

МОРФОЛОГИЯ БОРИДОВ ЖЕЛЕЗА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ, НАПЛАВЛЕННОМ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ*

*И.А. БАТАЕВ, канд. техн. наук, доцент,
Н.В. КУРЛАЕВ, доктор техн. наук, профессор,
О.Г. ЛЕНИВЦЕВА, аспирант,
О.А. БУТЫЛЕНКОВА, аспирант,
А.А. ЛОСИНСКАЯ, аспирант
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Статья поступила 15 февраля 2012 года

О.А. Бутыленкова – 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: boal17@ngs.ru

Рассматриваются структурные особенности боридных слоев, сформированных методом вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошка аморфного бора на заготовки низкоуглеродистой стали. Методами оптической и растровой электронной микроскопии исследована структура покрытий, сформированных за один, два и три прохода электронного луча. Показано, что на различных по глубине слоях формируются различные по форме бориды железа. Один и тот же тип боридных кристаллов при микроскопических исследованиях может проявляться в различных формах в зависимости от углов пересечения кристаллов с поверхностью микрошлифа.

Ключевые слова: бориды железа, вневакуумная электронно-лучевая обработка, структура.

Введение

Борирование является одним из широко используемых технологических процессов поверхностного упрочнения деталей машин и элементов конструкций. Благодаря высоким триботехническим свойствам и повышенной твердости боридных слоев эта технология применяется для упрочнения поверхности изделий, работающих в условиях повышенного износа [1]. Наиболее целесообразно борированию подвергать изделия строительной и сельскохозяйственной техники, а также детали горношахтного оборудования, эксплуатация которых сопровождается воздействием различного рода абразивных сред.

К традиционным способам борирования относятся печное борирование, борирование в жидкой и газовой средах [2]. Однако эти процессы обладают рядом недостатков, основны-

ми из которых являются большая длительность диффузионного насыщения сталей бором и малая толщина упрочненного слоя. Использование технологии вневакуумной электронно-лучевой обработки (ВЭЛО) позволяет избежать указанных выше недостатков и получить высокопрочные боридные слои толщиной свыше 1 мм [3–5]. ВЭЛО дает возможность с высокой производительностью наплавлять порошки различного типа на крупногабаритные заготовки.

В процессе наплавки боросодержащих порошков образуются кристаллы боридов железа различной формы [4, 5]. Целью данной работы является исследование морфологии кристаллов типа Fe_2B , полученных при оплавлении порошка аморфного бора на стальной заготовке электронным пучком, выведенным в воздушную атмосферу.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы.

Таблица 1

Технологические параметры наплавки

Ток пучка	4 мА
Расстояние от выпускного окна до заготовки	90 мм
Энергия пучка электронов	1,4 МэВ
Плотность насыпки	0,2 г/см ²
Скорость перемещения образцов относительно пучка электронов	10 мм/с

Материалы и методы исследования

В качестве заготовок использовались пластины низкоуглеродистой стали 20 размером 50×100×14 мм следующего химического состава: 0,18 % С, 0,23 % Si, 0,50 % Mn, 0,04 % S, 0,035 % Р. Для поверхностного легирования стальных заготовок применяли порошок аморфного бора марки А (ТУ 212-001-4953404-2003) в смеси с порошком железа и флюса MgF_2 . Процесс наплавки осуществлялся в Институте ядерной физики СО РАН на промышленном ускорителе электронов типа ЭЛВ-6. Технологические параметры наплавки представлены в табл. 1.

Металлографические исследования структуры полученных образцов проводились на оптических микроскопах Carl Zeiss AxioObserver A1m и AxioObserver Z1m при увеличениях в диапазоне $\times 50 \dots \times 1000$. Более глубокие исследования были выполнены на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP. Структуру материала выявляли химическим травлением в 3 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Трансмиссионные электронно-микроскопические исследования проводились на микроскопе Tescna G20.

Результаты исследований и их обсуждение

Наплавка на стальную заготовку одного слоя аморфного бора приводит к образованию поверхностного слоя, обладающего явно выраженной градиентной структурой. Выделяющиеся при кристаллизации материала бориды являются разобщенными. Содержания бора для формирования в поверхностном слое сплошной боридной зоны недостаточно (рис. 1, а).

При двух- и трехслойной электронно-лучевой наплавке концентрация бора в расплаве возрас-

тает и формируются покрытия с более плотным расположением боридов. Поверхностные слои наплавленного материала практически полностью состоят из боридных кристаллов. По направлению к основному металлу содержание бора снижается, в результате чего уменьшается объемная доля боридов железа.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о формировании при наплавке сложной структуры, характеризующейся наличием боридов различной формы и колоний эвтектики. При повышенном содержании бора образуются бориды железа округлой формы (рис. 1, б). Имеется два объяснения образованию кристаллов неправильной формы, в которых отсутствуют элементы симметрии. Одно из них аналогично объяснению неправильной формы зерен в поликристаллической структуре, формируемой при кристаллизации металлических материалов. Заключается оно в том, что растущие из множества центров кристаллы сталкиваются между собой, мешают росту друг друга и препятствуют тем самым правильной огранке.

Второе объяснение связано с типом боридов железа, образующихся при электронно-лучевой наплавке. Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о том, что при наплавке аморфного бора формируются бориды двух типов – FeB и Fe_2B . Гурьевым А.М. с соавторами отмечается, что соединение FeB склонно к выделению в виде частиц округлой формы, а бориды Fe_2B – в форме игл [6, 7]. Фаза FeB, содержащая большее количество бора по сравнению с боридом Fe_2B , преимущественно выделяется в поверхностном слое наплавленного материала. В направлении от поверхности наплавленного слоя к стальной подложке объемная доля фазы FeB снижается более интенсивно, чем Fe_2B .

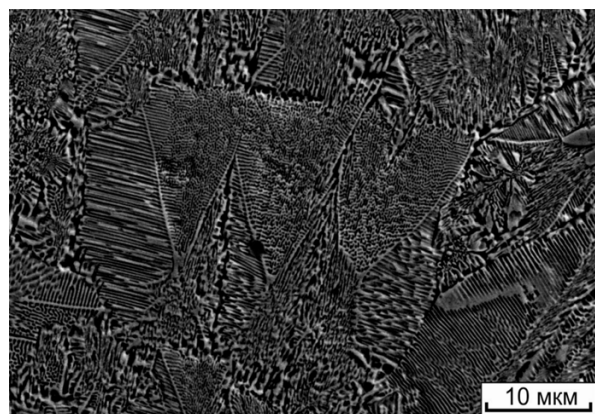
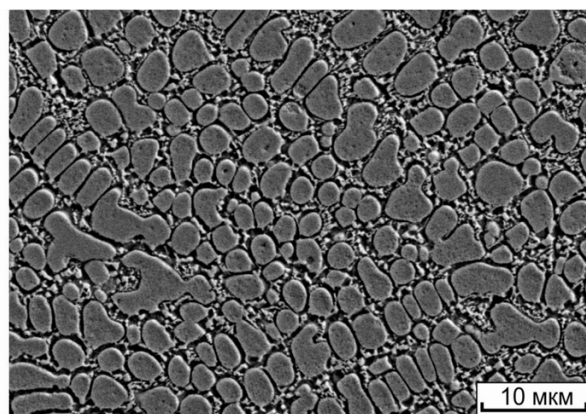
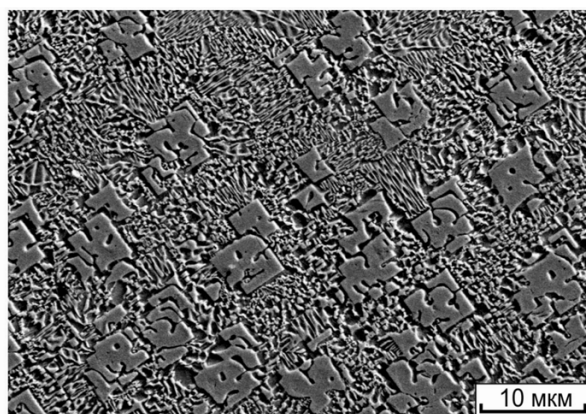
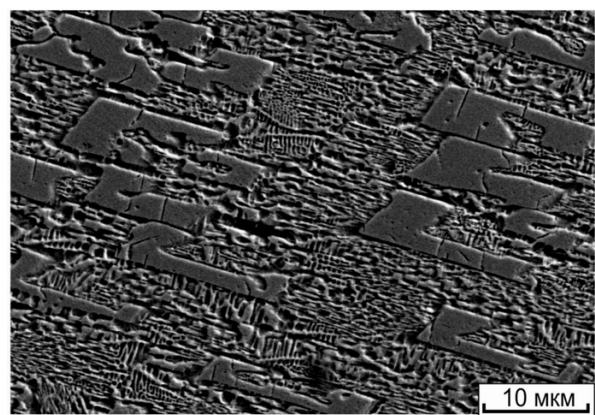
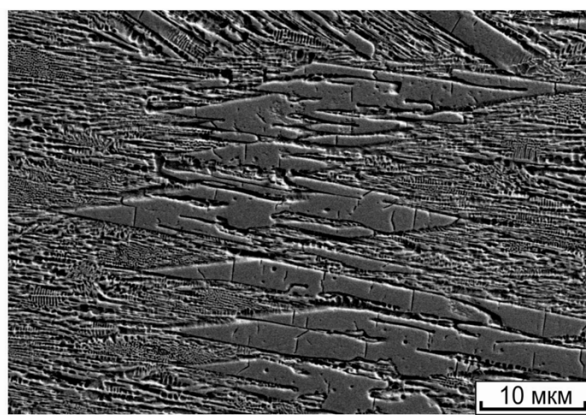
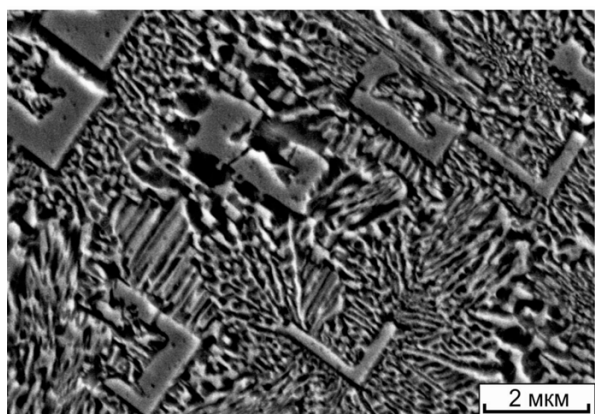
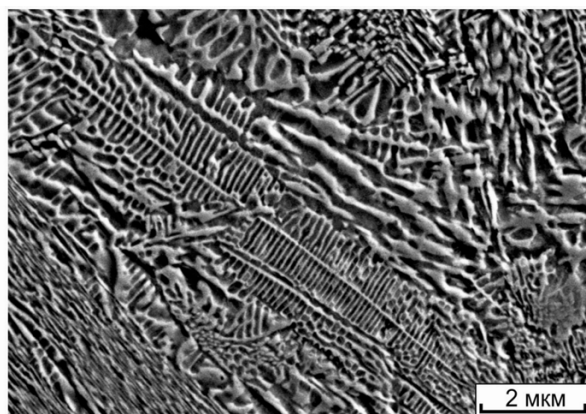
*a**б**в**г**д**е**ж**з*

Рис. 1. Структурные особенности боридов железа в различных по глубине слоях покрытия

Большинство исследователей отмечают, что фаза Fe_2B является более предпочтительной по сравнению с FeB . Несмотря на высокую твердость моноборида железа, его появление приводит к резкому охрупчиванию упрочненных слоев. В связи с этим особый интерес представляют кристаллы Fe_2B , во многих случаях характеризующиеся правильной геометрической формой.

По мере удаления от поверхности наплавки концентрация бора уменьшается. Структура представляет собой смесь эвтектики ($\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_2\text{B}$) и первичных кристаллов борида железа правильной геометрической формы,

расположенных на некотором расстоянии друг от друга (рис. 1, в). В этих зонах концентрация бора достаточна для роста отдельных боридных кристаллов, ориентированных в одном направлении, которые в поперечном сечении могут иметь форму прямоугольника.

Малое содержание бора в нижележащих слоях может являться причиной формирования дефектных кристаллов, контуры которых принимают разнообразную форму в зависимости от их расположения относительно поверхности шлифа (рис. 1, з – ж). Такие дефектные кристаллы представляют собой пустотелые каркасы различной формы. При дальнейшем снижении концентрации бора и приближении к

основному металлу образования боридных кристаллов не наблюдается, структура представляет собой эвтектику сложного типа (рис. 1, з).

Таблица 2

Форма кристаллов борида железа Fe_2B различной степени дефектности, наблюдаемых на поверхности металлографического шлифа в зависимости от их ориентации в объеме наплавленного слоя (углов α и β)

Форма кристалла	$\alpha = 0^\circ$					$\alpha = 45^\circ$					$\alpha = 60^\circ$				
	β					β					β				
	0°	30°	45°	60°	90°	0°	30°	45°	60°	90°	0°	30°	45°	60°	90°
1	■	◆	◆	◆	■	◆	◆	◆	◆	■	◆	◆	◆	◆	■
2	▣	▣	▣	▣	▣	▣	▣	▣	▣	▣	▣	▣	▣	▣	▣
3	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢
4	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢
5	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢	▢
Форма кристалла	$\alpha = 80^\circ$										β				
	0°		30°		45°		60°		90°						
1	▬		▬		▬		▬		▬		▬				
2	▬		▬		▬		▬		▬		▬				
3	▬		▬		▬		▬		▬		▬				
4	▬		▬		▬		▬		▬		▬				
5	▬		▬		▬		▬		▬		▬				

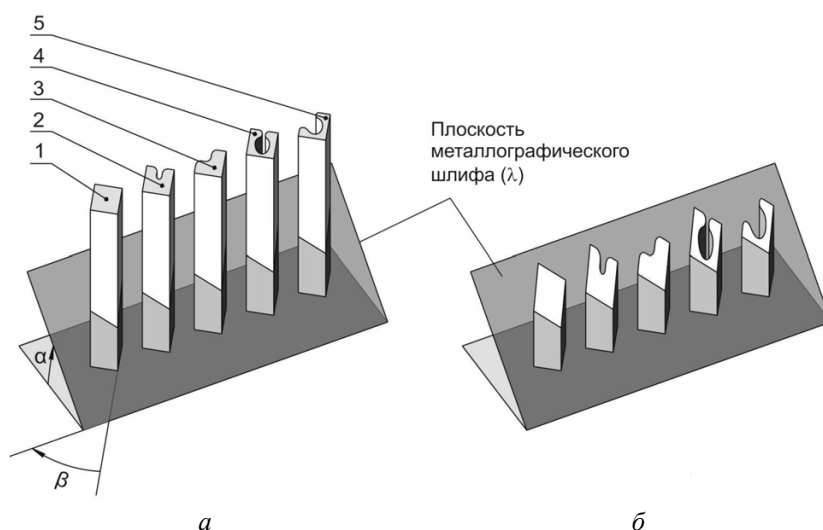


Рис. 2. Сечение кристаллов борида железа Fe_2B , обладающих различной степенью дефектности, плоскостью металлографического шлифа

Морфология боридных кристаллов, наблюдаемых в наплавленном слое, весьма разнообразна и в общем случае представляется хаотичной и не поддающейся классификации. Однако многообразие форм кристаллов на металлографическом снимке представляет собой лишь двумерное отображение реальных частиц упрочняющей фазы. Для более глубокого понимания морфологии боридных кристаллов авторами работы предложена модель нескольких типов кристаллов Fe_2B : от кристалла идеальной формы до кристаллов с повышенной степенью дефектности (рис. 2). Для упрощения каждый кристалл считался прямолинейным стержнем квадратного сечения. В дефектных кристаллах контур дефекта сохранялся неизменным на всем его протяжении. В качестве поверхности шлифа служила секущая плоскость λ , положение которой по отношению к кристаллам описывается углами α и β .

Форма кристаллов для некоторых углов α и β представлена в табл. 2. При горизонтальном положении секущей плоскости λ форма наблюдаемых кристаллов практически не искажена, поэтому они легко идентифицируются (табл. 2, $\alpha = 0^\circ$). При изменении угла наклона секущей плоскости наблюдаются значительные искажения формы боридов (например, при $\alpha = 80^\circ$, табл. 2), вследствие чего их принадлежность к тому же самому семейству кристаллов неочевидна.

Заключение

Вневакуумная электронно-лучевая наплавка является эффективным методом получения износостойких боридных покрытий на основе из низкоуглеродистой стали. Однослойная наплавка порошка аморфного бора не позволяет создать сплошной боридный слой на поверхности покрытия. При двух- и трехслойной наплавке концентрация бора возрастает, структура слоя резко изменяется при движении от поверхности к основному металлу.

В структуре рассматриваемых боридных покрытий условно можно выделить несколько зон: зону сплошных боридов, зону, содержащую бориды правильной геометрической формы, и зону с дефектной структурой боридных включений. Для более полного понимания морфологии боридных кристаллов предложена модель, позволяющая объяснить и классифицировать разнообразие геометрических форм боридов.

Список литературы

1. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. – М.: Машиностроение, 1995. – 335 с.
2. Ворошин Л.Г. Борирование стали / Л.Г. Ворошин, Л.С. Ляхович. – М.: Металлургия, 1978. – 238 с.
3. Полетика И.М. Формирование упрочняющих покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов / И.М. Полетика, М.Г. Голковский, М.Д. Борисов, Р.А. Салимов, М.В. Перовская // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 5. – С. 29–41.
4. Teplykh A.M. Boride coatings structure and properties, produced by atmospheric electron-beam cladding / A.M. Teplykh, M.G. Golkovskiy, I.A. Bataev, E.A. Drobyaz, S.V. Veselov, E.D. Golovin, A.A. Bataev, A.A. Nikulina // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 287–290. – P. 26–31.
5. Теплых А.М. Борирование низкоуглеродистой стали с использованием технологии вневакуумной электронно-лучевой обработки / А.М. Теплых, М.Г. Голковский, А.А. Батаев, В.А. Батаев, Е.А. Дробяз, Е.Д. Головин, А.С. Гонтаренко // Труды международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов. – (Томск, 5-9 сентября 2011 г.). – Томск: ИФПМ СО РАН. – 2011. – С. 494–496.
6. Иванов С.Г. Исследование процессов диффузионного насыщения сталей из смесей на основе карбида бора / С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, Е.А. Кошелева, О.А. Власова, М.А. Гурьев // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – № 3 – С. 55–56.
7. Гурьев А.М. Интенсификация процессов химико-термической обработки металлов и сплавов / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, О.А. Власова // Успехи современного естествознания. – 2008. – № 8 – С. 48–50.

Morphology of iron borides in coatings, produced by non-vacuum electron beam cladding

I.A. Bataev, N.V. Kurlaev, O.G. Lenivtseva,
O.A. Butylenkova, A.A. Losinskaya

The structural peculiarities of boride layers produced by non-vacuum electron beam cladding on low carbon steel substrate were studied. Methods of optical microscopy and scanning electron microscopy were used to investigate structure of one- two- and three-layered boride coatings. It was shown, that iron borides have different structures at different distances from the cladding surface. It was shown, that boride crystals of some particular type are able to appear in different shapes depending on angle of intersection with the surface of specimen microsection.

Key words: iron borides, non-vacuum electron beam cladding, structure.