ОТОЗВАНА/ RETRACTED 05.04.2022

УДК 669.017

СРАВНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ СТАЛЕЙ В ЛИТОМ И ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

А. М. Гурьев [1, 2], О. А. Власова [1], С. Г. Иванов [1], И. А. Гармаева [1], Мэй Шунчи [2, 3], Люи Чао [2]

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

[2] Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

[3] Государственная цифровая лаборатория текстильного оборудования провинции Хубэй, г. Ухань, Китай

Исследована структура диффузионных боридных слоев на штамповой стали 5ХНВ в литом и деформированном исходном состоянии, полученная в условиях изотермического насыщения и в условиях, когда насыщение велось при циклическом изменении температуры. Показано, что циклический нагрев и охлаждение значительно ускоряют кинетику процесса ХТО железоуглеродистых сплавов вне зависимости от их исходного состояния. Установлено, что диффузия по границам зерен является главным механизмом карбоборирования за исключением наружного слоя, где решающим фактором является реакционная диффузия.

Ключевые слова: сталь, диффузия, борирование, химико-термическая обработка, термоциклирование

COMPARISON OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE DIFFUSION LAYER OF STEELS IN CAST AND STRAIN STATE AFTER THERMAL CYCLING IN CHEMICAL HEAT PROCESSING

A. M. Guriev [1, 2], O. A. Vlasova [1], S. G. Ivanov [1], A. I. Garmaeva [1], Mei Shunqi [2, 3], Liu Chao [2]

[1] Altai State Technical University, Barnaul, Russia

[2] Wuhan Textile University, Wuhan, China

[3] Government Key Laboratory of Digital Textile Equipment of Hubei Province, Wuhan, China

The investigated structure the diffusion of the boride layers on cast and de-formed steels. The structure obtained in the isothermal saturation in conditions where the saturation was carried out under cyclic temperature change. It is shown that the cyclic heating and cooling significantly accelerate the kinetics of the process XTO iron-carbon alloys, regardless of their initial state. It is established that diffusion along the grain boundaries is the main mechanism of boriding with the exception of the outer layer, where the decisive factor is reaction diffusion.

Ключевые слова: steel, diffusion, boriding, chemical-heat treatment, thermocycling

В процессе эксплуатации наиболее интенсивно подвергаются температурно-силовым воздействиям поверхностные слои деталей и инструмента, поэтому структура и свойства поверхностных слоев оказывает важное влияние на их работоспособность. С этой точки зрения представляет интерес повышение износостойкости деталей машин и инструмента методами химико-термической обработки (ХТО) [1, 2].

ОТОЗВАНА/ RETRACTED 05.04.2022

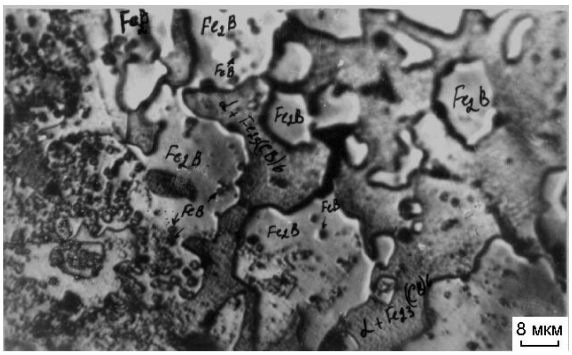


Рисунок 1 – Оптическое изображение поверхности боридного слоя малоуглеродистой стали. Отмечены присутствующие фазы, установленные с помощью метода дифракционной электронной микроскопии. Разрез сделан параллельно поверхности образца на глубине 50 мкм

Рисунок 2 – Микроструктура боридного слоя малоуглеродистой стали. Оптическая микроскопия. Разрез сделан перпендикулярно поверхности образца

Недостатками процессов традиционной ХТО являются их энергоёмкость и продолжительность. Диффузионное насыщение поверхности стали чаще всего производят при высокотемпературной изотермической или изотермически-ступенчатой выдержке с полной перекристаллизацией стали в аустенитное состояние. Это приводит к перегреву – структура и механические свойства, кроме твёрдости и износостойкости, ухудшаются. Есть и другие недостатки в технологии ХТО с высокотемпературной выдержкой в процессе насыщения: коробление ползучести, высокая энергоёмкость и т. д.

Указанные недостатки можно устранить при диффузионном насыщении поверхности сплава в режиме термоциклирования. Химико-термическая обработка сталей при некоторых циклически изменяющихся температурных режимах (ХТЦО) более эффективна, чем при постоянной температуре насыщения [3 – 5].

Изготовление инструмента различными методами литья приводит к сокращению расхода дорогостоящей инструментальной стали и снижению себестоимости инструмента. Литой инструмент к тому же обладает повышенной износостойкостью. Поэтому широкое применение литейных технологий является весьма перспективным направлением в инструментальном производстве [6].

В настоящей работе представлены результаты исследования структуры и микротвердости инструментальных штамповых сталей в деформированном (5ХНВ) и литом состоянии (5ХНВЛ) после их химико-термической обработки.

Установлено, что истинная картина структуры феррито-перлитной стали подвергнутой диффузионному борированию более сложная, чем предполагалось в ранее опубликованных результатах исследований, а переходную зону следует называть карбоборидной. Фазовый состав внутри всей карбоборидной (переходной) зоны не меняется. Однако механизм формирования в различных ее участках (слоях) различен [7, 8].

Как показали исследования, проведенные методами рентгеноструктурного анализа оптической и электронной микроскопии, фазовый состав и объемная доля фаз по мере продвижения вглубь образца меняется. Наиболее наглядно расположение этих фаз видно на рисунках 1 и 2. На рисунке 3 показано распределение концентрации бора по слою боридов.

Бориды Fe_2B и FeB образуются путем реакционной диффузии вслед за движущейся межфазной границей, которая смещается в глубь α-Fe.

Исследования структуры стали с исходным литым состоянием показали, что направленная кристаллизация привела к существенным качественным изменениям в структуре стали. Бор более активно проникает при таком строении на большую глубину и в больших количествах. В частности, фазовый состав на глубине 2,5 мм в первом образце содержит один карбоборид железа $Me_{23}(C,B)_6$, в то время как во втором образце присутствуют два карбоборида –

ОТОЗВАНА/ RETRACTED 05.04.2022

$Me_3(C,B)$ и $Me_{23}(C,B)_6$. Установлен следующий фазовый состав:

- на поверхности:

α + Me_2B+ MeB + B_4C + $Me_3(C,B)$ + $Me_{23}(C,B)_6$

- на расстоянии от поверхности образца 100 мкм:

α + $Me_3(C,B)$ + $Me_{23}(C,B)_6$

- на расстоянии - 500 мкм:

α + Me_3C + $Me_3(C,B)$ + $Me_{23}(C,B)_6$

- на расстоянии – 2500мкм:

α + Me_3C + $Me_{23}(C,B)_6$

Чистого (не борированного) цементита даже на глубине 2,5 мм после борирования малоуглеродистой литой стали нет, в то время как в первом образце он начал появляться на глубине 500 мкм. Кроме того, о более активной диффузии бора в объем материала во втором случае свидетельствует несколько повышенная суммарная плотность границ зерен, как исходных, так и возникающих в процессе борирования. Эти границы служат основными каналами проникновения бора вглубь стали.

Проведенные исследования позволили детально изучить кинетику образования борированного слоя и выявить механизм его формирования на стали.

Кроме борирования литая сталь была подвергнута цементации в течение 5 часов при температуре 950 ^{0}С. Толщина диффузионного слоя составила около 1,6 мм, что более чем в два раза превышает результат, полученный при цементации аналогичной стали в деформированном состоянии.

Полученные результаты свидетельствуют о значительно более высокой скорости диффузии углерода и бора (рисунок 4) при химико-термической обработке сталей в литом состоянии по сравнению с деформированными сталями аналогичного химического состава. Из рисунка 4 также видно, что термоциклирование во время насыщения бором позволяет получить упрочнённый диффузионный слой необходимой толщины за более короткое время и с более высокой твердостью.

Установлено, что увеличению скорости диффузии способствует наличие в структуре литой стали зоны столбчатых кристаллов, а основным механизмом диффузии бора в стали является диффузия по границам зерен.

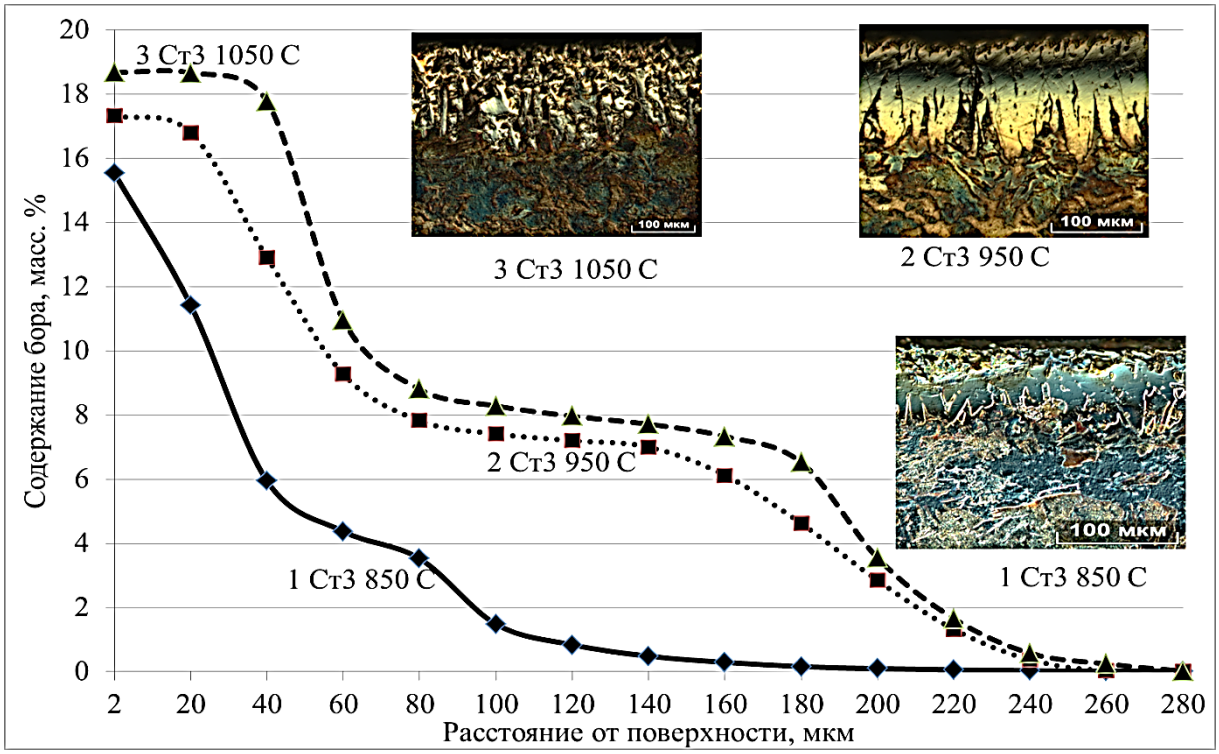
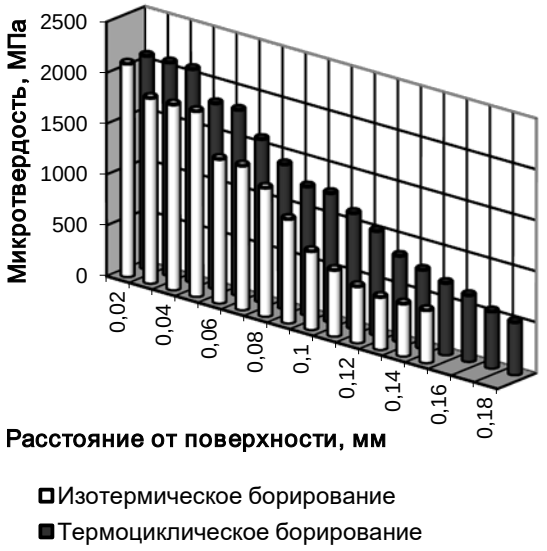
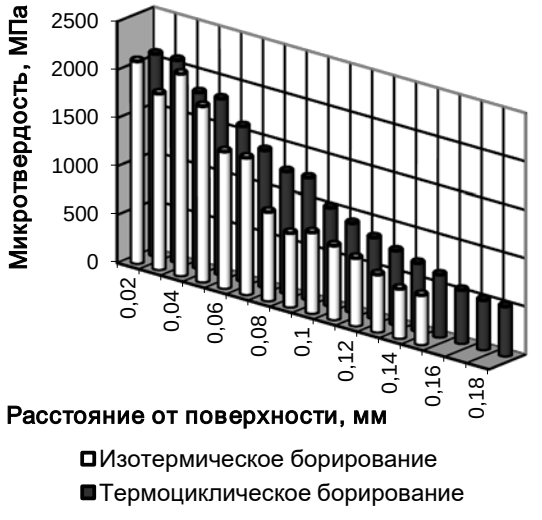


Рисунок 3 – Распределение концентрации бора по слою боридов на малоуглеродистой стали

ОТОЗВАНА/ RETRACTED 05.04.2022



а



б

Рисунок 4 – Распределение микротвердости упрочненного борированием слоя: а – литая сталь 5ХНВЛ, б – деформированная сталь 5ХНВ

Следует отметить, что новые способы ХТЦО, позволяют проводить диффузионное насыщение поверхностей конструкционных и инструментальных сталей бором и углеродом на стандартном оборудовании любого термического участка. Эти способы ХТЦО совмещены с закалкой в последнем цикле, последующий отпуск дает необходимую твёрдость, как «сердцевины», так и поверхности детали, т. е. формирует окончательные свойства изделия.

Выводы

1. Исследована структура диффузионных боридных слоев на штамповой стали 5ХНВ в литом и деформированном исходном состоянии, полученная в условиях изотермического насыщения и в условиях, когда насыщение велось при циклическом изменении температуры. Показано, что циклический нагрев и охлаждение значительно ускоряют кинетику процесса химико-термической обработки железоуглеродистых сплавов вне зависимости от их исходного состояния (литое или деформированное).

2. Результаты исследования свидетельствуют о более высокой скорости диффузии углерода и бора при химико-термической обработке сталей в литом состоянии по сравнению с деформированными сталями аналогичного химического состава.

3. Установлено, что диффузия по границам зерен является главным механизмом карбоборирования за исключением наружного слоя, где решающим фактором является реакционная диффузия.

Список литературы

1. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник // Под ред. Л.С. Ляховича. М.: Металлургия, 1981. 424 с.

2. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. М.: Металлургия, 1978. 239 с.

3. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние. 1989. – 255 с.

4. Руфанов Ю.Г., Бирук Н.Г., Бордюг Г.К., Фомичёв О.И. Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства боридного слоя. // МиТОМ. - 1983. - № 12. – С. 13 – 14.

5. Transformation of the phase composition and the mechanism of transition re-gion 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.

6. Гурьев А.М. Новые материалы и технологии для литых штампов.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ.- 2000.-216 с.

7. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Физические основы термоциклического борирования. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 216 с.

8. Transition zone forming by different diffusion techniques in borating process of ferrite - pearlite steels Under the thermocyclic conditions A.M. Guriev, E.V. Kozlov, B.D. Lygdenov, A.M. Kirienko, E.V. Chernykh // Фундаментальные проблемы современного материаловедения, №2.- 2004.- С.54 – 60.

9. 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.: Эволю-

ОТОЗВАНА/ RETRACTED 05.04.2022

ция дефектных структур в конденсированных средах. Сб. тезисов докладов 5-ой Международной школы-семинара. - 2000. - С. 149-150.

10.Гурьев А.М. Изменение фазового состава и механизм формирования структуры переходной зоны при термоциклическом карбоборировании феррито-перлитной стали / Гурьев А.М., Козлов Э.В., Крымских А.И., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2000. - Т. 43. - № 11. - С. 60.

11.Гурьев А.М. Изменение фазового состава и механизм формирования структуры переходной зоны при термоциклическом борировании феррито-перлитной стали / Гурьев А.М., Козлов Э.В., Жданов А.Н., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. / Известия высших учебных заведений. Физика. - 2001. - № 2. - С. 58.

12.Гурьев А.М. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей / Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П., Лыгденов Б.Д., Земляков С.А., Гурьева О.А., Колядин А.А., Попова О.В. // Ползуновский вестник. - 2005. - № 2-2. - С. 36-43.

13.Гурьев А.М. Особенности формирования структуры диффузионного слоя на литой стали при химико-термической обработке / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Махаров Д.М., Мосоров В.И., Черных Е.В., Гурьева О.А., Иванов С.Г. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2005. - Т. 2. - № 1. - С. 39-41.

14.Гурьев А.М. Циклическое тепловое воздействие при термической и химико-термической обработке инструментальных сталей / Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П., Лыгденов Б.Д., Черных Е.В. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2005. - Т. 2. - № 3. - С. 37-45.

15.Лыгденов Б.Д. Особенности формирования структуры диффузионного слоя и разработка технологии упрочнения литых инструментальных сталей с учетом дендритной ликвации / Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Гармаева И.А., Мижитов А.Ц., Мосоров В.И. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2006. - Т. 3. - № 3. - С. 84-86.

16.Гурьев А.М. Исследование процессов диффузии в стали при циклическом тепловом воздействии / Гурьев А.М., Хараев Ю.П., Гурьева О.А., Лыгденов Б.Д. // Современные проблемы науки и образования. - 2006. - № 3. - С. 65-66.

17.Гурьев А.М. Распределение атомов бора и углерода в диффузионном слое после борирования стали 08кп / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Мосоров В.И., Инхеев Б.С. // Современные наукоемкие технологии. - 2006. - № 5. - С. 35-36.

18.Гурьев А.М. Термоциклическое борирование как метод повышения прочности инструментальных сталей / Гурьев А.М., Власова О.А., Лыгденов Б.Д., Гармаева И.А., Кириенко А.М., Иванов С.Г., Кошелева Е.А. // Ползуновский альманах. - 2007. - № 1-2. - С. 85.

19.Гурьев А.М. Диффузионное термоциклическое упрочнение поверхности стальных изделий бором, титаном и хромом / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гармаева И.А., Гурьев М.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2007. - Т. 4. - № 1. - С. 30-35.

20.Власова О.А. Повышение прочности диффузионных карбоборидных покрытий термоциклированием в процессе их получения / Власова О.А., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Гурьев А.М. // В сборнике: 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.

21.Гурьев А.М. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Лыгденов Б.Д., Земляков С.А., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. // патент на изобретение RUS 2345175 03.04.2007.

22.Гурьев А.М. Способ упрочнения деталей из штамповых сталей / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Земляков С.А., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. // патент на изобретение RUS 2360031 18.07.2007

23.Гурьев А.М. Физические основы химико-термоциклической обработки сталей Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Попова Н.А., Козлов Э.В. Барнаул, 2008.

24.Гурьев А.М. Фазовый состав и механизм образования диффузионного слоя при борировании сталей в условиях циклического теплового воздействия / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А., Иванов С.Г., Козлов Э.В., Гармаева И.А. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 1. - С. 20-27.

25.Гурьев А.М. Новый способ диффузионного термоциклического упрочнения поверхностей железоуглеродистых сплавов / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Земляков С.А. // Ползуновский альманах. - 2008. - № 3. - С. 10-16.

26.Гурьев А.М. Интенсификация процессов химико-термической обработки металлов и сплавов / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А. // Фундаментальные исследования. - 2008. - № 8. - С. 10.

27.Гармаева И.А. Исследование влияния различных факторов при борировании на механические свойства стали с применением математической модел / Гармаева И.А., Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Власова О.А. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2008. - № 10. - С. 30-32.

28.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. // Современные наукоемкие технологии. - 2008. - № 3. - С. 33.

29.Гурьев А.М. Способ упрочнения стальных деталей / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Лыгденов Б.Д. // патент на изобретение RUS 2381299 12.05.2008.

30.Кошелева Е.А. Оптимизация химико-термоциклической обработки стали 30Х / Кошелева Е.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Власова О.А., Бруль Т.А. // Фундаментальные исследования. - 2008. - № 2. - С. 108-109.

ОТОЗВАНА/ RETRACTED 05.04.2022

31.Гурьев А.М. Влияние циклического теплового воздействия на формирование структуры и фазового состава диффузионных боридных слоев инструментальных сталей / Гурьев А.М., Грешилов А.Д. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2009. - Т. 6. - № 3. - С. 70-84.

32.Гурьев А.М. Совершенствование технологии химико-термической обработки инструментальных сталей / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2009. - № 1. - С. 14-15.

33.Кошелева Е.А. Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном борировании инструментальных сталей / Кошелева Е.А., Гурьев А.М. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2009. - № 5. - С. 76-77.

34.Гурьев М.А. Комплексное диффузионное упрочнение тяжелонагруженных деталей машин и инструмента / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Кошелева Е.А., Иванов А.Г., Грешилов А.Д., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Околович Г.А. // Ползуновский вестник. - 2010. - № 1. - С. 114-121.

35.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.

36.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.

37.Лыгденов Б.Д. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 20Л, 45, 55 И 5ХНВ / Лыгденов Б.Д., Гармаева И.А., Попова Н.А., Козлов Э.В., Гурьев А.М., Иванов С.Г. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2012. - Т. 9. - № 4-2. - С. 681-689.

38.Гурьев А.М. Диффузионные покрытия сталей и сплавов / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, И. А. Гармаева. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. - 221 с.

39.Лыгденов Б.Д. Термоциклирование. Структура и свойства / Лыгденов Б.Д., Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – 252с.

40.Lygdenov B.D. Phase composition of gradient structures on carbon steels after boronizing / Lygdenov B.D., Guriev A.M., Butukhanov V.A., Mei Sh., Zhou Q. // В сб.: External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys. Book of the International seminar articles. Ed. by V. Gromov. - 2014. - С. 154-160.

41.Гурьев А.М. Борирование малоуглеродистой стали / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Гурьев М.А., Шунчи М., Власова О.А. - Raleigh, North Carolina, USA: Lulu Press, - 2015. - 141 p.

42.Gur'ev A. M. Chemicothermal Treatment of Tool Materials., S. G. Ivanov, M. A. Gur'ev, E. V. Chernykh, T. G. Ivanova // Steel in Translation, - 2015, - Vol. 45, - No. 8, - pp. 555–558.

43.Лыгденов Б.Д. Перспективные диффузионные покрытия / Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев, В.И. Мосоров, В.А. Бутуханов. - Raleigh, North Carolina, USA: Lulu Press, - 2015. – 131 p.

44.Гурьев А.М. Химико-термическая обработка материалов для режущего инструмента / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Иванова Т.Г. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. - Том 58. - № 8. - С. 578 – 582.

45.Гурьев М.А. Перспективные методы получения упрочняющих покрытий / М.А. Гурьев, Е.А. Кошелева, А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, О. Галаа. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 182с.

46.Гармаева И. А Сравнительное исследование насыщающей способности борирующих сред различного состава / Гармаева И. А., Гурьев А. М., Иванова Т. Г., Гурьев М. А., Иванов С. Г. // Letters on materials 6 (4), - 2016 - 262-265 pp.

Гурьев Алексей Михайлович [1, 2] *– д. т. н., профессор*
Власова Ольга Алексеевна [1] *– к. т. н.*
Иванов Сергей Геннадьевич [1] *– к. т. н.*
Гармаева Ирина Анатольевна [3] *– к. т. н., доцент*
Мэй Шунчи [2, 3] *– профессор*[2]*, директор*[3]
Люи Чао [2] *– аспирант*

[1] *ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия*
[2] *Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай*
[3] *Государственная Цифровая Лаборатория текстильного оборудования провинции Хубэй г. Ухань, Китай*