

УДК 621.785.5;621.793

## СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА СТАЛЯХ 65Г И 50ХГА ПРИ СКОРОСТНОМ ТВЧ-БОРИРОВАНИИ

Н.М. Мишустин, В.В. Иванайский, А.В. Ишков

ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет», г. Барнаул

E-mail: olg168@rambler.ru

Осуществлено скоростное борирование (1...2 мин) поверхности сталей 65Г и 50ХГА на глубину до 800 мкм при ТВЧ-нагреве образцов, покрытых составами на основе плавного боратного флюса для индукционной наплавки П-0,66, карбида бора, аморфного бора и различных активаторов. С помощью методов рентгенофазового, микрорентгеноспектрального анализа и металлографических исследований установлены состав и строение получающихся покрытий. Исследовано распределение микротвердости покрытий по глубине и определена их износостойкость.

### Ключевые слова:

Борирование, ТВЧ-нагрев, бор, карбид бора, железо-боридная эвтектика, почвообрабатывающие органы сельхозтехники.

### Key words:

Borating process, RFC-heating, boron, carbide of boron, iron-boric eutectic, soil-cultivating instruments of agricultural machinery.

### Введение

Для улучшения физико-механических характеристик поверхности различных деталей, их поверхностного упрочнения, повышения срока службы в машиностроении широко применяются методы химико-термической обработки, заключающиеся в одновременном воздействии на стальные поверхности температурных градиентов и веществ, химически реагирующих с материалом детали [1]. Среди таких процессов особое место занимают технологии насыщения поверхностного слоя сталей бором – борирование. При борировании на поверхности стальной детали получают протяженные (до 500...800 мкм) слои, отличающиеся высокой твердостью и прочностью, стойкостью к коррозии, абразивной стойкостью и высоким сопротивлением изнашиванию [2]. Однако большинство из известных процессов борирования (печное, газовое, электролитическое) длительны, трудоемки, не автоматизированы и плохо встраиваются в технологические схемы современных производств [3].

Интенсификация процессов химико-термической обработки и, в частности, борирования, может осуществляться с применением технологий кратковременного, высокоскоростного нагрева поверхности стальной детали с нанесенным на нее борировующим составом токами высокой частоты (ТВЧ-борирование) до температур образования новых фаз и эвтектик (1100...1350 °С) в системах Fe-B, Fe-B-C и Fe-Me-B-C, где Me – это легирующий элемент из группы Cr, Mn, Ni и т. п. [3]. Ранее нами были рассмотрены физико-химические и некоторые технологические основы получения боридных покрытий на легированных сталях при их скоростном борировании [4], а также их использование для увеличения срока службы почвообрабатывающих органов сельхозтехники [5]. Для дальнейшего совершенствования нового процесса скоростного ТВЧ-борирования требуется систематическое исследование структуры и свойств образующихся износостойких покрытий на различных

сталях, а также происходящих при ТВЧ-борировании тепло- и массообменных процессов.

Целью настоящей работы являлось исследование состава, структуры, износостойкости и твердости покрытий, полученных на сталях 65Г и 50ХГА при скоростном ТВЧ-борировании.

### Экспериментальная часть

Объектом исследования были выбраны образцы из легированных углеродистых сталей 65Г и 50ХГА (ГОСТ 14959-79). В качестве борировующих агентов использовали технический карбид бора  $B_4C$  по ГОСТ 5744-85 и аморфный бор квалификации «х.ч.». В качестве флюса использовали состав для индукционной наплавки (флюс П-0,66), состоящий из прокаленной буры, борного ангидрида, силикокальция и сварочного флюса АН-348А, взятых в соотношении, мас. %: 30 –  $Na_2B_4O_7$ , 20 –  $B_2O_3$ , 10 –  $CaSi_2$  и 40 – АН-348А. Активаторами борирования служили  $CaF_2$  и  $NH_4Cl$  квалификации «х.ч.».

Борировующие смеси, содержащие флюс, агент борирования и активатор, свободно наносили на образцы размером 30×50×3 мм с поверхности которых, предварительно была удалена окалина механическим способом (шлифованием), вырубленные из стали, и закрепляли на них с помощью жидкого стекла или казеинового клея (1,5...2 %), вводимых в состав за счет уменьшения количества флюса.

Нагрев подготовленных образцов осуществляли в петлевом водоохлаждаемом медном индукторе диаметром 160 мм, подключенном к высокочастотному ламповому генератору ВЧГ 7-60/0,066. Настройка контура и геометрия индуктора обеспечивали нагрев исследуемых образцов до температуры 1300...1350 °С в течение 40...60 сек, с последующей выдержкой при заданной температуре. После выдержки при указанной температуре в течение определенного времени образцы вынимались из индуктора, и остывали на спокойном воздухе до температуры 20 °С.

Элементный состав покрытий устанавливали с помощью микрорентгеноспектрального анализа (растровый электронный микроскоп Philips SEM 515, микроанализатор EDAX ECON IV – оборудование ТРЦКП ТГУ, г. Томск). У полученных покрытий исследовали микроструктуру и толщину борированного слоя (травление – 5%-й спиртовой раствор  $\text{HNO}_3$ , металлографический микроскоп МИМ-7), микротвердость (твердомер ПМТ-3, нагрузка 50, 100 г), фазовый состав (дифрактометр ДРОН-6, рассеянное  $\text{Co-K}_\alpha$ -излучение, скорость углового перемещения образца 1 град/мин – оборудование ПНИЛ СВС АлтГТУ им. И.И. Ползунова», г. Барнаул), и интенсивность изнашивания (ГОСТ 23.208-79, ГОСТ 23.224) при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы электрокорунд зернистостью 16-П по (ГОСТ 3647-80) с относительным содержанием влаги не более 0,15 %.

**Результаты и их обсуждение**

В предварительных экспериментах при нанесении на очищенную стальную поверхность только одного борировующего агента ( $\text{B}_4\text{C}$  или  $\text{B}_{\text{аморфн.}}$ ), ее индукционным нагреве до 1200...1300 °С и различном времени выдержки, нами были получены лишь островковые двухфазные ( $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ ) боридные покрытия толщиной 5...15 мкм, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к почвообрабатывающим органам [6]. Для лучшего раскисления, удаления окисных пленок и перевода твердофазного процесса в квазижидкостное борирование в состав борировующих обмазок был введен плавильный флюс для индукционной наплавки П-0,66, приготовленный по методике, описанной в [3]. Состав исследованных смесей приведен в табл. 1.

Известно, что когда температура борирования превышает 1100...1200 °С, вследствие начинающихся процессов роста и распада зёрен основных фаз, распад и диспропорционирование карбидов и другие аналогичные процессы в сталях, скорости борирования возрастают в 2...4 раза при увеличении температуры на каждые 15...20 °С, и процесс переходит из диффузионной стадии в стадию химической реакции. Так при температуре 1200...1300 °С, по данным [7–9], удается за несколько минут получить толщину однофазного боридного слоя до

0,2...0,4 мм, при этом нагрев детали осуществляется специальной термитной смесью.

**Таблица 1.** Состав борировующих смесей, мас. %

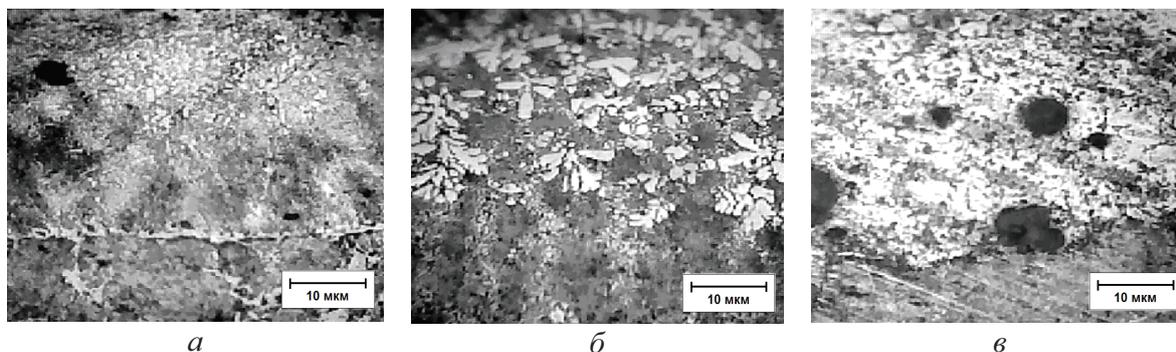
Смесь	Борировующий агент	Активатор	Флюс П-0,66
I	$\text{B}_4\text{C}$ (90)	–	10
Ia	$\text{B}_4\text{C}$ (84)	$\text{NH}_4\text{Cl}$ (6)	10
II	$\text{B}_4\text{C}$ (84)	–	16
IIa	$\text{B}_4\text{C}$ (90)	$\text{CaF}_2$ (5)	5
III	B (90)	–	10
IIIa	B (90)	$\text{CaF}_2$ (5)	5

Было установлено, что при скоростном ТВЧ-нагреве образцов из стали 65Г и 50ХГА, покрытыми борировующими составами при выбранных параметрах процесса ( $T=1200...1300$  °С, выдержка 1 мин), образуются покрытия, по внешнему виду напоминающие наплавленный твердый сплав. Их рентгенофазовый и микрорентгеноспектральный анализ показал присутствие следующих фаз:  $\alpha\text{-Fe}$ ,  $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$  (с выраженным преобладанием  $\text{Fe}_2\text{B}$ ), то есть при ТВЧ-нагреве легированных углеродистых сталей под слоем флюса П-0,66, содержащего от 84 до 90 % борировующих агентов на их поверхности, образуются сложные боридные покрытия.

Для выяснения фазового состава и структуры полученных слоев, а также состояния боридов в них были получены микрофотографии травленных шлифов (рис. 1–3).

Как видно из рис. 1, при выбранных температурных условиях и времени борирования структура и состояние границы полученных износостойких слоев на стали 65Г отличаются, но во всех случаях, в отличие от классических боридных иглообразных двухфазных слоев, на поверхности образуется более стойкая в условиях тяжелого абразивного, знакопеременного и ударного износа пластичная боридная эвтектика с выраженной (а, в) или диффузионной (б) границей. Изменений структуры основного металла из-за перегрева не наблюдается [8].

На образцах из стали 65Г за 1 мин при ТВЧ-нагреве образуются боридные покрытия трех типов. Так, для смесей, содержащих в качестве борировующего агента одинаковое количество карбида бора, схожее количество флюса и отличающихся только нали-



**Рис. 1.** Структура боридных покрытий на стали 65Г, полученных за 1 мин из различных смесей: а) I; б) IIa; в) IIIa

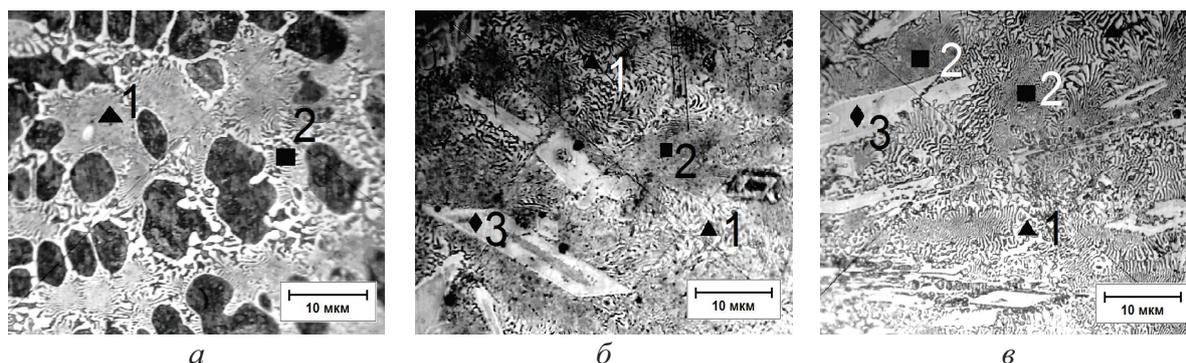


Рис. 2. Структура боридных покрытий на стали 65Г, полученных за 1,5 мин из различных смесей: а) I; б) IIa; в) IIIa

чем активатора ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{CaF}_2$ ), способствующего усилению обратимых диффузионных процессов, особенно при низких температурах, в начале процесса борирования, наблюдается образование зернистой эвтектической структуры со следовыми включениями фазы  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Микротвердость такого покрытия не выше  $700\text{--}750\text{ HV}$ , толщина слоя до  $100\text{ мкм}$ , и наблюдается четко различимая граница раздела покрытия с основным металлом (рис. 1, а).

Для смеси II без активаторов, в покрытии наблюдается выраженный рост дендритов, островов и друз фазы  $\text{FeB}$  в матрице из  $\text{Fe}_2\text{B}$  и железо-боридной эвтектики, микротвердость покрытия достигает  $1100\text{--}1250\text{ HV}$ , толщина слоя до  $200\text{ мкм}$ . Покрытие характеризуется диффузной границей раздела с основным металлом (рис. 1, б).

Самыми реакционноспособными оказались смеси на основе аморфного бора (рис. 1, в), так в смеси IIIa, содержащей дополнительно 5 % активатора  $\text{CaF}_2$  и 5 % флюса, за 1 мин толщина слоя составила  $600\text{--}750\text{ мкм}$ , при микротвердости  $2200\text{--}2300\text{ HV}$ . Основная структура представляет собой переплавленную гомогенизированную железо-боридную эвтектику с включением, в качестве основной фазы  $\text{FeB}$ , образовавшуюся с такой скоростью, что из расплава при его затвердевании не успели выделиться частицы шлака. Покрытие характеризуется наличием выраженной границы раздела с основным металлом.

Боридные покрытия, полученные при ТВЧ-нагреве этих же образцов в течение 1,5 мин имеют иную структуру (рис. 2).

Как следует из рис. 2, при таких условиях борирования образуются структуры двух типов. Так в покрытии, полученном при ТВЧ-нагреве из смеси, содержащей карбид бора и флюс П-0,66 без активаторов, наблюдается разрастание ледебуритоподобной железо-боридной эвтектики, которая имела мелкозернистую структуру на образцах, выдержанных при температуре  $1200\text{--}1300\text{ °C}$  в течение 1 мин, причем состав эвтектики изменяется в более светлых и темных участках. В эвтектической матрице наблюдаются равномерно распределенные замкнутые карбидные области (рис. 2, а). Микротвердость образующегося покрытия  $1450\text{--}1600\text{ HV}$ , а толщина – до  $300\text{--}350\text{ мкм}$ .

Введение в состав борлирующей смеси активатора  $\text{CaF}_2$  и (или) замена карбида бора более активным  $\text{B}_{\text{аморфн}}$  приводит к появлению в железо-боридной матрице новых фаз – пластинчатых кристаллов смешанных карбоборидов  $\text{Mn}$  и  $\text{Fe}$  (рис. 2, б, в). Микротвердость таких покрытий на стали 65Г достигает максимальных значений  $2250\text{--}2350\text{ HV}$ , а толщина  $600\text{--}800\text{ мкм}$ . Покрытия обоих типов имеют сглаженную границу с основным металлом, вызванную его частичным подплавлением, вследствие усиленного прогрева токами высокой частоты и теплом происходящих при борировании химических реакций.

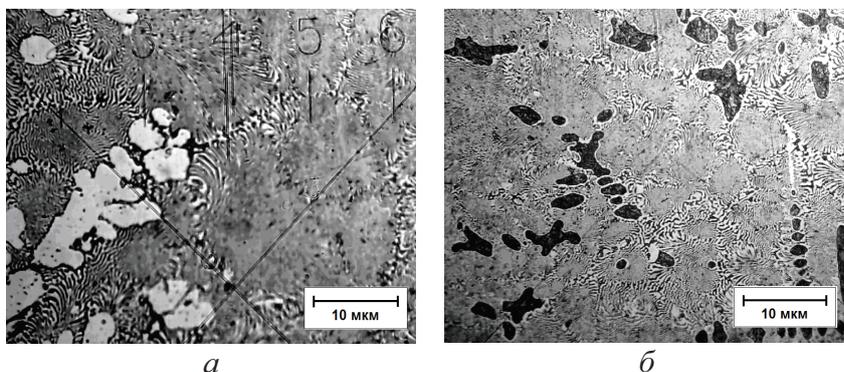


Рис. 3. Структура боридных покрытий на стали 50XГA, полученных за 2 мин из различных смесей: а) I; б) IIa

На рис. 3 приведены типичные структуры боридных покрытий, полученных при ТВЧ-нагреве стали 50ХГА под борлирующей обмазкой на основе  $B_4C$  и флюса П-0,66 без активатора (рис. 3, а), и в присутствии 5 % фторида кальция (рис. 3, б). Основной (матрицей) износостойкого покрытия в обоих случаях является железо-боридная эвтектика, однако для этой стали доля более твердых светлых областей в ее объеме значительно меньше, чем на образцах стали 65Г, борированных в течение 1 и 1,5 мин.

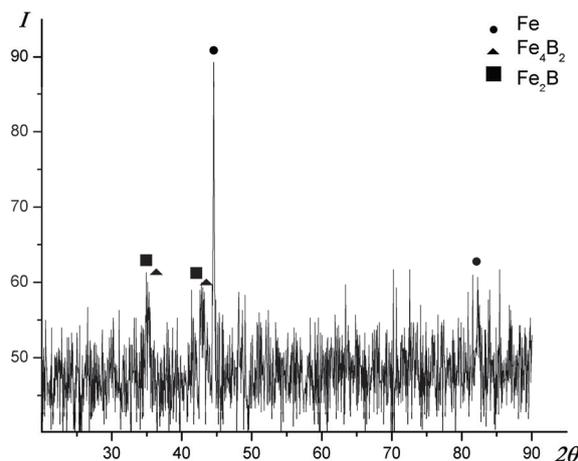
В структурах первого типа (рис. 3, а) в покрытии хорошо видны острова и друзы упрочняющей фазы FeB, подобные структуре на рис. 1, б. Микротвердость этих участков достигает 2100...2200 HV, а твердость матрицы, образующейся при ТВЧ-борировании стали 50ХГА составляет 1700...1800 HV, что на 100...200 ед. выше, чем для стали 65Г, толщина образующегося покрытия наоборот, несколько меньше, и составляет 450...600 мкм. Введение активатора  $CaF_2$  ускоряет процесс, за 2 мин в покрытии не успевают образовываться включения боридов железа, а в железо-боридной матрице видны карбидные области, подобные приведенным на рис. 2, а, однако их площадь и общая доля в структуре заметно меньше (рис. 3, б). Микротвердость такого покрытия 1300...1400 HV, а толщина – 450...600 мкм.

Проведенный микрорентгеноспектральный анализ позволил установить состав основных фаз износостойких боридных покрытий (на рис. 2 отмечены специальными значками с цифрой), получающихся при ТВЧ-борировании исследованных сталей (табл. 2). Как следует из данных табл. 2, в состав основной матричной и упрочняющих фаз всех исследованных покрытий, помимо железа и бора входит углерод, причем его доля колеблется от 13,4 до 28 мас. %, что отвечает углеродным фазам от цементита и карбоборидов Fe до специальных карбидов и специальных карбоборидов Fe, Mn и Cr. Такой состав фаз в полученных покрытиях хорошо согласуется с известной диаграммой состояния тройной системы Fe-C-B, изотермические сечения которой при 900, 1000 и 1080 °C приведены в [10]. Основными равновесными фазами в системе Fe-C-B при содержании углерода до 25 а бора до 35 мас. %, по данным этой работы, являются диборид железа  $FeB_2$ , цементит  $Fe_3C$ , борированный цементит  $Fe_3(C,B)$  и специальный борированный карбид  $Fe_{23}(C,B)_6$ . В случае же осуществления высокоскоростного процесса ТВЧ-борирования создаются условия для образования метастабильных фаз, фаз переменного состава и твердых растворов бора и углерода в железе (табл. 2). Фазы аналогичные по составу указанные авторами работы [10] были обнаружены и у наших образцов (расчет брутто-формулы произведён по величинам атомных процентов). В пользу этого свидетельствуют и данные рентгенофазового анализа (идентификация проведена по картотеке JCPDS), объективно подтверждающие существование во всех полученных покрытиях только фазы  $FeB_2$  и ее кристаллохимического димера –  $Fe_2B_4$  (рис. 4).

**Таблица 2.** Результаты микрорентгеноспектрального анализа основных фаз в боридных покрытиях на стали 65Г и 50ХГА

Обозначение фазы, элементы	Описание фазы, ее морфология	Элемент состав, %		Химическая формула
		весовой	атомный	
■2 – Fe, C, B	Матрица – серое поле в ледебуритоподобной эвтектике	Fe – 57,25 C – 28,02 B – 14,73	21,72 49,42 28,86	$FeC_{2,3}B_{1,3}$
■2* – Fe, C, B	То же	Fe – 64,31 C – 22,30 B – 13,38	27,12 43,73 29,15	$FeC_{1,6}B_{1,1}$
▲1 – Fe, C, B	Упрочняющая фаза – светлые области эвтектики	Fe – 50,63 C – 23,11 B – 26,25	17,24 36,59 46,17	$FeC_{2,1}B_{2,7}$
◆3 – Fe, Mn(Cr), C, B	Упрочняющая фаза – пластинчатые кристаллы или иглы	Fe – 64,70 Mn(Cr) – 1,21(1,35) C – 23,01 B – 11,08	28,11 0,54(0,62) 46,49 24,87	$Fe_{58}MnCr_{96}B_{51}$ $Fe_{58}CrC_{96}B_{51}$
◆3* – Fe, C	Упрочняющая фаза – темные замкнутые области	Fe – 86,60 C – 13,40	58,15 41,85	$Fe_{1,4}C$

Примечание: \* – данные для аналогичной фазы в покрытии, полученном на стали 50ХГА.



**Рис. 4.** Рентгенограмма боридного покрытия, полученного на стали 65Г за 1,5 мин из смеси IIa

Исследование распределения микротвердости полученных покрытий по глубине показало наличие в них, более твердого поверхностного слоя и менее твердого слоя, лежащего под ним, протяженность и характеристики которых различаются (рис. 5). Измерение микротвёрдости проводилось по среднему значению в пределах площади одного отпечатка.

Существование такой слоистой структуры в полученных покрытиях в нашем случае объясняется не наличием двух фаз  $FeB$  и  $Fe_2B$ , расположенных в материале друг за другом [7], а различающимся содержанием основной упрочняющей фазы по глубине покрытия. Об этом свидетельствуют как структура полученных покрытий (рис. 1–3), так и зависимость толщины, твердости и износостойкости покрытий, образующихся на почвообраба-

тывающих органах, выполненных в промышленных условиях из сталей 65Г и 50ХГА за различное время из обмазки на основе В<sub>4</sub>С без активаторов (табл. 3).

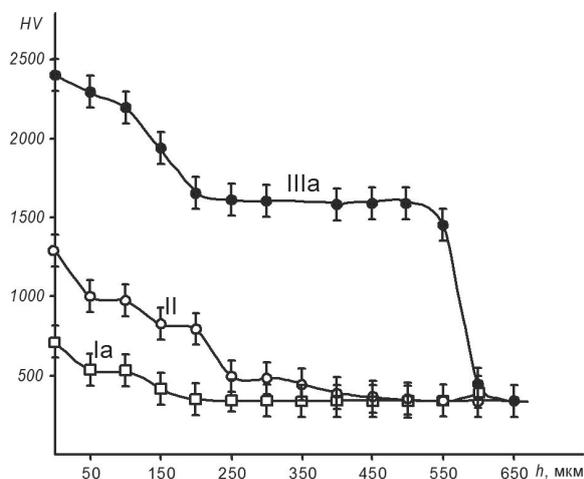


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине покрытий, полученных из различных борированных смесей на стали 65Г за 1 мин

Таким образом, хотя наиболее эффективной в процессе высокоскоростного ТВЧ-борирования оказалась обмазка на основе состава IIIa, содержащая аморфный бор, который в присутствии флюса П-0,66 и активатора CaF<sub>2</sub> образует с основным металлом самые протяженные и твердые покрытия, однако из-за наличия выраженной границы раздела с основным металлом, наличием в покрытии остатков флюса и высокой стоимости аморфного бора для получения износостойких покрытий при ТВЧ-нагреве следует рекомендовать обмазки на основе составов с карбидом бора и флюса П-0,66 и проведение процесса борирования в течение 1...1,5 мин.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шитов А.Н., Веденев А.А. Влияние различных факторов на изнашивание рабочих органов почвообрабатывающих машин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 7. – С. 21–23.
2. Сидоров С.А. Технический уровень и ресурс рабочих органов сельхозмашин. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1998. – № 3. – С. 29–33.
3. Ткачев В.Н., Фиштейн Б.Ч., Казинцев Н.В., Алдырев Д.А. Индукционная наплавка твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. – 184 с.
4. Иванайский В.В., Ишков А.В., Кривочуров Н.Т. и др. Влияние природы борировочного агента, флюсов и активаторов на характеристики покрытий, полученных при скоростном борировании легированных сталей // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 201–203.
5. Ишков А.В., Кривочуров Н.Т., Мишустин Н.М. и др. Износостойкие боридные покрытия для почвообрабатывающих орга-

Таблица 3. Некоторые свойства износостойких покрытий

Состав обмазки (В <sub>4</sub> С:флюс П-0,66), мас. %	Материал основы	τ, мин	h, мкм	HV	W, мг
84:16	65Г	1	260	2300	100
		2	280	1060	150
90:10	50ХГА	1	160	1000	200
		2	190	1100	300
84:16	50ХГА	1	100	950	600
		2	150	1100	300
90:10	65Г	1	280	2150	150
		2	350	2200	250

Примечание: τ – время выдержки детали в индукторе при 1250...1300 °С; h – толщина упрочняющего боридного покрытия; HV – микротвердость рабочей поверхности, измеренная на ПМТ-3 при нагрузке 100 г; W – весовой износ образца на 10 км м пути при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы.

**Выводы**

1. Введение в состав борировочных обмазок, содержащих В<sub>4</sub>С, В<sub>аморфн.</sub>, активаторы NH<sub>4</sub>Cl, CaF<sub>2</sub> плавленного флюса для индукционной наплавки П-0,66 позволяет перевести процесс борирования из твердой в квазижидкую фазу и значительно увеличить его скорость.
2. Показано, что в оптимальных условиях на поверхности сталей 65Г и 50ХГА образуются износостойкие покрытия, состоящие из упрочняющих фаз (цементит, бориды Fe<sub>2</sub>B и Fe<sub>2</sub>V<sub>4</sub>, карбобориды Fe и специальные карбиды и карбобориды Fe, Mn и Cr), распределенных в матрице железо-боридной эвтектики, с толщиной от 100 до 800 мкм, микротвердостью от 700 до 2350 HV, износ которых при трении о незакрепленный абразив составляет от 100 до 600 мг на 10000 м пути, в зависимости от природы борировочного агента, состава обмазки, времени выдержки и химического состава стали.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 11-08-98016-р\_сибирь\_а.

- нов сельхозтехники // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 9. – С. 71–74.
6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Справочник под редакцией Л.С. Ляховича. – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
7. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. – М.: Металлургия, 1978. – 239 с.
8. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин К.Н. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
9. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Физические основы термоциклического борирования. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 216 с.
10. Фомичев О.И., Катков В.Ф., Кушнерева А.К. Исследование тройной диаграммы Fe-Fe<sub>2</sub>B-Fe<sub>3</sub>C // Журнал физической химии. – 1978. – Т. 52. – № 9. – С. 2240–2243.

Поступила 02.03.2011 г.