

МИКРОСТРУКТУРА ДИФФУЗИОННОЙ ЗОНЫ СТАЛИ СТ3 ПОСЛЕ СОВМЕСТНОГО ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ БОРОМ И ХРОМОМ

С. Г. Иванов¹, Дон Яджи², А. М. Гурьев^{2, 1}

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

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

Проведены металлографические исследования переходной зоны от комплексного диффузионного покрытия до сердцевины металла. Покрытие на стали ст3 было получено методом диффузионного насыщения бором и хромом в самозащитной насыщающей среде. Изображения микроструктуры получены при помощи программно-аппаратного комплекса Thixomet®, включающего программное обеспечение Thixomet® в комплекте с оптическим микроскопом CarlZeissAxioObserverZ1m. Кроме того, для выявления микроструктуры использовались специальные методы исследования.

Ключевые слова: сталь, диффузионные покрытия, микроструктура, борирование, переходная зона

THE MICROSTRUCTURE OF THE DIFFUSION ZONE OF STEEL ST3 AFTER A JOINT DIFFUSION SATURATION WITH BORON AND CHROMIUM

S. G. Ivanov¹, Dong Yajie², A. M. Guryev^{1, 2}

¹ Altai State Technical University, Barnaul, Russia

² Wuhan Textile University, Wuhan, China

Metallographic examination of the transition zone from integrated diffusion coatings to the core metal. Coating on steel St3 was obtained by diffusion saturation with boron and chromium in self-shielded flux-saturated environment. Image of the microstructure obtained with the help of hardware-software complex Thixomet®, including software Thixomet® in combination with optical microscope CarlZeissAxioObserverZ1m. In addition, for the detection of the microstructure were used special methods of research.

Keywords: steel, diffusion coating, microstructure, boriding, transitive zone

Химико-термическая обработка (ХТО) имеет достаточно широкое распространение при производстве деталей машин и инструмента в силу преимуществ перед другими методами поверхностного упрочнения сталей:

– возможности встраивания в технологический процесс производства как элемента термической обработки;

– высокой экономичности;

– возможности упрочнения изделий практически любых форм и размеров;

– возможности получения в покрытиях такого структурно-фазового состояния материала, получение которого другими способами либо не возможно, либо экономически не целесообразно.

Одним из перспективных способов химико-термической обработки является диффузионное поверхностное насыщение бором, а также совмещенное с борированием насыщение другими элементами: хромом, титаном, кремнием, алюминием.

Боридные слои имеют характерную текстуру (рисунок 1), представляющую собой игольчатый слой, обладающий высокой микротвердостью (до 2000 HV – боридный слой и до 3700 HV – в случае комплексного насыщения бором совместно с хромом, титаном, алюминием), износостойкостью в условиях абразивного и адгезионного износа, хорошей способностью противостоять отслаиванию при действии касательных нагрузок и т. п.

Однако в настоящее время процессы диффузии бора и сопутствующих элементов при диффузионном упрочнении поверхности сталей изучены недостаточно. Нет ясного понимания как механизмов диффузии, так и способов управления процессом с целью получения покрытий заданного состава и с требуемыми свойствами, а это приводит к появлению технологических рекомендаций, отличающихся в 2 – 50 раз по трудовым и энергетическим затратам, на диффузионное борирование. При этом если само боридное покрытие (зона сплошных боридов) еще изучается, то подборидной (переходной) зоне, внимания, как правило, уделяется не заслуженно мало. Хотя отдельные исследования показывают, что строение и физико-механические свойства переходной зоны оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства всего покрытия.

тическим затратам, на диффузионное борирование. При этом если само боридное покрытие (зона сплошных боридов) еще изучается, то подборидной (переходной) зоне, внимания, как правило, уделяется не заслуженно мало. Хотя отдельные исследования показывают, что строение и физико-механические свойства переходной зоны оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства всего покрытия.

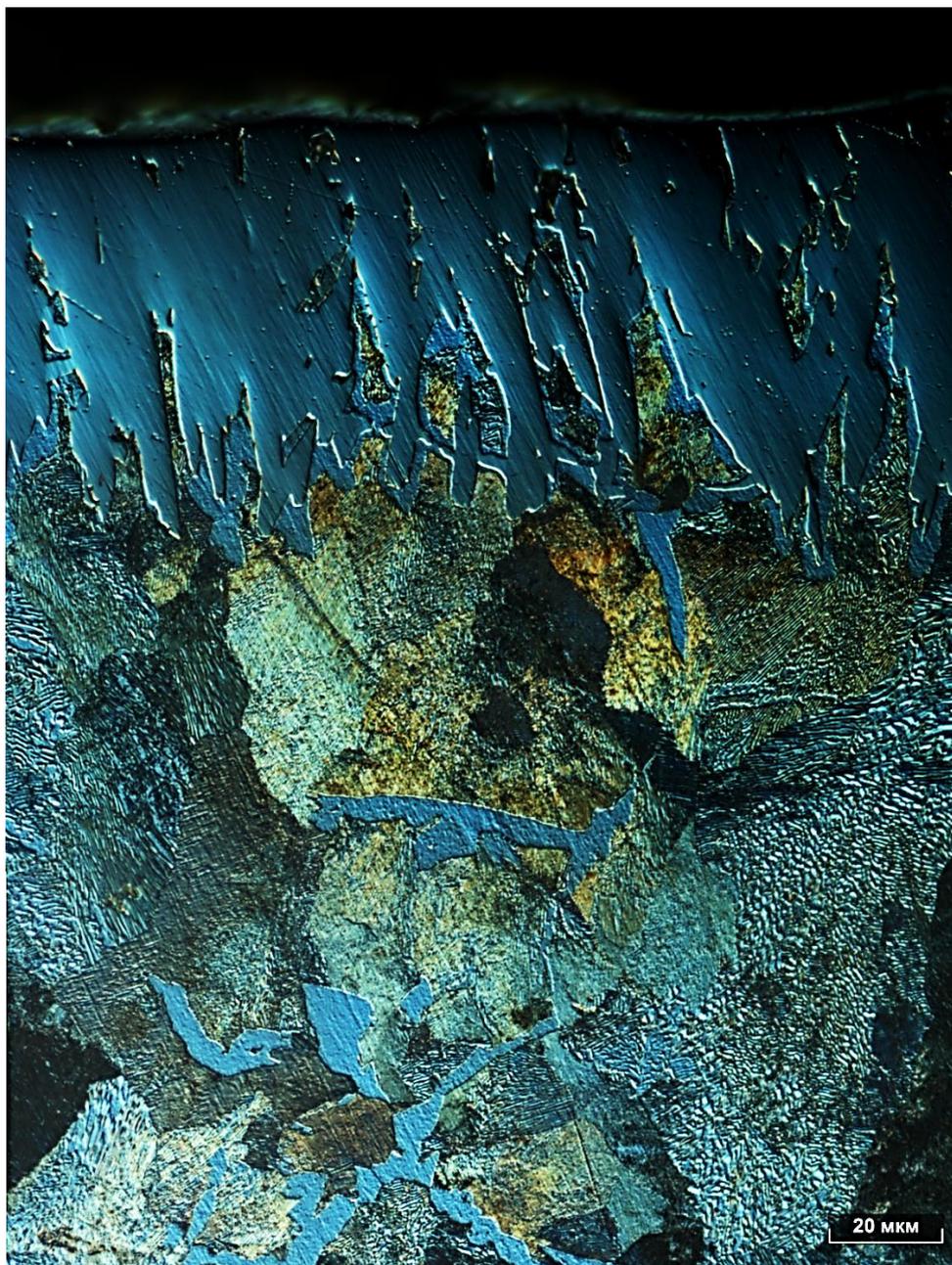


Рисунок 1 – Панорамное изображение диффузионного слоя на стали Ст3, полученного одновременным насыщением бором и хромом

МИКРОСТРУКТУРА ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНЫ СТАЛИ Ст3 ПОСЛЕ СОВМЕСТНОГО ДИФфуЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ БОРОМ И ХРОМОМ

В настоящей работе проведены металлографические исследования переходной зоны от комплексного диффузионного покрытия до основного металла (сердцевины). Покрытие на стали Ст3 было получено методом диффузионного комплексного насыщения бором и хромом в самозащитной насыщающей среде.

Изображения микроструктуры получены при помощи программно-аппаратного комплекса Thixomet[®], включающего программное обеспечение Thixomet[®] в комплекте с оптическим микроскопом CarlZeissAxioObserverZ1m. Кроме того, для выявления микроструктуры использовались специальные методы исследования – метод «круговой поляризации» (С–DIC). А также специальное травление, включающее следующие шаги:

- травление 5 % спиртовым раствором йода до появления темно-серого цвета шлифа;
- травление пересыщенным раствором пикрата натрия;
- полировка на фетровом круге в течение

15 – 30 с;

- травление 2 % спиртовым раствором плавиковой кислоты в течение 1 – 3 с.

Специальное травление применено для того, чтобы выявить тонкую структуру именно подборидной зоны, так как отдельные виды травления спиртовым раствором йода, пикрата натрия либо плавиковой кислоты получить четких снимков не позволяют. Применение растворов микроскопии также желаемого эффекта не дает, вероятно, в силу иного метода исследования, для которого требуются другие приемы выявления микроструктуры и иной набор травителей, подбор которых – очень трудоемкая задача. Исследование тонкой структуры подборидной зоны на просвечивающем электронном микроскопе также представляет значительную трудоемкость в плане приготовления качественных препаратов. Оптическая микроскопия – один из самых относительно простых и доступных в настоящее время способов изучения микроструктуры материалов.

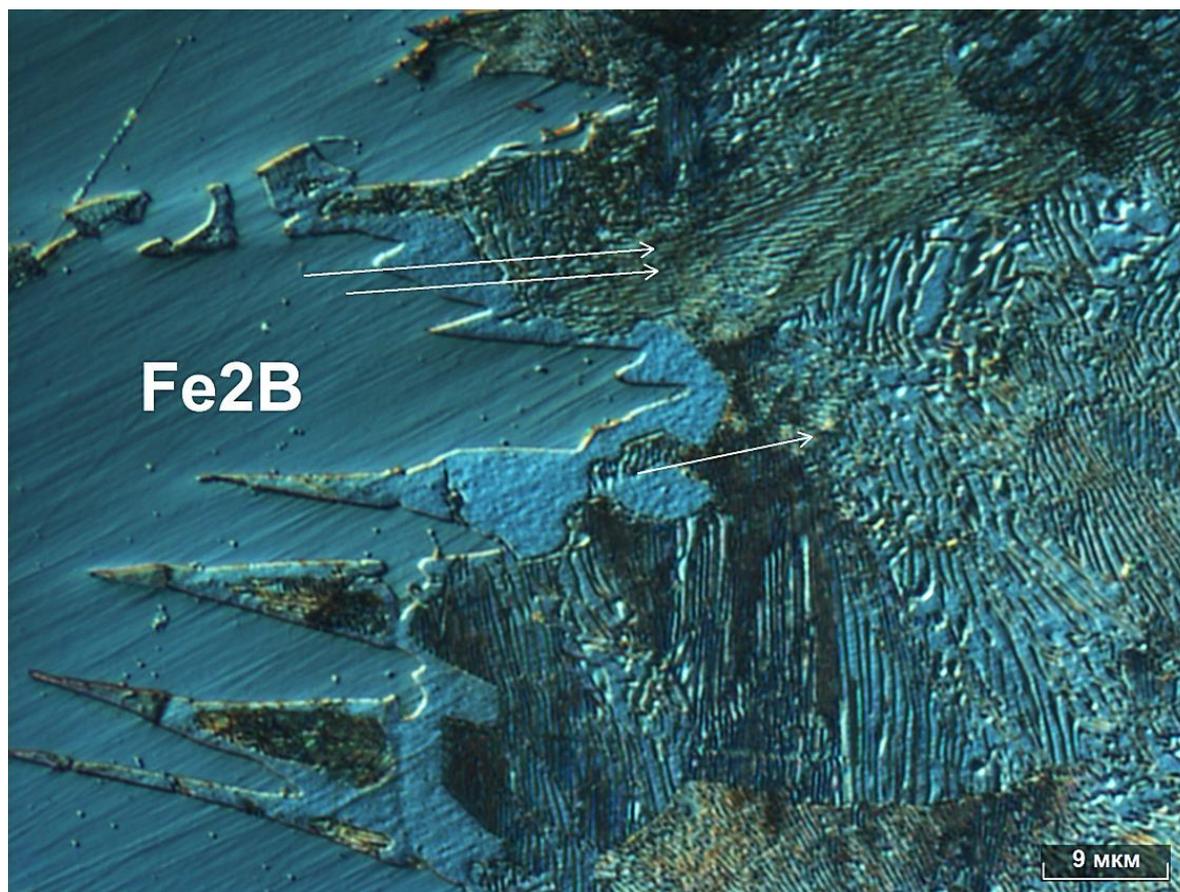


Рисунок 2 – Микроструктура концов боридных игл и подборидной зоны на стали Ст3 после диффузионного борохромирования. Оптическая микроскопия. Одиночной стрелкой показан исходный перлит, двойной стрелкой показан перлит, образовавшийся в результате борохромирования

Из представленной на рисунках 1 и 2 микроструктуры видно, что в подборидной зоне борхромированной стали практически отсутствуют отдельные зерна феррита, хотя в стали Ст3 в исходном состоянии их доля достигает 80 % (рисунок 3), при этом цементитные пластины практически все разрушены на фрагменты. Кроме того, наблюдается заметная направленность цементитных пластин в направлении диффузии бора: от зоны сплошных боридов в направлении сердцевинки образца. Такая текстура, вероятнее всего, образуется в результате совместной диффузии бора и углерода от обрабатываемой поверхности вглубь материала: все образующиеся структурные составляющие (карбиды, бориды и карбобориды), мешающие диффузионным потокам, растворяются в зародыше, тогда как составляющие, дислоцированные параллельно концентрационному градиенту имеют большие шансы избежать растворения и вырасти до приемлемых размеров.

На рисунке 2 показано, как вновь образуемый в ходе борирования перлит структурирован в направлении градиента концентрации. Детализированное изображение борированного перлита в малоуглеродистой стали, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии, с полуразрушенными цементитными пластинами приведено в работе выполненной совместно с профессором Э. В. Козловым и доцентом Н. А. Поповой на кафедре физики Томского архитектурно-строительного университета. Изображение борированного перлита с фрагментированными цементитными пластинами в стали Ст3 представлено на рисунке 4.

Как видно из рисунков 2 и 4, перлит, изначально существовавший в стали до диффузионного насыщения, весь подвергся фрагментации, тогда как пластины новообразованного перлита выстроены вдоль линий градиента концентраций и значительной фрагментации не подверглись.



Рисунок 3 – Микроструктура образцов стали Ст3 в исходном состоянии. Травление спиртовым раствором пикриновой кислоты

МИКРОСТРУКТУРА ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНЫ СТАЛИ СТЗ
ПОСЛЕ СОВМЕСТНОГО ДИФфуЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ БОРОМ И ХРОМОМ

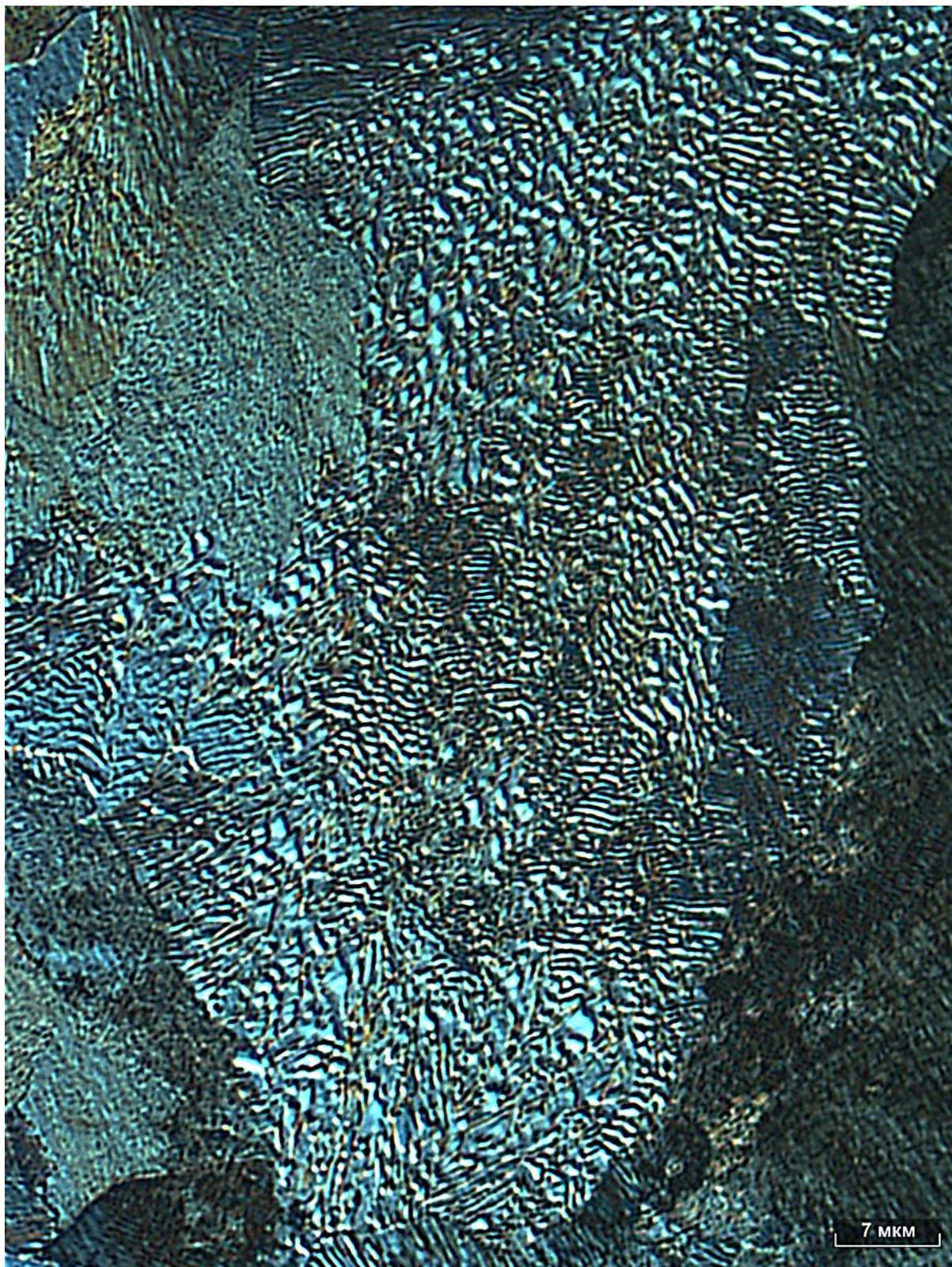


Рисунок 4 – микроструктура перлита с фрагментированными цементитными пластинами

Список литературы

1. Kazakov, A. A. Thixomet Image Analyzer for Characterization of 2D and 3D Materials Structure / Kazakov, A. A.; Luong, N. H.; Kazakova, E. I.; Zorina, E. M. // Understanding Processing, Structure, Property and Behavior Correlations: Proceedings of the 32nd Annual Convention of the International Metallographic Society Held 31 October to 3 November, 1999 in Cincinnati, Ohio ASM International, 27; - 133-142.
2. Гурьев, А. М. Особенности формирования диффузионного слоя при термоциклическом борировании углеродистой стали / Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. // В кн.: Эволюция дефектных структур в конденсированных средах сборник тезисов докладов 5-ой Международной школы-семинара. - 2000. - С. 149-150.
3. Gur'ev, A.M. Transformation of the phase composition and the mechanism of transition region structuring in a ferrite-pearlite steel subjected to thermal-cycling borating / Gur'ev A.M., Kozlov E.V., Zhdanov A.I., Ignatenko L.I., Popova I.A. // Russian Physics Journal. - 2001. - Т. 44. - № 2. - С. 183-188.
4. Kazakov, A. Characterization of Semi-Solid Materials structure / Kazakov A., Luong N.H. // Materials Characterization - 2001, - pp. 191-196.
5. Гурьев, А.М. Распределение атомов бора и углерода в диффузионном слое после борирования стали 08кп / Гурьев А.М., Лыгденев Б.Д., Мосоров В.И., Инхеев Б.С. // Современные наукоемкие технологии. - 2006. - № 5. - С. 35-36.
6. Иванов, С.Г. Диффузионное хромирование сталей из насыщающей обмазки / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Кошелева Е.А. // Ползуновский альманах. - 2006. - № 3. - С. 191.
7. Власова, О.А. Повышение прочности диффузионных карборидных покрытий термоциклированием в процессе их получения / Власова О.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Гурьев А.М. // В сб.: Наука и молодежь - 2007 (НИМ - 2007) Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2007" (НИМ-2007). - 2007. - С. 110-112.
8. Казаков, А.А. Разработка методики количественной оценки микроструктурной полосчатости низколегированных трубных сталей с помощью автоматического анализа изображений / Казаков А.А., Киселев Д.В., Андреева С.В., Чигинцев Л.С., Головин С.В., Егоров В.А., Марков С.И. // Черные металлы. - 2007. - № 7-8.
9. Иванов, С.Г. Диффузионное насыщение сталей из насыщающих обмазок / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Бруль Т.А. // Фундаментальные исследования. - 2007. - № 4. - С. 38.
10. Иванов, С.Г. Комплексное насыщение сталей бором и хромом – борохромирование / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Власова О.А., Гурьев М.А. // Ползуновский альманах. - 2008. - № 3. - С. 53.
11. Иванов, С.Г. Исследование процессов диффузионного насыщения сталей из смесей на основе карбида бора / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Власова О.А., Гурьев М.А. // Со-временные наукоемкие технологии. - 2008. - № 3. - С. 33.
12. Гармаева, И.А. Исследование влияния различных факторов при борировании на механические свойства стали с применением математической модели / Гармаева И.А., Лыгденев Б.Д., Гурьев А.М., Власова О.А. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 10. - С. 30-32.
13. Гурьев, М.А. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М. // В сб.: Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств // Гурьев А.М., Марков В.А. Сб. науч. трудов X международной научно-практической конференции. - Барнаул, 2009. - С. 40-46.
14. Кошелева, Е.А. Технология многокомпонентного диффузионного упрочнения поверхности деталей машин и инструмента для энергетического машиностроения / Кошелева Е.А., Иванов С.Г., Нестеренко Е.А., Гурьев М.А., Земляков С.А., Власова О.А., Иванов А.Г. // Ползуновский вестник. - 2010. - № 1. - С. 106-113.
15. Гурьев, А.М. Структура и свойства упрочненных бором и бором совместно с титаном поверхности штамповых сталей 5ХНВ и 5Х2НМВФ. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Лыгденев Б.Д., Земляков С.А., Долгоров А.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2010. - Т. 7. - № 1. - С. 27-31.
16. Иванов, С.Г. Влияние добавок легирующих элементов в обмазку на процессы комплексного многокомпонентного диффузионного насыщения стали / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Иванов А.Г., Гурьев А.М. // Современные наукоемкие технологии. - 2010. - № 7. - С. 170-172.
17. Гурьев, А.М. Способ изготовления и упрочнения деталей из чугунов и сталей / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Земляков С.А., Грешилов А.Д., Иванов А.Г. // патент на изобретение RUS 2440869 10.11.2010.
18. Иванов, С.Г. Фазовые превращения и структура комплексных боридных покрытий / Иванов С.Г., Гармаева И.А., Андросов А.П., Зобнев В.В., Гурьев А.М., Марков В.А. // Ползуновский вестник. - 2012. - № 1-1. - С. 106-108.
19. Кошелева, Е.А. Разработка технологии диффузионного упрочнения поверхности стальных деталей и инструмента / Кошелева Е.А. // Ползуновский альманах. - 2010. - № 1. - С. 95-101.
20. Иванов, С.Г. Оценка скорости диффузии бора и хрома при различных режимах диффузионного упрочнения поверхности стали Ст3 / Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2012. - Т. 9. - № 2. - С. 248-251.
21. Иванов, С.Г. Исследование зависимости морфологии диффузионных боридных покрытий на углеродистых сталях от состава и фракции насыщающей смеси / Иванов С.Г., Куркина Л.А., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2012. - Т. 9. - № 4. - С. 556-559.

МИКРОСТРУКТУРА ДИФФУЗИОННОЙ ЗОНЫ СТАЛИ СТЗ
ПОСЛЕ СОВМЕСТНОГО ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ БОРОМ И ХРОМОМ

22. Лыгденов, Б.Д. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 20Л, 45, 55 и 5ХНВ / Лыгденов Б.Д., Гармаева И.А., Полова Н.А., Козлов Э.В., Гурьев А.М., Иванов С.Г. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. - 2012. - Т. 9. - № 4-2. - С. 681-689.
23. Гурьев, А.М. Строение и свойства многокомпонентных боридных покрытий сталей / Гурьев А.М., Гурьев М.А., Русакова А.В. // В сборнике: VI сессия Научного совета РАН по механике Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; Научные редакторы: Н.Ф. Морозов, М.Д. Старостенков. - 2012. - С. 56-58.
24. Гурьев, А.М. Технология нанесения многокомпонентных упрочняющих покрытий на стальные детали / Гурьев М.А., Фильчаков Д.С., Гармаева И.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Околович Г.А. // *Ползуновский вестник*. - 2012. - № 1-1. - С. 73-78.
25. Иванов, С.Г. Особенности диффузии атомов бора и хрома при двухкомпонентном насыщении поверхности стали ст3 / Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. - 2012. - Т. 9. - № 1. - С. 86-88.
26. Гурьев, А.М. Диффузионные покрытия сталей и сплавов / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гармаева И.А. - Барнаул, 2013.
27. Гурьев, М.А. Технология упрочнения стальных изделий в процессе литья / Гурьев М.А., Фильчаков Д.С., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Деев В.Б. // *Литейщик России*. - 2013. - № 6. - С. 36-38.
28. Иванов, С.Г. Микроструктура поверхности многокомпонентных диффузионных покрытий на основе бора / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Русакова А.В., Гурьев М.А., Старостенков М.Д. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. - 2013. - Т. 10. - № 1. - С. 130-133.
29. Ivanov, S.G. Special features of preparation of saturating mixtures for diffusion chromoborating / Ivanov S.G., Guriev A.M., Starostenkov M.D., Ivanova T.G., Levchenko A.A. // *Russian Physics Journal*. - 2014. - Т. 57. - № 2. - С. 266-269.
30. Иванов, С.Г. Особенности приготовления насыщающих смесей для диффузионного борохромирования / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Старостенков М.Д., Иванова Т.Г., Левченко А.А. // *Известия высших учебных заведений. - Физика*. - 2014. - Т. 57. - № 2. - С. 116-118.
31. Казаков, А.А. Исследование природы неметаллических включений в стали с помощью автоматического анализатора частиц / А.А. Казаков, Д.А. Любченко, С.В. Рябошук, Л.С. Чигинцев // *Черные металлы*. - 2014. - №4.
32. Иванов, С.Г. Термодинамическое моделирование реакций в насыщающей среде при диффузионном борировании сталей / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Черных Е.В., Гурьев М.А., Иванова Т.Г., Гармаева И.А., Зобнев В.В., Гонг В. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. - 2014. - Т. 11. - № 1. - С. 13-16.
33. Guriev, A.M. Comparison of the microstructure of boron-based diffusion coatings obtained from different pastes / Guriev A.M., Ivanov S.G., Guriev M.A. // *Письма о материалах*. - 2014. - Т. 4. - № 4 (16). - С. 257-260.
34. Гурьев, М.А. Взаимосвязь химического состава насыщающей среды и диффузионного покрытия на сталях 45 и 45Л / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Алонцева Д.П., Иванова Т.Г., Гурьев А.М. // *Письма о материалах*. - 2014. - Т. 4. - № 3 (15). - С. 179-181.
35. Гурьев, А.М. Борирование малоуглеродистой стали / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Гурьев М.А., Шунчи М., Власова О.А. - Raleigh, 2015.
36. Ivanov, S.G. Features of multicomponent saturation alloyed by steels / Ivanov S.G., Garmaeva I.A., Guriev M.A., Guriev A.M., Starostenkov M.D. // *Lecture Notes in Control and Information Sciences*. - 2015. - Т. 22. - С. 49-53.
37. Кошелева, Е.А. Повышение прочности инструментальных сталей / Кошелева Е.А. // *Ползуновский альманах*. - 2015. - Т. 2. - С. 133-134.
38. Guriev, A.M. Determine the mechanism of adsorption of atoms of boron chemical-heat-treated steel / Guriev A.M., Ivanov S.G., Guriev M.A., Ivanova T.G. // В сб.: Effect of external influences on the strength and plasticity of metals and alloys Book of the International seminar articles. Edition in Chief: Professor Sc. D., Starostenkov M.D. - 2015. - С. 75-76.
39. Иванов, С.Г. Структура и свойства сталей с диффузионными покрытиями, полученными из разных обмазок на основе карбида бора / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Гармаева И.А., Гурьев А.М. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. - 2015. - Т. 12. - № 2. - С. 198-202.
40. Иванов, С.Г. Микроструктура диффузионной зоны в железоуглеродистых сплавах после совместного поверхностного диффузионного насыщения бором и хромом / Иванов С.Г., Иванова Т.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Бильтриков Н.Г., Гурьев А.М. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. - 2015. - Т. 12. - № 2. - С. 223-226.
41. Гурьев, А.М. Особенности микроструктуры стали Ст3 после совместного диффузионного насыщения поверхности бором, хромом и титаном / Гурьев А.М., Иванова Т.Г., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Мэй Шунчи. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. - 2016. - Т. 13. - № 2. - С. 230-232.
42. Гурьев, М.А. Перспективные методы получения упрочняющих покрытий / Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Галаа О. - Барнаул, 2016. - 182 с.: ил.

Иванов Сергей Геннадьевич¹ – к. т. н.

Дон Яджи²

Гурьев Алексей Михайлович^{1,2} – д. т. н., профессор

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

² Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай