

УДК 785.51

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ
БОРИРОВАННОЙ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

С.Г. Иванов², М.А. Гурьев², Т.Г. Иванова², И.А. Гармаева²,
Дон Яджи¹, Мэй Шунчи¹, А.М. Гурьев^{1,2}

¹Уханьский текстильный университет, г. Ухань, КНР

²Алтайский государственный технический университет
им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

serg225582@yandex.ru

Борирование и совмещенные процессы химико-термической обработки (ХТО) являются перспективными способами повышения ресурса работы стальных деталей и рабочих органов машин и оборудования [1–5]. Структура и свойства непосредственно боридных покрытий изучены достаточно хорошо [3–6], однако в литературе практически отсутствуют сведения о структуре и свойствах переходной зоны между слоем боридов и основным материалом. В большинстве случаев структура и свойства переходной зоны определяют свойства диффузионного покрытия и ресурс упрочненного ХТО изделия наравне с боридным покрытием [7–10].

Изображения микроструктуры были получены при помощи программно-аппаратного комплекса Thixomet[®], включающего программное обеспечение Thixomet[®] в комплекте с оптическим микроскопом Carl Zeiss Axio Observer Z1m. Для выявления данной структуры 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;
- травление 2% спиртовым раствором плавиковой кислоты в течение 1–3 с.

Специальное травление применено для того, чтобы выявить тонкую структуру именно подборидной (переходной) зоны, так как отдельные виды травления спиртовым раствором йода, пикрата натрия либо плавиковой кислоты получить четких снимков не позволяют.

В подборидной зоне борохромированной стали Ст3 (рисунок 1) практически отсутствует феррит, хотя в обычных условиях его доля достигает 80%. Структура неборированного перлита представлена на рисунке 2. Видно,

Grand Altai Council of HEI Chancellors network edition

что после борирования цементитные пластины в перлите практически все разрушены на фрагменты, имеющие средние размеры 20–45x80–180нм в плоскости шлифа. Кроме того, наблюдается значительная текстурованность цементитных пластин в направлении диффузии бора: от боридного покрытия в направлении сердцевины образца. Такая текстура, вероятнее всего, образуется в результате совместной диффузии бора и углерода от обрабатываемой поверхности вглубь материала: все образующиеся структуры, мешающие диффузионным потокам, растворяются в зародыше, тогда как структуры, параллельные концентрационному градиенту имеют большие шансы избежать растворения и вырасти до приемлемых размеров.



Рисунок 1. Микроструктура перлита с фрагментированными цементитными пластинами x1000 [The microstructure of pearlite with fragmented plates of cementite x1000].

Детализированное изображение борированного перлита, полученное с помощью просвечивающей микроскопии, с полуразрушенными цементитными пластинами приведено в работе [10].

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. Структура, представленная на рисунке 1, представляет собой полностью фрагментированное зерно перлита, существовавшего изначально, до процесса борирования. Достаточно четко просматриваются отдельные субзерна, составляющие приведенное на рисунке зерно – ориентация цементитных пластин, в отдельных субзернах, не совсем синхронна друг с другом. Кроме того, цементитные пластины субзерен, ориентированных под меньшим углом к градиенту концентраций бора, фрагментированы в меньшей степени, чем пластины субзерен, ориентированных по нормали к градиенту концентраций.

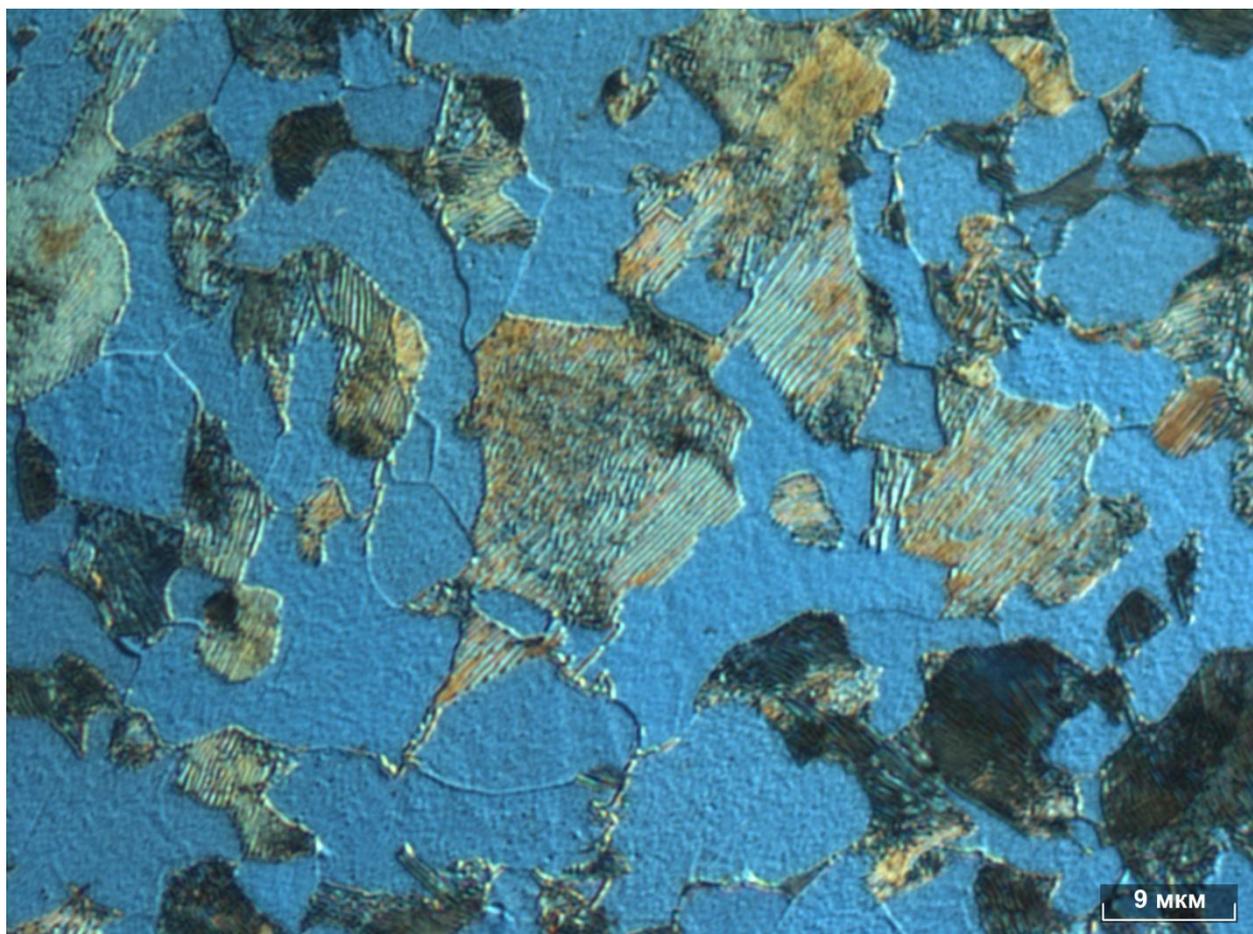


Рисунок 2. Микроструктура исходного перлита (зерна с пластинчатыми включениями) x1000 [The microstructure of the original pearlite (grain with plate inclusions) x1000].

Grand Altai Council of HEI Chancellors network edition

Это подтверждает, что диффузия бора преимущественно идет по реакционному механизму, так как в силу своего достаточно большого радиуса, атомы бора имеют крайне малую растворимость как в α -, так и в γ -фазах железа, ограниченную уровнем в тысячные доли процента. Таким образом, единственным путем реализации сколь-нибудь значимых величин диффузии, является реакционный механизм.

При однокомпонентном борировании на поверхности образуется однофазный диффузионный слой, имеющий среднюю микротвердость 1750 HV, что приблизительно соответствует микротвердости гемиборида железа Fe_2B , равной 1800–1900 HV. Испытания на микрохрупкость диффузионных покрытий показали, что при борировании по разработанным [1–3] технологиям с использованием смесей на основе карбида бора [6], образования микротрещин не обнаруживается в случаях вплоть до расстояния 0,5 диагоналей между отпечатками. В высокобористой фазе при расстояниях, меньших 0,5 диагонали отпечатка, возможно возникновение микротрещин.

Работа выполнена при поддержке задания Минобрнауки по приоритетным направлениям развития науки и техники – тема №885 и гранта Президента РФ МК-656.2014.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гармаева И.А. Диффузионные покрытия сталей и сплавов Барнаул, 2013. – 221с.
2. Иванов С.Г., Гармаева И.А., Андросов А.П., Зобнев В.В., Гурьев А.М., Марков В.А. Фазовые превращения и структура комплексных боридных покрытий Ползуновский вестник. 2012. № 1-1. С. 106-108.
3. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Кошелева Е.А., Иванов А.Г., Грешилов А.Д., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Околович Г.А. Комплексное диффузионное упрочнение тяжело нагруженных деталей машин и инструмента Ползуновский вестник. 2010. № 1. С. 114-121.
4. Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М. Упрочнение литых деталей поверхностным легированием В сборнике: проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств Гурьев А.М., Марков В.А. сборник научных трудов X международной научно-практической конференции. Барнаул, 2009. С. 40-46.
5. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Земляков С.А. Новый способ диффузионного термоциклического упрочнения поверхностей железоуглеродистых сплавов Ползуновский альманах. 2008. № 3. С. 10-16.
6. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Старостенков М.Д., Иванова Т.Г., Левченко А.А. Особенности приготовления насыщающих смесей для диффузионного борохромирования Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 2. С. 116-118.

7. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Черных Е.В., Гурьев М.А., Иванова Т.Г., Гармаева И.А., Зобнев В.В., Гонг В. Термодинамическое моделирование реакций в насыщающей среде при диффузионном борировании сталей. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2014. Т. 11. № 1. С. 13-16.
8. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Жданов А.Н., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Изменение фазового состава и механизм формирования структуры переходной зоны при термоциклическом борировании феррито-перлитной стали. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2001. № 2. С. 58.
9. Лыгденов Б.Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Новокузнецк, 2004 – 186с.
10. Лыгденов Б.Д. Интенсификация процессов формирования структуры диффузионного слоя при химико-термической обработке сталей диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ГОУВПО "Алтайский государственный технический университет". Барнаул, 2009 – 355с.
11. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М. Влияние состава насыщающей среды на структуру и свойства диффузионного слоя при титанировании сталей. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2000. Т. 43. № 11. С. 269.
12. Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П., Лыгденов Б.Д., Земляков С.А., Гурьева О.А., Колядин А.А., Попова О.В. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей. *Ползуновский вестник*. 2005. № 2-2. С. 36-43.
13. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Крымских А.И., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Изменение фазового состава и механизм формирования структуры переходной зоны при термоциклическом карбоборировании феррито-перлитной стали. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2000. Т. 43. № 11. С. 60.
14. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г., Власова О.А., Гармаева И.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом. *Успехи современного естествознания*. 2007. № 10. С. 84-85.
15. Иванов С.Г. Разработка состава насыщающей смеси и технологии диффузионного борохромирования тяжело нагруженных деталей машин и инструмента диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. 2007 – 157 с.

REFERENCES

1. Guriev A. M., Ivanov S. G., Garmayeva I. A. (2013) Diffuzionnye pokrytiya staley i splavov [Diffusion coating of steels and alloys]. Barnaul. – 221pp.

Grand Altai Council of HEI Chancellors network edition

2. Ivanov S. G., Garmaeva I. A., Androsov A. P., Zobnev V. V., Guriev A. M., Markov V. A. (2012) Fazovye prevrashcheniya i struktura kompleksnykh boridnykh pokrytiy [Phase transitions and structure of complex boride coatings]. Barnaul, Polzunovskiy vestnik, no 1-1, p. 106-108.
3. Guriev M. A., Ivanov S. G., Kosheleva E. A., Ivanov A. G., Greshilov A. D., Guriev A. M., Lygdenov B. D., Okolovich G. A. (2010) Kompleksnoe diffuzionnoe uprochnenie tyazhelo nagruzhennykh detaley mashin i instrumenta [Complex diffusion hardening of heavy loaded machine elements and tools]. Barnaul, Polzunovskiy vestnik, no 1, p. 114-121.
4. Guriev M. A., Ivanov S. G., Guriev A. M. (2009) Uprochnenie litykh detaley poverkhnostnym legirovaniem [The cast elements hardening by surface alloy addition]. Proceeding of the X-th international scientific-practical conference *Problems and prospects of development of the foundry, welding and forging and stamping production*, Barnaul: Polzunov Altai State Technical University, p. 40-46.
5. Guriev A. M., Lygdenov B. D., Ivanov S. G., Vlasova O. A., Kosheleva E. A., Guriev M. A., Zemlyakov S. A. (2008) Novyy sposob diffuzionnogo termotseklicheskogo uprochneniya poverkhnostey zhelezouglerodistykh splavov [A new method of diffusion thermocyclic surface hardening of iron-carbon alloys]. Barnaul, Polzunovskiy vestnik, no 3, p. 10-16.
6. Ivanov S. G., Guriev A. M., Starostenkov M. D., Ivanova T. G., Levchenko A. A. (2014) Osobennosti prigotovleniya nasyshchaushchikh smesey dlya diffuzionnogo borokhromirovaniya [Features of saturating mixtures preparation for diffusion borating chrome plating]. *News of Higher School. Physic*, v. 57, no 2, p. 116-118.
7. Ivanov S. G., Guriev A. M., Chernykh E. V., Guriev M. A., Ivanova T. G., Garmaeva I. A., Zobnev V. V., Gong V. (2014) Termodinamicheskoe modelirovanie reaktsiy v nasyshchaushchey srede pri diffuzionnom borirovanii staley [Reactions thermodynamic modeling in the saturating medium under the diffusion steels borating]. *Basic Problems of Material Sciences*, v. 11, no 1, p. 13-16.
8. Guriev A. M., Kozlov E. V., Zhdanov A. N., Ignatenko L. N., Popova N. A. (2001) Izmenenie fazovogo sostava i mekhanizm formirovaniya struktury perekhodnoy zony pri termotsiklicheskom borirovanii ferrito-perlitnoy stali [Phase composition changes and the formation of the transition zone structure mechanism in the thermal cycling borating of the ferrite-pearlite steel]. *News of Higher School. Physics*, no 2, p. 58.
9. Lygdenov B. D. (2004) Fazovye prevrashcheniay v stalyakh s gradientnymi strukturami, poluchennymi khimiko-termicheskoy i khimiko-termotsiklicheskoy obrabotkoy [Phase transformations in steels with gradient structures by chemical-thermal and chemical-thermal cycling treatment derived]. (Candidate of Technical Sciences Thesis) – 186 pp.
10. Lygdenov B. D. (2009) Intensifikatsiya protsessov formirovaniya struktury diffuzionnogo sloya pri khimiko-termicheskoy obrabotke [Processes of the diffusion layer structure formation intensification in the chemical and heat steel

treatment] (Doctor of Technical Sciences Thesis), Barnaul: Polzunov Altai State Technical University. – 355 pp.

11. Lygdenov B. D., Guriev A. M. (2000) Vliyanie sostava nasyshchaushchey sredy na strukturu i svoystva diffuzionnogo sloya pri titanirovanii staley [The composition of saturating medium influence on the structure and properties of the diffusion layer under the steel titanium-plating]. *News of Higher School. Physics*. v. 43, no 11, p. 269.

12. Guriev A. M., Voroshnin L. G., Kharaev Yu. P., Lygdenov B. D., Zemlyakov S. A., Gurieva O. A., Kolyadin A. A., Popova O. V. (2005) Termotsiklichesкое i khimiko-termotsiklichesкое uprochnenie staley [Thermal cycling and chemical thermal cycling steel hardening]. Barnaul, Polzunovskiy vestnik, no 2-2, p. 36-43.

13. Guriev A. M., Kozlov E. V., Krymskikh A. I., Ignatenko L. N., Popova N. A. (2000) Izmenenie fazovogo sostava i mekhanizm formirovaniya struktury perekhodnoy zony pri termotsiklicheskom karbo-borirovanii ferrito-perlitnoy stali [Phase composition changes and the formation of the transition zone structure mechanism in the thermal cycling carbon-borating of the ferrite-pearlite steel]. *News of Higher School. Physics*, v. 43, no 11, p. 60.

14. Guriev A. M., Lygdenov B. D., Ivanov S. G., Vlasova O. A., Garmaeva I. A., Kosheleva E. A., Guriem M. A. (2007) Nove metody diffuzionnogo termotsiklichesкого uprochneniya poverkhnosti stalnykh izdeliy borom sovместno s titanom i khromom [New methods of diffusion thermo-cyclic hardening of steel products surface by boron together with titanium and chromium]. *Advances in current natural sciences*, no 10, p. 84-85.

15. Ivanov S. G. (2007) Razrabotka sostava nasyshchaushchey smesi i tekhnologii diffuzionnogo boro-khromirovaniya tyazhelo nagruzhennykh detaley mashin i instrumenta [The composition of the saturating mixture development and the diffusion borating chrome plating technology of heavy loaded machine elements and tools] (Candidate of Technical Sciences Thesis), Barnaul: Polzunov Altai State Technical University.– 157 pp.