

# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОЕВ БОРИДОВ НА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 45, СФОРМИРОВАННЫХ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКЕ В ВАКУУМЕ

*Н.Н.Смирнягина, Б.Н.Банзаракцаева*

Отдел физических проблем при Президиуме БНЦ СО РАН, 670047 Улан-Удэ, Россия,  
E-mail: [ionbeam@ofpsrv.bsc.buryatia.ru](mailto:ionbeam@ofpsrv.bsc.buryatia.ru)

Исследованы условия образования, структура и свойства слоев на основе боридов железа на углеродистой стали 45 при электронно-лучевом борировании и в результате взаимодействия оксида  $Fe_2O_3$ , бора и углерода под воздействием электронного пучка в вакууме.

## 1. Введение

Модифицирование поверхности металлов и сплавов позволяет увеличивать срок службы и повысить надежность работы различных деталей машин и инструментов. В последнее время наряду с традиционными в современном машиностроении методами получения защитных покрытий, повышающих твердость и износостойкость деталей, таких как цементация, азотирование, нитроцементация, борирование, хромирование и др., все больше используют пучковые технологии, например, обработку лазерным лучом и электронным пучком. Использование электронного нагрева с высокой ( $>10^9$  Вт/м<sup>2</sup>) удельной мощностью в вакууме имеет преимущества благодаря быстрому безынерционному достижению предельно высоких температур и легкости регулирования нагрева в широком диапазоне температур.

В настоящей работе исследованы условия образования, структура и свойства слоев на основе боридов железа на углеродистой стали 45 под воздействием электронного пучка в вакууме.

## 2. Экспериментальная часть

**Твердофазное борирование** (метод химико-термической обработки ХТО) проводили в порошковой смеси в контейнере с плавким затвором по следующему режиму: порошок состава 97 мас %  $B_4C$  и 3 мас %  $KBF_4$ , температура - 950°C, продолжительность- 4 часа [1].

**Электронно-лучевое борирование.** Исследования проводили на образцах, изготовленных из углеродистой стали 45 в форме цилиндров с диаметром  $\square$  15 мм и высотой 7 мм. Образцы готовили путем нанесения обмазки на предварительно подготовленную поверхность стали. Толщина обмазки была одинакова, не превышала 1 мм. В состав обмазки входили 1:1 по объему карбид бора  $B_4C$  (квалификации "технический") или бор аморфный. (с содержанием основного компонента не менее 95 мас %) и органическое связующие - раствор 1:10 клея БФ-6 в ацетоне. Обработку образцов проводили в течение 2-5 минут при мощности электронного пучка 150-300 Вт в установке с мощной аксиальной электронной пушкой [2]. Остаточное давления в вакуумной камере не превышало  $2 \square 10^{-3}$  Па.

**Рентгенофазовый анализ (РФА)** осуществляли на дифрактометрах ДРОН-2М (Со  $K_{\alpha}$ -излучении) и D8 фирмы Bruker

(Cu K $\alpha$ - излучении с внутренним стандартом Si).

**Микротвердость и микроструктуру** сформированных слоев, определяли на микротвердомере ПМТ-3 с фотонасадкой-цифровой камерой Olympus c4000 zoom с оптическим увеличением  $\times 3$  или использованием металлографического микроскопа "Neophot-21". Нагрузка на алмазную пирамиду составляла 50 или 100 г.

### Результаты и их обсуждение

По данным РФА поверхностный слой после ХТО состоит из борида железа FeB и борированного цементита.

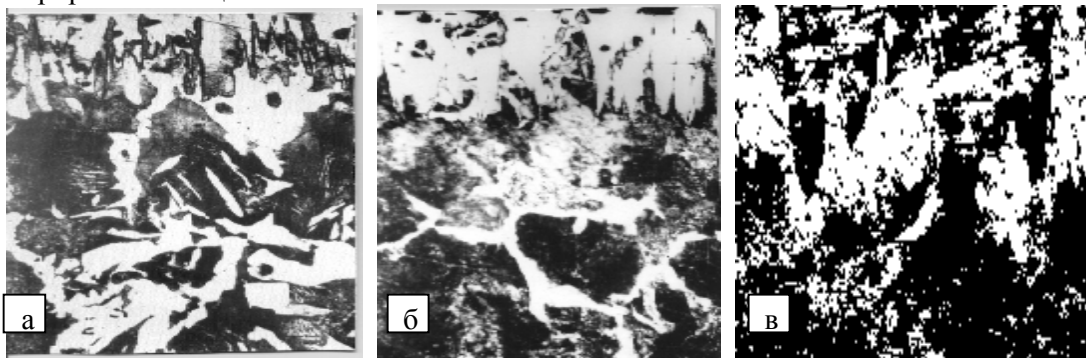


Рис.1. Микроструктуры боридных слоев, сформированных твердофазным борированием на сталях: а- 20; б- 45; в- У8А; а, б -  $\square 250$ ; в -  $\square 500$

Метод электронно-лучевого борирования [3], по своему механизму, вероятно, является модификацией способа борирования из твердофазных насыщающих обмазок при химико-термической обработке. Его новизной является воздействие электронного пучка на борсодержащую обмазку в вакууме. Применение высококонцентрированного источника энергии позволяет очень быстро передавать энергию электронного пучка при его соударении с поверхностью обрабатываемого металла или сплава, нагревать зону контакта до очень высоких температур. Это способствует увеличению диффузии бора из насыщающей обмазки по поверхности и проникновению его в объем металла, взаимодействию и образованию боридов

Микроструктуры боридных слоев приведены на рис.1. Известно [1], что в низкоуглеродистых сталях боридный слой имеет игольчатое строение, при котором иглы боридов, срастаясь в основаниях, образуют сплошной слой (рис.1.а и б). В высокоуглеродистых сталях боридные иглы укрупнены, а концы их скруглены (рис.1.в). Непосредственно к иглам боридов примыкают перистые выделения карбоборидной фазы. Микротвердость боридных игл составляет 1300-1350 HV, перистых выделений 300-330 HV. Толщина слоя - 70-90 мкм.

железа (рис.2). Толщина боридного слоя зависит от состава борлирующего компонента. Слои толщиной 300-360 мкм получены при использовании аморфного бора, а толщиной 100-150 мкм - карбида бора. Количество наносимых слоев определяет, в целом, толщину насыщающей обмазки, а, следовательно, и толщину образующегося боридного слоя на обрабатываемой поверхности сплава. Насыщающую обмазку наносили, намазывая один или несколько слоев. Затем обрабатываемую поверхность сушат на воздухе, а только после удаления растворителя, помещают в вакуумную рабочую камеру и начинают процесс электронно-лучевого борирования.

На рис.2 приведены зависимости массы образующего слоя от общей массы насыщающей обмазки. Общее количество клеевых слоев достигало от 1 до 5 (аморфный бор) и 1-4 ( $B_4C$ ).

Как следует из рис.2, для формирования боридного слоя с наибольшей массой (толщиной) достаточно нанести один клеевой слой борирующего компонента, как в случае использования аморфного бора, так и при применении карбида бора. Исходные образцы стали 45 были предварительно нормализованы при температуре  $930\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 7 минут, охлаждены на воздухе.

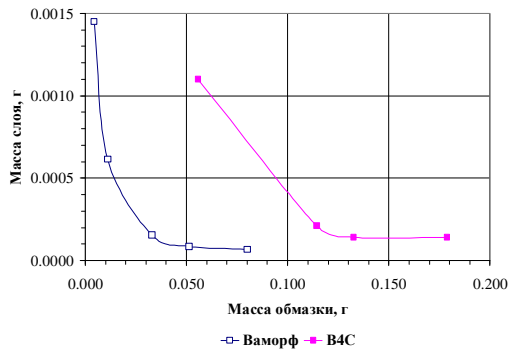


Рис.2. Зависимость массы боридного слоя от количества слоев борирующего компонента (сталь 45,  $W=270$  Вт, время воздействия 5 мин)

Толщина боридного слоя зависит и от мощности электронного пучка (рис.3). Эта зависимость имеет большое практическое значение, поскольку позволяет контролировать технологический показатель (удельную мощность, а, следовательно, и ток электронного пучка, и ускоряющее напряжение) в зависимости от

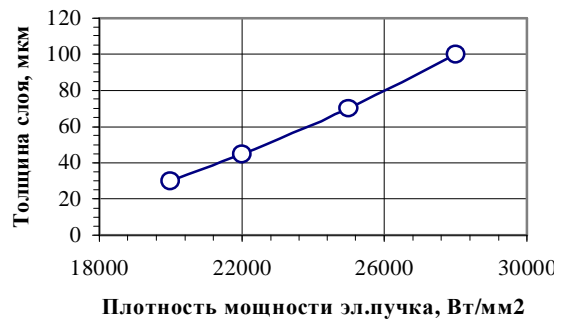


Рис.3. Влияние мощности электронного пучка на толщину боридного слоя (сталь 45, обмазка на основе Вamorф, время воздействия 1 мин)

величины требуемой толщины боридного слоя.

Фазовый состав боридного слоя также зависит от состава борирующего компонента. По данным РФА, слои содержат бориды  $Fe_2B$  (ASTM 3-1053) и  $FeB$  (ASTM 3-957), но количественное соотношение их различно. В боридном слое, сформированном на основе аморфного бора, преобладает борид  $Fe_2B$ . Борид  $FeB$  является преобладающей фазой в боридном слое, образованном из насыщающей обмазки на основе карбида  $B_4C$ . На рентгенограммах присутствуют также линии, принадлежащие ферриту ( $\square$ -Fe, ASTM 6-696), отсутствуют рефлексы борированного цемента ( $Fe_{23}(C,B)_6$ , ASTM 12-570).

На рис.4 представлены микроструктуры боридных слоев на стали 45.

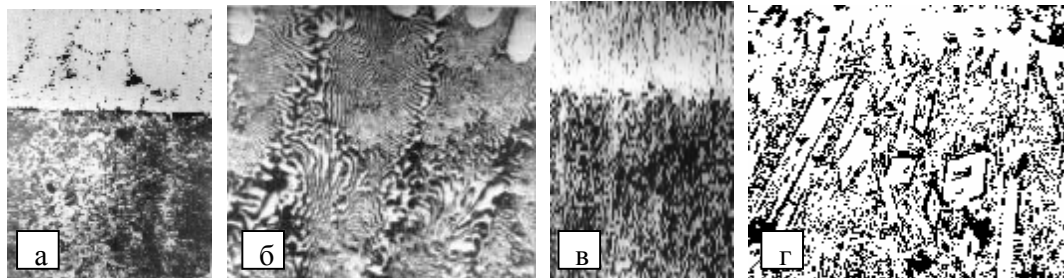


Рис.4. Микроструктуры слоев, сформированных на стали 45:  
 а, б - обмазка на основе  $B_4C$ ; в, г - обмазка на основе аморфного В;  
 а-  $\square 250$ ; б-  $\square 630$ ; в -  $\square 100$ ; г-  $\square 500$

Боридный слой, сформированный из обмазки на основе карбида бора (рис.3.а, б) состоит из округлых включений, располагающихся на поверхности слоя и эвтектики, имеющих микротвердость 820-840 HV и 510-530 HV. Округлые включения являются первичными кристаллами боридов, что отвечает энтропийному критерию устойчивости ограниченной формы кристаллов при кристаллизации в условиях, приближенных к равновесным. Согласно этому критерию, если значение энтропии плавления ( $DS$ ) не превышает 2 кал/моль $\square$ к, кристаллы имеют округлую форму [4]. Полученные в работе [5] значения энтропии плавления для боридов железа  $Fe_2B$  составляет  $DS=1,5$  кал/моль $\square$ к. В свою очередь, округлые формы боридов определяют форму кристаллов эвтектики.

Боридный слой, сформированный из обмазки на основе аморфного бора, имеет другую структуру (рис.4.в, г). Он состоит из частиц различной формы: ромбической, призматической, дендритной. На поверхности слоя располагается сплошная светлая пленка с иглами, направленными вглубь образца. Микротвердость ее составляет 1200-1250 HV. Внутри пленки встречаются редкие (1-2) крупные включения с микротвердостью 1750-1820 HV. Под пленкой находятся первичные кристаллы и эвтектика с микротвердостью

840-880 HV и 500-540 HV, соответственно.

Согласно [6], борид железа  $Fe_2B$  имеет объемноцентрированную тетрагональную кристаллическую решетку (Пр. группа  $I4/mcm$  с параметрами элементарной ячейки  $a=0,51087$ ,  $c=0,42497$  нм). При формировании слоя из обмазки, содержащей аморфный бор, кристаллы боридов железа наследуют форму элементарной ячейки. Поэтому, первичные кристаллы боридов имеют форму ромбов, параллелограммов и т.д., обусловленную разными углами наклона кристаллической решетки (призмы) к плоскости шлифа. Следует отметить, что аналогичные формы кристаллов боридов наблюдаются и при лазерном борировании [7].

В настоящей работе сделали попытку формирования слоев на основе боридов  $Fe_2B$  и  $FeB$  в процессе синтеза их из стехиометрических смесей с участием  $Fe_2O_3$ , В и С на поверхности стали 45. Для этого брали смесь исходных компонентов в соотношении  $Fe_2O_3 : 3B : 3C (Fe_2B)$  и  $Fe_2O_3 : 2B : 3C (FeB)$ , тщательно перетирали в агатовой ступке, смешивали с органическим связующим и реакционную смесь поверхности образца стали 45. Электронно-лучевую обработку проводили в вакууме не выше  $2 \cdot 10^{-3}$  Па при мощности электронного пучка  $W= 250-450$  Вт в течение 1-3 мин.



Рис. 5. Микроструктура боридного слоя  $\text{Fe}_2\text{B}$  (а),  $\text{FeB}$  (б) и  $\text{FeB}+\text{B}_2\text{O}_3$  (в):  $\square$ -400

По данным РФА, боридный слой преимущественно состоит из борида  $Fe_2B$ . Слой образца со стехиометрической смесью  $Fe_2O_3 : 2B : 3C (FeB)$  имеет в своем составе борид  $FeB$ .

Толщина боридных слоев составляла 200-280 мкм ( $Fe_2B$ ) и 50-80 мкм ( $FeB$ ). Микроструктура слоя на основе  $Fe_2B$  представлена на рис.5.а. Структура сложная, включает первичные кристаллы борида, дендритные включения эвтектики. На рис. 5.б приведена микроструктура слоя на основе борида  $FeB$ .

Применение защитного слоя аморфного оксида способствовало получению равновесного боридного слоя. Во всех слоях наблюдали эвтектики, имеющие микротвердость 650-700 HV. Округлые и вытяженные включения имели упорядоченное расположение в слое, их микротвердость в слоях была:  $FeB$  (1080 и 1150 HV),  $FeB+B_2O_3$  (1250 1150 HV), соответственно. Округлые включения были лишь в слоях  $Fe_2B$  (1200 HV) и  $Fe_2B+B_2O_3$  (1150 HV).

Как видно из рис.1 и 4, структуры поверхностных слоёв после твердофазного и электронно-лучевого борирования. После твердофазного - боридный слой имеет игольчатое строение, под ним располагается переходная зона, а после электронно-лучевого – отсутствует переходная зона, видна четкая граница между слоем и основным металлом. Слой состоит из округлых включений, располагающихся на поверхности или в объеме и эвтектики. Толщина слоя составляет: после твердофазного борирования 70-90 мкм, а после электронно-лучевого достигает 250-300 мкм.

На рис.6. показано влияние температуры нагрева на микротвердость боридных слоёв. Если в исходном состоянии боридные слои, полученные в результате твердофазного борирования, обладают более

высокой твердостью по сравнению со слоями, полученными при электронно-лучевом борировании, то при нагреве до температуры 800-900°C микротвердость слоями, полученными при ЭЛБ, то при нагреве до температуры 800-900°C микротвердость становится практически сопоставимой.

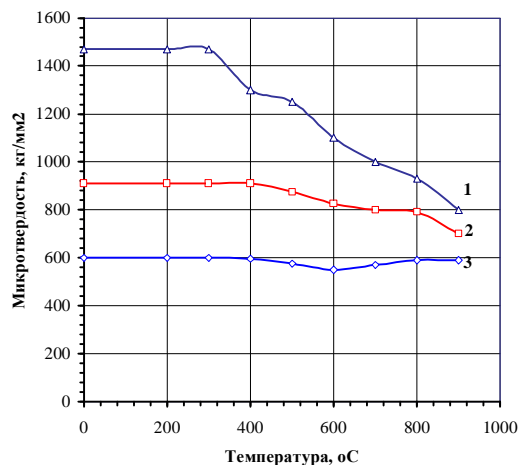


Рис.6. Влияние температуры нагрева на микротвердость  $HV_{50}$  боридного слоя:  
1- твердофазное борирование; 2- округлые включения (ЭЛБ); 3- эвтектика (ЭЛБ)



Рис.7. Хрупкость боридных слоев на стали 45:  
1- твердофазное борирование; 2- округлые кристаллы (ЭЛБ); 3- эвтектика (ЭЛБ)

Исследованием микроструктуры установлено, что, начиная с температуры 700°C в боридных слоях, полученных в результате твердофазного борирования,

начинают образовываться трещины (рис.8.а). Зарождение трещины начи-

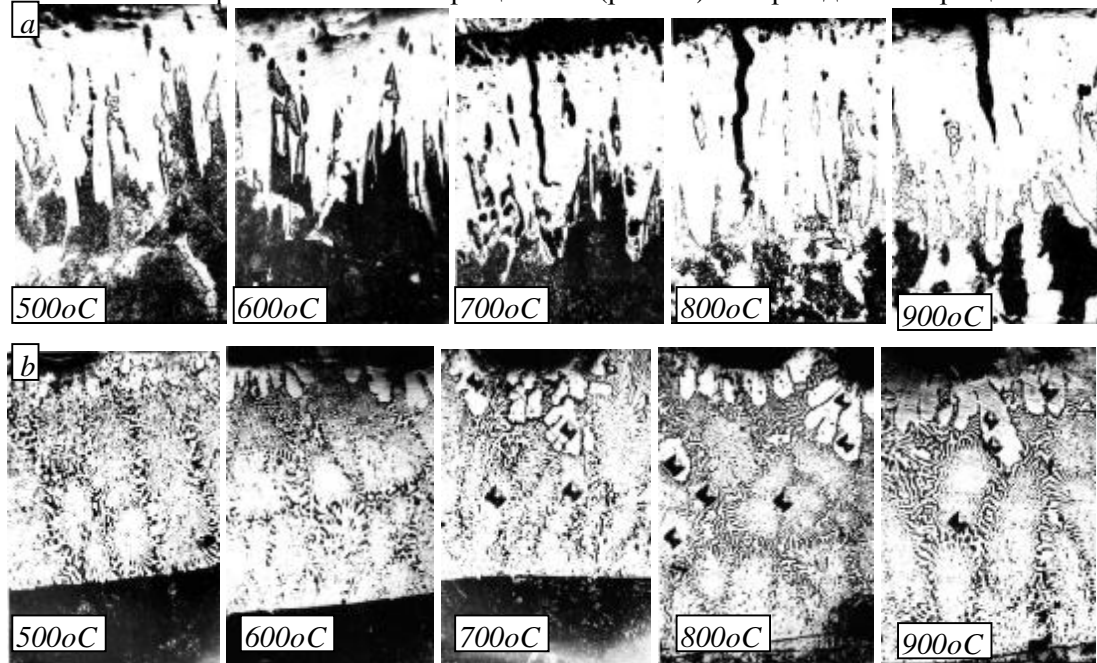


Рис.8. Микроструктура боридных слоев на стали 45:  
а- твердофазное борирование; б электроннолучевое борирование

нается с поверхности. Увеличение температуры нагрева приводит к росту трещины вглубь слоя и к её раскрытию. В слоях, полученных при электроннолучевом борировании, трещины не обнаружены (рис.8.б).

Известно [1], что наряду с высокой твёрдостью и износостойкостью, боридные слои обладают и существенным недостатком – повышенной хрупкостью. Для оценки хрупкости боридных слоёв определяли балл хрупкости (рис.7). Из рисунка следует, что после ЭЛБ слои более пластичны, чем после твердофазного борирования. Кроме того, слои после ЭЛБ имеют гетерогенную структуру, сочетающую твёрдые (хрупкие) и более пластичные структурные составляющие. Такое сочетание отчасти объясняет отсутствие термических трещин при нагреве боридных слоёв до высоких температур.

#### Список литературы

[1] Химико-термическая обработка металлов и сплавов. //Справочник. под ред. Ляховича Л.С. М.: Металлургия. 1981. 424с.

[2] Мощная плавильная технологическая печь с электронно-лучевым нагревом /Григорьев Ю.В., Семенов А.П., Нархинов В.П. и др. //Комплексное использование минерального сырья в Забайкалье. Улан-Удэ, 1992, С.139-148.

[3] Семенов А.П., Сизов И.Г., Смирнягина Н.Н. и др. //Патент RU 2186872. 2002. БИ №22.

[4] Таран Ю.Н., Мазур В.И. Структура эвтектических сплавов. М.:Металлургия, 1978, 312с.

[5] Тавадзе Ф.Н., Горибашвили В.И., Накаидзе Ш.Г.//МиТОМ, 1983, №1, С.2-3.

[6] Кубашевски О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа. М.: Металлургия, 1985, С. 25-28.

[7] Сафонов А.Н. //МиТОМ, 1998, № 1, С. 5-9.