

УДК 539.5:621.9

ФОРМИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ НА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТА, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗНОСА

*Лыгденов Б.Д.^{1,2}, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
металловедения и технологии обработки материалов*

*Гурьев А.М.^{1,3}, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой начертательной геометрии
и инженерной графики (gurievam@mail.ru)*

Козлов Э.В.⁴, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой физики

Бутуханов В.А.², инженер, аспирант

Чжу Чинхуа¹, профессор

¹ Уханьский текстильный университет

(430072, No. 34, Hongshance Road, Wuchang District, Wuhan University, Wuhan, Hubei Province, P.R. China)

² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

(670013, Россия, Улан-Удэ, Республика Бурятия, ул. Ключевская, 40в)

³ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

(656038, Россия, Барнаул, Алтайский край, пр. Ленина, 46)

⁴ Томский государственный архитектурно-строительный университет

(634003, Россия, Томск, пл. Соляная, 2)

Аннотация. Проведены исследования строения и свойств диффузионного слоя образцов после борирования и борохромирования. Выявлено, что при борировании образуются диффузионные слои с большим содержанием высокобористой фазы, что приводит к снижению пластичности слоя. В настоящей работе проведены исследования по диффузионному насыщению бором рабочей поверхности пуансонов для вырубки шайб, которые во время работы испытывают трение при динамических нагрузках. Получение хрупких боридных слоев не обуславливает повышения эксплуатационных свойств подобных изделий. Установлено, что легирование боридных слоев хромом позволяет снизить хрупкость диффузионных слоев. Путем оптимизации процесса борохромирования для указанных изделий были определены следующие параметры: состав обмазки, температура диффузионного насыщения, время выдержки. Предложено совместить химико-термическую обработку пуансонов в обмазке и нагрев изделий под закалку. Показана возможность замены легированной стали на углеродистую сталь с исследованным диффузионным покрытием.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, борохромирование, рентгеноструктурный анализ, микротвердость.

При использовании диффузионного борирования в качестве способа поверхностного упрочнения и увеличения износостойкости на рабочей поверхности инструмента образуются фазы с высоким содержанием бора с очень высокой микротвердостью. Однако при работе в условиях динамического износа диффузионный слой достаточно быстро разрушается вследствие его хрупкости.

В литературных источниках [1] встречаются упоминания о том, что легирование боридных слоев медью, хромом, никелем, алюминием и др. элементами способно уменьшить хрупкость боридного слоя. При этом увеличение толщины диффузионного слоя зависит от природы второго насыщающего компонента и его положения в периодической системе Д.И. Менделеева. Так, например, при одновременном бороазотировании толщина диффузионного слоя повышается на 3–5 %, а при одновременном насыщении бором и алюминием увеличение толщины диффузионного слоя составляет от 5,0 до 8,5 % [1, 2]. При одновременном многокомпонентном насыщении бором и хромом происходит увеличение

толщины диффузионного слоя в сравнении с однокомпонентными слоями на 5–15 %. Однако одновременное диффузионное упрочнение бором и другим элементом сопряжено с некоторыми трудностями, главными из которых являются возможность непосредственной реакции бора с легирующим элементом с образованием более стойкого (чем бориды железа) соединения непосредственно в насыщающей среде, а также конкуренция бора и легирующего элемента при сорбционных процессах на поверхности упрочняемого материала [3, 4].

В настоящей работе проведены исследования по диффузионному насыщению бором рабочей поверхности пуансона для вырубки шайб. Пуансон из стали Х12Ф1 во время работы испытывает трение при динамических нагрузках. Вместо термически упрочненной стали Х12Ф1 предложено использовать углеродистую сталь 55 после химико-термической обработки.

Тонкими методами (растровая, просвечивающая электронная микроскопия (РЭМ, ПЭМ) и рентгеноструктурный анализ (РСА)) были исследованы струк-

тура и фазовый состав полученного диффузионного слоя после борирования. Детальные исследования поверхностного слоя позволяют определить механизмы диффузионных процессов и достаточно качественно прогнозировать формирование зоны с необходимыми физико-механическими свойствами.

Исследования показали, что поверхностная структура в исследуемой стали фактически формируется тремя химическими элементами: железом, бором и углеродом. Железо является основным элементом, бор – основным легирующим элементом на поверхности, углерод присутствует в количестве, введенном в сталь.

Глубина борированного слоя составила около 70 мкм. Следующие слои были просмотрены на больших расстояниях от поверхности борирования с целью достижения большего объема информации исследования; как правило, глубины изучаемых слоев методами ПЭМ и РСА не совпадали.

При воздействии бора в структуре поверхности стали можно выделить четыре слоя (см. таблицу).

При борировании объемная доля цементита возрастает. Это обусловлено тем, что внедрившийся в цементит бор вовлекает в него дополнительную долю железа. Наличие борированного цементита подтверждается и данными рентгеноструктурного анализа фазового состава стали 55 на различном расстоянии (x) от поверхности образца, которые приведены ниже:

x , мкм	Объемная доля, %, фаз			
	α -Fe	FeB	Fe ₂ B	Fe ₃ C
0	0	67	32	1
470	95	2	1	2
620	100	0	0	0
1040	92	0	0	8

Фазой, наблюдаемой в большом количестве в диффузионном слое, является борид FeB: имеет вид столбчатых кристаллов (рис. 1), простирающихся от борированной поверхности в глубь материала. Как показали исследования, проведенные методом ПЭМ при больших увеличениях, в поперечном сечении кристаллы FeB имеют неправильную форму и либо являются бездефектными, либо обладают слоистой структурой. Дан-

Фазы, наблюдаемые на различных глубинах стали 55

Слой	x , мкм	ПЭМ	РСА
Борированный	0 – 200	FeB + Fe ₈ B	FeB + Fe ₂ B
	200 – 500	–	α + FeB + Fe ₃ (C,B)
Промежуточный	500 – 1000	–	α
	1000 – 1400	α + Fe ₃ (C,B)	α + Fe ₃ (C,B)
Основной металл	3500	α + Fe ₃ C	–

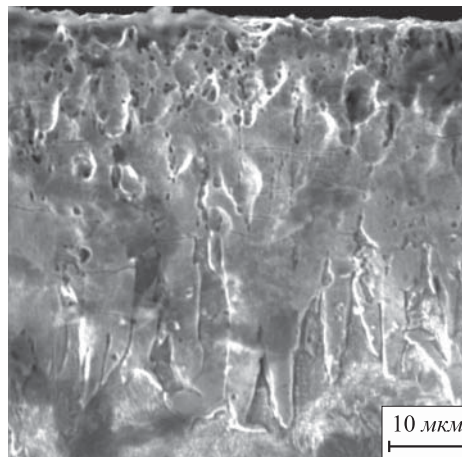


Рис. 1. Микроструктура борированного слоя (РЭМ)

Fig. 1. Microstructure of borated layer (scanning electron microscopy)

ные рентгеноструктурного анализа также подтверждают присутствие боридов FeB и Fe₂B.

Таким образом, на поверхности образуется износостойкий, но очень хрупкий диффузионный слой. Такие слои хорошо зарекомендовали себя при работе в условиях трения без динамических нагрузок.

Формирование диффузионных покрытий для повышения служебных характеристик деталей машин и механизмов имеет важное значение для народного хозяйства, поэтому исследования, посвященные проблемам упрочнения стальных изделий, актуальны.

Согласно статистическим данным нет универсального метода химико-термической обработки (ХТО), который удовлетворял бы требованиям необходимой надежности в зависимости от условий эксплуатации. Для каждого конкретного случая необходимо разрабатывать свою технологию ХТО. В настоящем случае, учитывая, что пуансон испытывает динамический износ, предложен метод комплексного борохромирования, совмещенный с термической обработкой. При этом исходили из того, что хром понижает высокую микротвердость боридного слоя, что позволяет повысить работоспособность инструмента.

Оптимизация процесса позволила установить для борохромирования следующие параметры: химический состав смеси 60 % В₄С + 35 % Cr₂O₃ + 5 % NaF; режим насыщения: температура – 1050 °С, время выдержки – 2 ч.

На рис. 2 показана микроструктура диффузионного слоя на стали Х12Ф1; толщина диффузионного слоя составила около 70 мкм.

В настоящей работе проведено определение фактора хрупкости с использованием микроскопа ПМТ-3. Суммарный балл хрупкости определяется по формуле

$$Z_p = 0 \cdot n_0 + 1n_1 + 2n_2 + 3n_3 + 4n_4 + 5n_5,$$

где, n_0, n_1, \dots, n_5 – относительное количество отпечатков из общего их числа (обычно 25 – 100) с данным баллом хрупкости.

Средний балл хрупкости определяется при нагрузках 0,2, 0,5, 1,0, 1,2 и 1,5 Н. После испытаний строится график функции $Z_p = f(p)$, по которому определяется темп хрупкого разрушения (фактор хрупкости γ_p) $dZ_p/d(p)$ (тангенс угла наклона касательной к кривой изменения балла хрупкости). Фактор хрупкости γ_p определяется для точки с нагрузкой 1,0 Н.

Микрохрупкость ($\gamma_p = 100$) диффузионных слоев стали Х12Ф1 и стали 55 при борохромировании составляет 1,0 и 0,8 соответственно. По данным работы [5] при нагрузке 0,9 Н фактор хрупкости VC составляет 3,23, Cr₃C₂ – 2,40, FeB – 1,70, CrB₂ – 0,10.

Очевидно, что полученные диффузионные слои более пластичны.

На рис. 3 показана микроструктура диффузионного слоя на стали 55, толщина диффузионного слоя больше, чем на стали Х12Ф1. Это объясняется влиянием легирующих элементов, которые препятствуют диффузионной активности бора и хрома. При одновременном насыщении бором и хромом последний препятствует диффузии углерода в глубь материала, связывая углерод в смешанные карбобориды. В результате послойное распределение микротвердости диффузионного слоя имеет ступенчатый характер в силу преобладания на различной глубине различных соединений железа, хрома, бора и углерода.

На рис. 4 показано распределение микротвердости диффузионного слоя в зависимости от расстояния до поверхности на сталях Х12Ф1 и стали 55. После термической обработки твердость поверхности пуансона составила 54 – 57 HRC. Распределение микротвердости показывает возможность замены дорогостоящей легированной стали на углеродистые.

Ранее было установлено, что для инструментов во избежание изменения геометрических параметров толщина диффузионного слоя не должна превышать 50 мкм (то есть выдержка при температуре насыщения уменьшается). Это в значительной мере снижает энергоемкость процесса. При длительной выдержке во избежание отрицательного влияния высоких температур необходимо использование термоциклирования [6, 7].

Было предложено совместить химико-термическую обработку с нагревом изделия под закалку. Это позво-

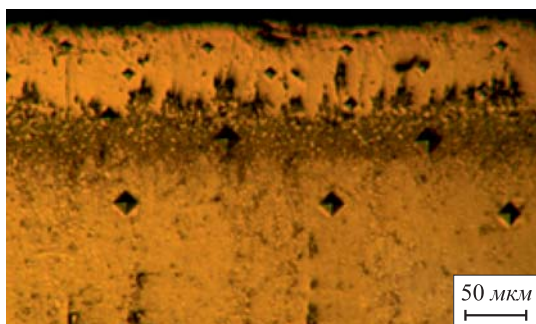


Рис. 2. Микроструктура диффузионного слоя на стали Х12Ф1

Fig. 2. Microstructure of diffusion layer on steel Kh12F1 (Russian grade)

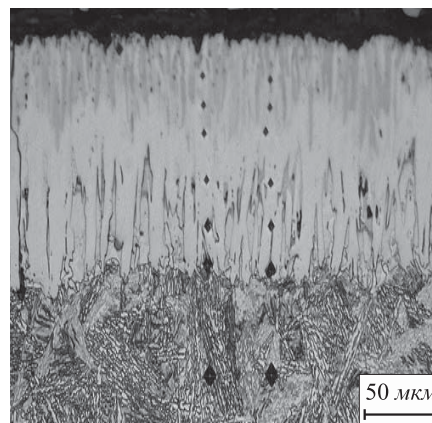


Рис. 3. Микроструктура диффузионного слоя на стали 55

Fig. 3. Microstructure of diffusion layer on steel 55 (Russian grade)

лило сократить общую длительность производственного цикла. Обмазку необходимо наносить на все изделие целиком, этим обеспечивается надежная защита поверхностей пуансона от окисления и обезуглероживания в условиях продолжительных высокотемпературных воздействий печной среды. Таким образом, температура диффузионного насыщения составляла 1050 °С [8 – 10].

После выдержки при 1050 °С инструмент закачивали в масле. Обмазку перед последующим отпуском не удаляли. Отпуск при 400 – 450 °С в течение 1,5 ч позволяет не только снизить закалочные напряжения, но и удалить из обмазки органические включения. Таким образом, материал обмазки можно подвергать регенерации.

Выводы. Температурно-временной режим совместного с термической обработкой диффузионного упрочнения определяется скоростью роста диффузионного слоя необходимой толщины, а также условиями нагрева под закалку конкретного вида стали. Учитывая хрупкость диффузионных слоев, возможна замена инструмента, работающего в условиях динамического

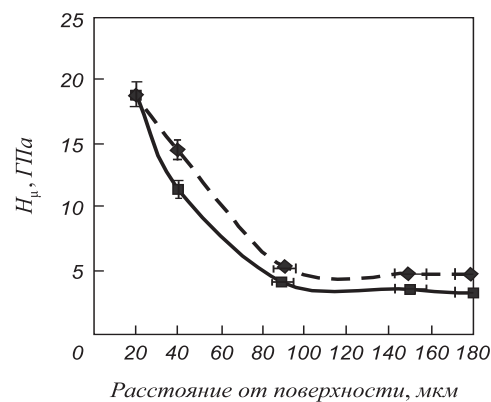


Рис. 4. Распределение микротвердости диффузионного слоя на стали Х12Ф1 (---) и стали 55 (—) в зависимости от расстояния до поверхности

Fig. 4. Distribution of microhardness of diffusion layer on steels Kh12F1 (---) and 55 (—) (Russian grades) depending on distance to surface

износа из дорогостоящей легированной стали, на инструмент из углеродистой стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
2. Минкевич А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1965. – 491 с.
3. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. – М.: Металлургия, 1976. – 559 с.
4. Гринберг Е.М. Металловедение борсодержащих конструкционных сталей. – М.: изд. МИСИС, 1997. – 198 с.
5. Глазов В.М., Вигдорович В.Н. Микротвердость металлов и полупроводников. – М.: Металлургия, 1969. – 248 с.
6. Лыгденов Б.Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-

термоциклической обработкой. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2004. – 33 с.

7. Гурьев А.М., Иванов С.Г. Механизм диффузии бора, хрома и титана при одновременном многокомпонентном насыщении поверхности железоуглеродистых сплавов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. № 3. С. 92 – 96.
8. Ситкевич М.В., Бельский Е.И. Совмещенные процессы химико-термической обработки с использованием обмазок. – Мн.: Высшая школа, 1987. – 156 с.
9. Иванов С.Г. Разработка состава насыщающей смеси и технологии диффузионного борохромирования тяжелонагруженных деталей машин и инструмента. Автореф. дис. канд. техн. наук. – Барнаул, 2007. – 18 с.
10. Борисенко С.Г., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник. – М.: Металлургия, 1984. – 424 с.

Поступила 13 января 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 2, pp. 117–120.

FORMATION OF DIFFUSION LAYER ON A WORKING SURFACE OF A TOOL, WORKING IN THE CONDITIONS OF DYNAMIC WEAR

Lygdenov B.D.^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Metal Science and Materials Processing Technologies”

Gur'ev A.M.^{1,3}, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Descriptive Geometry and Engineering Graphics” (gurievam@mail.ru)

*Kozlov E.V.*⁴, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Physics

*Butukhanov V.A.*², Engineer, Postgraduate
*Chzhu Chinkhua*¹, Professor

¹ Wuhan Textile University (430072, No. 34, Hongshance Road, Wuchang District, Wuhan University, Wuhan, Hubei Province, P.R. China)

² East Siberia State University of Technology and Management (40V, Klyuchevskaya str., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670013, Russia)

³ Altai State Technical University named after I.I. Polzunov (46, Lenina ave., Barnaul, Altai Territory, 656038, Russia)

⁴ Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya sqr., Tomsk, 634003, Russia)

Abstract. The paper is devoted to the investigations of the structure and properties of the diffusion layer of the samples after boriding and boron-chrome plating. It has been revealed that when boriding, diffusion layers are formed with a high content of high-boride phase; it reduces the plasticity of the layer. The research on boron diffusion saturation of the working surface of the punch for cutting goals has been carried out. It has been established that during the work under dynamic loads they experience friction. The receiving of fragile boride layers does not cause the increase of operational properties of such products. It has been found out that the alloying of chromium boride layers reduces the fragility of the diffusion layers. By optimizing the process of boron-chrome plating for these products the following parameters have been identified: the composition of the coating, the temperature of diffusion saturation, exposure time. It has been proposed to combine chemico-thermal treatment of punches in coating and heating of products for hardening. The possibility of replacing the alloyed steel by carbon steel with the investigated diffusion coating has been shown.

Keywords: thermo-chemical treatment, borochromizing, X-ray analysis, microhardness.

REFERENCES

1. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. *Plastichnost' borirovannykh sloev* [Plasticity of borated layers]. Moscow: Fizmatlit, 2010. 384 p. (In Russ.).
2. Minkevich A.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Chemico-thermal treatment of metals and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1965. 491 p. (In Russ.).
3. Samsonov G.V., Epik A.P. *Tugoplavkie pokrytiya* [High-melting coatings]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 559 p. (In Russ.).
4. Grinberg E.M. *Metallovedenie borsoderzhashchikh konstruktivnykh staley* [Physical metallurgy of boron-containing structural steels]. Moscow: izd. MISIS, 1997. 198 p. (In Russ.).
5. Glazov V.M., Vigdovich V.N. *Mikrotverdst' metallov i poluprovodnikov* [Microhardness of metals and semiconductors]. Moscow: Metallurgiya, 1969. 248 p. (In Russ.).
6. Lygdenov B.D. *Fazovye prevrashcheniya v stalyakh s gradientnymi strukturami, poluchennymi khimiko-termicheskoi i khimiko-termotsiklicheskoj obrabotkoi. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.* [Phase transformation in steels with the gradient structures, got by chemico-thermal and chemical thermocyclic treatment. Cand. Tech. Sci. diss.]. Novokuznetsk, 2004. 33 p. (In Russ.).
7. Gur'ev A.M., Ivanov S.G. Diffusion mechanism of boron, chromium and titanium at simultaneous multicomponent surface saturation of iron-carbon alloys. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2011, Vol. 8, no. 3, pp. 92–96. (In Russ.).
8. Sitkevich M.V., Bel'skii E.I. *Sovmeshchennye protsessy khimiko-termicheskoi obrabotki s ispol'zovaniem obmazok* [Simultaneous processes of chemico-thermal treatment with the use of coatings]. Minsk: Vysshaya shkola, 1987. 156 p. (In Russ.).
9. Ivanov S.G. *Razrabotka sostava nasyshchayushchei smesi i tekhnologii diffuzionnogo borokhromirovaniya tyazhelonagruzhennykh detalei mashin i instrumenta. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.* [Development of saturating mixture content and the technology of diffusion boron-chrome plating of heavy duty machine parts and tools. Cand. Tech. Sci. diss.]. Barnaul, 2007. 18 p. (In Russ.).
10. Borisenok S.G., Vasil'ev L.A., Voroshnin L.G. etc. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i splavov. Spravochnik* [Chemico-thermal treatment of metals and alloys. Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1984. 424 p. (In Russ.).

Received January 13, 2014