

Особенности синтеза, строения и прочностных свойств слоев боридов железа на углеродистой стали Ст3, сформированных под воздействием мощного электронного пучка в вакууме

Д. Э. Дашеев, А. П. Семенов, Н. Н. Смирнягина

Институт физического материаловедения СО РАН
670047 Россия, Улан-Удэ
e-mail: ionbeam@pres.bsnet.ru

Исследованы условия образования, структура и свойства слоев на основе боридов железа на углеродистых сталях (3, 20, 45 и У8А) при электронно-лучевом борировании и в результате взаимодействия оксида Fe_2O_3 , бора и углерода под воздействием электронного пучка в вакууме.

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/м²) 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.

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, изготов-

ленных из углеродистой стали 45 в форме цилиндров с диаметром 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 связующее – раствор 1:10 клея БФ-6 в ацетоне. Обработку образцов проводили в течение 2–5 мин при мощности электронного пучка 150–300 Вт в установке с мощной аксиальной электронной пушкой [2]. Остаточное давление в вакуумной камере не превышало 2×10^{-3} Па.

Рентгенофазовый анализ (РФА) осуществляли на дифрактометрах ДРОН-2М (Co K_{α} -излучении) и D8 фирмы Bruker (Cu K_{α} -излучении с внутренним стандартом Si).

Микротвердость и микроструктуру сформированных слоев определяли на микротвердомере ПМТ-3 с фотонасадкой – цифровой камерой Olympus с 4000 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.

Микроструктуры боридных слоев приведены на рис. 1. Известно [1], что в низкоуг-

леродистых сталях боридный слой имеет игольчатое строение, при котором иглы боридов, срастаясь в основаниях, образуют сплошной слой (рис. 1а, б). В высокоуглеродистых сталях боридные иглы укрупнены, а концы их скруглены (см. рис. 1в). 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.

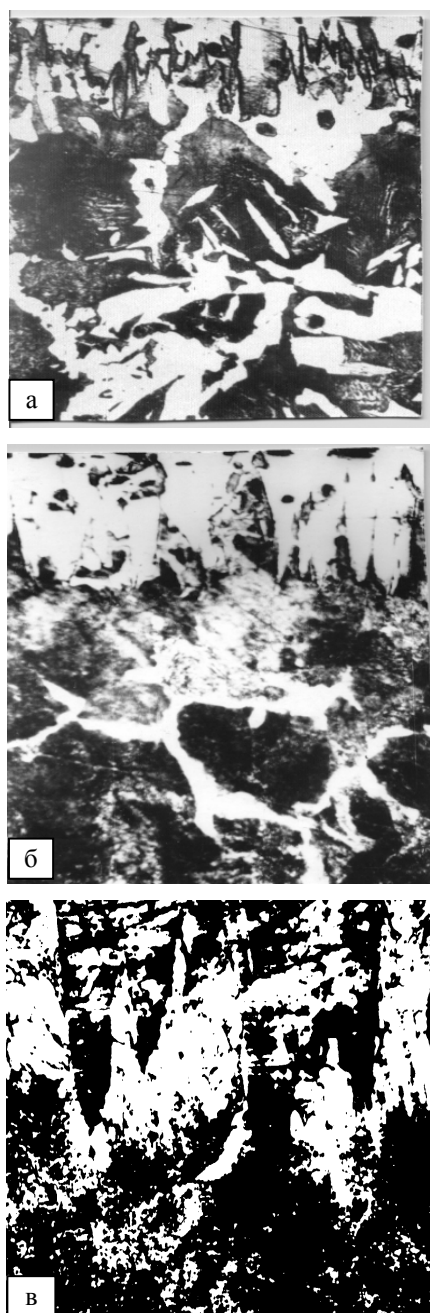


Рис. 1. Микроструктуры боридных слоев, сформированных твердофазным борированием на сталях: а – 20; б – 45; в – У8А; а, б – $\times 250$; в – $\times 500$

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 поверхности 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 железа (рис. 2). Толщина боридного слоя зависит от состава борирующего компонента. Слои толщиной 300–360 мкм получены при использовании аморфного бора, а толщиной 100–150 мкм – карбида бора. Количество наносимых слоев определяет 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, и только после удаления растворителя помещают в вакуумную рабочую камеру и начинают процесс электронно-лучевого борирования.

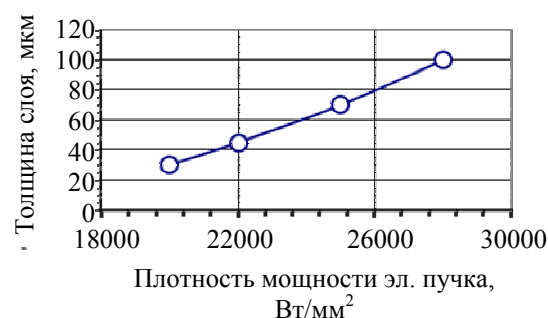


Рис. 2. Влияние мощности электронного пучка на толщину боридного слоя (сталь Ст3, обмазка на основе $B_{\text{аморф}}$, время воздействия 1 мин)

На рис. 2 приведены зависимости массы образующегося 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 °С в течение 7 мин, охлаждены на воздухе.

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 величины требуемой толщины боридного слоя.

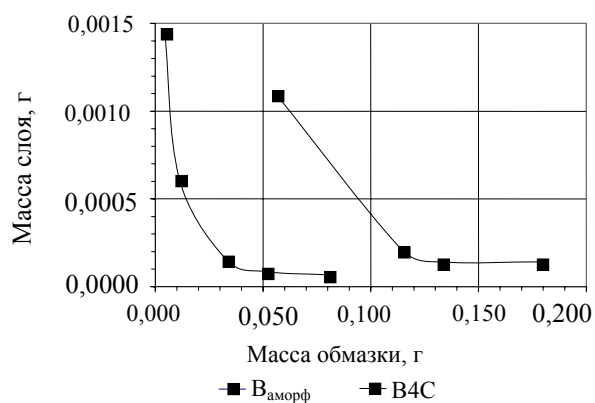


Рис. 3. Зависимость массы боридного слоя от количества слоев борирующего компонента (сталь Ст3, W=270 Вт, время воздействия 5 мин)

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 . Бо-

рид FeB является преобладающей фазой в боридном слое, образованном из насыщающей обмазки на основе карбида B_4C . На рентгенограммах присутствуют также линии, принадлежащие ферриту ($\alpha\text{-Fe}$, ASTM 6–696), отсутствуют рефлексы борированного цементита ($\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$, ASTM 12–570).

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

Боридный слой, сформированный из обмазки на основе карбида бора (см. рис. 3а, 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 (ΔS) не превышает 2 кал/моль $\times$ к, кристаллы имеют округлую форму [4]. Полученные в работе [5] значения энтропии плавления для боридов железа Fe_2B составляют $\Delta S=1,5$ кал/моль $\times$ к. В свою очередь, округлые формы боридов определяют форму кристаллов эвтектики.

Боридный слой, сформированный из обмазки на основе аморфного бора, имеет другую структуру (см. рис. 4в, 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 и 500–540 HV соответственно.

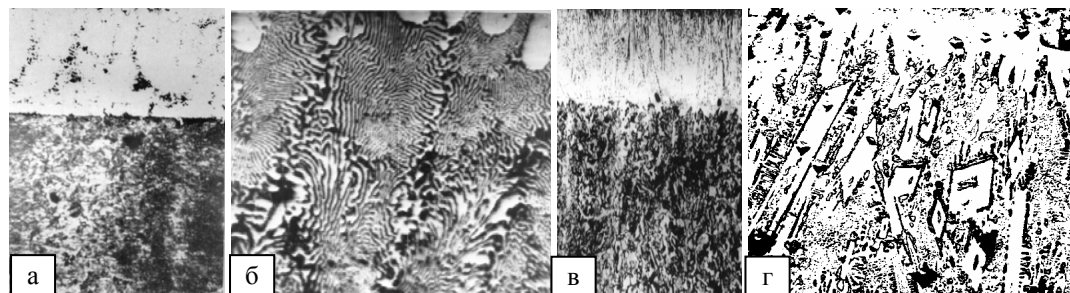


Рис. 4. Микроструктуры слоев, сформированных на стали 45: а, б — обмазка на основе B_4C , в, г — обмазка на основе аморфного В; а $\times$ 250; б $\times$ 630; в $\times$ 100; г $\times$ 500

Согласно [6], борид железа Fe_2B имеет объемноцентрированную тетрагональную кристаллическую решетку (группа I4/мкм 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 сделана попытка 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 $\text{Fe}_2\text{O}_3 : 3\text{B} : 3\text{C}(\text{Fe}_2\text{B})$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 : 2\text{B} : 3\text{C}(\text{FeB})$, тщательно перетирали в агатовой ступке, смешивали с органическим связующим и реакцию проводили в вакууме не выше 2×10^{-3} Па при мощности электронного пучка $W = 250\text{--}450$ Вт в течение 1–3 мин.

По данным РФА, боридный слой преимущественно состоит из боридов Fe_2B . Слой образца со стехиометрической смесью $\text{Fe}_2\text{O}_3 : 2\text{B} : 3\text{C}(\text{FeB})$ 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. 5а. Структура сложная, включает первичные кристаллы боридов, дендритные включения эвтектики. На рис. 5б приведена микроструктура слоя на основе боридов FeB .

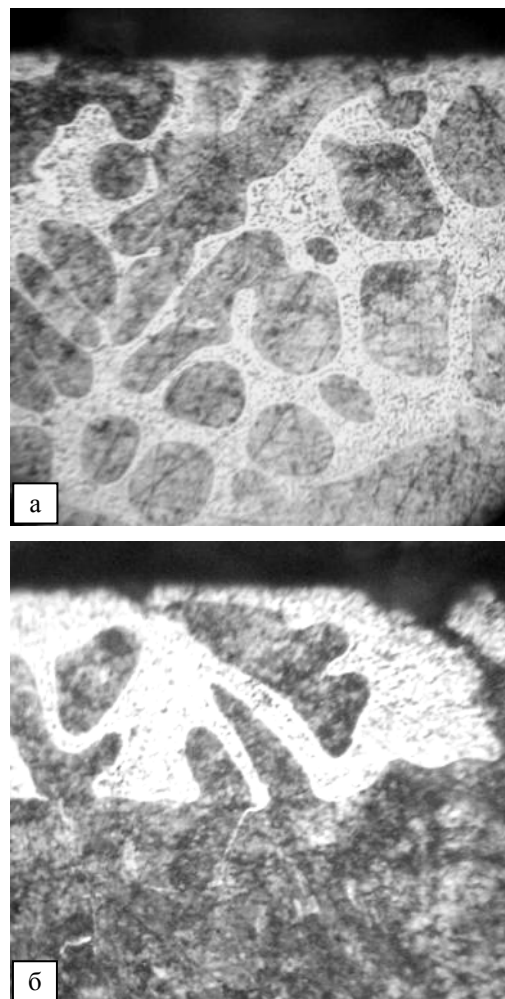


Рис. 5. Микроструктура боридного слоя Fe_2B (а), FeB (б) на поверхности Ст45: $\times 400$

Применение защитного слоя аморфного оксида бора способствовало получению равновесного боридного слоя (рис. 6). Во всех слоях наблюдали эвтектики, имеющие микротвердость 650–800 HV. Округлые и вытянутые включения имели упорядоченное расположение в слое, их микротвердость в слоях была $\text{Fe}_2\text{B} + \text{B}_2\text{O}_3$ (1650 и 1850 HV), $\text{FeB} + \text{B}_2\text{O}_3$ (1800 и 2350 HV) соответственно.

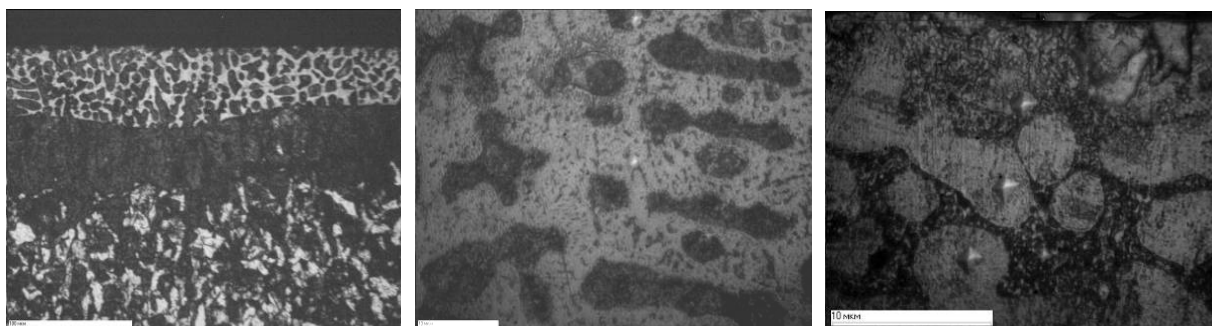


Рис. 6. Строение слоя $\text{Fe}_2\text{B} + \text{B}_2\text{O}_3$ на Ст45

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, гранты 10-08-00918а и 12-08-98036-р_сибирь_а.

Литература

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

2. Григорьев Ю. В., Семенов А. П., Нархинов В. П. и др. Мощная плавильная технологическая печь с электронно-лучевым нагревом // 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. 312 с.

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.