

Строение, жаропрочность и жаростойкость наноструктурных слоев боридов переходных металлов на углеродистых сталях

Бато В. Раднаев, Баир В. Раднаев, Д. Э. Дашеев, А. С. Милонов, Н. Н. Смирнягина

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

Исследованы и сопоставлены микроструктуры и микротвердость боридных слоев, сформированных различными методами – электронно-лучевым борированием в вакууме и химико-термической обработкой из насыщающих обмазок. Сформированные слои обладают гетерогенной структурой, сочетающей твердые и пластичные компоненты, приводящие к уменьшению хрупкости боридного слоя.

На сегодняшний день в условиях постоянно развивающейся техники возрастают требования к прочности материалов деталей машин, приборов и инструментов, а особенно к их жаропрочности и жаростойкости. Бориды переходных металлов обладают высокими температурами плавления (свыше 2000 °С) и значениями твердости, достаточно устойчивы к окислению, поэтому представляют особый интерес для формирования покрытий на их основе. Боридные слои имеют высокие физико-механические характеристики. Микротвердость слоев достигает 2000 МПа, причем эти значения микротвердости могут сохраняться до температур ~ 600–700 °С, что позволяет применять борирование для повышения износостойкости изделий, работающих при высоких температурах [1–3].

В работе получены слои в результате электронно-лучевого борирования (ЭЛБ) [4]. На предварительно подготовленную поверхность образцов наносили обмазку толщиной 0,5–1 мм. В состав насыщающей обмазки входили карбид бора B_4C и органическое связующее. Электронный нагрев в течение 2–5 мин. при удельной мощности 2–2,5 Вт/см². Остаточное давление в вакуумной камере не превышало 2×10^{-3} Па.

Твердофазное борирование методом ХТО проводили при температуре 950 °С, в течение 4 ч в порошковой смеси, содержащей 97 мас. % B_4C и 3 мас. % KBF_4 , в контейнере с плавким затвором [5].

Результаты и их обсуждение

Исследование структуры поверхностных слоев после твердофазного борирования и ЭЛБ выявило особенности строения. После

твердофазного боридный слой имеет игольчатое строение, под ним располагается переходная зона. После ЭЛБ переходной зоны нет, видна четкая граница между слоем и основным металлом. Слой состоит из округлых кристаллов, располагающихся на поверхности или в объеме и эвтектики (рис. 1). Толщина слоя составляет: после твердофазного борирования 70–90 мкм, а после электронно-лучевого достигает 250–300 мкм.

Боридные слои испытывали на термическую устойчивость и жаропрочность. Для этого все образцы нагревали в печи сопротивления КО-14 до определенных температур и выдерживали в течение 2 часов для установления равновесия.

На рис. 2 показано влияние температуры дополнительного нагрева после формирования на микротвердость боридных слоев. Измерена микротвердость отдельных составляющих боридных слоев, а именно: 1 игл, сформированных при твердофазном борировании, 2 округлых включений и 3 эвтектики в слоях после электронно-лучевого борирования. 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 °С микротвердость становится практически сопоставимой.

Выравнивание микротвердости боридных слоев после твердофазного и ЭЛБ при высоких температурах (900 °С) позволяет сделать вывод об использовании ЭЛБ для упрочнения режущих инструментов и др., испытывающих разогрев в процессе работы до столь высоких температур без существенного снижения эксплуатационных свойств.

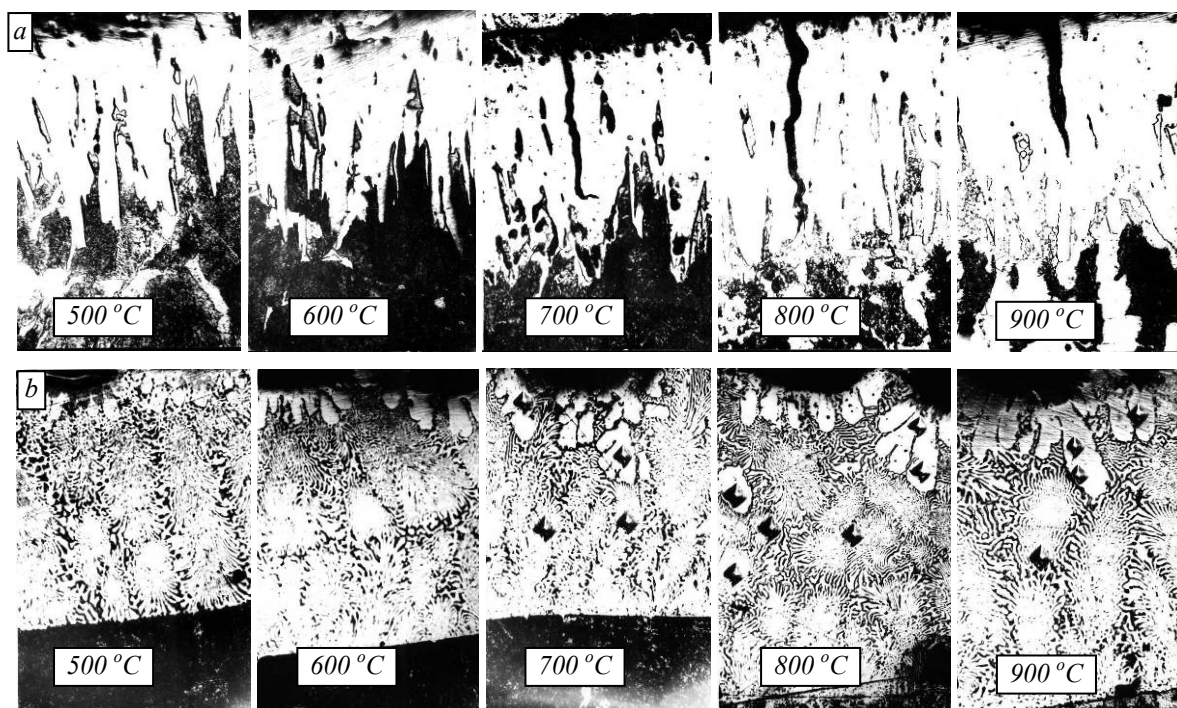


Рис. 1. Микроструктура боридных слоев на стали 20: а) твердофазное борирование, б) электронно-лучевое борирование

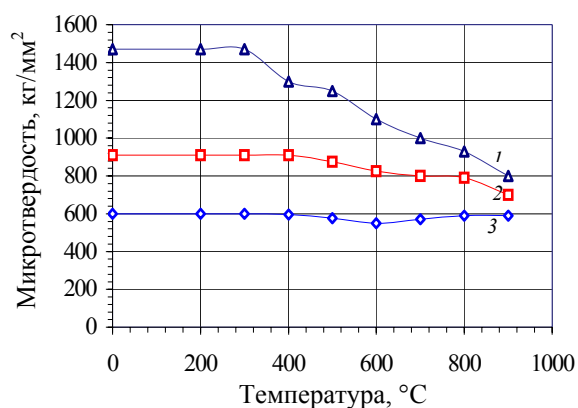


Рис. 2. Влияние температуры нагрева на микротвердость HV_{50} боридного слоя: 1 – твердофазное борирование, 2 – округлые включения (ЭЛБ), 3 – эвтектика (ЭЛБ)

Исследованием микроструктуры установлено, что с температуры 700 °C в боридных

слоях, полученных в результате твердофазного борирования, начинают образовываться трещины. Зарождение трещины начинается с поверхности. Увеличение температуры нагрева приводит к росту трещины вглубь слоя и к ее раскрытию. В слоях, полученных при ЭЛБ, трещины не обнаружены (см. рис. 1).

Дальнейшее повышение температуры нагрева до 1300 °C на воздухе приводит к постепенному уменьшению толщины боридных слоев (рис. 3). Наиболее интенсивно это наблюдается в слоях, сформированных при твердофазном борировании, в которых происходит потеря массы слоя и полное его разложение при температурах выше 1150–1300 °C. В слоях, полученных при электронно-лучевом борировании, трещины не обнаружены.

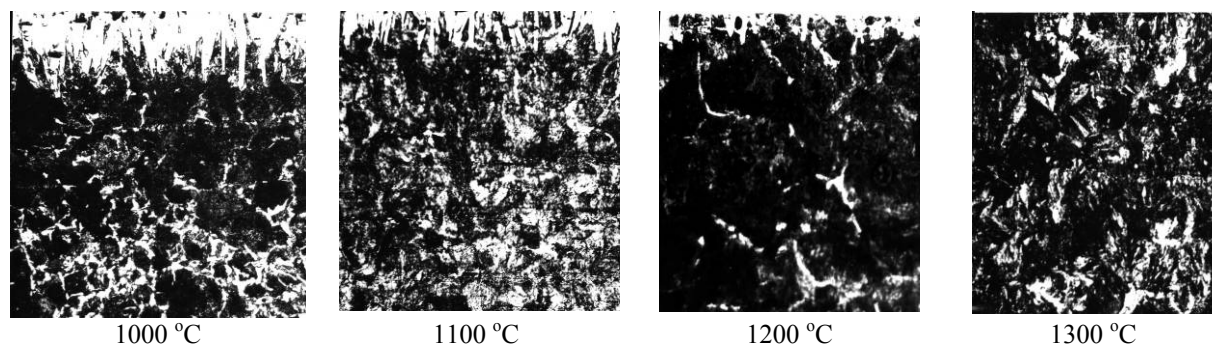


Рис. 3. Термическая стабильность боридных слоев (сталь 20) при нагреве на воздухе, $\times 250$

Известно, что наряду с высокой твердостью и износостойкостью, боридные слои обладают и существенным недостатком – повышенной хрупкостью. Проведенные исследования показали, что использование электронного

нагрева позволяет снизить хрупкость и повысить пластичность. В табл. 1 представлена сравнительная оценка балла хрупкости. Хрупкость оценивали по методике [6, 7] при измерении микротвердости.

Таблица 1

Хрупкость боридных слоев на стали Ст20

Твердофазное борирование		Округлые кристаллиты (электронно-лучевое борирование)		Эвтектика (электронно-лучевое борирование)	
Нагрузка, г	Балл хрупкости	Нагрузка, г	Балл хрупкости	Нагрузка, г	Балл хрупкости
20	0	50	0	70	0
50	1	70	1	100	0
70	2	100	2	120	0
100	4	120	4	150	1
120	5	150	4	–	–

Из данных табл. 1 следует, что после электронно-лучевого борирования слои более пластичны, чем после твердофазного. Кроме того, слои после электронно-лучевого борирования имеют гетерогенную структуру, сочетающую твердые (хрупкие) и более пластичные структурные составляющие. Такое сочетание отчасти объясняет отсутствие термических трещин при нагреве боридных слоев до высоких температур.

Хрупкость боридных слоев зависит от фазового состава. Как известно [2], балл хрупкости борида Fe_2B меньше в 2 раза по сравнению FeB [3]. В целом, балл хрупкости определяется фазовым составом боридного слоя. По данным рентгенофазового анализа, слои после твердофазного борирования состоят из боридов Fe_2B , FeB и борированного цементита. Слои двухфазны. Первая зона состоит из боридов, на поверхности располагаются иглы FeB , под ними Fe_2B , а затем переходная зона, содержащая борированный цементит. Наряду с высокой хрупкостью боридный, двухфазный слой имеет ярко выраженную склонность к скалыванию. Скалывание происходит на границе раздела фаз. В однофазном слое скалывание наблюдается на границе непрерывного слоя. Следовательно, однофазные слои боридов меньше склонны к скалыванию.

В качестве одной из оценок хрупкости боридных слоев используют их склонность к скалыванию. Скалывание боридного слоя при

различных испытаниях на прочность в большинстве случаев начинается при общем относительном удлинении или сжатии, равно не менее 1–2 %. Двухфазные ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) боридные слои начинают скалываться при пластической деформации 1,5–3 %, а однофазные (Fe_2B) – при 3–4,5 %. Пластичность двухфазного боридного слоя составляет 2 %. С увеличением толщины слоя склонность к скалыванию и однофазных, и двухфазных слоев увеличивается.

В табл. 2 приведена сравнительная оценка показателей хрупкости ($\sigma_{\text{ск}}$) и пластичности ($\epsilon_{\text{пред}}$) боридных слоев, сформированных электронно-лучевой обработкой.

Таблица 2

Механические свойства боридных слоев на стали 20

Обработка	Марка материала	$\epsilon_{\text{пред}}$	$\sigma_{\text{ск}}$, МПа	Балл хрупкости
Твердофазное борирование	Сталь 20	1,13	245	4
Электронно-лучевая	Сталь 20	1,65	484	3

Исследование $\epsilon_{\text{пред}}$ и $\sigma_{\text{ск}}$ позволило дать оценку пластическим свойствам слоев на основе боридов железа как на поверхности, так и в глубине слоя. Снижение хрупкости боридных слоев при электронно-лучевом борировании связано с отсутствием трещин при нагреве, поскольку для их возникновения требуются гораздо большие усилия.

ЭЛБ-слои более пластичны, чем после твердофазного борирования. Кроме того, слои после ЭЛБ имеют гетерогенную структуру, сочетающую твердые (хрупкие) и более пластичные структурные составляющие. Такое сочетание отчасти объясняет отсутствие термических трещин при нагреве боридных слоев до высоких температур.

Выводы

1. Выравнивание микротвердости боридных слоев после традиционного и электроннолучевого борирования при высоких температурах (900 °С) позволяет сделать вывод об использовании ЭЛБ для упрочнения режущих инструментов и др., испытывающих разогрев в процессе работы до столь высоких температур без существенного снижения эксплуатационных свойств.

2. Формирующиеся при ЭЛБ на поверхности слои имеют гетерогенную структуру, сочетающую твердые и мягкие составляющие и приводящие к снижению хрупкости боридного слоя.

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

Литература

1. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение / пер. с англ. М.: Мир, 2000. 518 с.
2. Лабунец В. Ф., Ворошнин Л. Г., Киндарчук М. В. Износостойкость боридных покрытий. Киев: Изд-во «Техніка», 1989. 204 с.
3. Структура и свойства боридных покрытий / А. В. Колубаев, С. Ю. Тарасов, Г. В. Трусова и др. // Изв. вузов. Черные металлы. 1994. № 7. С. 49–51.
4. Семенов А. П., Смирнягина Н. Н., Сизов И. И. Установка для электронно-лучевой химико-термической обработки // Технология металлов. 2001. № 4. С. 32–34.
5. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / под ред. Л. С. Ляховича. М.: Металлургия, 1981. С. 424.
6. Григоров П. К., Катханов Б. Б. Методика исследования хрупкости борированного слоя // Тр. НИИТМа. 1972. Вып. XVI. С. 97–99.
7. Скуднов В. А. Предельные пластические деформации металлов. М.: Металлургия, 1989. 176 с.