



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Формирование покрытий на основе бора и алюминия на поверхности углеродистых сталей электронно-лучевым легированием

Ундрах Мишигдоржийн ^{a, *}, Игорь Сизов ^b, Иван Полянский ^c

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская 40В, г. Улан-Удэ, 670013, Россия

^a <http://orcid.org/0000-0002-7863-9045>, druh@mail.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0002-4468-784X>, sigperlit@mail.ru,

^c <http://orcid.org/0000-0002-7350-8791>, i.polyansky@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669 - 15:621.793.6

История статьи:

Поступила: 24 января 2018
 Рецензирование: 02 марта 2018
 Принята к печати: 05 апреля 2018
 Доступно онлайн: 15 июня 2018

Ключевые слова:

Электронно-лучевое легирование
 Бориды железа
 Аллюминиды железа
 Микроструктура
 Микротвердость

Благодарности:

Авторы выражают благодарность к.т.н. Дамтилому Б.В., научному сотруднику Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, г. Томск за помощь в проведении эксперимента.

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовом обеспечении гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-2641.2018.8 и Госзадания № 11.9999.2017/ДААД для проведения научных исследований.

Для цитирования: Мишигдоржийн У.Л., Сизов И.Г., Полянский И.П. Формирование покрытий на основе бора и алюминия на поверхности углеродистых сталей электронно-лучевым легированием // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 87–99. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-87-99.

*Адрес для переписки

Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович, к.т.н., с.н.с.
 Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
 ул. Ключевская 40В,
 670013, Улан-Удэ, Россия
 Тел.: 8 (3012) 43-14-17, e-mail: druh@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Борирование и бороалитирование являются эффективными способами повышения поверхностных свойств деталей машин и инструментов. Однако данные способы находят ограниченное применение в промышленном производстве. Одним из сдерживающих факторов является повышенная хрупкость борированных и бороалитированных слоев. Так, традиционные способы борирования и бороалитирования с печным нагревом приводят к формированию слоев с игольчатой и слоистой структурой соответственно. При этом на поверхности данных слоев как правило формируются наиболее твердые и хрупкие фазы, такие как Fe₃B и Fe₂Al₃. **Цель работы:** изучение последовательности формирования фаз в борированных и бороалитированных слоях, полученных под воздействием электронного луча в вакууме на поверхности углеродистых сталей. **В статье рассмотрены** результаты исследования электронно-лучевого легирования углеродистых сталей. Легирование осуществляли или одним карбидом бора, или карбидом бора совместно с алюминием. Соответственно в первом случае имело место электронно-лучевое борирование, а во втором – электронно-лучевое бороалитирование. **Методы исследования.** Были апробированы различные параметры электронно-лучевой обработки: ускоряющее напряжение, сила тока и длительность облучения. После обработки исследовалась микроструктура, микротвердость, элементный и фазовый состав полученных покрытий. **Результаты и обсуждения.** Установлено, что формирование фаз при легировании карбидом бора преимущественно происходит согласно диаграмме состояния Fe-B. Так, моноборид железа FeB кристаллизуется в виде ромбических и призматических кристаллов, на которых зарождается Fe₂B в виде округлых дендритов. Остатки жидкости при охлаждении кристаллизуются в виде эвтектики из Fe₂B и твердого раствора бора в α-Fe. При этом после электронно-лучевого бороалитирования эвтектику образуют Fe₂B и твердый раствор Al и B в α-Fe. В целом микроструктуры полученных слоев после электронно-лучевого нагрева являются более предпочтительными по сравнению с традиционной ХТО с печным нагревом.

Введение

В последние десятилетия в литературе появилось значительное количество работ, связанных с исследованиями по применению электронного луча в различных технологиях

обработки поверхности. Так, введение в поверхность металлов и сплавов определенных элементов (наплавка, поверхностное легирование, химико-термическая обработка) с использованием высококонцентрированных источников энергии (лазерного и электронного пучка) позволяет получать на поверхности свойства, ранее не доступные при традиционных способах нагрева. Сущность электронно-лучевого легирования заключается в расплавлении участка поверхности металла вместе с добавляемыми легирующими элементами, предварительно нанесенными на обрабатываемый участок [1–3]. С помощью такой обработки можно улучшать эксплуатационные свойства металлов и сплавов, такие как коррозионная стойкость, износостойкость, жаропрочность, жаростойкость и др.

Как известно, свойства диффузионных слоев определяются видом насыщающего элемента и соотношением элементов (в случае многокомпонентного насыщения) в поверхностном слое. Такие процессы химико-термической обработки (ХТО), как алитирование, хромирование, борирование и другие с использованием традиционного печного нагрева достаточно хорошо изучены. Поэтому продолжается активное изучение процессов в области многокомпонентного насыщения поверхности металлов и сплавов как с применением традиционных (в электропечах сопротивления), так и прогрессивных (лазером, электронным лучом, в плазме и др.) способов нагрева [4–6].

Одним из перспективных методов многокомпонентного насыщения является бороалитирование [7]. Последовательное или совместное насыщение бором и алюминием позволяет получить на поверхности слои с высокой коррозионной стойкостью, жаро- и износостойкостью. Эксперименты показали, что процессы борирования и алитирования, совмещенные в одном технологическом цикле, в большинстве случаев приводят к формированию слоистой структуры, которая не позволяет в полной мере проявиться положительным свойствам бороалитированного слоя в комплексе. Известно, что алюминиды железа с высоким содержанием алюминия эффективно сопротивляются окислению при высоких температурах и характеризуются низкими механическими свойствами, а именно низкой пластичностью и склонностью к контактному

истиранию [8]. В условиях сухого трения борированная составляющая слоя, располагающаяся на границе слой-основа, может обеспечить высокое сопротивление механическому износу только по мере истирания алитированной зоны. Таким образом, данный тип бороалитированного слоя не оправдывает назначения многокомпонентных покрытий по повышению комплекса поверхностных свойств.

Однокомпонентные диффузионные слои на основе боридов железа обладают некоторыми серьезными недостатками, среди которых – повышенная хрупкость, склонность к образованию трещин и сколов. Перечисленные отрицательные явления объясняются анизотропией теплового расширения боридных фаз (FeB и Fe_2B) [9]. Несмотря на то, что слои, состоящие из боридов железа, имеют высокую твердость, из-за их хрупкости их применение ограничено. Например, в условиях работы режущего и деформирующего инструмента участки, подвергаемые ударным нагрузкам, склонны к выкрашиванию.

Более высоким комплексом механических свойств обладают слои, микроструктуры которых сформированы по «принципу Шарпи». В таких слоях твердые структурные составляющие располагаются в виде изолированных друг от друга включений, а наиболее вязкие образуют сплошную матрицу.

В целом задача по разработке теории формирования борированных и бороалитированных слоев, обладающих высокими теплофизическими и механическими свойствами, в том числе пониженной хрупкостью, остается до конца нерешенной. Целью настоящей работы является исследование последовательности формирования фаз в борированных и бороалитированных слоях, полученных под воздействием электронного пучка в вакууме на поверхности углеродистых сталей.

Методика исследований

Исследования проводили на углеродистых сталях 20 и У12. Легирование осуществляли карбидом бора (B_4C) при однокомпонентной обработке. На предварительно подготовленную поверхность наносили пасту из насыщающего компонента и ацетона. Для бороалитирования использовали пасту из карбида бора и алюминия

Результаты и их обсуждение

в соотношении 4:1 по массе соответственно. Ранее авторами был установлен состав пасты для одновременного насыщения бором и алюминием с печным нагревом: 78 % B_4C + 18 % Al + 4 % NaF [10, 11]. Было принято решение об использовании данного состава при электронно-лучевом легировании. Электронно-лучевой нагрев проводили с помощью установки ЭЛУ-5 в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН. Обработку электронным пучком проводили по следующему режиму: ускоряющее напряжение $U = 25$ кВ, сила тока $I = 60$ мА (при борировании), $I = 80$ мА (при бороалитировании), скорость перемещения заготовки $V = 3$ мм/с (при бороалитировании), вакуум $10^{-3} \dots 10^{-5}$ Па, диаметр пучка $d = 15$ мм, время облучения $t = 11,5$ с (при борировании).

Микроструктуру образцов исследовали на металлографическом микроскопе «МЕТАМ РВ-34». Микротвердость определяли на микротвердометре ПМТ-3М при нагрузке 0,5 Н. Рентгеноспектральный микроанализ проводили на растровом электронном микроскопе «JSM-6510LV, JEOL» с микроанализатором «INCA Energy 350, Oxford Instruments». Фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре «Bruker D8» в медном излучении с интервалом съемки $10 \dots 70^\circ$. Исследования проводили в Центре коллективного пользования «Прогресс» ФГБОУ ВО ВСГУТУ и Байкальском институте природопользования СО РАН.

В результате электронно-лучевого борирования на поверхности сталей сформировался слой глубиной до 1 мм. Микроструктуру слоев можно условно разделить на четыре зоны в направлении от поверхности к основному металлу: *A* – зона сферических и ромбических (призматических) кристаллов; *B* – зона заэвтектического состава; *C* – зона эвтектического состава и зона основного металла.

В зоне *A* ромбические и призматические кристаллы (в некоторых случаях с недостающими гранями) ориентированы под различными углами относительно направления электронного пучка (рис. 1). На стали 20 кристаллы данного типа заключены в оболочку из светлых сферических кристаллов, временами полностью срастающихся друг с другом и образующих сплошную светлую зону с вкраплениями темных ромбических кристаллов (рис. 1, *a*). Содержание бора в призматических кристаллах составляет 15...18 мас.%, в светлых сферических – 8...9 мас.%. Между кристаллами располагается эвтектика с содержанием 3...4 мас.% бора. Рентгенофазовый анализ (РФА) выявил наличие карбида бора, боридов железа FeB и Fe_2B (рис. 2).

На стали У12 формируется несколько иная структура. Ромбические и призматические кристаллы располагаются в зоне сферических кристаллов, разделенных между собой сеткой

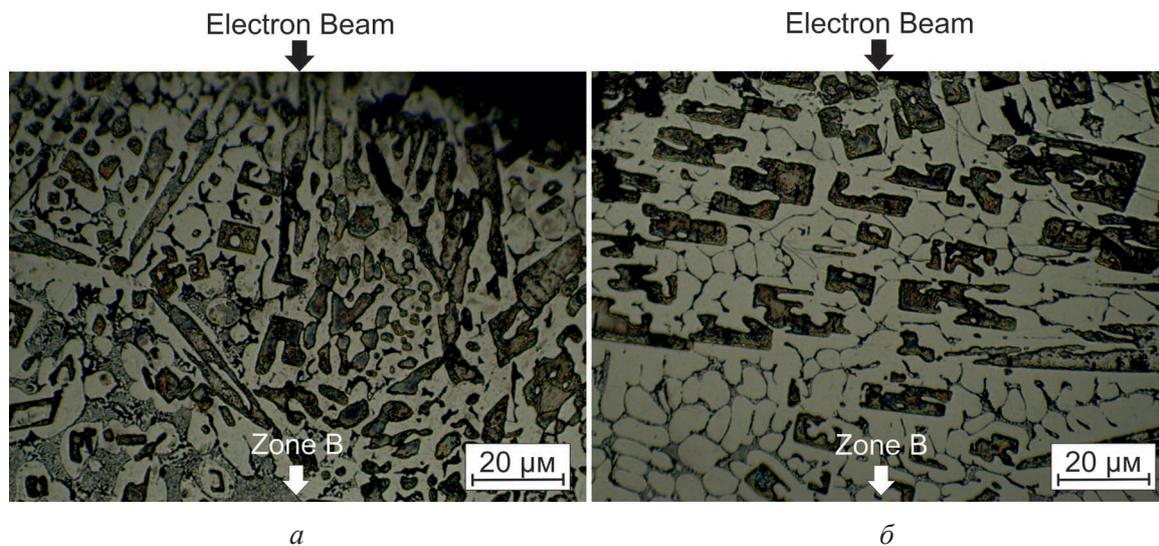


Рис. 1. Микроструктура борированных слоев на стали 20 (*a*) и У12 (*б*) в зоне *A*
 Fig. 1. The microstructure of boronized layers on steel 20 (*a*) and U12 (*б*) in zone *A*

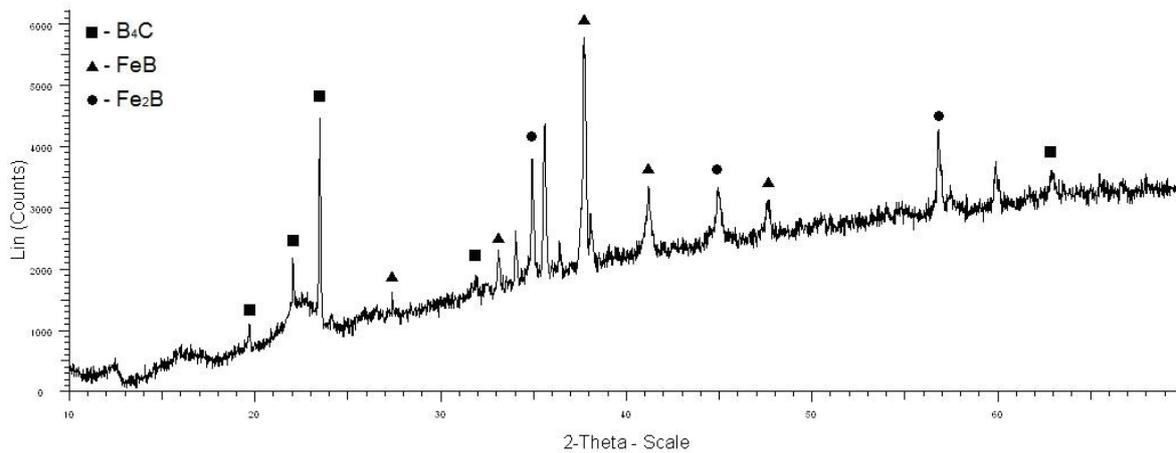


Рис. 2. Рентгенограмма стали 20 после электронно-лучевого борирования

Fig. 2. XRD-pattern of steel 20 after electron beam boronizing

эвтектики (рис. 1, б). При этом сами сферические кристаллы располагаются в центре призматических и ромбических кристаллов и тем самым нарушают их геометрию (целостность). Содержание бора колеблется от 13 до 16 мас.% в зоне призматических кристаллов и 7...8 мас.% – в зоне сферических. Фазовый состав слоя аналогичен слою на стали 20: рентгенофазовым анализом были выявлены карбид бора, бориды железа FeB и Fe₂B.

Микротвердость призматических и ромбических кристаллов на сталях У12 и 20 составляет 1890...1900 НВ. Микротвердость сферических кристаллов на стали У12 составляет 1450...1455 НВ, на стали 20 – 1140...1150 НВ. Таким образом, на основе данных РФА, РСМА и микротвердости можно утверждать, что призма-

тические и ромбические кристаллы являются боридами FeB, а сферические кристаллы – боридами Fe₂B. Причем согласно работе [12] вытянутая форма боридов FeB связана с тем, что кристаллы находятся под различными углами наклона по отношению к плоскости шлифа.

В зоне В в связи со снижением концентрации бора объемная доля кристаллов снижается. Кристаллы выделяются в виде крупных дендритов с осями первого порядка или с осями первого и второго порядков (рис. 3). Содержание бора в указанных дендритах на стали У12 составляет 7...8 мас.%, на стали 20 – 8...9 мас.%. К основному металлу примыкает зона С, в которой кристаллы отсутствуют, в ней наблюдается эвтектика пластинчатого типа с содержанием бора 1...2 мас.% (рис. 4). Микротвердость эвтек-

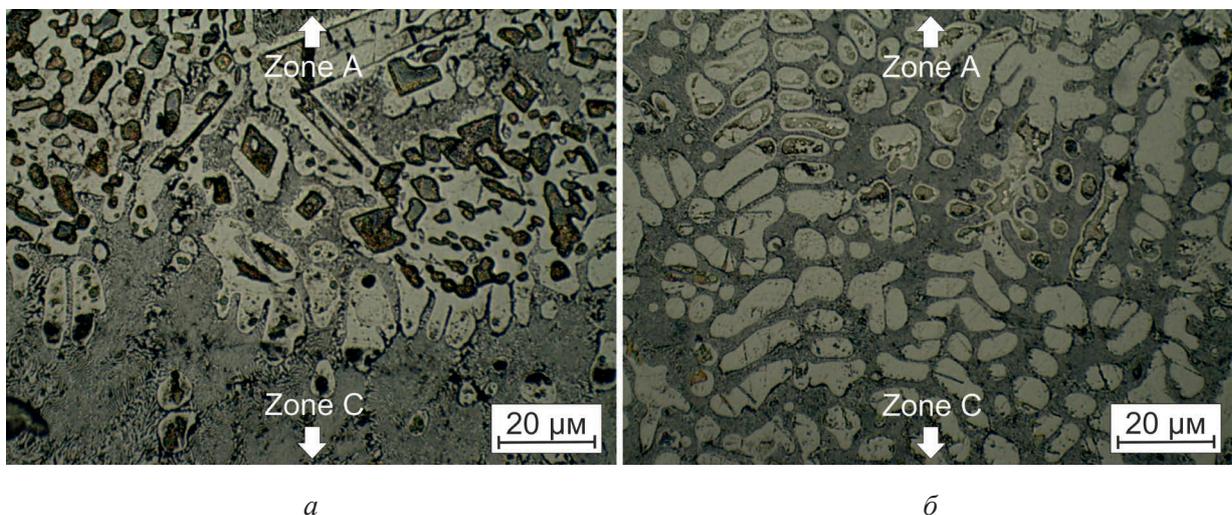


Рис. 3. Микроструктура борированных слоев на стали 20 (а) и У12 (б) в зоне В

Fig. 3. The microstructure of boronized layers on steel 20 (a) and U12 (b) in zone В

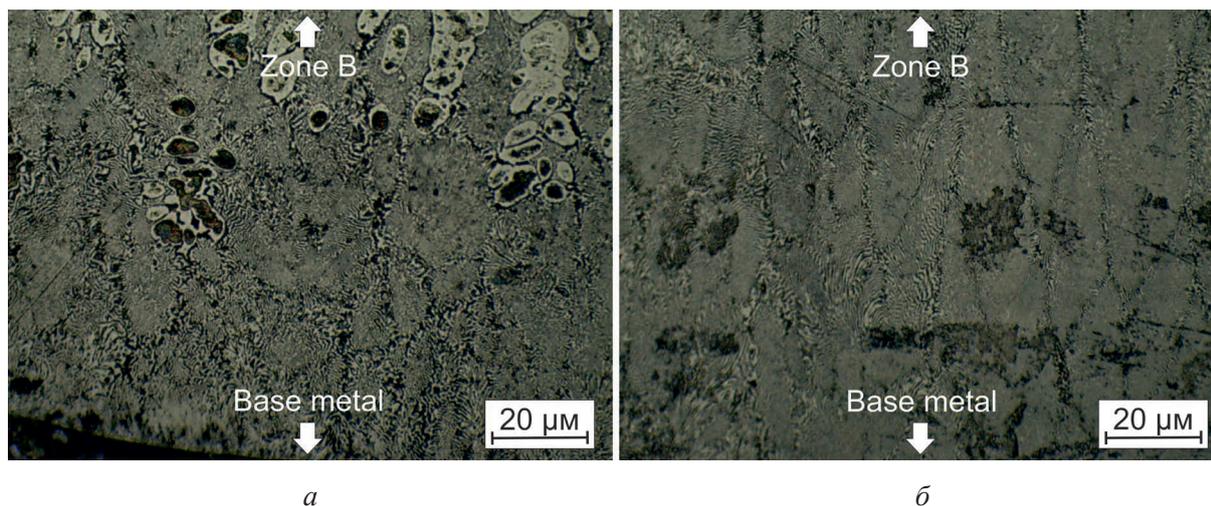


Рис. 4. Микроструктура борированных слоев на стали 20 (а) и У12 (б) в зоне С
 Fig. 4. The microstructure of boronized layers on steel 20 (a) and U12 (б) in zone C

тик на сталях У12 и 20 составляет 360...365 HV. В целом состав эвтектики изменяется незначительно по глубине слоя (табл. 1) и представляет собой смесь твердого раствора бора в α -Fe и бориды железа Fe_2B .

Изучение структуры и свойств слоев на стали У12, полученных электронно-лучевым легированием из карбида бора и алюминия

В результате электронно-лучевой обработки на стали У12 получен слой толщиной около 1 мм. Слои, полученные легированием карбидом бора и алюминием, имеют внешний вид, схожий с борированными слоями (рис. 5). Верхняя зона состоит из темных кристаллов различной конфигурации (призматические, ромбические с недостроенными гранями, кристаллы в виде углов) и

светлых ячеистых или сферических кристаллов (рис. 5, а). Микротвердость темных кристаллов составляет 1890...1895 HV, а содержание бора варьируется в пределах 15...16 масс.% бора; для сферических – данные значения соответственно равны 1445...1450 HV и 8...10 масс.% содержания бора. Как и в случае с электронно-лучевым борированием, после двухкомпонентного легирования на поверхности формируются бориды железа FeB и Fe_2B в виде темных и светлых кристаллов соответственно, причем первые оказываются заключенными в оболочку из вторых. В промежутках между боридами Fe_2B располагается эвтектика пластинчатого строения. Средняя зона заэвтектического состава преимущественно состоит из ячеистой структуры боридов Fe_2B , эвтектики и небольшого количества кристаллов FeB (рис. 5, б). Снизу расположена зона

Таблица 1

Table 1

Состав эвтектики в различных зонах слоя после электронно-лучевого борирования

The eutectic composition in various areas of the layer after electron-beam boronizing

Зона слоя / Layer's zone	Содержание элементов в масс.% / Ratio of the elements, mass.%		Итого / Total
	В (сталь 20 / У12) (steel 20 / U12)	Fe (сталь 20 / У12) (steel 20 / U12)	
Зона А / Zone А	4.67 / 3.37	95.33 / 96.63	100.00
Зона В / Zone В	5.21 / 3.75	94.79 / 96.25	100.00
Зона С / Zone С	3.18 / 3.85	96.82 / 96.15	100.00

Electron Beam →

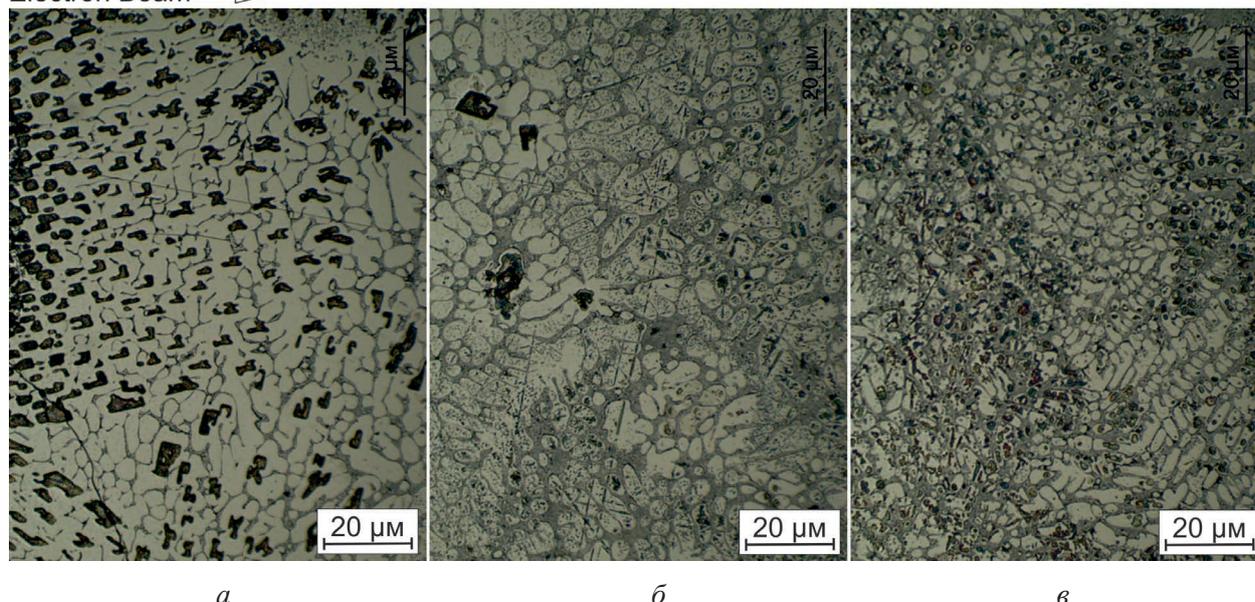


Рис. 5. Микроструктура стали У12 после электронно-лучевого бороалитирования:
 а – в зоне сферических и ромбических (призматических) кристаллов; б – в зоне заэвтектического состава;
 в – в зоне с преимущественным эвтектическим составом

Fig. 5. The microstructure of steel U12 after electron beam boroaluminizing in:
 а – spherical and rhombic (prism) crystals; б – area of hypereutectic composition; в – area of eutectic composition

с преимущественным эвтектическим составом с микротвердостью 412 HV (рис. 5, в).

Необходимо отметить, что в отличие от «чистого» борирования эвтектика после двухкомпонентного легирования содержит 2.67 масс.% алюминия в верхней зоне. По мере удаления от поверхности концентрация алюминия снижается (табл. 2). При этом содержание бора в эвтектике значительно не изменяется в зависимости от глубины слоя за исключением верхней зоны, где наблюдается пониженное содержание бора, равное 1.86 масс.%. Таким образом, эвтектика представляет собой механическую смесь твердого раствора бора и алюминия в α -Fe и борида железа Fe_2B .

Последовательность формирования упрочняющих фаз при электронно-лучевом борировании и бороалитировании

Известно, что при традиционном борировании формирование диффузионного слоя начинается с образования твердых растворов, после насыщения которых образуются первые участки борида Fe_2B . Затем под воздействием постоянной температуры и активности насыщающей среды концентрация атомов бора в местах флуктуаций оказывается достаточной для образования борида FeB [13].

Последовательность структурообразования слоя при электронно-лучевом борировании целесообразно рассматривать с помощью диаграммы состояния «железо–бор» (рис. 6). Концентрация бора плавно снижается от облучаемой поверхности к сердцевине образцов. Согласно этому каждую зону слоя можно рассматривать как сплав с определенным составом в бинарной диаграмме Fe–B. В верхней зоне (зона А) обрабатываемого материала кристаллизация происходит по кривой охлаждения сплава I. В точке 1 из жидкости выпадают первичные кристаллы борида FeB . В точках 2–2' в результате взаимодействия жидкости и FeB происходит перитектическое превращение $L + FeB \rightarrow Fe_2B$, вследствие которого происходит образование борида Fe_2B [14]. В зоне В, где концентрация бора ниже, кристаллизация происходит по кривой охлаждения сплава II. При охлаждении жидкости в точке 1 выделяются кристаллы боридов Fe_2B . В точках 2–2' проходит эвтектическая реакция. В результате кристаллизация сплава II приводит к формированию заэвтектической структуры, состоящей из боридов Fe_2B и эвтектики. Структура эвтектического типа формируется в зоне С, где кристаллизация происходит по кривой охлаждения сплава III. Эвтектика в данном случае

Таблица 2

Table 2

Состав эвтектики в различных зонах слоя после электронно-лучевого боралитирования
The eutectic composition in various areas of the layer after electron-beam boronizing

Зона слоя / Layer area	Содержание элементов в масс.% Ratio of the elements, mass.%			Итог / Total
	B	Al	Fe	
Зона сферических и ромбических (призматических) кристаллов / Area of spherical and rhombic (prism) crystals	1.86	2.67	95.47	100.00
Зона заэвтектического состава / Area of hypereutectic composition	2.9	0.82	96.28	100.00
Зона с преимущественным эвтектическим составом / Area of mainly eutectic composition	2.68	0.36	96.96	100.00

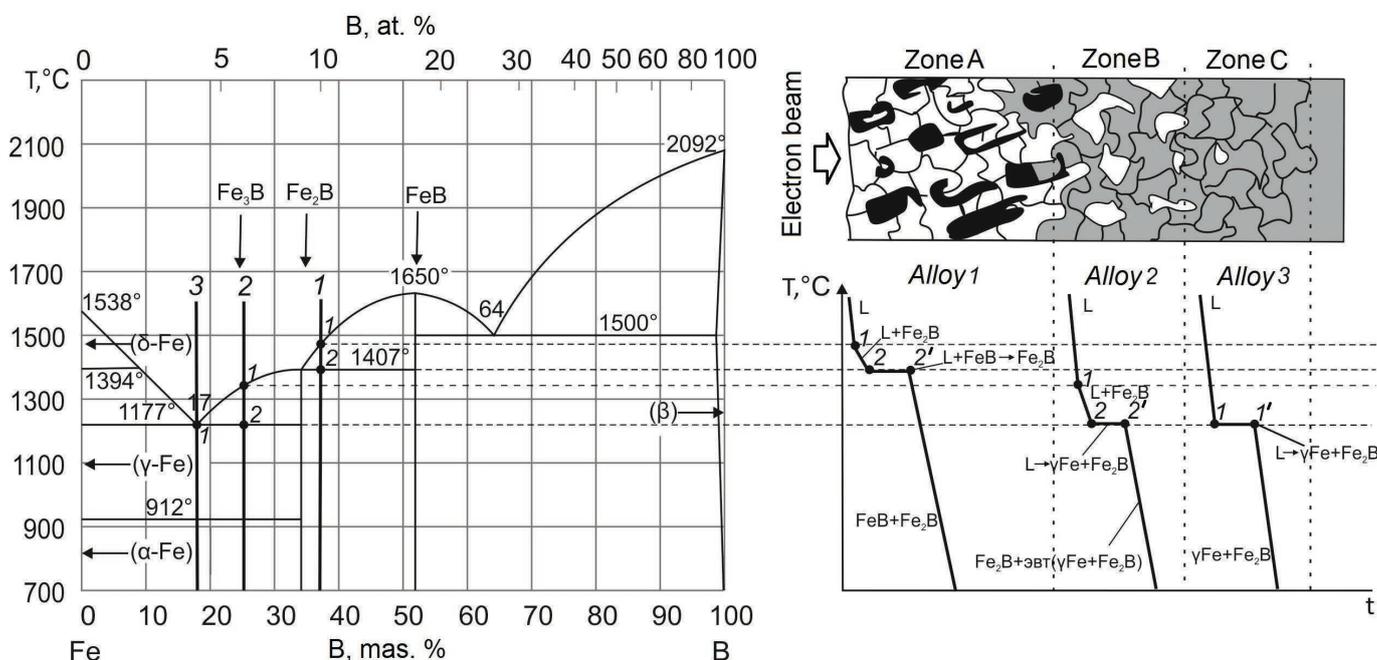


Рис. 6. Диаграмма состояния системы Fe–B [13] с кривыми охлаждения сплавов I–III, наложенными на схему борированного слоя

Fig. 6. Fe–B binary diagram [13] with the cooling curves of alloys I–III applied on scheme of boronized layer profile

представляет собой механическую смесь γ -фазы (при 912...1177 °C) или α -фазы (ниже 912 °C) и борида Fe_2B .

Согласно диаграмме «железо–бор» процесс кристаллизации в зоне A начинается с выделения FeB в виде первичных кристаллов. Затем в результате перитектической реакции происходит образование Fe_2B . В пользу такой последовательности структурообразования при электронно-лучевом борировании говорит теория эвтектической кристаллизации А.А. Бочвара [15].

Согласно данной теории кристаллизация начинается с выделения одной из фаз, являющейся базовой и обладающей более сложной кристаллохимической природой. Далее в процессе кристаллизации происходит отложение второй фазы на гранях базовой за счет поверхностного натяжения на границе базовой фазы с расплавом [16]. Моноборид железа с наличием высокопрочных связей ковалентного типа кристаллохимически более сложен по сравнению с боридом Fe_2B . Первичные кристаллы успевают вырасти

до определенного размера, прежде чем на их поверхности образуется дендритная оболочка второй фазы.

Моноборид железа FeB кристаллизуется в виде ромбических и призматических кристаллов, на которых зарождается Fe₂B в виде округлых дендритов. Так, кристалл FeB оказывается заключенным в оболочку из Fe₂B как снаружи, так и внутри. Явление формирования «полых» призматических и ромбических кристаллов FeB или кристаллов с недостроенными гранями может быть объяснено тем, что формирование боридов FeB начинается с граней с последующей кристаллизацией внутренних областей. Если содержание бора оказывается достаточным, то формируется монолитный кристалл борида железа FeB. Если же бора недостаточно для образования FeB, образуется борид Fe₂B в виде сферического кристалла в центре борида FeB. Остатки жидкости при охлаждении кристаллизуются в виде эвтектики (рис. 7).

Предложенная последовательность формирования слоя при электронно-лучевом борировании также справедлива и для электронно-лучевого бороалитирования. Единственным их отличием является состав эвтектики. Согласно тройной диаграмме состояния Fe–B–Al она состоит из фазы Fe₂B и твердых растворов алюминия и бора в железе [17, 18].

Микроструктуру борированного слоя после электронно-лучевого нагрева считают более

предпочтительной, чем микроструктуру слоя, полученного традиционной обработкой с печным нагревом (диффузионным борированием). Слои после такой обработки, как правило, имеют игольчатое строение и состоят из FeB на поверхности слоя и расположенным под ним Fe₂B [13, 19–22]. Такое строение обуславливает ряд существенных недостатков, основным из которых является «ступенчатое» изменение микротвердости по глубине слоя, вследствие чего происходит скол более твердой и хрупкой фазы FeB в процессе эксплуатации деталей. Наличие структуры слоя, в которой бориды FeB и Fe₂B распределены равномерно, должно приводить к повышению износостойкости. Это обусловлено тем, что вязкая матрица, состоящая из эвтектики, будет удерживать твердые боридные включения, не допускающие их хрупкого разрушения с последующим выкрашиванием.

В случае с бороалитированием алюминиды переменного состава вместе с эвтектикой обеспечивали бы пластичность, а бориды и алюминиды с постоянным составом – износостойкость и жаростойкость по всей глубине слоя соответственно.

Выводы

1. В отличие от традиционного (диффузионного) борирования, где первичной фазой является Fe₂B, при электронно-лучевом борирова-

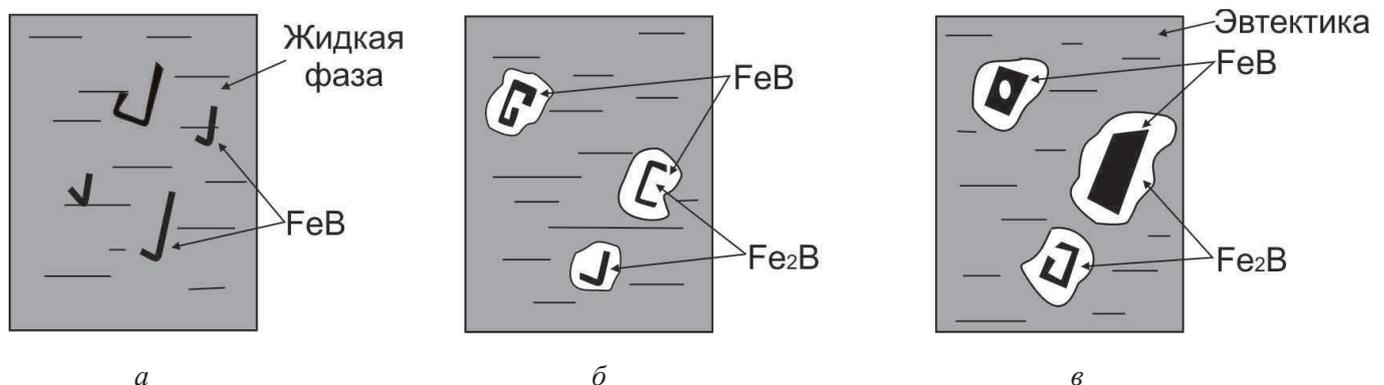


Рис. 7. Схема кристаллизации при электронно-лучевом борировании:

a – выделение первичных кристаллов FeB; *б* – образование ободков Fe₂B вокруг кристаллов FeB; *в* – конечная структура, состоящая из кристаллов FeB призматической (ромбической) формы, кристаллов Fe₂B сферической формы и эвтектики

Fig. 7. The scheme of crystallization under electron beam boronizing:

a – FeB primary crystallization; *б* – development of Fe₂B rims around FeB crystals; *в* – the final structure: rhombic (prism) FeB crystals, rounded Fe₂B crystals and eutectic system

нии зарождающей фазой является моноборид железа FeB.

2. При электронно-лучевом борировании фазы в поверхностной зоне слоя (зоне А) образуются в соответствии с диаграммой состояния Fe–В. Причем моноборид железа FeB кристаллизуется в виде кристаллов призматической и ромбической формы, на которых зарождается Fe₂B в виде округлых дендритов, а остатки жидкости кристаллизуются в виде эвтектики пластинчатого типа (α-фаза+Fe₂B).

3. Применение пасты для диффузионного бороалитирования с печным нагревом для процесса электронно-лучевого легирования бором и алюминием не приводит к формированию алюминидов железа.

Список литературы

1. *Węglowski M.St., Błacha S., Phillips A.* Electron beam welding – Techniques and trends – Review // *Vacuum*. – 2016. – Vol. 130. – P. 72–92. – doi: 10.1016/j.vacuum.2016.05.004.

2. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии / А.П. Семенов, И.Б. Ковш, И.М. Петрова и др. – М.: Наука, 1992. – 403 с.

3. Electron beam cladding and alloying of AISI 316 on plain carbon steel: microstructure and electrochemical corrosion behavior / A. La Barbera, A. Mignone, S. Tosto, C. Vignaud // *Surface and Coatings Technology*. – 1991. – Vol. 46, iss. 3. – P. 317–329. – doi: 10.1016/0257-8972(91)90174-U.

4. *Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P.* Special features of electron-beam boronizing of steels // *Metal Science and Heat Treatment*. – 1999. – Vol. 41. – P. 516–519. – doi: 10.1007/BF02466542.

5. Упрочнение поверхности литой стали комплексным диффузионным насыщением бором и хромом / В.Л. Мосоров, А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, Д.С. Фильчаков // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2011. – № 2. – С. 33–36.

6. *Suwattananont N., Petrova R.* Formation of multi-component boronization by adding transition metal group VIB // *Solid State Sciences*. – 2012. – Vol. 14. – P. 1669–1672. – doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2012.06.008.

7. *Sizov I.G., Mishigdorzhyn U.L., Maharov D.M.* A study of thermocycling boroaluminizing of carbon steel // *Metals Science and Heat Treatment*. – 2012. – Vol. 53, iss. 11–12. – P. 592–597. – doi: 10.1007/s11041-012-9440-4.

8. Boron–aluminide coatings applied by pack cementation method on low-alloy steels / N.E. Maragoudakis, G. Stergioudis, H. Omar, H. Paulidou, D.N. Tsipas // *Materials Letters*. – 2002. – Vol. 53. – P. 406–410. – doi: 10.1016/S0167-577X(01)00515-8.

9. *Сизов И.Г.* Оценка хрупкости боридных слоев после электронно-лучевого борирования // *Современные наукоемкие технологии*. – 2005. – № 11. – С. 77–78.

10. Влияние процесса бороалитирования в пастах на повышение стойкости деталей литейной оснастки / И.Г. Сизов, У.Л. Мишигдоржийн, А.Н. Телешев, Д.М. Махаров // *Технология металлов*. – 2011. – № 8. – С. 23–26.

11. Влияние состава насыщающих обмазок на структуру и свойства бороалитированного слоя / И.Г. Сизов, И.П. Полянский, У.Л. Мишигдоржийн, Д.М. Махаров // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 1 (58). – С. 22–25.

12. Морфология боридов железа в поверхностном слое, наплавленном электронным лучом / И.А. Батаев, Н.В. Курлаев, О.Г. Ленивцева, О.А. Бутыленкова, А.А. Лосинская // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – № 1 (54). – С. 85–89.

13. *Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G.* Plasticity of boronized layers. – 1st ed. – Cham: Springer, 2016. – 364 p. – ISBN 978-3-319-40011-2.

14. *Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Ланно С.И.* Бороалитированные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1986. – 190 с.

15. *Бочвар А.А.* Металловедение: учебник для вузов. – М.: Металлургиздат, 1956. – 495 с.

16. *Таран Ю.Н., Мазур В.Н.* Структура эвтектических сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 312 с.

17. *Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П.* Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. – М.: Металлургия, 1986. – 440 с.

18. *Rogl P.* Aluminium – Boron – Iron // Ternary alloy systems: phase diagrams, crystallographic and thermodynamic data. Subvol. D. Iron systems, pt. 1 / ed. by G. Effenberg, S. Ilyenko. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. – doi: 10.1007/978-3-540-69761-9_3.

19. Influence of process duration on structure and chemistry of borided low carbon steel / G. Kartal, S. Timur, O.L. Eryilmaz, A. Erdemir // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205. – P. 1578–1583. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.050.

20. *Xie F., Wang X.-J., Pan J.-W.* Accelerate pack boriding with reused boriding media by simultaneously employing Al and alternating current field // *Vacuum*. –

2017. – Vol. 141. – P. 166–169. – doi: 10.1016/j.vacuum.2017.04.011.

21. Xie F., Sun L., Cheng J. Alternating current field assisted pack boriding to Fe₂B coating // Surface Engineering. – 2013. – Vol. 29. – P. 240–243. – doi: 10.1179/1743294412Y.0000000104.

22. Keddam M., Chentouf S.M. A diffusion model for describing the bilayer growth (FeB/Fe₂B) during the iron powder-pack boriding // Applied Surface Science. – 2005. – Vol. 252, iss. 4. – P. 393–399. – doi: 10.1016/j.apsusc.2005.01.016.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Formation of Coatings Based on Boron and Aluminum on the Surface of Carbon Steels by Electron Beam Alloying

Undrakh Mishigdorzhniyn ^{a, *}, Igor Sizov ^b, Ivan Polyansky ^c

East Siberia State University of Technology and Management, 40V Kluchevskaya st., Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

^a  <http://orcid.org/0000-0002-7863-9045>,  druh@mail.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-4468-784X>,  sigperlit@mail.ru,
^c  <http://orcid.org/0000-0002-7350-8791>,  i.polyansky@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 January 2018

Revised: 02 March 2018

Accepted: 05 April 2018

Available online: 15 June 2018

Keywords:

Electron beam alloying

Iron borides

Iron aluminides

Microstructure

Microhardness

Acknowledgements:

The authors are grateful to Dr. B.V. Dampilon, the researcher of the Institute of Strength Physics and Materials Science (Siberian Branch of Russian Academy of Science, Tomsk) for his assistance in experiments.

Funding:

The present work was supported by the grant of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists – PhD holders Grant number MK-2641.2018.8 and State support (Grant No: 11.9999.2017/5.2) for conducting research.

ABSTRACT

Introduction. Boronizing and boroaluminizing are effective methods used to improve the surface properties of machine parts and tools. However, its application in industrial production is often restricted. High brittleness of boronized and boroaluminized layers is one of the restraining factors. Conventional methods of boronizing and boroaluminizing with furnace heating are aimed at the formation of needle and layered structured layers respectively. As a rule, the hardest and most brittle phases are formed on top of these layers, such as FeB and Fe₂Al₃. **The purpose of the work:** to study the phase formation sequence in boronized and boroaluminized layers obtained after electron beam treatment in vacuum on the surface of carbon steels. **The methods of investigation.** Alloying with either boron carbide (electron beam boronizing) or boron carbide and aluminum (electron beam boroaluminizing) is applied. Different modes of electron beam processing are tested: accelerating voltage, beam current and irradiation time. Microstructure, microhardness, element and phase composition of obtained layers are investigated. **Results and Discussion.** It is established that the phase formation at electron beam alloying with boron carbide occurs according to diagram Fe-B, where iron monoboride FeB is the nucleate phase. FeB iron monoboride crystallizes in the form of rhombic and prismatic crystals and Fe₂B appears in the form of rounded dendrites. Thus, FeB crystals come out as being enclosed into Fe₂B shells. The remaining liquid crystallizes as a eutectic system during cooling. This pattern formation of layer is also valid for the electron beam boroaluminizing. The only difference is the eutectic's composition, which consists of Fe₂B phase and solid solutions of aluminum and boron in α-Fe. Generally, the microstructure of obtained layer after electron beam treatment is more preferable than the ones after conventional treatment with furnace heating. The layer structure with hard and brittle FeB surrounded by Fe₂B and eutectic lead to an increase in its mechanical properties.

For citation: Mishigdorzhniyn U.L., Sizov I.G., Polaynsky I.P. Formation of coatings based on boron and aluminum on the surface of carbon steels by electron beam alloying. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 87–99. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-87-99. (In Russian).

* Corresponding author

Mishigdorzhniyn Undrakh L., Ph.D. (Engineering), Senior Researcher
 East Siberia State University of Technology and Management,
 40V Kluchevskaya st.,
 670013, Ulan-Ude, Russian Federation
 Tel.: 8 (3012) 43-14-17, e-mail: druh@mail.ru

References

1. Węglowski M.St., Błacha S., Phillips A. Electron beam welding – Techniques and trends - Review. *Vacuum*, 2016, vol. 130, pp. 72–92. doi: 10.1016/j.vacuum.2016.05.004.
2. Semenov A., Kovsh I., Petrova I. et al. *Metody i sredstva uprochneniya poverkhnosti detalei mashin kontsentririvannymi potokami energii* [Methods and tools for surfaces hardening of machine parts by concentrated energy flow]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 403 p.
3. Barbera A. La, Mignone A., Tosto S., Vignaud C. Electron beam cladding and alloying of AISI 316 on plain carbon steel: microstructure and electrochemical corrosion behavior. *Surface and Coatings Technology*, 1991, vol. 46, iss. 3, pp. 317–329. doi: 10.1016/0257-8972(91)90174-U.
4. Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P. Special features of electron-beam boronizing of steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 1999, vol. 41, pp. 516–519. doi: 10.1007/BF02466542.
5. Mosorov V.I., Guriev A.M., Lygdenov B.D., Filchakov D.S. Uprochneniye poverkhnosti litoi stali kompleksnym diffuzionnym nasyshcheniyem borom i khromom [Surface hardening of cast steel complex diffusion saturation with bore and chrome]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2011, no. 2, pp. 33–36.
6. Suwattananont N., Petrova R. Formation of multi-component boronization by adding transition metal group VIB. *Solid State Sciences*, 2012, vol. 14, pp. 1669–1672. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2012.06.008.
7. Sizov I.G., Mishigdorzhyn U.L., Maharov D.M. A study of thermocycling boroaluminizing of carbon steel. *Metals Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 53, iss. 11–12, pp. 592–597. doi: 10.1007/s11041-012-9440-4.
8. Maragoudakis N.E., Stergioudis G., Omar H., Paulidou H., Tsipas D.N. Boron–aluminide coatings applied by pack cementation method on low-alloy steels. *Materials Letters*, 2002, vol. 53, pp. 406–410. doi: 10.1016/S0167-577X(01)00515-8.
9. Sizov I.G. Otsenka khrupkosti boridnykh sloev posle elektronno-luchevogo borirovaniya [Estimation of the brittleness of boride layers after electron beam boronization]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*, 2005, no. 11, pp. 77–78.
10. Sizov I.G., Mishigdorzhyn U.L., Teleshev A.N., Makharov D.M. Vliyanie protsessa boroalitirovaniya v pastakh na povyshenie stoikosti detalei liteinoi osnastki [Influence of boro-aluminizing process in pastes on improvement in durability of casting equipment parts]. *Tekhnologiya metallov*, 2011, no. 8, pp. 23–26.
11. Sizov I.G., Polyansky I.P., Mishigdorzhyn U.L., Makharov D.M. Vliyanie sostava nasyshchayushchikh obmazok na strukturu i svoystva boroalitirovannogo sloya [The influence of composition of saturating pastes on the structure and properties of the boron aluminized layer]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2013, no. 1 (58), pp. 22–25.
12. Bataev I.A., Kurlaev N.V., Lenivtseva O.G., Butylenkova O.A., Losinskaya A.A. Morfologiya boridov zheleza v poverkhnostnom sloe, naplavlenom elektronnykh luchom [Morphology of iron borides in coatings, produced by non-vacuum electron beam cladding]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 1 (54), pp. 85–89.
13. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. *Plasticity of boronized layers*. 1st ed. Cham, Springer, 2016. 364 p.
14. Liakishev N.P., Pliner Yu.L., Lappo S.I. *Borsoderzhashchie stali i splavy* [Boron containing steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 190 p.
15. Bochvar A.A. *Metallovedenie* [Metal science]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1956. 495 p.
16. Taran Yu.N., Mazur V.N. *Struktura evtekticheskikh splavov* [Structure of the eutectic alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 312 p.
17. Bannykh O.A., Budberg P.B., Alisova S.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh i mnogokomponentnykh sistem na osnove zheleza* [Diagrams of binary and multicomponent systems based on iron]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 440 p.
18. Rogl P. Aluminium – Boron – Iron. *Ternary alloy systems: phase diagrams, crystallographic and thermodynamic data*. Subvol. D. *Iron systems*, pt. 1. Ed. by G. Effenberg, S. Ilyenko. Berlin, Heidelberg, Springer, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-69761-9_3.
19. Kartal G., Timur S., Eryilmaz O.L., Erdemir A. Influence of process duration on structure and chemistry of borided low carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205, pp. 1578–1583. doi: 10.1016/j.surfcoat.2010.08.050.
20. Xie F., Wang X.-J., Pan J.-W. Accelerate pack boriding with reused boriding media by simultaneously employing Al and alternating current field. *Vacuum*, 2017, vol. 141, pp. 166–169. doi: 10.1016/j.vacuum.2017.04.011.



21. Xie F., Sun L., Cheng J. Alternating current field assisted pack boriding to Fe₂B coating. *Surface Engineering*, 2013, vol. 29, pp. 240–243. doi: 10.1179/1743294412Y.0000000104.

22. Keddami M., Chentouf S.M. A diffusion model for describing the bilayer growth (FeB/Fe₂B) during the iron powder-pack boriding. *Applied Surface Science*, 2005, vol. 252, iss. 4, pp. 393–399. doi: 10.1016/j.apsusc.2005.01.016.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).