

ХАРАКТЕР ПОВРЕЖДЕНИЙ ЦЕМЕНТОВАННЫХ И БОРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ДЕТАЛЯХ РЕЖУЩЕЙ ПАРЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ЩЕЛЕВОГО ПЕРФОРАТОРА*

*Н.Б. ПУГАЧЕВА, доктор техн. наук, доцент
Т.М. БЫКОВА, инженер
(ИМАШ УрО РАН г. Екатеринбург)*

Поступила 3 декабря 2014
Рецензирование 12 января 2015
Принята к печати 29 января 2015

Быкова Т.М. – 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская 34,
Институт машиноведения УрО РАН,
е – mail: tatiana_8801@mail.ru

Исследовано состояние поверхности ножей и осей режущей пары гидромеханического щелевого перфоратора, предназначенного для вскрытия буровых скважин с целью увеличения сроков их эксплуатации. Показано, что деградация боридного покрытия на углеродистой инструментальной стали происходит за счет развития окислительных процессов. Срок эксплуатации цементованных осей определяется толщиной упрочненного слоя. Максимальную долговечность показали боридные покрытия на осях из стали 4Х5МФС и для ножей из стали 6Х6ВЗМФС. При этом легирование боридом хрома основы приводит к повышению жаростойкости и пластичности защитного слоя с обеспечением высоких показателей износостойкости.

Ключевые слова: покрытие, бориды, микротвердость, пластическая деформация, диффузия.
DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-51-59

Введение

В связи с интенсификацией режимов эксплуатации машин и механизмов, повышением температур и давлений роль качества поверхности значительно возрастает. Надежность и долговечность деталей и узлов машин непосредственно связаны с качеством их поверхности, которое характеризуется геометрическими и физико-механическими параметрами. Это относится в первую очередь к рабочей поверхности, находящейся в процессе эксплуатации в контакте с другими твердыми поверхностями (подшипники качения и скольжения, втулки, зубчатые зацепления, режущий инструмент) или твердой, жидкой и газообразной средой (абразивные частицы,

быстротекущий поток жидкости или газа) [1]. В условиях контактного нагружения при любых видах изнашивания детали и узлы машин выходят из строя не вследствие поломок, а по причине недопустимого изменения размеров и формы, так как износ деталей всегда происходит с поверхности. В связи с этим структурное состояние и геометрические характеристики рабочих поверхностей машин и механизмов играют решающую роль в обеспечении их надежности и долговечности.

К наиболее распространенным способам упрочняющей обработки поверхности деталей относят способы химико-термической (ХТО), поверхностной термической, деформационной и деформационно-термической обработки, по-

* Работа выполнена при частичной поддержке проекта фундаментальных научных исследований Уральского отделения РАН № 15-10-1-22.

верхностного легирования (лазерного, электроискрового), нанесения защитных и упрочняющих покрытий [2]. Поверхностное упрочнение металлообрабатывающего инструмента позволяет значительно повысить его служебные характеристики, долговечность, снизить расход высоколегированных инструментальных сталей и сплавов, уменьшить себестоимость обрабатываемых изделий. По сравнению с другими методами поверхностной обработки металлов (дробеструйный наклеп, накатка роликами, индукционная, газопламенная и электролитная закалка, лазерная обработка и т. д.) химико-термическая обработка, часто уступая им в производительности, имеет ряд существенных преимуществ [3–6]:

- 1) независимость от внешней формы изделия;
- 2) большое различие между свойствами сердцевины и поверхности;
- 3) последствия перегрева поверхности могут быть устранены последующей термической обработкой.

Основными параметрами цементации, азотирования и борирования являются температура нагрева и продолжительность выдержки при этой температуре [7]. Существенное значение для структуры и свойств упрочненного слоя имеют вид и химический состав насыщающей среды. При этом поверхностный упрочненный слой имеет хорошее сцепление с внутренней частью изделия. Наплавка или напыление покрытий, существенно отличающихся от основы по химическому составу, не всегда пригодны для упрочнения сильно нагруженных изделий, поскольку в процессе эксплуатации может происходить отслоение поверхностного слоя. Кроме того, в этом случае происходит изменение размеров деталей [8].

Цель работы – провести сравнительный анализ механизмов деградации упрочненных цементацией и борированием поверхностных слоев деталей режущей пары гидромеханического целевого перфоратора.

Материалы и методы исследования

Исследованы упрочненные ХТО поверхностные слои на сталях марок 18ХГТ, У8, 4Х5МФС и 6Х6В3МФС. В работе исследовались три фрикционные пары после одинаковых условий

эксплуатации. Первая режущая пара – ось из мягкой конструкционной стали 18ХГТ после цементации и нож из стали У8 с диффузионным боридным покрытием. Вторая режущая пара – ось из стали 4Х5МФС и нож из стали 6Х6В3МФС с нанесенным на них диффузионным боридным покрытием. Третья режущая пара – нож из стали 6Х6В3МФС и ось из стали 4Х5МФС после проведения полного цикла упрочняющей обработки (диффузионного борирования, закалки и отпуска).

Процесс диффузионного борирования проводили в контейнере из нержавеющей стали с плавким затвором и крышкой (на рис. 1 представлен чертеж контейнера). При проведении процесса термодиффузионного борирования для приготовления порошковых насыщающих смесей используются следующие материалы:

карбид бора с зернистостью 6-16П по ГОСТ 3647–80;

окись алюминия безводная, ТУ 6-09-426-75, ГОСТ 8136–85;

калий тетрафтороборат, ТУ 6-09-5304-86.

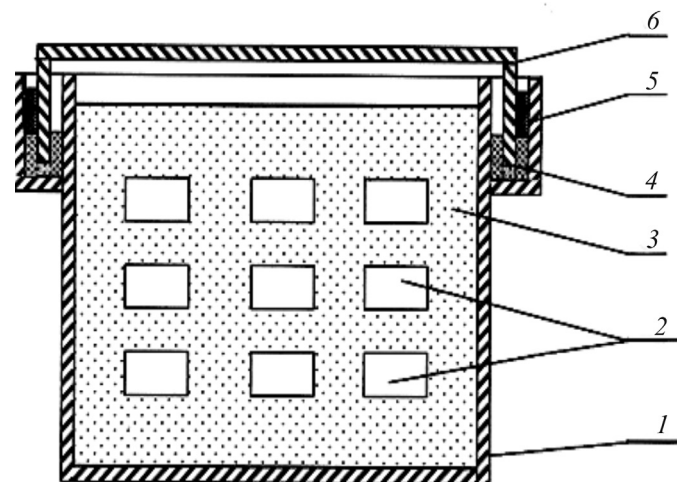


Рис. 1. Схема загрузки герметичного контейнера при термодиффузионном борировании в порошковых смесях:

1 – корпус контейнера; 2 – образцы или детали; 3 – рабочая порошковая смесь; 4 – отработанная порошковая смесь; 5 – силикатная крошка (плавкий затвор); 6 – крышка контейнера

Для просеивания порошков насыщающей смеси используют сито с размером ячейки не более 1 мм.

Герметичность контейнера обеспечивается за счет плавкого затвора, в качестве которого использовали жидкое стекло, размолотое до фрак-

ции (0,3...3) мм. Процесс термодиффузионного борирования проводили при температуре 900 °С, выдерживали 12 ч при этой температуре. После завершения выдержки при 900 °С печь следует выключить и охладить вместе с контейнером до комнатной температуры. Допускается выгрузить контейнер из печи при температуре 200...400 °С. При цементации детали загружали в стальной ящик с герметичным песчаным затвором. Укладка деталей производится таким образом, чтобы они были покрыты карбюризатором со всех сторон, не соприкасались друг с другом и стенками ящика. В качестве карбюризатора применяли смесь древесного угля с углекислыми солями (Na_2CO_3 , BaCO_3 и др.). Далее ящик герметично закрывается песчаным затвором и загружается в печь. Цементацию проводили по режиму : 900...950 °С, 20 ч выдержки.

Микроструктуру покрытий исследовали методами оптической металлографии на оптическом микроскопе Neophot 21 и растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA II XMU, оборудованном персональным компьютером и программным обеспечением VEGA TC. Локальный химический состав разных зон покрытий определяли с помощью системы рентгеновского волнодисперсионного (ВДС) микроанализа INCA WAVE 700, а характер распределения элементов – энергодисперсионного (ЭДС) микроанализа INCA ENERGY 450 с ADD-детектором и программным обеспечением INCA. Фазовый состав покрытий определяли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-700 в монохроматизированном k_α -излучении хромового анода. Микротвердость покрытий измеряли на инструментированном микротвердомере FISHERSCOPE 2000 *хут* с системой кинетического микроиндентирования. Твердость по Бринеллю измеряли в соответствии с требованиями ГОСТ 9012–59, по Роквеллу – ГОСТ 9013–59. Идентификацию микроструктуры сталей проводили по ГОСТ 8233–56, цементованных слоев – по ГОСТ 32.81–97 «Макро- и микроструктуры зубчатых колес тягового подвижного состава. Оценочные шкалы и порядок контроля». Строение боридных покрытий оценивали по ОСТ 24.977.01–82 «Борирование термодиффузионное штампового инструмента. Типовой технологический процесс» [9].

Результаты и обсуждение

Первая исследованная фрикционная пара – ось из конструкционной стали 18ХГТ с цементованным поверхностным слоем и нож из инструментальной стали У8 с диффузионным боридным покрытием (рис. 2). В процессе эксплуатации на оси оказываются динамические нагрузки от 26,7 до 62,3 МН.



a

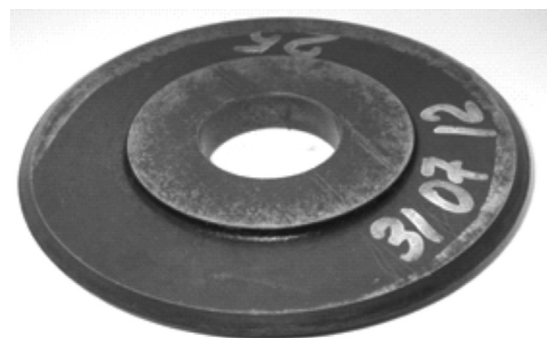
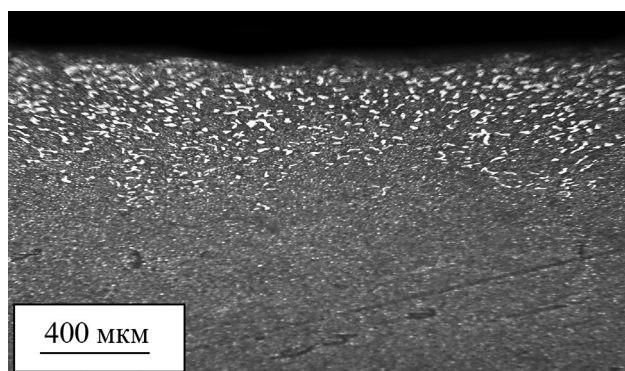
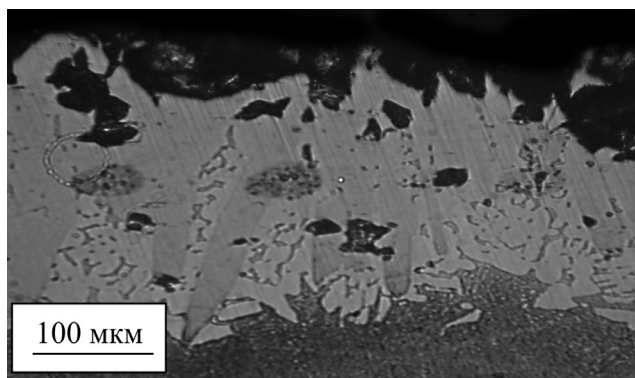


Рис. 2. Внешний вид цементованной оси из стали 18ХГТ (а); ножа из стали У8 с борированной поверхностью (б)

Толщина цементованного слоя на оси составила 2 мм, микротвердость 970...985 $\text{HV}_{0,05}$ (рис. 3, а). Такое состояние упрочненного слоя обеспечивает высокую износостойкость поверхности оси и препятствует адгезионному схватыванию с материалом ножа при эксплуатации [10]. Долговечность оси в этом случае будет определяться толщиной цементованного слоя, и когда он полностью разрушится в результате износа, вязкая сердцевина не выдержит высоких нагрузок. На поверхности боридного покрытия на стали У8 расположены столбчатые зерна боридов Fe_2B (серая фаза на рис. 3, б), под ним – бориды Fe_3B . Микротвердость внешнего слоя боридов составила 1285 $\text{HV}_{0,05}$, твердость сердцевины – 46...47 HRC.



a



б

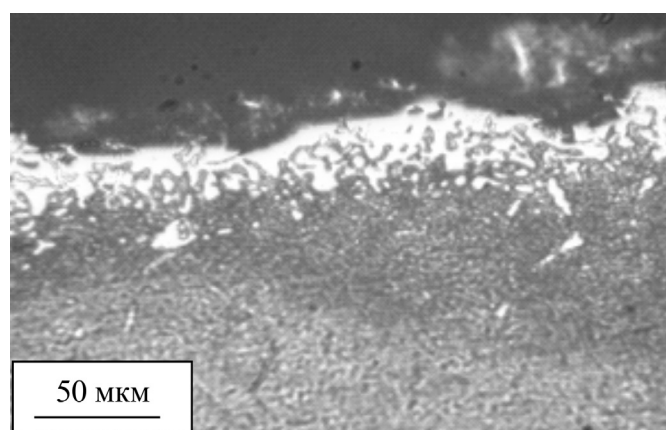
Рис. 3. Микроструктура цементованного слоя на оси из стали 18ХГТ (*a*); микроструктура боридного покрытия на ноже из стали У8 (*б*)

Анализ состояния поверхности первой режущей пары показал, что происходит сильный износ с изменениями размеров ножей и значительное окисление их поверхности с образованием сыпучей окалины Fe_2O_3 [11–13]. На исследованном ноже оксид железа образовался непосредственно в покрытии, облегчая его выкрашивание при испытаниях (рис. 4, *a*).

Микротвердость покрытия на посадочной поверхности ножа – $1400\text{ HV}_{0,02}$, внешний слой боридов Fe_2B поврежден порами, в которых находятся оксиды железа. Поры повреждают покрытие практически на всю толщину, поэтому оно не может обеспечивать высокую износостойкость и легко скалывается при эксплуатации, сохранилась лишь переходная диффузионная зона с единичными боридами Fe_2B (рис. 4, *б*). Толщина боридного покрытия на боковой поверхности ножа – 0,18 мм, на режущей кромке – от 0,05 до 0,18 мм. На внутреннем отверстии (поверхность контакта с осью) толщина боридного покрытия не превышала 0,1 мм.

Ранее было показано, что повысить стойкость детали к окислению можно за счет леги-

рования его элементами основы, главным образом хромом [14]. Поэтому в качестве материалов для деталей режущей пары гидромеханического целевого перфоратора можно рекомендовать легированные стали, содержащие хром в количестве не менее 5 масс. %. Например, для ножей подходит сталь марки 6Х6В3МФС, а для осей 4Х5МФС – вторая режущая пара. Сталь 6Х6В3МФС разработана для ножей холодной резки. Отличительной особенностью ее являются повышенные значения теплостойкости за счет сбалансированного структурного состояния [15]. Сталь 4Х5МФС относится к штамповым сталям, которая в основном используется для мелких и крупных молотовых штампов и прессовых вставок при горячем деформировании конструкционных сталей и цветных сплавов в условиях крупносерийного и массового производства, а также пресс-форм литья под давлением цветных сплавов. На сталях боридные иглы фазы Fe_2B скругляются, более выражена переходная зона на границе с основой (рис. 5).



a

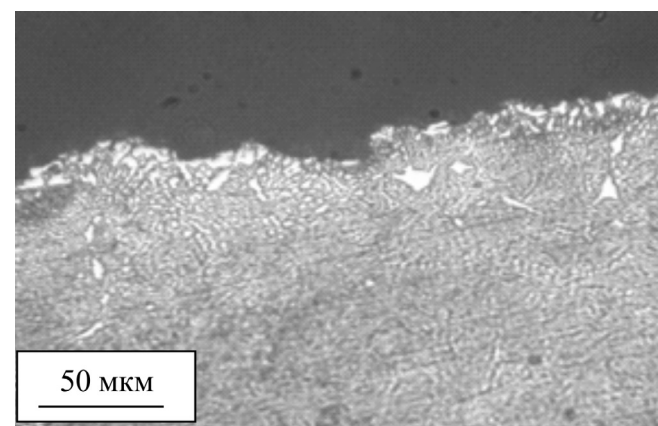
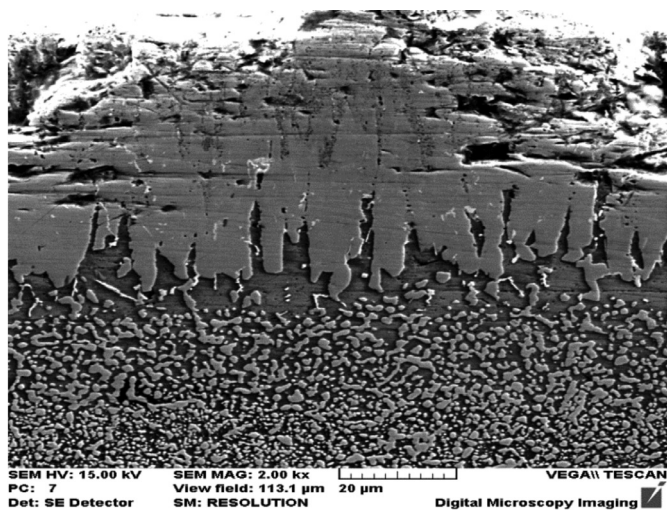


Рис. 4. Характер разрушения боридного покрытия на поверхности посадочного отверстия ножа из стали У8

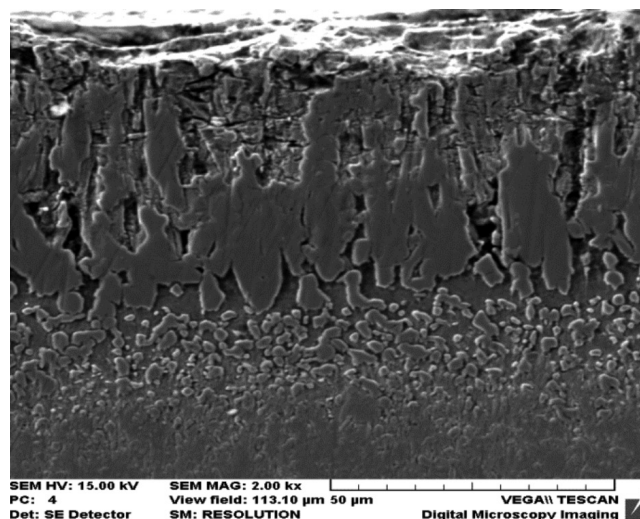
Фазы FeB и Fe_2B содержат хром в количествах, близких его содержанию в стали-основе, т. е. по сути являются легированными боридами $(\text{Fe,Cr})\text{B}$ и $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$. Переходная зона на границе с основой представляет механическую смесь борированного феррита, в котором содержание бора плавно убывает до нуля, и глобулярных частиц боридов хрома и вольфрама (рис. 5 и таблица).

Исходя из фазового и химического состава боридного покрытия на сталях марки 6Х6В3МФС для ножа и 4Х5МФС для оси, можно ожидать,

что боридное покрытие будет обеспечивать повышенную износостойкость в течение всего времени, пока сохраняется на поверхности. После проведения диффузионного борирования толщина покрытия на ноже составляет 180 мкм с микротвердостью $1400 \text{ HV}_{0,02}$, структура сердцевины представляет собой отпускаемый мартенсит с твердостью 48 HRC. Толщина покрытия на оси 200 мкм с микротвердостью $1550 \text{ HV}_{0,02}$, структура сердцевины представляет собой троостомартенсит с твердостью 38,5 HRC.



а



б

Рис. 5. Микроструктура диффузионного боридного покрытия:

а – на ноже из стали 6Х6В3МФС; б – на оси из стали 4Х5МФС

Параметры боридных покрытий на исследованных сталях

Марка стали	Содержание бора, масс %	Толщина, мкм	Фазовый состав
4Х5МФС	15–17	200	$(\text{Fe,Cr})\text{B}$, $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$, CrB_2
6Х6В3МФС	15–18	180	$(\text{Fe,Cr})\text{B}$, $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$, W_2B

Когда поверхностный слой столбчатых боридов железа будет изношен полностью, в работу вступает зона на границе сталь – покрытие, содержащая большое количество глобулярных боридов хрома, молибдена, вольфрама, ванадия. Таким образом, эффективная толщина покрытия увеличивается на толщину этой переходной зоны и составляет 0,25 мм.

Если ограничиваться только проведением диффузионного борирования деталей режущей пары с нагружением до 44,5 МН, наблюдали

пластическое смятие зубьев ножа (рис. 6, а). Ось также пластически деформировалась на участке контакта с ножом – наблюдался адгезионный износ (рис. 6, б). Износ боридного покрытия на оси из стали 4Х5МФС и ноже из стали 6Х6В3МФС после эксплуатации представлен на рис. 7. Толщина покрытия составила 20 мкм с микротвердостью $400 \text{ HV}_{0,02}$.

Проведение закалки ножей и осей после выполнения операции диффузионного борирования позволило получить весьма хорошие

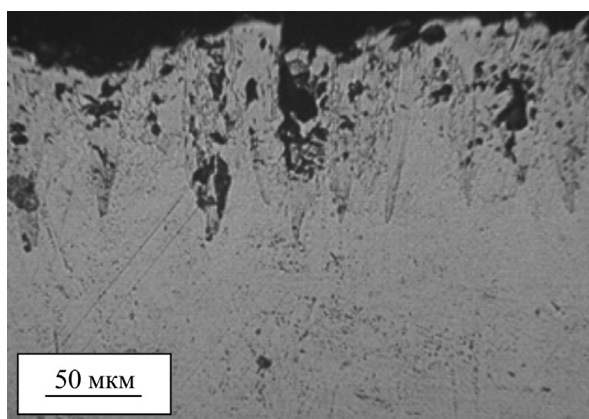


а

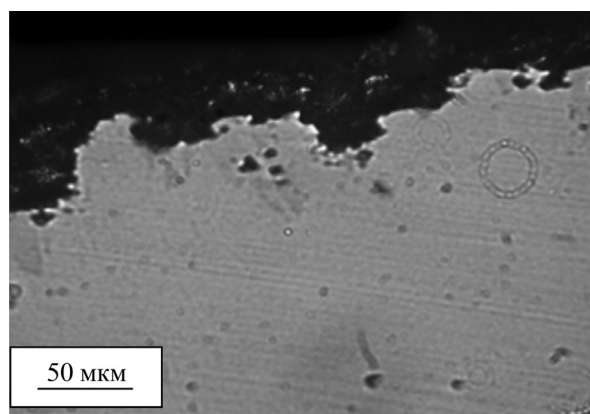


б

Рис. 6. Внешний вид ножа изношенного с пластической деформацией зубьев (отмечена стрелкой), 6Х6ВЗМФС (*а*) и оси из стали 4Х5МФС с боридным покрытием после эксплуатации (*б*)



а



б

Рис. 7. Износ боридного покрытия:

а – на оси из стали 4Х5МФС; *б* – на ноже из стали 6Х6ВЗМФС

результаты: состояние поверхности деталей режущей пары сохранилось практически в исходном состоянии (рис. 8) – третья исследовательская пара. Термическая обработка для деталей третьей режущей пары проходила по режиму: подогрев 750 °С, закалка 1050 °С в масло для осей и на воздухе для ножей, первый отпуск при 540 °С и второй отпуск при 510 °С. Твердость сердцевины после полной термической обработки составила на осях 54...56 HRC, на ножах 60 HRC. Микротвердость боридного покрытия составила 1500...1600 HV_{0,02}.

Следует отметить, что последующий высокотемпературный нагрев под закалку немного увеличивает толщину покрытия и выравнивает концентрацию бора в нем (рис. 9), что весьма полезно с позиций улучшения эксплуатационных свойств.

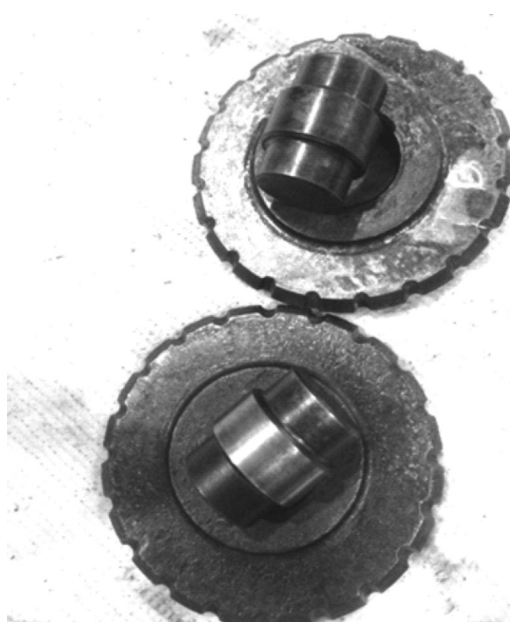
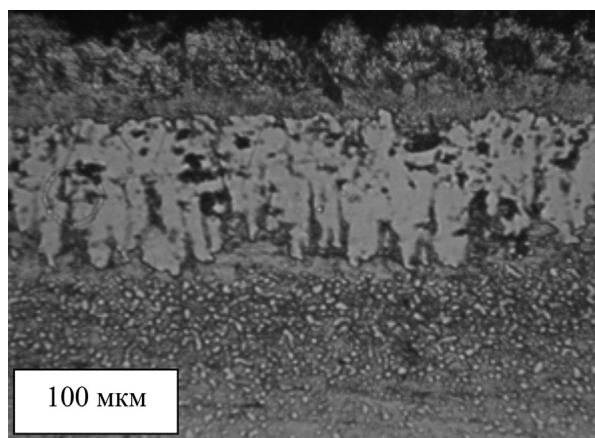
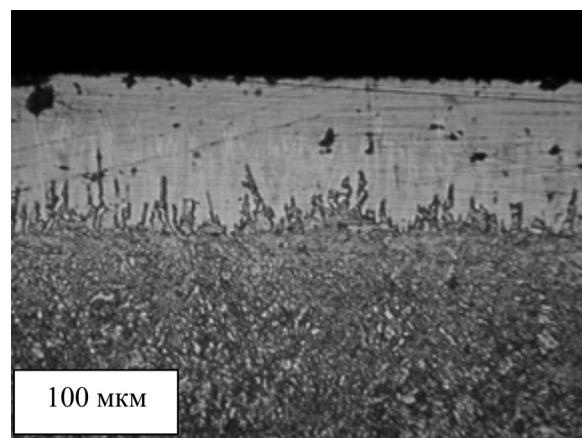


Рис. 8. Состояние поверхности режущих пар после эксплуатационных испытаний



а



б

Рис. 9. Микроструктура диффузионного боридного покрытия после закалки и отпуска:

а – на ноже из стали 6X6B3MFC; б – на оси из стали 4X5MFC

В этом случае в процессе эксплуатации в условиях трения фрагментированные частицы боридов с трудом вдавливаются в сталь-основу. Износостойкость покрытий после закалки заметно увеличилась. Причем твердость покрытий после закалки не изменилась, стала более твердой переходная зона и материал под покрытием.

Выводы

В процессе работы исследованы три фрикционные пары гидромеханического щелевого перфоратора после вскрытия буровой скважины.

При эксплуатации исследованных деталей первой режущей пары – оси из стали 18 ХГТ и ножа из стали У8 – происходил сильный износ с изменениями размеров ножей и сильное окисление их поверхности с образованием сыпучей окалины Fe_2O_3 . У деталей второй режущей пары – оси из стали 4X5MFC и ножа из стали 6X6B3MFC – после диффузионного борирования происходит пластическая деформация материала основы деталей режущей пары. У деталей третьей пары – ось из стали 4X5MFC и нож из стали 6X6B3MFC – после диффузионного борирования с полным циклом упрочняющей обработки закалки и отпуском получились весьма хорошие результаты, поверхность сохранилась почти в исходном состоянии. Таким образом, оптимальным способом упрочнения деталей режущей пары гидромеханического щелевого перфоратора представляется диффузионное борирование с полным циклом упрочняющей обработки закалки и отпуском.

Список литературы

1. Ляхович Л.С., Ворошин Л.Г. Борирование стали. – М.: Металлургия, 1967. – 120 с.
2. Земсков Г.В., Коган Р.А. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
3. Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 244 с. – ISBN 5-7691-1405-3.
4. Технология термической обработки стали / пер. с нем. В.В. Левина; под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1981. – 608 с.
5. Mevrel R. State of the art on high-temperature corrosion-resistant coatings // Materials Science and Engineering: A. – 1989. – Vol. 120–121, pt. 1. – P. 13–24. – doi: 10.1016/0921-5093(89)90713-2.
6. Структура и свойства однофазных боридных покрытий / А.Б. Колубаев, С.Ю. Тарасов, Г.В. Трусова, О.В. Сизова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1994. – № 7. – С. 49–50.
7. Selected values of thermochemical properties of metals and alloys / R. Hultgren, R.L. Orr, D. Anderson, K.K. Kelley. – New York: J. Wiley & Sons, 1974. – 480 p.
8. Исаков М.Г., Прусаков Г.М., Щербединский Г.В. Исследование кинетики роста боридов в системе Fe-B и Fe-B-C // Известия АН СССР. Металлы. – 1987. – № 1. – С. 185–190.
9. Sarkar A.D. Wear of metals. – Oxford; New York: Pergamon Press, 1976. – xv, 164 p. – (International series in materials science and technology; vol. 18). – ISBN 0080197388. – ISBN 008019737X.
10. Стали и сплавы. Марочник: справочник / В.Г. Сорокин и др.; науч. ред. В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 608 с. – ISBN 5-89594-056-0.

11. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: современные зарубежные методики. – М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 100 с. – ISBN 5-8279-0038-9.

12. Пугачева Н.Б., Быкова Т.М., Трушина Е.Б. Влияние состава-основы на структуру и свойства диффузионных боридных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 4. – С. 3–7.

13. Особенности разрушения диффузионного боридного покрытия на углеродистой стали в условиях термоциклирования под нагрузкой / Н.Б. Пугачева, Л.М. Замираев, Е.Б. Трушина, Т.М. Гурченко,

А.Н. Замятин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 3. – С. 24–30.

14. Saunders S.R.J., Nicholls J.R. Coatings and surface treatments for high temperature oxidation resistance // Materials Science and Technology. – 1989. – Vol. 5, iss. 8. – P. 780–798. – doi: 10.1179/mst.1989.5.8.780.

15. Мелкова Г.А. Упрочнение инструмента нанесением износостойких покрытий: аналитический обзор / ВНИИ информации и технико-экономических исследований по машиностроению и робототехнике. – М.: ВНИИТЭМР, 1989. – 31 с.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1(66), January – March 2015, Pages 51–59

The degree of breakdown of the cemented and borated surfaces on details of the cutting pair of the hydromechanical slot perforator

Pugacheva N.B., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, e-mail: nat@imach.uran.ru

Bykova T.M., Engineer, e-mail: tatiana_8801@mail.ru

Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Yekaterinburg, 630049, Russian Federation

Abstract

In connection with the intensification of the operation of machines and mechanisms, elevated temperatures and pressures of the surfaces increases significantly. In terms of contact loading in all types of wear parts and machine components fail not due to failures, but because of an unacceptable change in size and shape, as always wear occurs on the surface. In this connection, the structural state and geometric characteristics of the working surfaces of machines and mechanisms play a crucial role in ensuring its reliability and durability. The condition of the surface of the cutting pair knives and axles of hydromechanical slot perforator designed for the opening of boreholes in order to increase their useful life is investigated. A strengthening thermochemical treatment of the surface layers of steel 18HGT, U8, 4H5MFS, 6H6V3MFS is studied. Three friction pairs after the same operating conditions are investigated. The first cutting pair is presented by the axle of mild structural steel 18HGT after cementation and knife of carbon steel U8 with diffusion boride coatings. The second cutting pair is presented by the axle of steel 4H5MFS and knife of steel 6H6V3MFS with the diffusion boride coating. The third cutting pair is presented by the knife made of steel 6H6V3MFS and the axle made of steel 4H5MFS after a full cycle of strengthening treatment (diffusion borating, quenching and tempering). It is shown that the degradation of the boride coating on carbon tool steel takes place in response to the development of oxidative processes. The service life of cemented axles is determined by the thickness of the hardened layer. Maximum durability have boride coatings on axles made of steel 4H5MFS and knives made of steel 6H6V3MFS. In this case, the chromium boride doping of the bases leads to increased heat resistance and ductility of the protective layer that ensures high durability. It is shown that diffusion borating with a full cycle of strengthening treatment (quenching and tempering) is the best way to strengthen a cutting pair of hydromechanical slot perforator.

Keywords:

coatings, borides, microhardness, plastic deformation, diffusion.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-51-59

References

1. Lyakhovich L.S., Voroshnin L.G. *Borirovanie stali* [Boriding steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 120 p.
2. Zemskov G.V., Kogan R.A. *Mnogokomponentnoe diffuzionnoe насыщение металлов и сплавов* [Multicomponent diffusion saturation of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 208 p.
3. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Hardening protective coatings in engineering]. Yekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences Publ., 2004. 244 p. ISBN 5-7691-1405-3
4. Bernst R., Eckstein H.-J. et al. *Technologie der wärmebehandlung von stahl* [Heat treatment technology of steel]. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1976. 577 p. (Russ. ed.: Bernst R., Eckstein H.-J. et al. *Tekhnologiya termicheskoi obrabotki stali* [Heat treatment technology of steel]. Translated from German by V.V. Levin, edited by M.L. Bernshtein. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 608 p.).
5. Mevrel R. State of the art on high-temperature corrosion-resistant coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 1989, vol. 120–121, pt. 1, pp. 13–24. doi: 10.1016/0921-5093(89)90713-2
6. Kolubaev A.B., Tarasov S.Yu., Trusova G.V., Sizova O.V. Структура и свойства одnofазных боридных покрытий [Structure and properties of single-phase boride coatings]. *Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya – Steel in Translation*, 1994, vol. 24, iss. 7, pp. 49–50. (In Russian)
7. Hultgren R., Orr R.L., Anderson D., Kelley K.K. *Selected values of thermochemical properties of metals and alloys*. New York, J. Wiley & Sons, 1974. 480 p.
8. Isakov M.G., Prusakov G.M., Shcherbedinskii G.V. Исследование кинетики роста боридов в системе Fe-B и Fe-B-C [Investigation into kinetics of borides growth in Fe-B and Fe-B-C systems]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Metally – Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Series: Metals*, 1987, no. 1, pp. 185–190.
9. Sarkar A.D. *Wear of metals. International series in materials science and technology*. Vol. 18. Oxford, New York, Pergamon Press, 1976. xv, 164 p. ISBN 0080197388. ISBN 008019737X
10. Sorokin V.G., Gervas'ev M.A., eds. *Stali i splavy. Marochnik. Spravochnik* [Steels and alloys. Grades and specifications. Handbook]. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2001. 608 p. ISBN 5-89594-056-0
11. Fedosov S.A., Peshek L. *Opreделение механических свойств материалов микроиндентированием: современные зарубежные методики* [Determination of mechanical properties of materials microindentation: modern foreign methods]. Moscow, Faculty of Physics, Moscow State University Publ., 2004. 100 p. ISBN 5-8279-0038-9
12. Pugacheva N.B., Bykova T.M., Trushina E.B. Влияние состава-основы на структуру и свойства диффузионных боридных покрытий [The steel-basis structure influence on the diffusion boride coatings structure and properties]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening Technologies and Coatings*, 2013, no. 4, pp. 3–7.
13. Pugacheva N.B., Zamaraev L.M., Trushina E.B., Gurchenko T.M., Zamyatin A.N. Особенности разрушения диффузионного боридного покрытия на углеродистой стали в условиях термостатирования под нагрузкой [The features of destruction by the diffusion boride coating on the carbon constructional steel in thermo-cycling under loading conditions]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya – Strengthening Technologies and Coatings*, 2011, no. 3, pp. 24–30.
14. Saunders S.R.J., Nicholls J.R. Coatings and surface treatments for high temperature oxidation resistance. *Materials Science and Technology*, 1989, vol. 5, iss. 8, pp. 780–798. doi: 10.1179/mst.1989.5.8.780
15. Melkova G.A. *Uprochnenie instrumenta naneseniem iznosostoikikh pokrytii* [Hardening tool by hardfacing]. Moscow, VNIITEMR Publ., 1989. 31 p.

Funding

The reported study was partially supported by the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, fundamental scientific research project No. 15-10-1-22.

Received 3 December 2014

Revised 12 January 2015

Accepted 29 January 2015