

Исследование диффузионных боридных слоев стали 20, полученных микродуговой наплавкой

Е.П. Шевчук¹, В.А. Плотников², Г.С. Бектасова¹

¹Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова (Усть-Каменогорск, Казахстан)

²Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Study of Diffusion Boride Layers of Steel 20, Obtained by the Micro-Arc Surface

E.P. Shevchuk¹, V.A. Plotnikov², G.S. Bektasova¹

¹Sarsen Amanzholov East Kazakhstan State University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

²Altai State University (Barnaul, Russia)

Приведены результаты исследований борирования углеродистой стали 20 методом микродуговой химико-термической обработки шихты, содержащей железо и борную кислоту, выполненных в научных лабораториях ВКГУ им. С. Аманжолова. Установлено, что боридные диффузионные покрытия, полученные данным методом, характеризуются высокой твердостью — 3,5 ГПа и обширной диффузионной зоной. Обширная диффузионная зона представляет собой поверхностный слой стали, в котором соединения бора с железом распределены так, что формируется переходная область между упрочненной областью и матрицей. Материал диффузионной зоны представляет собой композит, состоящий из пластичной α -фазы железа и высокопрочных боридов железа. Рентгенографическое исследование диффузионной зоны позволило выявить образование соединений Fe_3B . Установлено, что наиболее оптимальный состав шихты содержит железо и борную кислоту в пропорции 1:3 ($Fe-25\%+H_3BO_3-75\%$).

Применение метода микродуговой наплавки позволяет интенсифицировать процесс диффузионного борирования по сравнению с традиционными методами и обеспечить формирование на поверхности стальных изделий упрочненного композиционного слоя с гетерогенной структурой, образованного по диффузионно-кристаллизационному механизму.

Ключевые слова: борирование, бориды, электродуговая обработка, наплавка, борсодержащая шихта, диффузия, микротвердость, рентгеноструктурный анализ, коэффициент диффузии, диффузионный слой.

We discuss the results of the study of carbon steel 20 boriding performed by the micro-arc chemical-thermal treatment of a mixture containing iron and boric acid. The study has been carried out in scientific laboratories of the EKSU named after S. Amanzholov. It is found out that boride diffusion coatings obtained by this method are characterized by high hardness of 3.5 GPa and have an extensive diffusion zone. The wide diffusion zone is a surface layer of steel in which the compounds of boron and iron are distributed so that a transition region is formed between the hardened region and the matrix. The material of the diffusion zone is a composite consisting of a plastic α -phase of iron and high strength iron borides. X-ray diffraction studies revealed the formation of Fe_3B compounds. It is found that the most optimal composition of the mixture contains iron and boric acid in a ratio of 1:3 ($Fe-25\% + H_3BO_3-75\%$).

The use of the micro-arc surfacing method makes it possible to intensify the process of diffusion boriding in comparison with traditional methods. Also, it ensures that a hardened composite layer with a heterogeneous structure formed by the diffusion-crystallization mechanism is developed on a surface of steel products.

Key words: boring, borides, electric arc treatment, surfacing, boron-containing charge, diffusion, microhardness, X-ray diffraction analysis, diffusion coefficient, diffusion layer.

Введение

Наряду с известными широко распространенными методами химико-термической обработки (цементацией, азотированием, нитроцементацией, цианированием) все большее внимание уделяется разработке новых методов поверхностного легирования металлов и сплавов. Одним из перспективных методов упрочнения является процесс диффузионного насыщения бором. В результате этого процесса на поверхности обрабатываемых изделий формируются химические соединения — бориды, обладающие высокими антикоррозионными и износостойкими характеристиками [1–2].

Борирование стали проводят различными способами для повышения ее поверхностной твердости, а соответственно, износостойкости, повышения коррозионной стойкости, окислительной стойкости (до 800 °С) и теплостойкости. Процесс борирования заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагревании в определенной среде.

В качестве преимущества борирования перед другими способами химико-термической обработки стоит отметить более высокую поверхностную твердость стали.

Таким образом, в ходе борирования образуется диффузионный слой, который, с одной стороны, обладает высокой твердостью, износостойкостью (главным образом, абразивной), коррозионной стойкостью, окислительной стойкостью (до 800 °С) и теплостойкостью, с другой стороны — очень хрупок. Поэтому одним из основных направлений повышения пластичности борированных слоев является применение концентрированных источников энергии, позволяющее принципиально изменить структуру слоя, морфо-

логию выделяющихся фаз, характер и распределение формирующихся соединений. Образование различных композиционных слоев дает возможность получать на упрочняемой поверхности диффузионные слои с регулируемой прочностью и пластичностью.

Эффективным способом концентрированного энергетического воздействия на поверхность стальных изделий является микродуговая химико-термическая обработка (МДХТО), предусматривающая электронагрев изделия [3] при помощи электрической дуги. Суть процесса наплавки состоит в проникновении расплавленных материалов борсодержащей шихты в поверхностный слой изделия на молекулярном уровне [4]. Борирование является достаточно эффективным и экономичным процессом по сравнению с традиционной химико-термической обработкой стали [5].

В данной работе в ходе микродуговой химико-термической обработки осуществляли введение в зону дуги борсодержащей шихты и флюса, что позволило повысить эксплуатационные характеристики наплавляемого слоя за счет формирования обширной диффузионной зоны в поверхностном слое матрицы.

Методика борирования

Для проведения экспериментальных работ была использована стальная труба (сталь 20) диаметром $d=25$ мм, из которой были подготовлены 4 вида образцов. Образцы готовились следующим образом. На цилиндрической трубе осуществляли наплавку по винтовой линии [4]. В зону соприкосновения электрода с поверхностью каждого из образцов поступала порошкообразная шихта, представляющая собой смесь из порошков железа и борной кислоты в трех комбинациях, смешанных в объемных пропорциях (табл. 1).

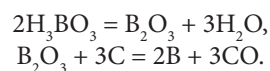
Таблица 1

Состав шихты [6]

№ образца	Процентное содержание компонентов пасты
1	Fe-75 % + H_3BO_3 -25 %
2	Fe-50 % + H_3BO_3 -50 %
3	Fe-25 % + H_3BO_3 -75 %
4	Исходный

Процесс по формированию покрытий с обширной диффузионной зоной проводился при помощи специальной установки, схема которой изображена на рисунке 1 [7].

Такой процесс характеризуется возникновением микродуговых разрядов, концентрирующихся в микрообъемах порошка вокруг изделия вследствие увеличения плотности тока в направлении от контейнера к образцу. Температура нагрева изделия составляет 900–1250 °С, однако локальный нагрев в местах контакта микродуг с поверхностью образца может достигать нескольких тысяч градусов [8]. При нагревании борной кислоты происходит образование борного ангидрида, который затем восстанавливается до атомарного состояния:



Атомарный бор диффундирует вглубь стального изделия, обеспечивая протекание процесса борирования.

В диффузионном слое в зависимости от применяемой технологии насыщения, от состава шихты, флюса и химического состава стали формируются двухфазные или однофазные покрытия, состоящие из боридов FeB и Fe_2B , под которыми располагается переходная зона — твердый раствор бора в α -железе.

Для рентгенографических исследований применяли дифрактометр X'Pert PRO.

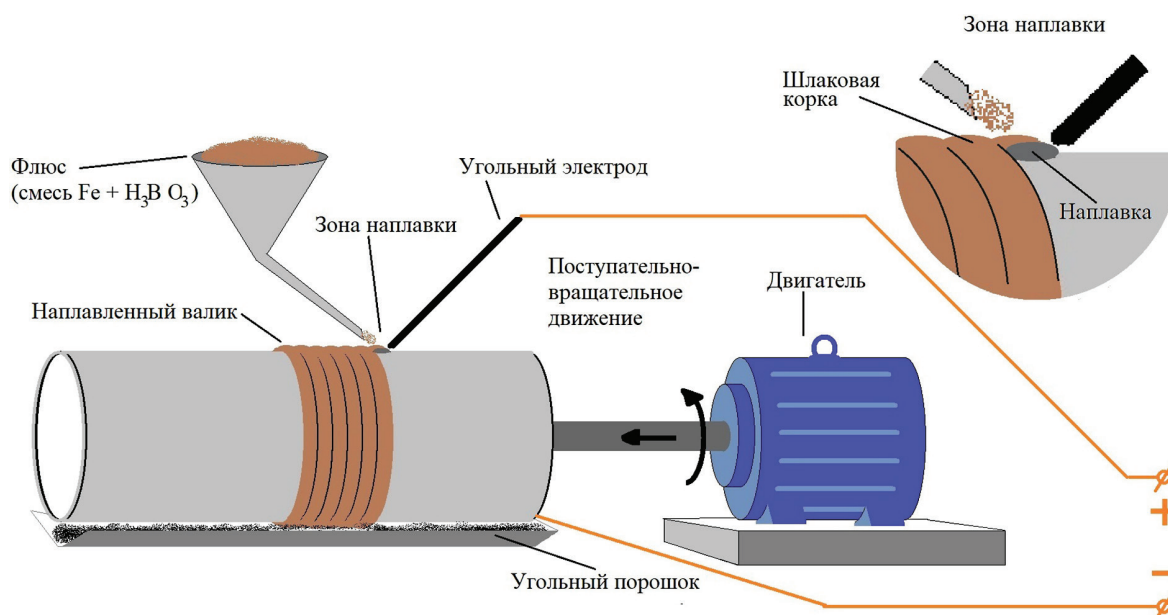


Рис. 1. Модель установки для проведения наплавки на поверхность стальной трубы

Экспериментальные результаты

Измерения микротвердости зоны наплавки образца 1 не показали существенных результатов.

Распределение микротвердости по сечению поверхностный слой — матрица углеродистой стали 20 в образцах 2 и 3 приведено на рисунке 2.

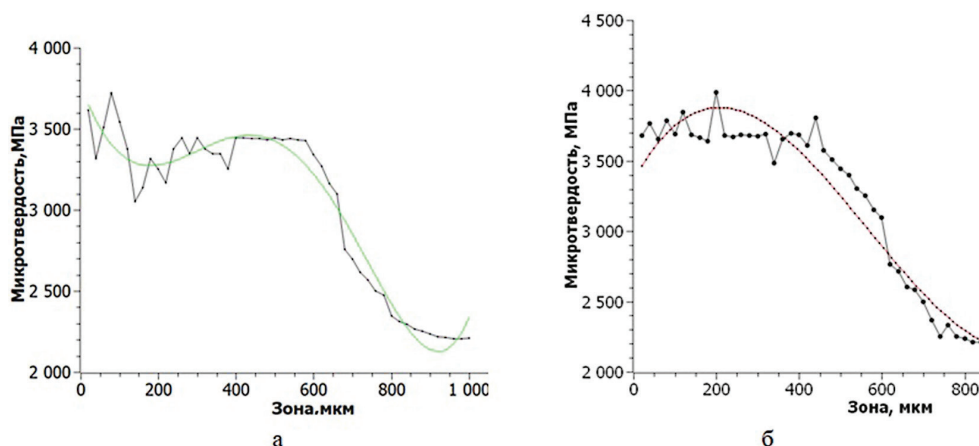


Рис. 2. Микротвердость образцов: а) образца 2; б) образца 3

Как следует из приведенных данных, наблюдается распределение микротвердости, представляющее собой обширную до 800–1000 мкм диффузионную зону, в которой диффузионным путем распределен бор.

Обсуждения

Измерения микротвердости боридных фаз показали, что микротвердость зоны наплавки образца 2 в среднем составила порядка 3,3–3,5 ГПа, а образца 3 — 3,4–3,5 ГПа (рис. 2), что выше примерно в 1,5 раза, чем микротвердость исходного образца стали 20, — 2207 МПа.

Распределение микротвердости по сечению наплавки позволяет определить толщину диффузионного слоя. За общую толщину слоя приняли расстояние

от поверхности до места совпадения микротвердости слоя и подложки образца.

Отметим, что толщина диффузных слоев каждого из исследуемых образцов составляет около 960 мкм и 880 мкм соответственно. Используя формулу (1) зависимости толщины диффузионного слоя от времени борирования [9], вычислим коэффициенты диффузии при электродуговом борировании образцов:

$$h^2 = 2D\tau h^2 = D \cdot \tau, \quad (1)$$

где h — толщина диффузионного покрытия, м; D — коэффициент диффузии, m^2/c ; τ — продолжительность процесса, с. Время прохождения процесса МДХТО составило $\tau = 54,05$ с.

Коэффициенты диффузии исследуемых образцов

	Размер диффузионной зоны, мкм	Температура, °C	Коэффициент диффузии бора, м ² /с
Параметры по литературе	–	950	$1,82 \cdot 10^{-11} - 1,53 \cdot 10^{-10}$
Образец 2	960	1250	$8,5 \cdot 10^{-9}$
Образец 3	880	1250	$7 \cdot 10^{-9}$

Коэффициент диффузии бора при 1250 °C на порядки величины выше значений коэффициента диффузии бора, указанного в литературе. Этот факт может свидетельствовать об аномально высоком процессе массопереноса бора в поверхностном слое стали 20.

Распределение микротвердости и образование фазы Fe₃B подчиняются закономерностям формирования обширной диффузионной зоны, а это говорит о том, что, во-первых, осуществляется аномальная диффузия, во-вторых, в ходе нагрева поверхности стального образца и шихты происходит сближение материала шихты на расстояние физической адсорб-

ции, что приводит к молекулярной адгезии между ними. Затем происходит химическое взаимодействие с переходом атомов через потенциальный барьер — образуется прочная межатомная связь, приводящая к взаимному растворению и диффузии атомов, что сопровождается формированием композиционной структуры в поверхностном слое. Адгезионный слой в данном случае — это слой наплавки, представляющий собой систему α-Fe + Fe₃B.

На рисунке 3 представлены сравнительные данные рентгеноструктурного анализа исходного образца и образцов 2 и 3.

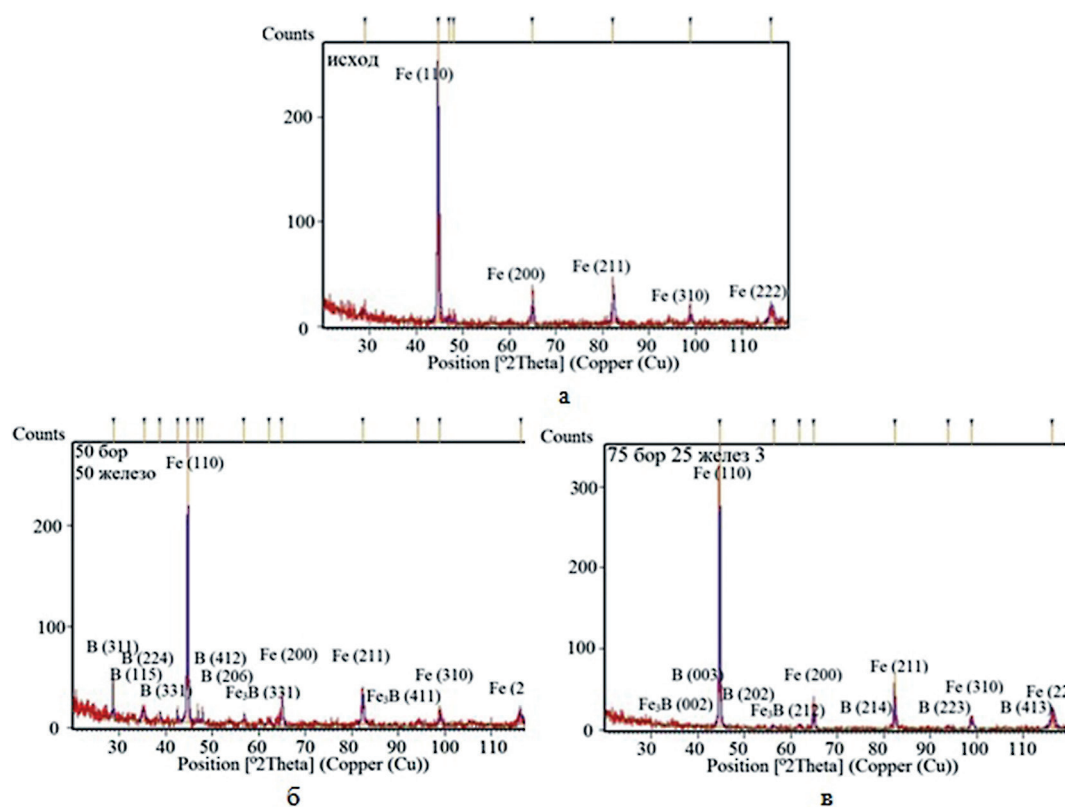


Рис. 3. Рентгеноструктурный анализ образцов:
а — исходного образца (стали 20); б — образца 2; в — образца 3

Из проведенного анализа следует, что в сплавах системы Fe-B при составе шихты 50 % борной кислоты и 50 % порошка Fe (образец 2) и составе 75 % борной кислоты и 25 % порошка Fe (образец 3) выявлено образование фаз боридов Fe₃B, представляющего

собой тройную фазу с большим содержанием бора, чем в FeB [10, 11].

В таблице 3 приведены соответствующие значения hkl и межплоскостные расстояния образовавшихся соединений боридов железа Fe₃B.

Расшифровка данных рентгеноструктурного анализа

	d	I	hkl
Fe ₃ B тетрагональная	1,634	18	002
	1,063	3	004
	1,019	1	114
	0,0906	1	152

Бориды типа Fe₃B существуют лишь в присутствии углерода. В этом случае Fe₃B являются продуктом замещения углерода бором и имеют формулу Fe₃(B,C). В фазе Fe₃(B,C) бор может замещать более 40 % атомов углерода, не изменяя ее кристаллическую структуру. Полученная фаза существует в термодинамическом равновесии при высоких температурах (1150–1250 °С) [12].

Заключение

Исследование диффузионной зоны при микродуговом борировании стали показало, что боридные диффузионные покрытия характеризуются высокой твердостью — 3,5 ГПа. Величина диффузионной зоны свидетельствует о наличии комплексного твердофаз-

ного механизма формирования борированного слоя за счет аномально высокого диффузионного массопереноса бора при микродуговом воздействии.

Рентгенографическое исследование зоны наплавки позволило выявить образование соединений Fe₃B. Опытным путем было выяснено, что наиболее эффективным является состав флюса, содержащий Fe-25%+H₃BO₃-75 %.

Применение микродуговой химико-термической обработки позволяет интенсифицировать процесс диффузионного борирования по сравнению с традиционными методами и обеспечить формирование на поверхности стальных изделий упрочненного композиционного слоя с гетерогенной структурой.

Библиографический список

1. Лахтин Ю.М. Основы металловедения : учеб. М., 1988.
2. Лабунец В.Ф. Износостойкие боридные покрытия : справ. пособие. К., 1989.
3. Домбровский Ю.М., Степанов М.С. Создание композитных диффузионных боридных покрытий при микродуговом упрочнении в порошковых средах // Известия ВолгГТУ. 2015. № 5 (160).
4. Наплавка металла: электродом и другие // Все о сварочных электродах. URL: <https://weldelec.com/info/kak-pravilno-varit/naplavka/>.
5. Бернштейн М.Л. Металловедение и термическая обработка стали. Изд-е перераб. и доп. М., 1991.
6. 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.
7. Шевчук Е.П., Плотников В.А. Композитные диффузионные боридные покрытия при микродуговом упрочнении в порошковых средах // Новые материалы и технологии : сборник научных статей III российско-казахстанской молодежной научно-технической конференции. Барнаул, 2015.
8. Домбровский Ю.М., Степанов М.С. Микродуговая цементация стальных изделий в порошковых средах // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 12.
9. Ворошнин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск, 1981.
10. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела : учебник. М., 2000.
11. Портной К.И., Левинская М.Х., Ромашов В.М. Диаграмма состояния Fe-B // Порошковая металлургия. 1969. № 8.
12. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. М., 2010.