УДК 621.785

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

А. М. Гурьев [1, 2], С. Г. Иванов [3], М. А. Гурьев [3], А. А. Бердыченко [1]
[1] Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия
[2] Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай
[3] ООО «Технологии упрочнения», г. Барнаул, Россия

Проведено моделирование воздействия термических режимов борирования из порошковых сред в условиях нагрева в камерной печи с целью выявления влияния их на изменение структуры и свойств стали Р6М5.

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

INFLUENCE OF THE HEAT TREATMENT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF QUICK CUTTING STEEL

A. M. Guriev [1, 2], S. G. Ivanov [3], M. A. Guriev [3], A. A. Berdychenko [1]
[1] Altai State Technical University, Barnaul, Russia
[2] Wuhan Textile University, Wuhan, China
[3] LLC «Technologies of hardening», Barnaul, Russia

Model operation of influence of the thermal modes of borating from powder environments in heating conditions in a compartment furnace for the purpose of identification of influence them on structural change and properties of P6M5 steel is carried out.

Ключевые слова: steel, diffusion, borating, chemical heat treatment

Введение. Быстрорежущие вольфрамсодержащие стали широко применяются в качестве материала для изготовления режущего, штампового и другого инструмента благодаря высокому комплексу эксплуатационных свойств: твердости, вязкости, красностойкости и т. д. Считается, что температурно-временной режим химико-термической обработки (ХТО) данных сталей, такой как цементация, борирование, титанирование, силицирование и т. п., несовместим со стандартным режимом их термообработки и может привести к значительному ухудшению структуры и снижению механических свойств.

В настоящей работе проведено моделирование воздействия термических режимов борирования из порошковых сред в условиях нагрева в камерной печи с целью выявления влияния их на изменение структуры и свойств стали Р6М5. Для имитации насыщающей среды была использована химически и термохимически нейтральная среда, в качестве которой применяли оксид алюминия Al_2O_3. Теплофизические параметры (теплопроводность, теплоемкость, теплопередача) оксида алюминия достаточно близки к теплофизическим параметрам насыщающих смесей на основе карбида бора, часто используемым для борирования сталей во всем интервале температур проведения процесса ХТО. Моделируемые условия борирования предусматривали как насыщение без сопряженной термической обработки, так и насыщение с сопряженной термической обработкой в виде закалки непосредственно после борирования с последующим отпуском при температуре 200 ^{0}С для снятия напряжений.

Методика экспериментов. В качестве нагревательного устройства была использована камерная высокотемпературная печь типа СНОЛ, оснащенная программируемым ПИД-контроллером «ТЕРМОДАТ-16Е3» с максимальной рабочей температурой 1250 ^{0}С. Образцы представляли собой цилиндры диаметром 15 мм и высотой 15 мм из проката быстрорежущей стали Р6М5. Так как данная сталь склонна к структурной неоднородности, то исследования структуры производились в направлениях вдоль и поперек прокатки. Исходная структурная неоднородность (полосчатость) проката соответствовала 1 баллу. Выбор режимов термообработки и химико-термической обработки производили в соответствии с рекомендациями, приведёнными в работах [1 – 10]. В качестве эталонного варианта был выбран режим, сочетающий закалку в масле с температуры 1250 ^{0}С и трехкратный отпуск при температуре 550 ^{0}С [5 – 10]. Моделируемые режимы борирования заключались в нагреве до 950 ^{0}С образцов, помещённых в контейнер с оксидом алюминия, и выдержке при этой температуре в течение 1,5 ч, после чего часть образцов охлаждалась вместе с печью до температуры 300 ^{0}С. Далее контейнеры с образцами извлекали из печи, охлаждали на воздухе до температуры 60 – 80 ^{0}С и распаковывали. Другая часть образцов, подлежащая закалке: извлекалась из печи, тут же распаковывалась и охлаждалась в масле, после чего подвергалась отпуску при температуре 200 ^{0}С для снятия напряжений. Время пребывания закаливаемых образцов на открытом воздухе не превышала 2 с, так как при дальнейшем борировании планируется использовать самозащитные насыщающие среды [1, 11, 12], не предполагающие применения плавкого затвора.

Микроструктурные исследования вели при помощи программно-аппаратного комплекса «Thixomet Pro» по методикам, описанным в [13 – 17].

Количественные и качественные результаты исследований, такие как плотность карбидов, их средний размер, твердость, представлены в таблице 1.

Как видно из представленных на рисунке 1 изображений микроструктуры, после традиционной термической обработки в стали Р6М5 сохраняется незначительная структурная неоднородность, соответствующая 1. Твердость образца при этом составляет 64,2 HRC вдоль и 64,0 HRC – поперек направления прокатки. Плотность карбидов в направлении вдоль и поперек направления прокатки соответственно составила 3,0 и 1,2 млн. шт/мм^2, средний диаметр карбидных частиц соответственно 2,39 и 1,62 мкм.

Микроструктура стали после нагрева, помещённых в контейнер с оксидом алюминия, вместе с печью до температуры 950 ^{0}С, выдержки при этой температуре в течение 1,5 ч и последующего охлаждения вместе с печью со скоростью 50 ^{0}С/ч до температуры 300 ^{0}С, а затем охлаждения на воздухе контейнера с упакованными образцами до температуры 60 – 80 ^{0}С со средней скоростью 30 ^{0}С /ч.

Таблица 1 – Физико-механические свойства стали Р6М5 после термической обработки

Направление исследования микроструктуры	Балл зерна	Твердость, HRC	Плотность карбидов, шт/мм^2	Средний размер карбидов, мкм	Объемная доля карбидов, %
Закалка с 1250 ^{0}С в масло и 3-х кратный отпуск при 550 ^{0}С					
Вдоль проката	11	64,2	3 043 509	2,39	14,3
Поперек проката	12	64,0	1 216 913	1,62	15,7
Отжиг при 950 ^{0}С в течение 1,5 ч, охлаждение с печью до 300 ^{0}С и далее – на воздухе					
Вдоль проката	12	60,8	759 841	2,13	21,3
Поперек проката	10	61,0	7 472 743	1,30	10,9
Закалка с 950 ^{0}С, 1,5 ч, масло. Отпуск при 200 ^{0}С, 2 ч.					
Вдоль проката	12	60,7	940 340	2,46	28,60
Поперек проката	11	60,5	753 539	1,96	8,98

При отжиге наблюдается рост размера карбидных частиц вследствие их коагуляции, а также увеличение их количества за счёт выпадения карбидных частиц из твёрдого раствора. При этом, в сечении вдоль направления прокатки, плотность карбидных частиц уменьшается в 4 раза, тогда как в направлении поперек прокатки она растет в 6 раз. Твёрдость стали при этом падает до 61 HRC. Средний размер карбидных частиц уменьшается, а объёмная

доля карбидной фазы – растёт в 1,5 раза в сечении направления проката и снижается в 1,4 раза в сечении поперек направления проката. Структурная неоднородность (полосчатость) также растет, но находится в пределах 1 балла по ГОСТ 5640-68.

При закалке с температуры 950 ^{0}С с последующим отжигом, наблюдается рост размера карбидных частиц вследствие их коагуляции, а также снижение их количества за счёт торможения процесса выделения карбидных частиц из твёрдого раствора вследствие резкого охлаждения. При этом в сечении вдоль направления прокатки, плотность карбидных частиц уменьшается в 3 раза, а в направлении поперек прокатки – в 1,6 раз. Твердость стали при этом падает до 60,5 HRC. Средний размер карбидных частиц растёт, а объёмная доля карбидной фазы – растёт в 2,0 раза в сечении направления проката и снижается в 1,7 раза в сечении поперёк направления проката. Структурная неоднородность (полосчатость) снижается. При этом, в крупных частицах карбидов наблюдается выпадение более темных частиц – предположительно сложных карбидов вольфрама и молибдена.

Проведенные исследования образцов из стали Р6М5 после термической обработки по режимам, предусматривающим нагрев до температуры 950 ^{0}С, позволяют сделать следующие выводы:

– происходит обеднение твёрдого раствора углеродом и легирующими элементами, что снижает их твёрдость;

– выделение карбидных частиц из твердого раствора превалирует над процессами их распада и перевода в твердый раствор;

– независимо от скорости охлаждения с температуры 950 ^{0}С твердость стали Р6М5 снижается незначительно (не более чем на 3,5 HRC) по сравнению с твердостью после охлаждения с более высокой температуры нагрева, традиционно применяемой для этой стали;

– исходя из проведенного исследования, нагрев и выдержку при температуре 950 ^{0}С можно рекомендовать для высокотемпературной химико-термической обработки быстрорежущей стали Р6М5.

Список литературы

1. 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.

2. 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.

3. 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. - № 8 (58). - С. 578-582.

4. 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.

5. Космынин А.В. Изотермическая закалка инструмента из быстрорежущих сталей / Космынин А.В., Чернобай С.П. // Современные наукоемкие технологии. - 2012. - № 9. - С. 46-47.

6. Хараев Ю.П. Термоциклическая закалка литой быстрорежущей стали / Хараев Ю.П. // Ползуновский альманах. - 2004. - № 4. - С. 54-55.

7. Доронин Д.И. Влияние температуры закалки на структурное состояние быстрорежущих сталей / Доронин Д.И., Русаков А.Д., Лукина Ю.А. // Металлы. - 2009. - № 4. - С. 63-66.

8. Еремин А.И. Исследование влияния отпуска в процессе закалки на свойства быстрорежущих сталей и стойкость малоразмерных инструментов / Еремин А.И. // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Москва, 1990

9. Хараев Ю.П. Структура и свойства литого инструмента / Хараев Ю.П. - Барнаул, 2004. - 143с.

10.Хараев Ю.П. Структурное состояние поверхностного слоя и стойкость литого инструмента / Хараев Ю.П. // Ползуновский вестник. - 2005. - № 2-2. - С. 98-100.

11.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

12.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

13.Kazakov A.A., Kiselev D. Metallography, Microstructure, and Analysis. DOI 10.1007/s13632-016-0289-6

14.Kazakov A.A., Ryaboshuk S., Lyubochko D., Chigintsev L. 1755 21 (3), (2015). DOI 10.1017/S1431927615009551.

15.Kazakov A.A. and Kiselev D. Microscopy and Microanalysis 457, 21 (3), (2015). DOI 10.1017/S1431927615003086.

16.Kazakov A.A., Luong N.H., Kasakova E.I., Zorina E.M. Understanding Processing, Structure, Property and Behavior Correlations: Proceedings of the 32nd Annual Convention of the International

Metallographic Society Held. Cincinati, Ohio ASM International, 133, 27 (1999).

17.Казаков А.А., Ковалев П.В., Мясников А.Л., Дробинин А.А., Зинченко С.Д. // Черные металлы. - 2006 - №2 – С. 32.

18.Лыгденов Б.Д. Влияние состава насыщающей среды на структуру и свойства диффузионного слоя при титанировании сталей / Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М. // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2000. - Т. 43. - № 11. - С. 269.

19.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.

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

21.Гурьев А.М. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Гармаева И.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. // Успехи современного естествознания. - 2007. - № 10. - С. 84-85.

22.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.

23.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.

24.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.

25.Бутуханов В.А. Исследование процесса диффузионного насыщения в смеси, содержащей оксид ванадия и алюминий / Бутуханов В.А., Грешилов А.Д., Лыгденов Б.Д., Отхонсо Г. // Ползуновский вестник. - 2012. - № 1-1. - С. 51-55.

26.Власова О.А. Оптимизация многокомпонентной химико-термической обработки стали 30Х / Власова О.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Чех С.А. // Современные наукоемкие технологии. - 2008. - № 3. - С. 32.

27.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.

28.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.

29.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.

30.Структурно-фазовые состояния перспективных металлических материалов / Багмутов В.П., Белов Е.Г., Божко И.А., Будовских Е.А., Ващук Е.С., Власова О.А., Викарчук А.А., Вострецова А.В., Громов В.Е., Громова А.В., Гун Г.С., Гурьев А.М., Данилов В.И., Дмитриев С.В., Ефимов О.Ю., Ерошенко А.Ю., Зуев Л.Б., Иванов Ю.Ф., Иванов С.Г., Иванова О.В. и др. Ответственный редактор Громов В.Е. - Новокузнецк, 2009.

31.Бутуханов В.А. Диффузионное упрочнение сталей в насыщающей среде V+Al+B_4C / Бутуханов В.А., Суханов Н.Г., Лыгденов Б.Д., Галаа О. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2013. - Т. 10. - № 1. - С. 146-148.

32.Бутуханов В.А. Влияние металлотермических реакций на диффузионные процессы при химико-термической обработке / Бутуханов В.А., Цыреторов Б.Ш., Лыгденов Б.Д. // В сборнике: VI сессия Научного совета РАН по механике Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; Научные редакторы: Морозов Н.Ф., Старостенков М.Д. - 2012. - С. 51-52.

33.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.

34.Гурьев М.А. Оптимизация состава многокомпонентной насыщающей смеси на основе бора и хрома для поверхностного легирования сталей / Гурьев М.А., Кошелева Е.А., Иванов С.Г. // Ползуновский альманах. 2010. № 1. С. 131-135.

35.Куркина Л.А. Влияние фракционного состава насыщающей смеси на изменение размеров образцов при борировании / Куркина Л.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Грешилов А.Д., Хараев Ю.П. // Ползуновский альманах. - 2012. – № 1. - С. 268-270.

36.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

37.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

38.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.

39.Бутуханов В.А. Влияние состава насыщающих порошковых сред на структуру и свойства диффузионных карбидных слоев / Бутуханов В.А., Лыгденов Б.Д. // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). - 2016. - № 2 (71). - С. 80-86.

40.Лыгденов Б.Д. Влияние специальных добавок на интенсификацию диффузионного титанирования / Лыгденов Б.Д., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. // Ползуновский альманах. - 2006. - № 3. - С. 94.

41.Бутуханов В.А. Исследование процесса диффузионного насыщения в смеси, содержащей оксид ванадия и алюминий / Бутуханов В.А., Грешилов А.Д., Лыгденов Б.Д., Отхонсо Г. // Ползуновский вестник. - 2012. - № 1-1. - С. 51-55.

42.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. 85-88.

43.Гурьев М.А. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М. // В сборнике: проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств Сборник научных трудов х международной научно-практической конференции. - Барнаул, 2009. - С. 40-46.

44.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

45.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.

46.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.

47.Гурьев М.А. Взаимосвязь химического состава насыщающей среды и диффузионного покрытия на сталях 45 и 45Л / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Алонцева Д.Л., Иванова Т.Г., Гурьев А.М. // Письма о материалах. - 2014. - Т. 4. - № 3 (15). - С. 179-181.

48.Иванов С.Г. Формирование поверхности при диффузионном боротитанировании сталей / Иванов С.Г., Гармаева И.А., Гурьев А.М. // Международный журнал экспериментального образования. - 2012. - № 5. - С. 42.

49.Гурьев А.М. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом / Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Гармаева И.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. // Успехи современного естествознания. 2007. № 10. С. 84-85.

50.Гурьев А.М. Теория и практика получения литого инструмента / Гурьев А.М., Хараев Ю.П. Барнаул, 2005. – 158с.

51.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.

Гурьев Алексей Михайлович [1, 2] *– д. т. н., профессор*
Иванов Сергей Геннадьевич [3] *– к. т. н.*
Гурьев Михаил Алексеевич [3] *– к. т. н.*
Бердыченко Александр Анатольевич *– к. т. н., доцент*

[1] *ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия*
[2] *Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай*
[3] *ООО «Технологии упрочнения», г. Барнаул, Россия*