



Оригинальная статья

УДК 539.911

DOI 10.17073/0368-0797-2022-2-98-105



## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФфуЗИОННОЙ ЗОНЫ, ПОЛУЧЕННОЙ НА СТАЛИ 20 БОРИРОВАНИЕМ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

Е. П. Шевчук<sup>1,2</sup>, В. А. Плотников<sup>2</sup>, С. В. Макаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Восточно-Казахстанский государственный университет имени Сарсена Аманжолова (Республика Казахстан, 070020, Восточно-Казахстанская обл., Усть-Каменогорск, ул. 30-й Гв. Дивизии, 34)

<sup>2</sup> Алтайский государственный университет (Россия, 656049, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, 61)

**Аннотация.** Приведены данные исследований синтеза боридов железа при индукционном нагреве до 1000 °С в течение 5 мин образцов стали 20 с обмазкой из шихты, содержащей  $\text{Fe}-\text{H}_3\text{BO}_3$ . Содержание борной кислоты в составе шихты менялось от 25 и до 75 % (по массе). Шихта в экспериментах могла быть разбавлена раствором в воде жидкого стекла с добавлением небольшого количества гидроксида аммония и угля. Исследование микротвердости поверхностного слоя показало, что в ходе насыщения бором поверхностного слоя углеродистой стали 20 формируется макроскопически обширная диффузионная зона размером 900 – 1000 мкм, в которой содержание боридов постепенно снижается при перемещении в глубь матрицы. Такой размер диффузионной зоны указывает на аномально высокий массоперенос в ходе борирования стали 20. Действительно, вычисленный коэффициент диффузии в ходе борирования в условиях индукционного воздействия (около  $1,35 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ ) на два порядка превышает коэффициент диффузии в классическом варианте борирования. Рентгеновские исследования показали, что в рассматриваемых условиях синтезируются бориды  $\text{Fe}_2\text{B}$  и  $\text{FeB}$ , а также формируется твердый раствор бора в  $\alpha$ -железе. Анализ фазового состава структурных составляющих диффузионной зоны свидетельствует, что от поверхности к матрице формирование боридных фаз осуществляется в последовательности  $\text{FeB} \rightarrow \text{Fe}_2\text{B} \rightarrow (\alpha\text{-фаза} + \text{B}) \rightarrow \text{металл}$  основы. Микроструктура диффузионной зоны представляет собой более или менее выраженные слои, состоящие из боридных фаз  $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$ . В целом же, особенно глубоколежащие области диффузионной зоны представляют собой композиционный материал, состоящий из пластичной  $\alpha$ -фазы и кристаллов боридов железа. Кристаллы в  $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$  в слое ориентированы преимущественно перпендикулярно к фронту диффузии. Возможно, это обусловлено быстрым преимущественным ростом боридной фазы в условиях высокой диффузионной подвижности атомов бора в каком-то одном направлении и затрудненной в других.

**Ключевые слова:** борирование, боридные слои, борсодержащая шихта, микротвердость, коэффициент диффузии, диффузионная зона, фазовый состав, микроструктура

**Для цитирования:** Шевчук Е.П., Плотников В.А., Макаров С.В. Особенности формирования диффузионной зоны, полученной на стали 20 борированием в индукционной печи // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 2. С. 98–105.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-98-105>

Original article

## FEATURES OF FORMATION OF DIFFUSION ZONE OBTAINED ON STEEL 20 BY BORIDING IN INDUCTION FURNACE

Е. П. Shevchuk<sup>1,2</sup>, V. A. Plotnikov<sup>2</sup>, S. V. Makarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eastern Kazakhstan State University (34 30-i Gvardeiskoi divizii Str., Ust-Kamenogorsk, Eastern Kazakhstan Region 070020, Republic of Kazakhstan)

<sup>2</sup> Altai State University (61 Lenina Ave., Barnaul, Altai Territory 656049, Russian Federation)

**Abstract.** The article presents data on studies of iron borides synthesis during induction heating to 1000 °C for 5 min of steel 20 samples with a coating from a charge containing  $\text{Fe}-\text{H}_3\text{BO}_3$ . Content of boric acid in the charge varied from 25 to 75 % wt. Charge in the experiments could be diluted with a solution of liquid glass in water with addition of small amount of ammonium hydroxide and coal. Study of the surface layer microhardness showed that during saturation of the surface layer of carbon steel 20 with boron, a macroscopically extensive diffusion zone 900 – 1000  $\mu\text{m}$  in size is formed, in which the boride content gradually decreases when moving deeper into the matrix. Such a size of the diffusion zone indicates an anomalously high mass transfer during boriding of steel 20. Indeed, the calculated diffusion coefficient during boriding under induction conditions (about  $1.35 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ) is two orders of magnitude higher than the diffusion coefficient in the classical boriding. X-ray studies showed that, under the considered conditions,  $\text{Fe}_2\text{B}$  and  $\text{FeB}$  borides are synthesized, and a solid solution of boron in  $\alpha$ -iron is also formed. An analysis of phase composition of the diffusion zone structural components indicates that, from the surface to the matrix, formation of boride phases occurs in the

following sequence:  $\text{FeB} \rightarrow \text{Fe}_2\text{B} \rightarrow (\alpha\text{-phase} + \text{B}) \rightarrow \text{base metal}$ . Microstructure of the diffusion zone consists of more or less pronounced layers consisting of FeB and  $\text{Fe}_2\text{B}$  boride phases. On the whole, especially deep-lying regions of the diffusion zone are a composite material consisting of plastic  $\alpha$ -phase and iron boride crystals. Crystals in FeB and  $\text{Fe}_2\text{B}$  in the layer are oriented mainly perpendicular to the diffusion front. Perhaps, this is due to the rapid predominant growth of the boride phase under conditions of high diffusion mobility of boron atoms in one direction and hindered in others.

**Keywords:** boration, boride layers, boron mixture, microhardness, diffusion coefficient, diffusion zone, phase composition, microstructure

**For citation:** Shevchuk E.P., Plotnikov V.A., Makarov S.V. Features of formation of diffusion zone obtained on steel 20 by boriding in induction furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 2, pp. 98–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-2-98-105>

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, сплавы системы Fe–B обладают комплексом уникальных свойств: тугоплавкость, высокая твердость, химическая устойчивость в агрессивных средах [1 – 3]. В этой связи использование борирования для улучшения функциональных свойств стали может быть стратегическим подходом, особенно при снижении времени насыщения поверхностного слоя бором, который позволяет обеспечить достаточный уровень физико-механических свойств изделий. Одним из основных и практически повсеместно осуществимых способов упрочнения сталей является химико-термическая обработка [4]. Такая обработка позволяет осуществлять не только борирование, но и хромирование, силицирование, титанирование, а также двухкомпонентное насыщение: борохромирование, хромосилицирование, боротитанирование [5 – 7]. Эти способы позволяют создавать многослойные покрытия, в которых объединяются достоинства нескольких вариантов поверхностного упрочнения сталей, повышающих эксплуатационные показатели деталей. Улучшение эксплуатационных характеристик зависит как от состава нанесенного покрытия, так и от структуры образовавшегося диффузионного слоя. Однако для осуществления наиболее распространенного классического варианта химико-термической обработки стальных деталей требуется большое время выдержки при температуре воздействия.

В настоящей работе поверхностное упрочнение стали 20 осуществлено методом термохимического диффузионного борирования, в котором термическая активация диффузионных процессов происходит в ходе нагрева вихревыми токами индукционной установки, что значительно сокращает время выдержки и исключает нагрев всего объема образцов [8].

## МЕТОДИКА БОРИРОВАНИЯ

Для изучения кинетики роста и структуры боридной зоны в поверхностном слое из углеродистой стали 20 были изготовлены образцы цилиндрической формы длиной ( $h$ ) 35 мм и диаметром 15 мм. Борирование проведено путем нанесения борсодержащей шихты на поверхность образцов и последующего нагрева в индукционной печи при температуре 1000 °C в течение 5 мин. Состав шихты приведен в табл. 1. Помимо основных компонентов шихты паста для борирования содержала гидроксид аммония, активированный уголь и жидкое стекло [9]. Составы пасты (при применении шихты состава 25 % Fe + 75 %  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) указаны в табл. 2.

Для предотвращения спекания порошков железа и борной кислоты в состав пасты для борирования в качестве инертной добавки введено жидкое стекло ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), а для ускорения процесса борирования – активаторы ( $\text{NH}_4\text{OH}$ , C). Индукционное воздействие в ходе химико-термической обработки стальных образцов осуществляли в индукционной печи при температуре 1000 °C в течение 5 мин.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведено измерение микротвердости по сечению борированный слой – матрица: распределение микротвердости по сечению образцов представляет собой плавный переход от насыщенной боридами поверхности к матрице из стали 20, представляющей собой преимущественно  $\alpha$ -фазу железа (рис. 1). По-видимо-

Т а б л и ц а 2

Состав пасты для борирования

Table 2. Composition of the paste for boriding

| Образец | Состав добавки на 1,5 г состава шихты                                                                             |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | 1 мл гидроксида аммония, 0,32 г угля, с добавлением 1 мл разбавленного водой жидкого стекла (размешанный)         |
| 2       | 1 мл гидроксида аммония, 0,32 г угля, с добавлением 1 мл разбавленного водой жидкого стекла (отстоявшийся осадок) |
| 3       | 1 мл гидроксида аммония, 0,32 г угля без добавления жидкого стекла                                                |

Т а б л и ц а 1

Состав шихты в образцах [8]

Table 1. Composition of charge in the samples [8]

| Образец | Состав шихты, %                        |
|---------|----------------------------------------|
| 1       | 75 % Fe + 25 % $\text{H}_3\text{BO}_3$ |
| 2       | 50 % Fe + 50 % $\text{H}_3\text{BO}_3$ |
| 3       | 25 % Fe + 75 % $\text{H}_3\text{BO}_3$ |

му, большой разброс значений микротвердости образца 1 обусловлен низким содержанием борной кислоты (25 % (по массе)) в шихте.

Из данных распределения микротвердости по сечению образцов (рис. 1) видно, что микротвердость поверхностного слоя составляет около 3700 – 3350 МПа [10], а значит, она повысилась примерно на 30 % по сравнению с микротвердостью отожженной  $\alpha$ -фазы железа, равной примерно 2207 МПа. Из распределения микротвердости по сечению можно предполагать, что концентрация бора монотонно снижается и достигает нулевого значения на глубине 900 – 980 мкм, где микротвердость достигает значения, равного микротвердости  $\alpha$ -матрицы.

Полученные данные распределения микротвердости по сечению диффузионной зоны образцов в ходе химико-термической обработки стальных образцов в индук-

ционной печи при температуре 1000 °С в течение 5 мин свидетельствуют об аномально высокой диффузионной подвижности бора, участвующего вместе с другими элементами обмазки в формировании макроскопически обширной диффузионной зоны.

По эмпирической зависимости толщины диффузионного слоя от времени борирования [6]  $h^2 = 2D\tau$  (где  $h$  – толщина диффузионного покрытия, м;  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\tau$  – продолжительность процесса, с) рассчитан коэффициент диффузии бора через формирующийся слой боридов и  $\alpha$ -фазу железа с учетом методики, изложенной в публикациях [11, 12]. Действительно, значение коэффициента диффузии бора через формирующийся слой боридов и  $\alpha$ -фазу железа величиной около  $1,35 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  свидетельствует об аномально высоком массопереносе бора. Значения коэффициента диффузии, рассчитанные в настоящей работе, представлены в табл. 3, где также приведены и литературные данные [6, 13] коэффициента диффузии при классическом варианте осуществления борирования.

Можно заметить, что полученные значения коэффициентов диффузии бора при 1000 °С на два порядка выше значений коэффициента диффузии бора в классической схеме борирования (при 950 °С коэффициент диффузии бора составляет  $1,82 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$  [6]). Низкие значения коэффициентов диффузии при классическом варианте борирования, очевидно, обусловлены медленным течением процесса в углеродистых сталях по сравнению с этим же процессом в чистом железе [13, 14]. То есть в условиях индукционного воздействия наблюдается аномально высокий массоперенос бора. Возможно, высокий уровень диффузионной подвижности бора можно объяснить действием нескольких механизмов: диффузия по дефектам, диффузия по зерну. Таким образом, преимущественный механизм диффузии не может быть чисто вакансионным, возможны и другие механизмы, тем более, что процесс массопереноса осуществляется в условиях высоких градиентов химических потенциалов в окрестностях границы раздела шихта – матрица.

Разумеется, что коэффициент диффузии, определенный из анализа геометрии диффузионной зоны, является усредненной характеристикой процесса борирования и не описывает диффузионный процесс на его разных стадиях.

Т а б л и ц а 3

Значения коэффициентов диффузии бора

Table 3. Diffusion coefficients of boron

| Образец | $D$ , $\text{м}^2/\text{с}$ (индукционная печь) [7] | $D$ , $\text{м}^2/\text{с}$ [6, 13] |
|---------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1       | $1,35 \cdot 10^{-9}$                                | $1,82 \cdot 10^{-11}$               |
| 2       | $1,35 \cdot 10^{-9}$                                |                                     |
| 3       | $1,60 \cdot 10^{-9}$                                |                                     |

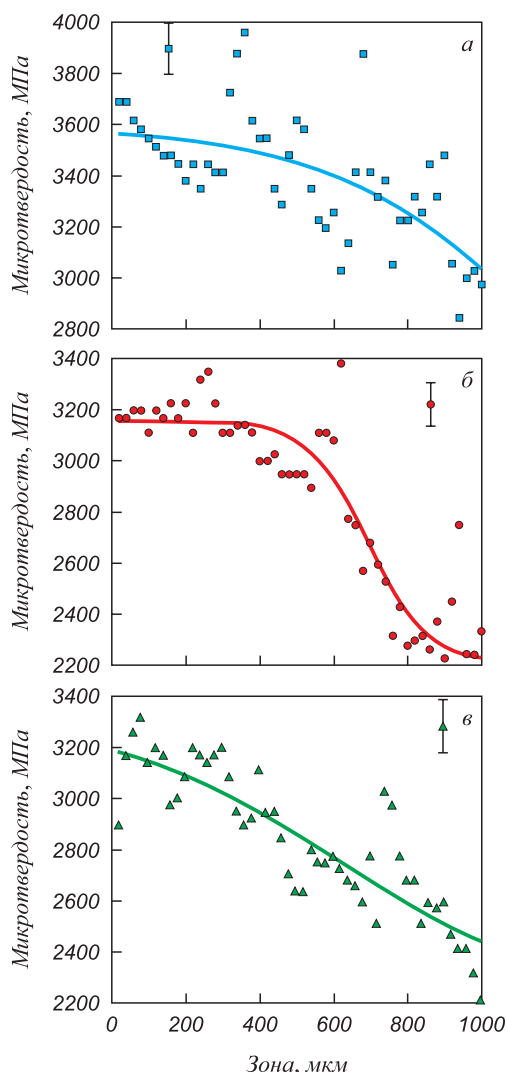


Рис. 1. Распределение микротвердости в борированной поверхности стали 20 после термической обработки в индукционной печи образцов 1 – 3 (а – в) [9]

Fig. 1. Distribution of microhardness in the borated surface of steel 20 after heat treatment of the samples 1 – 3 (a – c) in induction furnace [9]

Обычно в кинетике формирования диффузионных многофазных покрытий принимаются следующие допущения [15]:

– в покрытии образуются все фазы, имеющиеся на диаграмме состояния соответствующей системы, причем в последовательности, определяемой диаграммой состояния;

– концентрации на межфазных границах соответствуют предельным растворимостям диффундирующих элементов в фазах при данной температуре процесса;

– время образования всех фаз в покрытии с граничными концентрациями, соответствующими диаграмме состояния, мало, многократно меньше времени всего процесса химико-термической обработки, что объясняет факт «отсутствия» одного или нескольких слоев в диффузионной зоне в покрытии, несмотря на наличие соответствующих фаз на диаграмме состояния.

Проведенный рентгеноструктурный анализ исследуемых образцов показал наличие в диффузионном слое фаз:  $\alpha$ -Fe, B, FeB и  $\text{Fe}_2\text{B}$  (рис. 2). Известно, что структура покрытия при борировании, как правило, состоит из двух слоев разного фазового состава: внешний (поверхностный) состоит преимущественно из фазы FeB, внутренний –  $\text{Fe}_2\text{B}$  [16, 17]. То есть формирование фазового состава диффузионного слоя борированной стали 20 можно идентифицировать как последовательность  $\text{FeB} \rightarrow \text{Fe}_2\text{B} \rightarrow (\alpha\text{-фаза} + \text{B}) \rightarrow \text{металл}$  основы [10]. Однако в монографии [18] показано, что поверхностный слой борированной стали 20, содержащей 0,17 % углерода, состоит из смеси твердого раствора бора в  $\alpha$ -железе и борида  $\text{Fe}_2\text{B}$ .

Как видно из рис. 2, основными фазами в диффузионных слоях являются соединения железа с бором FeB,  $\text{Fe}_2\text{B}$  и B [9]. Эти фазы в образцах 1 – 3 сформировали композиты с максимальной микротвердостью 3395, 2837 и 2862 МПа соответственно. Однако структура слоев, характер распределения фаз в слое и распределение твердости во многом зависят от технологии получения: способа борирования и условий насыщения (температуры и времени) [18, 19].

Исследование микроструктуры борированных образцов показало, что слои состоят, по крайней мере, из двух фаз боридов и матрицы стали 20 (рис. 3). Характерно, что микроструктура исследуемых образцов окрашена: фаза FeB окрашивается в коричневый цвет, а  $\text{Fe}_2\text{B}$  сохраняет желтые тона, кристаллы бора белого цвета [4].

При индукционном борировании при температуре около 1000 °С на поверхности образца сформировалась пористая зона (рис. 3, а, б). По степени травления хорошо видно, что высокобористая фаза (FeB) располагается отдельными включениями на поверхности (рис. 3, б). Кроме этого, в поверхностном слое видны поры размером около 50 мкм (рис. 3, а, б). В образце 3 (рис. 3, в) поры отсутствуют [10]. Образование пористой структуры поверхности связано с быстрой истощаемостью насыщающей смеси.

Растровая электронная микроскопия позволила исследовать количественные характеристики боридных структур (рис. 4). Как правило, боридные слои имеют игольчатое строение, сформированы фазами ромбического бориды FeB и тетрагонального бориды  $\text{Fe}_2\text{B}$ . На рис. 4, а, б наблюдается игольчатая структура кристаллов  $\text{Fe}_2\text{B}$  и FeB, направленных нормально поверхности образца. Ориентация кристаллов определена по их положению в предполагаемой системе координат XY, где ось Y перпендикулярна поверхности образца (табл. 4).

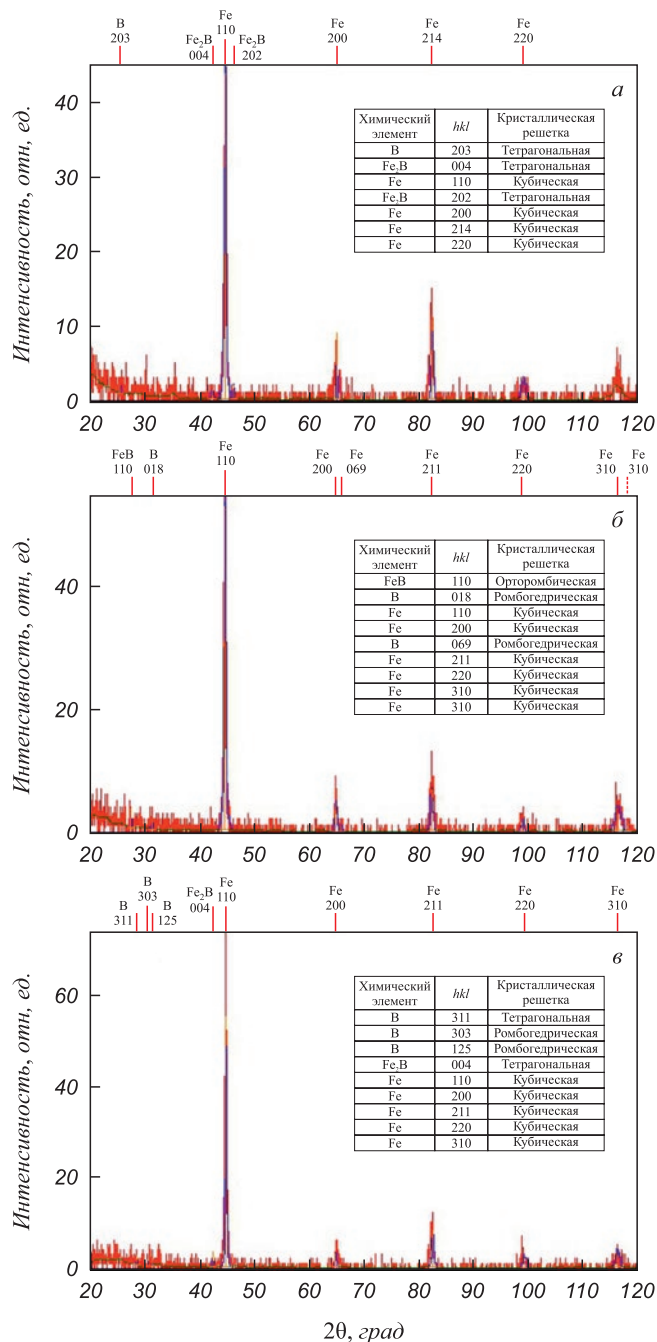


Рис. 2. Рентгеноструктурный анализ и фазовый состав боридных слоев стали 20 образцов 1 – 3 (а – в) [19]

Fig. 2. X-ray structural analysis and phase composition of boride layers of steel 20 of the samples 1 – 3 (a – v) [19]

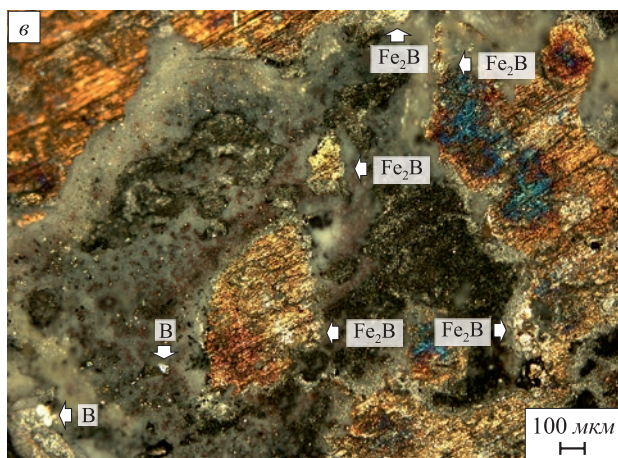
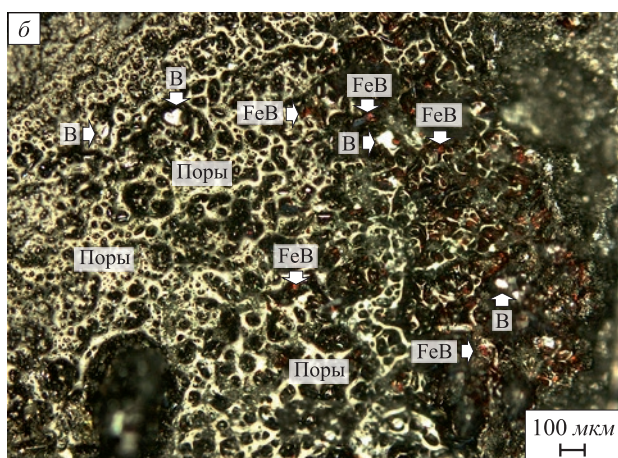
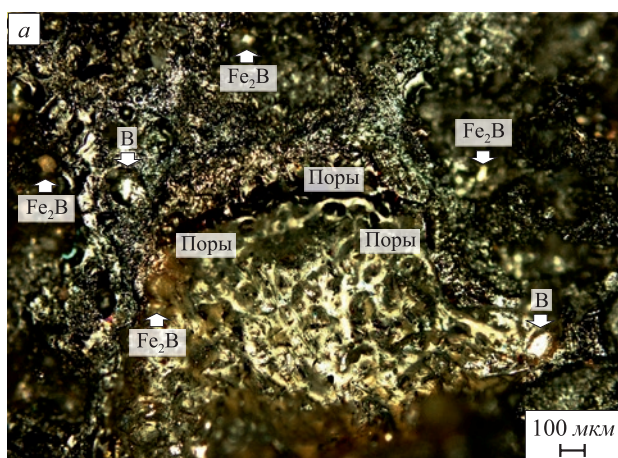


Рис. 3. Бориды в поверхностных слоях образцов стали 20 образцов 1 – 3 (а – в) [1]

Fig. 3. Borides in surface layers of steel 20 in the samples 1 – 3 (a – в) [1]

На площади исследования 3333,2 мкм<sup>2</sup> (рис. 4, б) выявлено 120 зерен, 112 из которых в диффузионном слое расположены перпендикулярно подложке.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что процесс насыщения поверхностного слоя бором осуществляется в три стадии [18]: образо-

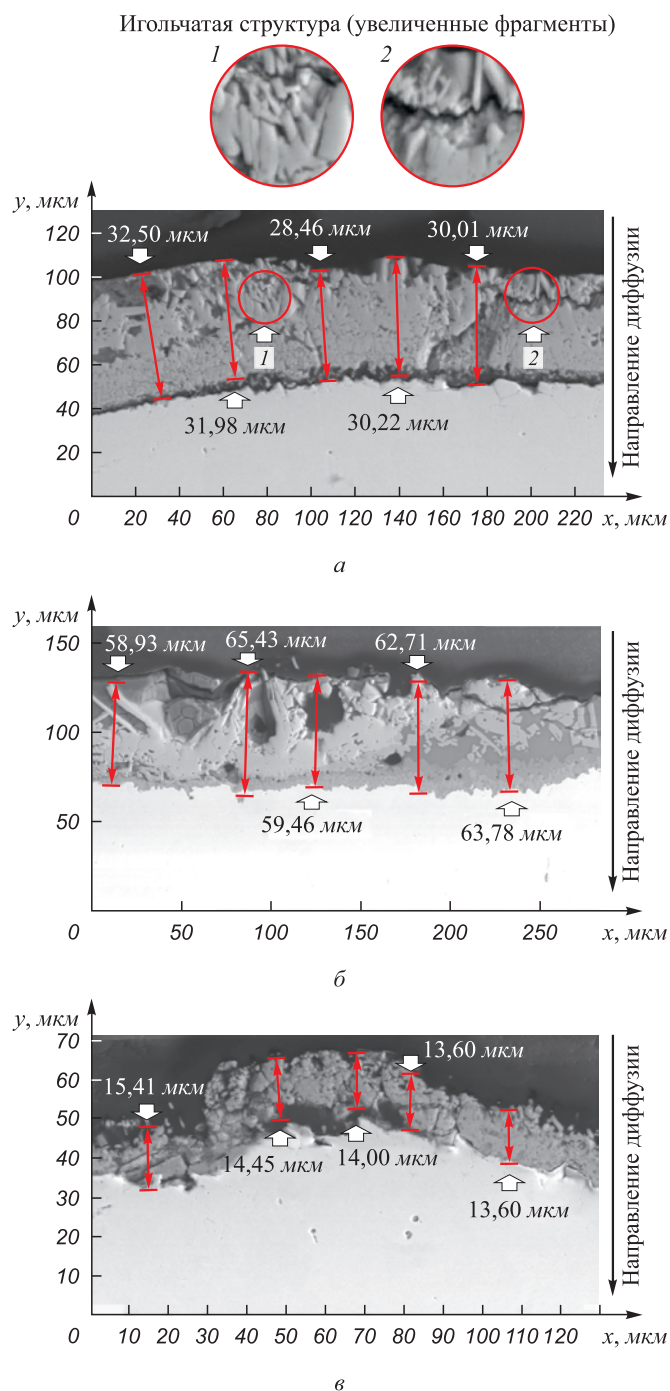


Рис. 4. Растровая электронная микроскопия диффузионных слоев после борирования образцов 1 – 3 (а – в) (красным цветом выделена толщина диффузионного слоя)

Fig. 4. Scanning electron microscopy of diffusion layers after boriding of samples 1 – 3 (a – в) (red – thickness of the diffusion layer)

вание насыщающих атомов на обрабатываемой поверхности; адсорбция образовавшихся атомов поверхностью обрабатываемого образца; диффузия бора в глубь металла с образованием борированного слоя.

Отметим, что процесс адсорбции осуществляется совместно с атомарной диффузией бора по межзеренным границам и длится до 0,05 ч, а последующий

Т а б л и ц а 4

Величина зерен по осям

Table 4. Size of the grains along the axes

| Образец | $h$ , мкм | $X$ , мкм     | $Y$ , мкм   |
|---------|-----------|---------------|-------------|
| 1       | 30,60     | 0,023 – 1,800 | 4,30 – 6,43 |
| 2       | 62,18     | 0,080 – 0,580 | 0,08 – 2,16 |
| 3       | 14,45     | 0,160 – 1,600 | 0,16 – 3,21 |

процесс диффузии бора с образованием слоя боридов продолжается до 0,1 ч [10, 18]. То есть образование обширной диффузионной зоны осуществляется уже за счет диффузии бора через слой боридов.

Первый процесс происходит на границе насыщающая среда – металл, причем активные атомы бора поглощаются металлической поверхностью. Указанный процесс можно представить как внедрение на вакантные места решетки металла атомов бора (имеющиеся в большом количестве на поверхности) или как химическую реакцию между атомами металла и бора<sup>1</sup>. В первом случае на поверхности образуется твердый раствор, во втором – химическое соединение. На начальной стадии борирования сначала в слое бора появляется фаза  $Fe_2B$  [19, 20], а рассмотренная выше последовательность событий, протекающих в ходе борирования, приводит к образованию слоя  $Fe_2B$  и последующей диффузии атомов бора через фазу  $Fe_2B$  в матрицу, что обеспечивает рост боридного слоя и его смещение в подложку [19 – 21].

В зависимости от состава может быть реализован газовый контактный массоперенос путем образования субсоединений бора в среде [10, 22]. Выделившийся водород взаимодействует с бором, образует соединение бороводород  $B_{10}H_{14}$ , который исполняет роль перенос-

чика бора в глубину структуры поверхностного слоя стальной подложки [23], и образует таким образом обширную диффузионную зону в виде композита бориды железа –  $\alpha$ -фаза железа.

С уменьшением содержания инертной добавки (жидкого стекла) в насыщающей смеси (в образце 3 инертной добавки нет) толщина диффузионного боридного слоя уменьшается. Как следует из данных рис. 4 и табл. 2, толщина слоя боридов снижается в четыре раза, а размер боридных игл – в два раза, то есть наблюдается увеличение дисперсности структуры диффузионной зоны. Одновременно с ростом дисперсности боридного слоя усложняется его строение: боридные иглы становятся закругленными, наблюдается их рост не только по нормали к поверхности, но и под некоторым углом, толщина боридных игл также увеличивается.

## Выводы

Установлено, что борирование стали 20 в условиях индукционного воздействия с использованием борсодержащей шихты существенно влияет на микроструктуру поверхностного слоя, микротвердость и интенсивность формирования обширной диффузионной зоны. В условиях индукционного воздействия повышение интенсивности борирования осуществляется также за счет использования шихты, содержащей борную кислоту, а не боросодержащие вещества. Кроме того, использование аммиака, жидкого стекла и древесного угля в специально рассчитанных пропорциях приводит к увеличению диффузионной подвижности бора в поверхностном слое матрицы, что позволяет образовываться боридам на большом расстоянии от поверхности.

Таким образом, применение шихты на основе борной кислоты и индукционного отжига в течение 5 мин при температуре 1000 °C позволяют сформировать бориды железа в поверхностном слое матрицы в виде макроскопически обширной диффузионной зоны, которая обладает достаточными прочностными свойствами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Bakare M.S., Voisey K.T., Chokethawai K., McCartney D.G. Corrosion behaviour of crystalline and amorphous forms of the glass forming alloy  $Fe_{43}Cr_{16}Mo_{16}C_{15}B_{10}$  // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. Vol. 527. P. 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.02.127>
2. Medvedovski E. Advanced iron boride coatings to enhance corrosion resistance of steels in geothermal power generation // *Advances in Applied Ceramics*. 2020. Vol. 119. No. 8. P. 462–481. <https://doi.org/10.1080/17436753.2020.1830359>
3. Mebarek B., Keddad M. A fuzzy neural network approach for modeling the growth kinetics of  $FeB$  and  $Fe_2B$  layers during the boronizing process // *Matériaux & Techniques*. 2018. Vol. 106. No. 6. Article 603. <https://doi.org/10.1051/mattech/2019002>
4. Лактин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
1. Bakare M.S., Voisey K.T., Chokethawai K., McCartney D.G. Corrosion behaviour of crystalline and amorphous forms of the glass forming alloy  $Fe_{43}Cr_{16}Mo_{16}C_{15}B_{10}$ . *Journal of Alloys and Compounds*. 2012, vol. 527, pp. 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.02.127>
2. Medvedovski E. Advanced iron boride coatings to enhance corrosion resistance of steels in geothermal power generation. *Advances in Applied Ceramics*. 2020, vol. 119, no. 8, pp. 462–481. <https://doi.org/10.1080/17436753.2020.1830359>
3. Mebarek B., Keddad M. A fuzzy neural network approach for modeling the growth kinetics of  $FeB$  and  $Fe_2B$  layers during the boronizing process. *Matériaux & Techniques*. 2018, vol. 106, no. 6, article 603. (In Fr.). <https://doi.org/10.1051/mattech/2019002>
4. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Chemical and Thermal Treatment of Metals*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 256 p. (In Russ.).

5. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. М.: Металлургия, 1978. 239 с.
6. Ворошнин Л.Г. Антикоррозионные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1981. 296 с.
7. Nora R., Zine T.M., Abdelkader K., Youcef K., Ali O., Jiang X. Boriding and boronitrocarburising effects on hardness, wear and corrosion behavior of AISI 4130 steel // *Matéria*. 2019. Vol. 24. No. 1. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0609>
8. Шевчук Е.П., Плотников В.А., Ахметжанов Б.К. Исследование боридных слоев стали 20 после химико-термической обработки в индукционной печи // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2018. Т. 15. № 3. С. 386–391. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2018.03.012>
9. Шевчук Е.П., Плотников В.А., Бектасова Г.С. Рентгеноструктурный анализ диффузионного боридного слоя на углеродистой стали // *Известия Алтайского государственного университета*. 2018. № 4 (102). С. 51–55. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2018\)4-09](https://doi.org/10.14258/izvasu(2018)4-09)
10. Шевчук Е.П., Плотников В.А., Джес А.В. Формирование обширной диффузионной зоны при борировании стали 20 // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2018. Т. 15. № 3. С. 424–428. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2018.03.018>
11. Mehrer H. *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Springer Science & Business Media, 2007. 654 p.
12. Балгазин И.И., Саяпова В.В. Нахождение коэффициента диффузии методом Монте-Карло // *Universum: Химия и биология*. 2018. № 5 (47). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/5801> (дата обращения: 09.02.2022).
13. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. *Физика твердого тела*. М.: Высшая школа, 2000. 494 с.
14. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Гурьев М.А., Мэй Шунчи, Власова О.А. Борирование малоуглеродистой стали // *Международный журнал экспериментального образования*. 2015. № 12-4. С. 572–573.
15. Быкова Т.М. Влияние химического состава стали на структуру и свойства диффузионных боридных покрытий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.09: Екатеринбург, 2016. 164 с.
16. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. *Plasticity of Boronized Layers*. Berlin: Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40012-9>
17. Epik A.P. Boride coatings. In book: *Boron and Refractory Borides*. Part. 4. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1977. P. 597–612.
18. Крукевич М.Г. Механизм формирования диффузионных слоев // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. 2012. № 15. С. 69–76.
19. Kouba R., Keddarn M., Kulka M. Modelling of paste boriding process // *Surface Engineering*. 2015. Vol. 31. No. 8. P. 563–569. <https://doi.org/10.1179/1743294414y.0000000357>
20. Keddarn M., Ortiz-Dominquez M., Elias-Espinosa V., Damián-Mejía O., Arenas-Flores A., Gómez-Vargas O.A., Abreu-Quijano M., Aldana-González I.J., Zuno-Silva J. Growth kinetics of the Fe<sub>2</sub>B coating on AISI4130 steel // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2015. Vol. 68. No. 3. P. 433–442. <https://doi.org/10.1007/s12666-014-0472-x>
21. Mebarek B., Keddarn M. Fuzzy logic approach for modelling the formation kinetics of Fe<sub>2</sub>B layer // *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*. 2020. Vol. 9. No. 2. P. 147–156. <https://doi.org/10.1504/IJCMSSE.2020.109563>
22. Лыгденов Б.Д. Интенсификация процессов формирования структуры диффузионного слоя при химико-термической обработке сталей: дисс. ... док. техн. наук: 05.02.01. Барнаул, 2009. 354 с.
23. Екимов Е.А., Зибров И.П., Зотеев А.В. Получение микрокристаллов бора пиролизом декаборана В<sub>10</sub>H<sub>14</sub> при высоких давлениях и температурах // *Неорганические материалы*. 2011. Т. 47. № 11. С. 1311–1316.
5. Voroshnin L.G., Lyakhovich L.S. *Steel Boriding*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 239 p. (In Russ.).
6. Voroshnin L.G. *Anticorrosive Diffusion Coatings*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1981, 296 p. (In Russ.).
7. Nora R., Zine T.M., Abdelkader K., Youcef K., Ali O., Jiang X. Boriding and boronitrocarburising effects on hardness, wear and corrosion behavior of AISI 4130 steel. *Matéria*. 2019, vol. 24, no. 1. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0609>
8. Shevchuk E.P., Plotnikov V.A., Akhmetzhanov B.K. Study of boride layers of steel 20 after chemical-thermal processing in induction furnaces. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2018, vol. 15, no. 3, pp. 386–391. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2018.03.012>
9. Shevchuk E.P., Plotnikov V.A., Bektasova G.S. X-ray structural analysis of a diffusion boride layer on carbon steel. *Izvestiya of Altai State University*. 2018, no. 4 (102), pp. 51–55. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2018\)4-09](https://doi.org/10.14258/izvasu(2018)4-09)
10. Shevchuk E.P., Plotnikov V.A., Jes A.V. Formation of an extensive diffusion zone during boration of steel 20. *Basic Problems of Material Science (BPMS)*. 2018, vol. 15, no. 3, pp. 424–428. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2018.03.018>
11. Mehrer H. *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Springer Science & Business Media, 2007, 654 p.
12. Balgazin I.I., Sayapova V.V. Finding the diffusion coefficient by the Monte Carlo method. *Universum: Khimiya i biologiya*. 2018, no. 5 (47). Available at URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/5801> (accessed: 09.02.2022). (In Russ.).
13. Pavlov P.V., Khokhlov A.F. *Physics of Solids*. Moscow: Vysshaya shkola, 2000, 494 p. (In Russ.).
14. Gur'ev A.M., Lygdenov B.D., Gur'ev M.A., Mei Shunchi, Vlasova O.A. Boriding of low-carbon steel. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2015, no. 12-4, pp. 572–573. (In Russ.).
15. Bykova T.M. *Influence of steel chemical composition on structure and properties of diffusion boride coatings: Cand. Tech. Sci. Diss*. Yekaterinburg, 2016, 164 p. (In Russ.).
16. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. *Plasticity of Boronized Layers*. Berlin: Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40012-9>
17. Epik A.P. Boride coatings. In: *Boron and Refractory Borides*. Part. 4. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1977, pp. 597–612.
18. Krukovich M.G. Mechanism of diffusion layers formation. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*. 2012, no. 15, pp. 69–76. (In Russ.).
19. Kouba R., Keddarn M., Kulka M. Modelling of paste boriding process. *Surface Engineering*. 2015, vol. 31, no. 8, pp. 563–569. <https://doi.org/10.1179/1743294414y.0000000357>
20. Keddarn M., Ortiz-Dominquez M., Elias-Espinosa V., Damián-Mejía O., Arenas-Flores A., Gómez-Vargas O.A., Abreu-Quijano M., Aldana-González I.J., Zuno-Silva J. Growth kinetics of the Fe<sub>2</sub>B coating on AISI4130 steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2015, vol. 68, no. 3, pp. 433–442. <https://doi.org/10.1007/s12666-014-0472-x>
21. Mebarek B., Keddarn M. Fuzzy logic approach for modelling the formation kinetics of Fe<sub>2</sub>B layer. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*. 2020, vol. 9, no. 2, pp. 147–156. <https://doi.org/10.1504/IJCMSSE.2020.109563>
22. Lygdenov B.D. *Intensification of formation of diffusion layer structure during chemical-thermal treatment of steels: Dr. Tech. Sci. Diss*. Barnaul, 2009, 354 p. (In Russ.).
23. Ekimov E.A., Zibrov I.P., Zoteev A.V. Preparation of boron microcrystals via high-pressure, high-temperature pyrolysis of decaborane, B<sub>10</sub>H<sub>14</sub>. *Inorganic Materials*. 2011, vol. 47, no. 11, pp. 1194–1198. <https://doi.org/10.1134/S0020168511110069>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Евгения Петровна Шевчук**, старший преподаватель кафедры физики, НАО Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова; старший преподаватель кафедры общей и экспериментальной физики, Алтайский государственный университет  
**E-mail:** [evgeniya-shevchu@mail.ru](mailto:evgeniya-shevchu@mail.ru)

**Владимир Александрович Плотников**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики, Алтайский государственный университет  
**E-mail:** [plotnikov@phys.asu.ru](mailto:plotnikov@phys.asu.ru)

**Сергей Викторович Макаров**, д.ф.-м.н., профессор, декан Института цифровых технологий, электроники и физики, Алтайский государственный университет  
**E-mail:** [makarov@phys.asu.ru](mailto:makarov@phys.asu.ru)

**Evgeniya P. Shevchuk**, Senior Lecturer of the Chair of Physics, Eastern Kazakhstan State University; Senior Lecturer of the Chair of General and Experimental Physics, Altai State University  
**E-mail:** [evgeniya-shevchu@mail.ru](mailto:evgeniya-shevchu@mail.ru)

**Vladimir A. Plotnikov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of General and Experimental Physics, Altai State University  
**E-mail:** [plotnikov@phys.asu.ru](mailto:plotnikov@phys.asu.ru)

**Sergei V. Makarov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Dean of the Institute of Digital Technologies, Electronics and Physics, Altai State University  
**E-mail:** [makarov@phys.asu.ru](mailto:makarov@phys.asu.ru)

Поступила в редакцию 30.07.2021  
После доработки 31.08.2021  
Принята к публикации 27.09.2021

Received 30.07.2021  
Revised 31.08.2021  
Accepted 27.09.2021