрастность боридных фаз FeB и Fe₂B отличаются слабо. Для надежной дифференциации боридных фаз в настоящей работе был применен метод электролитического травления в щелочном пикрате натрия. Результаты травления представлены на рис. 3.

При борировании возникает типичная градиентная структура (рис. 3), в которой значительный набор параметров (твердость и износостойкость) меняется от поверхности к центру образца. Следует также иметь в виду то, что борированный слой не адсорбирует углерод, а растворимость кремния в нем очень ограничена. Во время процесса борирования растущий слой боридов как бы «гонит» перед собой углерод, что в случае углеродистой стали ведет к значительному обогащению углеродом переходной зоны основного металла [8 – 15] и как следствие – повышению содержания перлита в переходной зоне вплоть до 100 %, что соответствует составу эвтектоидной стали.

Структура и рост слоя боридов зависят не только от условий борирования, но и в значительной степени от химического состава стали, из которой изготовлены детали. Наилучшая связь слоя боридов с основным материалом имеет место в случае нелегированной или малолегированной стали. Большое содержание хрома, ванадия, вольфрама, молибдена и даже углерода ограничивает рост слоя и концы боридных игл сглаживаются. В настоящей работе наблюдается микроструктура с типичными боридными

иглами. Их коричневый цвет указывает на фазу Fe₂B, с небольшим содержанием разрозненных единичных светлых иглообразных выделений фазы FeB в верхней части боридного слоя.

В подборидной зоне просматриваются карбобориды сложного состава, а также карбиды хрома и титана, имеющие глобулярную форму, распределенные как в ферритной, так и в перлитной фазах [16 – 26].

Выводы

Техника «цветного» травления требует высокого уровня подготовки исследователя, поэтому замена метода химического травления на электрохимический позволяет более широко применять методы контроля структурно-фазового состояния боридных покрытий с применением оптической микроскопии в условиях заводских лабораторий.

Полученные после травления изображения микроструктур позволяют визуализировать структурно-фазовый состав и с довольно высокой точностью провести как качественный, так и количественный анализы исследуемой зоны материала без применения трудоемких тонких методов исследований с применением в том числе электронной микроскопии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dearnly P.A., Bell T. Engineering the surface with boron-based materials // *Surface Engineering*. 1985. Vol. 1. No. 3. P. 203–217. <https://doi.org/10.1179/sur.1985.1.3.203>
2. Колубаев А.В., Белый А.В., Буяновский И.А., Колубаев Е.А., Кукареко В.А., Сизова О.В., Хрущов М.М. Структура и механизмы деформирования и разрушения твердых покрытий в условиях фрикционного взаимодействия // *Известия вузов. Физика*. 2019. Т. 62. № 8 (740). С. 52–83. <https://doi.org/10.17223/00213411/62/8/52>
3. Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М. Оценка скорости диффузии бора и хрома при различных режимах диффузионного упрочнения поверхности стали СТЗ // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2012. Т. 9. № 2. С. 248–251.
4. Иванов С.Г., Куркина Л.А., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. Исследование зависимости морфологии диффузионных боридных покрытий на углеродистых сталях от состава и фракции насыщающей смеси // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2012. Т. 9. № 4. С. 556–559.
5. Пат. 2360031 С2 РФ. Способ упрочнения деталей из штамповых сталей / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Земляков С.А., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А.; заявл. 18.07.2007; опубл. 27.06.2009.

6. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Алонцева Д.Л., Иванова Т.Г., Гурьев А.М. Взаимосвязь химического состава насыщающей среды и диффузионного покрытия на сталях 45 и 45Л // Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 3 (15). С. 179–181.
7. Пат. 2381299 С РФ. Способ упрочнения стальных деталей / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Лыгденов Б.Д.; заявл. 12.05.2008; опубл. 10.02.2010.
8. Ivanov S.G. Features of multicomponent saturation alloyed by steels. S.G. Ivanov, I.A. Garmaeva, M.A. Guriev, A.M. Guriev, M.D. Starostenkov. *Advances in Mechanical Engineering // Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series*. Cham. 2015. P. 49–53.
9. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Иванова Т.Г. Химико-термическая обработка материалов для режущего инструмента // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 8. С. 578–582. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-8-578-582>
10. 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 кн.: Наука и молодежь – 2007. Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2007. С. 110–112.
11. 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 Х12Ф1 после цементации в вакууме с применением программного комплекса "ТНХОМЕТ ПРО" // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2020. № 2. С. 165–168. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.031>
12. 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. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2020.01.012>
13. 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.
14. 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. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. In: 3rd International Conference on New Material and Chemical Industry. 2019. Vol. 479. No. 1. Article 012077. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/479/1/012077>
15. Гурьев А.М., Гурьев М.А., Землякова С.А., Иванов С.Г. Выявление особенностей морфологии и фазового состава сталей методами специального металлографического травления. В кн.: Эволюция дефектных структур в конденсированных средах. Сборник тезисов XVI Международной школы-семинара. 2020. С. 83–84.
16. 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.
17. Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Иванов С.Г. Исследование тонкой структуры боридного слоя методами оптической микроскопии высокого разрешения // Ползуновский альманах. 2020. № 3. С. 3–9.
18. 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 // *Microscopy and Microanalysis*. 2015. Vol. 21. No. 3. P. 1755–1756. <https://doi.org/10.1017/S1431927615009551>
19. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial Application of Thixomet // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2016. № 5. P. 294–301.
20. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloys microstructure // *Microscopy and Microanalysis*. 2015. Vol. 21. No. 3. P. 457. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2204.0720>
21. ASM Handbook // *Metallography and Microstructures*. 2004. Vol. 9.
22. 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. <https://doi.org/10.1520/MPC20160001>
23. Kazakov A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure // *Metallography Microstructure and Analysis*. 2016. Vol. 5. P. 294–301.
24. Vander Voort G.F. Computer-aided microstructural analysis of specialty steels // *Materials characterization*. 1991. Vol. 27. No. 4. P. 241–260.

25. Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I. Methodological features of micro-structural heterogeneity estimation by the thickness of steel plates // *Chernye Metally*. 2021. No. 7. P. 65–75.
26. 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.

REFERENCES

1. Dearnly P.A., Bell T. Engineering the surface with boron-based materials. *Surface Engineering*. 1985, vol. 1, no. 3, pp. 203–217. <https://doi.org/10.1179/sur.1985.1.3.203>
2. Kolubaev A.V., Bely A.V., Buyanovsky I.A., Kolubaev E.A., Kukareko V.A., Sizova O.V., Khrushchov M.M. Structure and mechanisms of deformation and manifestations of manifestations under conditions of frictional interaction. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2019, vol. 62, no. 8 (740), pp. 52–83. <https://doi.org/10.17223/00213411/62/8/52> (In Russ.).
3. Ivanov S.G., Garmaeva I.A., Guryev A.M. Estimation of the Diffusion Rate of Boron and Chromium under Different Modes of Diffusion Hardening of the Surface of ST3 Steel. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2012, vol. 9, no. 2, pp. 248–251. (In Russ.).
4. Ivanov S.G., Kurkina L.A., Greshilov A.D., Guryev A.M. Investigation of the dependence of the morphology of diffusion boride coatings on carbon steels on the composition and fraction of the saturating mixture. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2012, vol. 9, no. 4, pp. 556–559. (In Russ.).
5. Guryev A.M., Ivanov S.G., Zemlyakov S.A., Vlasova O.A., Kosheleva E.A., Guryev M.A. *Method for hardening parts made of die steels*. Pat. 2360031 C2 RF. dec. 07/18/2007; publ. 06/27/2009. (In Russ.).
6. Guryev M.A., Ivanov S.G., Alontseva D.L., Ivanova T.G., Guryev A.M. Relationship between the chemical composition of the saturating medium and the diffusion coating on steels 45 and 45L. *Pis'ma o materialah*. 2014, vol. 4, no. 3 (15), pp. 179–181. (In Russ.).
7. Guryev A.M., Ivanov S.G., Vlasova O.A., Kosheleva E.A., Guryev M.A., Lygdenov B.D. *Method for hardening steel parts*. Pat. RF 2381299 C. dec.05/12/2008; publ. 02/10/2010. (In Russ.).
8. Ivanov S.G., Garmaeva 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, pp. 49–53 .
9. Guryev A.M., Ivanov S.G., Guryev M.A., Chernykh E.V., Ivanova T.G. Chemical-thermal treatment of materials for cutting tools. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2015, vol. 58, no. 8, pp. 578–582. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-8-578-582> (In Russ.).
10. Vlasova O.A., Ivanov S.G., Guryev M.A., Kosheleva E.A., Guryev A.M. Increasing the strength of diffusion carboboride coatings by thermal cycling in the process of their production. In: *SCIENCE AND YOUTH – 2007 (him – 2007). Materials of the IV All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists*. 2007, pp. 110–112. (In Russ.).
11. Ivanov S.G., Guryev A.M., Zemlyakov S.A., Guryev M.A., Romanenko V.V. Features of the procedure for preparing samples for automatic analysis of the carbide phase of steel Kh12F1 after cementing in a vacuum using the THIXOMET PRO software. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2020, no. 2, pp. 165–168. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.031> (In Russ.).
12. 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, pp. 74–77. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2020.01.012> (In Russ.).
13. Guryev M.A., Ivanov S.G., Guryev A.M., Kosheleva E.A., Chernykh E.V. Revealing the Composition of Color Etching Boride Powders. *Polzunovskij vestnik*. 2020, no. 3, pp. 19–23. (In Russ.).
14. 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. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 3rd International Conference on New Material and Chemical Industry*. 2019, vol. 479, no. 1, pp. 012077. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/479/1/012077>
15. Guryev A.M., Guryev M.A., Zemlyakova S.A., Ivanov S.G. Identification of peculiarities of morphology and phase composition of steels by methods of special metallographic etching. In: *Evolution of defective structures in condensed media. Collection of theses of the XVI International Seminar School*. M.D. Starostenkov Ed. 2020, pp.83–84.

16. Ivanov S.G., Guryev A.M., Zemlyakov S.A., Guryev M.A. Procedure for sample preparation of samples of high-alloyed steels for automatic analysis of carbide phase. *Polzunovskij vestnik*. 2020, no. 3, pp. 102–105.
17. Gur'ev A.M., Zemlyakov S.A., Gur'ev M.A., Kosheleva E.A., Ivanov S.G. Investigation of the fine structure of the boride layer by high-resolution optical microscopy. *Polzunovskij vestnik*. 2020, no. 3, pp. 3–9. (In Russ.).
18. Kazakov A.A., Ryaboshuk S.V., Lyubochko D.A., Chigintsev L.S. Research on the Origin of Non-metallic Inclusions in High-Strength Low-Alloy Steel Using Automated Feature Analysis. *Microscopy and Microanalysis*. 2015, vol. 21, no. 3. P. 1755–1756. <https://doi.org/10.1017/S1431927615009551>
19. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial Application of Thixomet. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2016, no. 5, pp. 294–301.
20. Kazakov A.A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloys microstructure. *Microscopy and Microanalysis*. 2015, vol. 21, no. 3, 457 pp. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2204.0720>
21. *ASM Handbook*. Metallography and Microstructures. 2004, vol. 9.
22. Vander Voort G.F., Pakhomova O., Kazakov A. Evaluation of normal versus non-normal grain size distributions. *Mater. Perform. Character.* 2016, vol. 5, pp. 521–534. <https://doi.org/10.1520/MPC20160001>
23. Kazakov A., Kiselev D. Industrial application of thixomet image analyzer for quantitative description of steel and alloy's microstructure. *Metallography Microstructure and Analysis*. 2016, vol. 5, pp. 294–301.
24. Vander Voort G.F. Computer-aided microstructural analysis of specialty steels. *Materials characterization*. 1991, vol. 27, no. 4, pp. 241–260.
25. Kazakov A.A., Kiselev D.V., Kazakova E.I. Methodological features of micro-structural heterogeneity estimation by the thickness of steel plates. *Chernye Metally*. 2021, no. 7, pp. 65–75.
26. 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, pp. 7.

Сведения об авторах

Сергей Геннадьевич Иванов, д.т.н., заведующий ЛМИ ИЦ «ХимБиоМаши», ведущий научный сотрудник НУ, и.о. заведующего кафедрой «Машиностроительные технологии и оборудование». Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249

Алексей Михайлович Гурьев, д.т.н., профессор Уханьского текстильного университета, заведующий кафедрой «Начертательная геометрия и графика», Уханьский текстильный университет, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
E-mail: gurievam@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7570-8877

Бурьял Дондокович Лыгденов, д.т.н., профессор Уханьского текстильного университета, профессор Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, Уханьский текстильный университет, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
E-mail: lygdenov59@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3580-6165

Михаил Алексеевич Гурьев, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование». Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787

Information about the authors

Sergey G. Ivanov, Dr. Sci. (Tech.), Head of the Laboratory of Microscopic Research, Lead Researcher of ASTU, Acting Head of department «Mechanical Engineering Technologies and Equipment Polzunov Altai State Technical University
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249

Aleksey M. Guryev, Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Wuhan Textile University, Acting head of department «Descriptive geometry and graphics», Polzunov Altai State Technical University
E-mail: gurievam@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7570-8877

Burial D. Lygdenov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Wuhan Textile University, East Siberian State University of Technology and Management
E-mail: lygdenov59@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3580-6165

Mikhail A. Guryev, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department «Mechanical Engineering Technologies and Equipment», Polzunov Altai State Technical University
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787

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

Поступила в редакцию 16.0.2023
 После доработки 26.01.2023
 Принята к публикации 03.02.2023

Received 16.0.2023
 Revised 26.01.2023
 Accepted 03.02.2023