

УДК 621.785.5; 621.793

**Получение износостойких композиционных
боридных покрытий на стали 65Г при ТВЧ-нагреве**

В.Ф. Аулов¹, В.В. Иванайский¹, А.И. Ишков¹,
В.П. Лялякин¹, Д.В. Коваль², Н.Т. Кривочуров¹, А.А. Соколов²

1 - ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии, г. Москва;

valpal-1938@mail.ru

2 - ФГОУ ВПО Алтайский государственный аграрный университет (АГАУ),
г. Барнаул

***Аннотация.** При осуществлении ТВЧ-нагрева конструкционной стали 65Г под слоем шихты на основе плавного боратного флюса П-0,66, содержащей карбид бора или аморфный бор и активаторы (NH_4Cl , CaF_2), получены износостойкие композиционные боридные покрытия $\text{Fe}_n\text{B-Fe-B}$ толщиной до 800 мкм за время 1-2 мин. С помощью методов рентгенофазового анализа, микрорентгеноспектрального анализа и металлографии установлены состав и структура покрытий. Исследовано распределение микротвердости покрытий по глубине и определена их относительная износостойкость стандартным методом.*

***Ключевые слова:** борирование, ТВЧ-нагрев, бор, карбид бора, железо-боридная эвтектика, почвообрабатывающие органы сельхозтехники.*

Введение

Для улучшения физико-механических характеристик и восстановления изношенной поверхности различных деталей, поверхностного упрочнения и повышения ресурса техники в общем и сельскохозяйственном машиностроении широко применяются методы нанесения покрытий наплавкой и напылением [1], электроискровые методы [2], а также методы химико-термической обработки (ХТО), заключающиеся в одновременном воздействии на стальные поверхности температуры и веществ, способных химически реагировать с материалом детали [3]. Особое место среди

процессов ХТО занимает 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 [4]. Однако большинство из известных в настоящее время методов борирования стали (печное, газовое, электролитическое) длительны, трудоемки, не автоматизированы и плохо встраиваются в технологические схемы современных производств.

Ранее нами было показано, что интенсификация процессов ХТО и, в частности борирования, может осуществляться с применением технологий кратковременного, высокоскоростного нагрева поверхности стальной детали с нанесенным на нее специальным борлирующим составом токами высокой частоты (**ТВЧ-нагрев**) 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. [5], а также рассмотрены вопросы применения таких покрытий для увеличения срока службы почвообрабатывающих органов сельхозмашин [6]. Учитывая высокую скорость получения боридных покрытий в условиях ТВЧ-нагрева, разрабатываемый нами новый технологический процесс ХТО было предложено называть скоростным ТВЧ-борированием [7,11]. Для совершенствования процесса скоростного ТВЧ-борирования и разработки промышленной технологии такой ХТО требуется систематическое исследование структуры и свойств износостойких покрытий, образующихся на различных марках конструкционной стали.

Целью настоящей работы являлось получение, исследование состава, структуры и свойств износостойких композиционных покрытий, образующихся на стали 65Г в условиях скоростного ТВЧ-борирования.

Экспериментальная часть

В качестве борлирующих агентов использовали карбид бора марки М40 (ГОСТ 3647-80) и аморфный бор марки Б-99 (ТУ 1-92-154-90). В качестве

флюса использовали известный 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 - $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 20 - B_2O_3 , 10 - CaSi_2 и 40 - АН-348А [8]. Активаторами борирования служили реактивы CaF_2 и NH_4Cl квалификации х.ч. Борирующую шихту готовили, смешивая рассчитанное количество просеянных компонентов в лабораторной шаровой мельнице *Активатор-2SL* без мелющих тел в течение 5-10 мин.

Готовые смеси, содержащие флюс, борирующий агент и активатор, в виде шихты свободно наносили на предварительно подготовленные, зачищенные образцы размером 30×50×5 мм, вырубленные из проката стали 65Г, и закрепляли на них с помощью жидкого стекла, или казеинового клея (1,5-2 мас. %), вводимых в готовый состав за счет уменьшения количества флюса.

Нагрев подготовленных образцов осуществляли в петлевом индукторе диаметром 160 мм, выполненном из медной трубки \varnothing 5 мм, на ТВЧ-установке *ЭЛСИТ - 100/20-70*. Настройка программы инвертора и геометрия индуктора обеспечивали нагрев образцов до температуры 1300-1350 °С в течение 40-60 сек, с последующей стабилизацией. Температуру поверхности образцов определяли с помощью пирометра *ОППИР-017-II*. После выдержки при указанной температуре в течение определенного времени (1-2 мин.) образцы вынимали из индуктора и давали им свободно остыть на воздухе.

Состав полученных 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: микротвердость (микротвердомер *КМТ-1*, нагрузка 50, 100 г); фазовый состав (рентгеновский дифрактометр *XRD-6000 Shimadzu*, рассеянное Cu-K_α -излучение, скорость углового перемещения образца 1 град/мин) - оборудование ГНУ ГОСНИТИ, г. Москва); микроструктуру и толщину борируемого слоя (металлографический микроскоп *МИМ-7*, травление образцов 5 % спиртовой

раствор HNO_3), а также износостойкость при трении и нежестко закрепленные абразивные частицы (ГОСТ 23.208-79, аттестованная лабораторная установка) - оборудование АГАУ, г. Барнаул.

Результаты и их обсуждение

Низколегированная среднеуглеродистая марганцовистая сталь 65Г (ГОСТ 14959-79), относящаяся к группе конструкционных рессорно-пружинных, наиболее часто используется в России при изготовлении почвообрабатывающих органов сельхозмашин (долот, лемехов, стрельчатых лап, дисков и пр.).

В предварительных экспериментах при нанесении на очищенную стальную поверхность только одного борлирующего агента (B_4C или $\text{B}_{\text{аморфн.}}$), ее ТВЧ-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 технологическим требованиям [7]. Для лучшего раскисления, удаления окисных пленок и перевода твердофазного процесса в квазижидкостное борирование в состав борлирующей шихты был дополнительно введен плавленный флюс для индукционной наплавки П-0,66, приготовленный по методике, описанной в [8]. Состав исследованных смесей приведен ниже (табл. 1).

Нами было установлено, при ТВЧ-нагреве стали 65Г покрытой этими борлирующими составами при обоснованных ранее теоретически параметрах процесса ($T=1200-1300^\circ\text{C}$, выдержка 1-2 мин) [5, 7], на всех образцах образовались покрытия, по внешнему виду напоминающие наплавленный твердый сплав. РФА покрытия показал присутствие в нем следующих фаз: $\alpha\text{-Fe}$, FeB и Fe_2B (с выраженным преобладанием Fe_2B), $\text{Fe}_3(\text{C},\text{B})$ и $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$, смешанных боридов и карбоборидов Fe и Mn , мета- и ортоборатов железа (Fe_3BO_3 , Fe_3BO_6 , Fe_3BO_5), следов вюстита FeO и шпинели $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, различных силикатов. То есть, при ТВЧ-нагреве легированных углеродистых сталей в шихте на основе флюса П-0,66, содержащей от 84 до 90% борлирующих

агентов, на стальной поверхности образуются износостойкие композиционные боридные покрытия.

Таблица 1. Состав борлирующей шихты, мас. %

Смесь	Борирующий агент	Активатор	Флюс П-0,66
I	B_4C (90)	-	10
Ia	B_4C (84)	NH_4Cl (6)	10
II	B_4C (84)	-	16
IIa	B_4C (90)	CaF_2 (5)	5
III	B (90)	-	10
IIIa	B (90)	CaF_2 (5)	5

Для выяснения состава и структуры полученных покрытий, а также фазового состояния боридов были получены микрофотографии травленых шлифов (рис. 1-2).

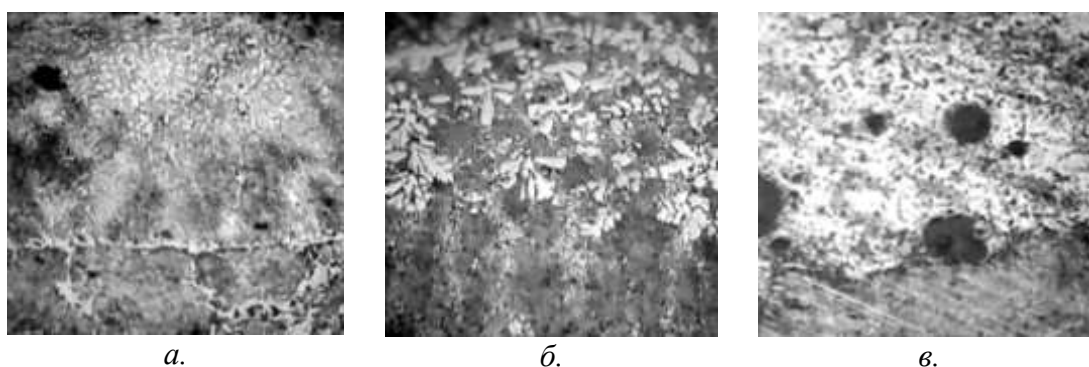


Рис. 1. Структура боридных покрытий на стали 65Г, полученных за 1 мин из различных смесей (400[×]): а. - Ia, б. - II, в. - IIIa

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 эвтектика Fe-B, содержащая включения боридов железа Fe_nB , с выраженной (а, в) или диффузионной (б) границей. Изменений структуры основного металла из-за перегрева не выявлено [8].

Самой реакционноспособной оказалась шихта на основе аморфного бора (рис. 1в). Так, в смеси Ша, содержащей дополнительно 5 % активатора CaF_2 и 5 % флюса, за 1 мин толщина борированного слоя составила 600-750 мкм, при его микротвердости 2200-2300 НV. Основная структура износостойкого покрытия представляет собой переплавленную гомогенизированную эвтектику Fe-B с включением, в качестве основной, фазы 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 1,5-2 мин имеют уже иную структуру (рис. 2).

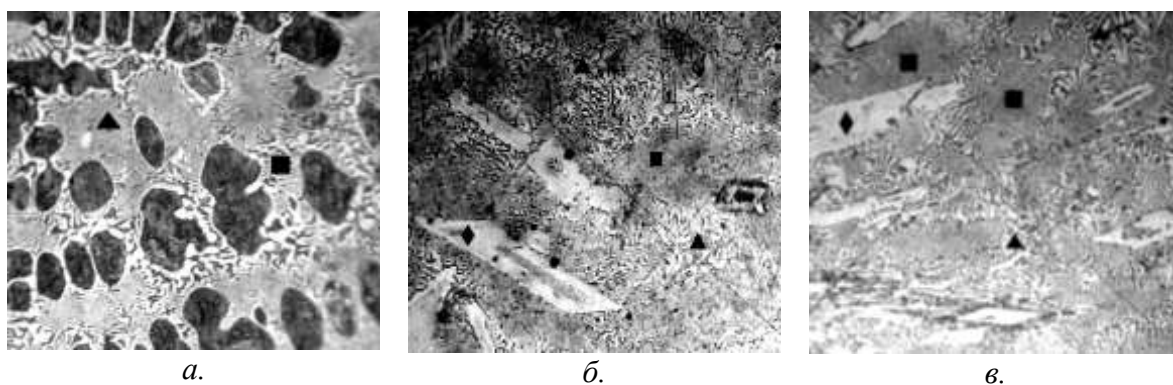


Рис. 2. Структура боридных покрытий на стали 65Г, полученных за 1,5 мин из различных смесей ($400\times$): а. - I, б. - Па, в. - Ша

Как следует из рис. 2, при таких условиях скоростного ТВЧ-борирования в покрытиях образуются структуры двух типов. Так в покрытии, полученном при ТВЧ-нагреве из смеси, содержащей карбид бора и флюс П-0,66 без активаторов, наблюдается образование ледебуритоподобной эвтектики Fe-B, которая на образцах, выдержанных при температуре 1200-1300 °С в течение 1 мин имела мелкозернистую структуру, причем состав эвтектики изменяется в более светлых и темных участках. В эвтектической матрице наблюдаются равномерно распределенные замкнутые темные карбидные области (рис. 2а). Микротвердость образующегося покрытия 1450-1600 НV, толщина - до 300-350 мкм. Введение же в состав борировующей смеси активатора CaF_2 и (или) замена карбида бора более термодинамически

активным $V_{\text{аморфн}}$ приводит к появлению в железо-боридной матрице покрытия новых фаз - пластинчатых кристаллов смешанных карбоборидов Mn и Fe (рис. 2б, в). Микротвердость таких покрытий на стали 65Г достигает максимальных значений 2250-2350 HV, а толщина 600-800 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.

Микрорентгеноспектральный анализ позволил установить состав основных фаз композиционных покрытий (на рис. 2 отмечены знаками ■, ▲ и ◆), получающихся при скоростном ТВЧ-борировании стали 65Г за разное время (см. табл. 2).

Как следует из результатов, приведенных в табл. 2, в состав основной матричной и упрочняющих фаз всех исследованных композиционных боридных покрытий, помимо железа и бора всегда входит углерод, причем его доля колеблется от 13,4 до 28 масс. %, что отвечает углеродным фазам от цементита и карбоборидов Fe до специальных карбидов и специальных карбоборидов Fe и Mn.

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 °С приведены в [9]. Основными равновесными фазами в системе Fe-C-B при содержании углерода до 25 а бора до 35 масс. %, 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).

Таблица 2. Результаты металлографического и микрорентгеноспектрального анализа основных фаз износостойких композиционных боридных покрытиях на стали 65Г

Обозначение фазы, элементы	Описание фазы, морфология	Состав, элемент, %		Химическая (брутто) формула
		весовой	атомный	
■ - Fe, C, B	матрица - серое поле в ледебурито-подобной эвтектике	Fe - 57,25 C - 28,02 B - 14,73	21,72 49,42 28,86	$FeC_{2,3}B_{1,3}$
■* - Fe, C, B	то же	Fe - 64,31 C - 22,30 B - 13,38	27,12 43,73 29,15	$FeC_{1,6}B_{1,1}$
▲ - Fe, C, B	упрочняющая фаза - свет-лые области эвтектики	Fe - 50,63 C - 23,11 B - 26,25	17,24 36,59 46,17	$FeC_{2,1}B_{2,7}$
◆ - Fe, Mn, C, B	упрочняющая фаза – пластинча-тые кристал-лы или иглы	Fe - 64,70 Mn - 1,21 C - 23,01 B - 11,08	28,11 0,54 46,49 24,87	$Fe_{58}MnC_{96}B_{51}$
◆* - 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 за 1 мин.

Исследование распределения микротвердости полученных покрытий по глубине показало наличие в них двух зон - более твердого поверхностного слоя и менее твердого слоя, лежащего под ним, протяженность и характеристики которых различаются (рис. 3).

Существование такой слоистой структуры в полученных покрытиях в нашем случае объясняется не просто наличием двух фаз FeB и Fe₂B, расположенных в материале друг за другом [7], а различающимся содержанием основной упрочняющей фазы по глубине покрытия. Об этом свидетельствуют как структура полученных покрытий (рис. 1-2), так и зависимость толщины, твердости и относительной износостойкости покрытий, образующихся на образцах, полученных в промышленных условиях на стали 65Г за различное время из обмазки на основе B₄C без активаторов (табл. 3).

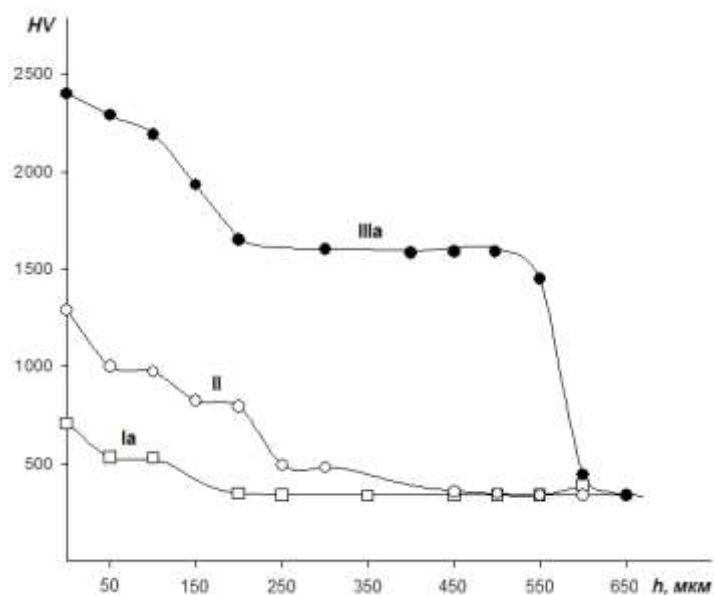


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине покрытий, полученных из различных боридующих смесей на стали 65Г за 1 мин

Таблица 3. Некоторые свойства износостойких композиционных боридных покрытий

Состав обманки (B_4C : флюс П-0,66), масс.%	τ , мин	h , мкм	MKT	W , мг
84:16	1	260	2300	100
	2	280	1060	150
90:10	1	280	2150	150
	2	350	2200	250

Примечание: τ - время выдержки детали в индукторе при $1250 \div 1300$ °С, мин; h - толщина упрочняющего боридного покрытия, мкм; MKT - микротвердость рабочей поверхности, измеренная на ПМТ-3 при нагрузке 100 г, HV; W - износ образца на 10 000 м пути при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы, мг.

Таким образом, хотя наиболее эффективной в процессе скоростного ТВЧ-борирования оказалась шихта на основе состава IIIa, содержащая аморфный бор, который в присутствии флюса П-0,66 и активатора CaF_2 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.

Выводы

1. Исследованы состав, структура и свойства износостойких боридных покрытий, полученных при ТВЧ-нагреве стали 65Г до температуры 1200-1300 °С с выдержкой 1-2 мин в шихте различного состава.
2. Введение в состав шихты, содержащей B_4C (или $B_{\text{аморфн.}}$), активаторы NH_4Cl (или CaF_2) плавленного боратного флюса для индукционной наплавки П-0,66 позволяет перевести процесс борирования из твердой в квазижидкую фазу и значительно увеличить его скорость.
3. Показано, что в оптимальных условиях скоростного ТВЧ-борирования на поверхности стали 65Г образуются износостойкие композиционные боридные покрытия, состоящие из упрочняющих фаз (цементит, диборид Fe_2B и Fe_2B_4 , карбоборидов и специальных карбидов Fe и Mn), распределенных в матрице эвтектики Fe-B, 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 10 000 м пути, в зависимости от природы борлирующего агента, состава шихты и времени выдержки.

Литература

1. *Лялякин В.П.* О восстановлении деталей машин и механизмов: [Текст] / В.П. Лялякин // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. -2012. -№ 5. -С. 9-10.
2. *Черноиванов В.И.* Состояние и перспективы применения электроискровых технологий в ремонтном производстве: [Текст] / В.И. Черноиванов // Труды ГОСНИТИ. -2010. -Т.106. -С. 19-24.

3. *Борисенок Г. В.* Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник: [Текст] / Г.В. Борисенок, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин. -М.: Металлургия, 1981.
4. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник: [Текст] / под ред. Л.С. Ляховича. -М.: Металлургия, 1981.
5. *Ворошнин Л.Г.* Борирование стали: [Текст] / Л.Г. Ворошнин, Л.С. Ляхович. -М.: Металлургия, 1978.
6. *Ишков А.В.* Физико-химические и инженерные основы создания функциональных боридных покрытий на сталях при ТВЧ-нагреве: [Текст] / А.В. Ишков, Н.М. Мишустин, В.В. Иванайский // Научно-технический вестник Поволжья. -2010. -№ 2. -С.92-97.
7. *Ишков А.В.* Износостойкие боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники: [Текст] / А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, Н.М. Мишустин, В.В. Иванайский, А.А. Максимов // Вестник АГАУ. -2010. -Т.71. -№ 9. - С.71-75.
8. *Ишков А.В.* Влияние технологических факторов на износ поверхностно-упрочненных стрелчатых лап: [Текст] / А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, Н.М. Мишустин, В.В. Иванайский, А.А. Максимов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. -2010. -Т.72. -№10. -С. 92-96.
9. *Ткачев В.Н.* Индукционная наплавка твердых сплавов: [Текст] / В.Н. Ткачев, Б.Ч. Фиштейн, Н.В. Казинцев, Д.А. Алдырев. -М.: Машиностроение, 1970.
10. *Фомичев О.И.* Исследование тройной диаграммы Fe-Fe₂B-Fe₃C: [Текст] / О.И. Фомичев, В.Ф. Катков, А.К. Кушнерева // Журнал физической химии. -1978. -Т.52. -№ 9. -С. 2240-2243.
11. *Аулов В.Ф., Кривочуров Н.Т., Иванайский В.В., Соколов А.В., Ишков А.В.* Новая конструкция стрелчатых лап //Сельский механизатор. 2013. №10. С. 34-35.

FORMATION OF WEAR-RESISTANT COMPOSITION BORIDES COVERINGS ON STEEL 65Mn AT RFC-HEATING

Aulov V.F., Ivanajskij V.V., Ishkov A.V., Lyalyakin V.P., Koval D.V.,
Krivochurov N.T., Sokolov A.V.

Annotation. At realization of TBЧ-HEATING of machinery steel 65Mn under bed of fusion mixture on the basis of molten boric flux П-0,66 (in Russian), containing carbide of boron or amorphous boron and activators (NH_4Cl , CaF_2), are received wear-resistant composition borides coverings Fe_nB -Fe-B by thickness up to 800 microns during 1-2 minutes. With the help of methods of X-ray analysis, X-ray fluorescence spectral microanalysis and the metallographic analysis, composition and structure of coverings are established. Distribution of microhardness of coverings on depth is investigated and their comparative wear resistance is determined by a standard method.

Keywords: borating, RFC-heating, boron, carbide of boron, Fe-B eutectic, soil-cultivating bodies of agricultural machinery.