

Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20. № 4. С. 546–550
Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2023; 4(20): 546–550

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 669.1, 621.78

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.014

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДИФфуЗИОННЫХ СЛОЕВ НА АРМКО-ЖЕЛЕЗЕ ПРИ ПОРОШКОВОМ БОРОМЕДНЕНИИ

Степан Алексеевич Лысых^{1†}, Ундрах Лхагвасуренович Мишигдоржийн²,
Василий Николаевич Корнопольцев³, Сяо Цзон Хе⁴, Юрий Петрович Хараев⁵

^{1,2} Институт физического материаловедения СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, 670047, Улан-Удэ, Россия

³ Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, 670047, Улан-Удэ, Россия

^{4,5} Подшипниковый завод Сансьон, Синьчан Дадаодонг шоссе, 881, 312500, Синьчан, КНР

¹ lsysh.stepa@yandex.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>

² undrakh@ipms.bscnet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>

³ kompo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1970-2945>

⁴ lsysh.stepa@yandex.ru

⁵ kharaev@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6449-4175>

Аннотация. В работе представлены результаты исследований диффузионных слоёв полученных на образцах из АРМКО-железа в порошковых смесях содержащих бор и медь. Целью являлось исследование влияния содержания меди в составе насыщающей смеси на строение, структуру и толщину диффузионного слоя. Подробно описана методика проведения эксперимента: описание составов насыщающей смеси, режимы проведения боромеднения, дальнейшие металлографические исследования и измерения микротвердости. Проведен сравнительный анализ литературных источников о состоянии и развитии ситуации с поверхностным упрочнением на машиностроительных предприятиях. В результате на образцах из АРМКО-железа были получены диффузионные слои толщиной от 120 до 220 мкм различные по структуре и строению. При толщине 120 мкм слой имеет «классическое» игольчатое строение, а при толщине в 220 мкм слой теряет игольчатую структуру и приобретает вид сплошного слоя с примыкающей перьевидной фазой. Увеличение концентрации меди в 3 раза (состав № 2) по сравнению с составом № 1 оказало влияние на распределение микротвердости. Разница между наибольшими значениями микротвердости незначительна, составляет 50 HV, но дальнейшее распределение имеет более плавный характер, без резких скачков или перепадов. Было установлено, что увеличение содержания меди в насыщающей смеси способствует увеличению толщины диффузионного слоя и изменению строения и структуры слоя. Также медь оказывает влияние на распределение микротвердости полученных диффузионных слоёв. При максимальной концентрации меди в составе насыщающей смеси микротвердость имеет более плавный характер распределения, без резких скачков и перепадов.

Ключевые слова: боромеднение, АРМКО-железо, диффузионный слой, микротвердость.

Для цитирования: Лысых С.А., Мишигдоржийн У.Л., Корнопольцев В.Н., Хе С.Ц., Хараев Ю.П. Исследование структуры диффузионных слоёв на АРМКО-железе при порошковом боромеднении // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 4. С. 546–550. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.014.

Original article

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF DIFFUSION LAYERS ON ARMCO-IRON DURING POWDER BOROCOPPERING

Stepan A. Lysykh^{1†}, Undrakh L. Mishigdorzhiiyn², Vasily N. Kornopol'tsev³,
Xiao Zhong He⁴, Yurii P. Kharaev⁵

^{1,2} Institute of Physical Materials Science SB RAS, Sakhyanovoy Str., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia

³ Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Sakhyanovoy Str., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia

^{4,5} Sanxiang Bearing Co., Ltd., Xinchang Dadaodong Road Xinchang County, 881, Xinchang, 312500, China

¹ lsysh.stepa@yandex.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>

² undrakh@ipms.bscnet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>

³ kompo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1970-2945>

⁴ lsysh.stepa@yandex.ru

⁵ kharaev@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6449-4175>

Abstract. The paper presents the results of studies of diffusion layers obtained on ARMCO-iron samples in powder mixtures containing boron and copper. The aim was to study the effect of the copper content in the saturating mixture on the structure, structure and thickness of the diffusion layer. The method of conducting the experiment is described in detail: description of the compositions of the saturating mixture, boromedning modes, further metallographic studies and microhardness measurements. A comparative analysis of literature sources on the state and development of the situation with surface hardening at machine-building enterprises is carried out. As a result, diffusion layers with a thickness of 120 to 220 μm different in structure and structure, were obtained on ARMCO-iron samples. With a thickness of 120 μm the layer has a «classic» needle-like structure, and with a thickness of 220 μm the layer loses its needle-like structure and takes the form of a continuous layer with an adjacent feathery phase. An increase in the concentration of copper by 3 times (composition No. 2) compared with composition No. 1 had an effect on the distribution of microhardness. The difference between the highest values of microhardness is insignificant, it is 50 HV, but the further distribution has a smoother character, without sudden jumps or differences. It was found that an increase in the copper content in the saturating mixture contributes to an increase in the thickness of the diffusion layer and a change in the structure and structure of the layer. Copper also influences the microhardness distribution of the obtained diffusion layers. At the maximum concentration of copper in the composition of the saturating mixture, the microhardness has a smoother distribution, without sudden jumps and drops.

Keywords: boromednenie, ARMCO-iron, diffusion layer, microhardness.

For citation: Lsykh, S. A., Mishigdorzhyn, U. L., Kornopol'tsev, V. N., He, X. Z. & Kharaev, Yu. P. (2023). Investigation of the structure of diffusion layers on ARMCO-iron during powder borocoppering. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(4), 546–550. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.014.

Введение

Повышение долговечности и срока службы деталей машин и инструмента является одной из самых важных задач современного материаловедения и науки в целом. Существует огромное количество таких методов, но одним из более распространенных является ХТО (химико-термическая обработка). За счет изменения структуры и химического состава поверхности, соответственно изменяются и его свойства, повышается ряд физико-механических характеристик [1-7]. Вместе с тем широкое применение получили только некоторые виды ХТО, такие как цементация, азотирование, нитроцементация. В большинстве крупных машиностроительных предприятиях имеются серийно выпускаемые промышленностью печи для насыщения углеродом и азотом в газовых средах. Данные процессы в основном используются для повышения износостойкости поверхностных слоев стальных изделий, причем для получения необходимого эффекта упрочнению подвергаются лишь стали определенного химического состава (низкоуглеродистые в случае цементации и нитроцементации и легированные, как правило, алюминием, хромом, молибденом, ванадием, вольфрамом, титаном при азотировании). В то же время такие процессы, как бо-

рирование, борохромирование, боросилицирование, бороалитирование, в значительно большей степени увеличивающие сопротивление изнашиванию, чем цементация, азотирование, нитроцементация, и обеспечивающие, кроме того, повышение коррозионной, жаро-, теплоустойчивости и ряда других свойств поверхностных слоев изделий из сплавов железа, используются в промышленности крайне редко. Это связано прежде всего с тем, что разработанные для их осуществления диффузионно-активные среды в большинстве случаев требуют применения сложного и дорогостоящего нестандартного оборудования [8].

Одним из перспективных методов химико-термической обработки является боромеднение. Процесс комплексного поверхностного упрочнения железуглеродистых сплавов бором и медью. В литературе данный процесс встречается редко и требует детального рассмотрения.

Целью данной работы является исследование структуры и строения диффузионных слоёв, полученных на поверхности технически чистого железа (АРМКО-железа) в порошковых насыщающих средах содержащих бор и медь, и исследование влияние меди на толщину и строение получаемых диффузионных слоёв.

Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала выступали образцы из технически чистого железа (ТЧЖ). Химический состав представлен в таблице 1.

Диффузионное насыщение проводилось в порошковых смесях содержащих бор и медь в определенном соотношении. Состав № 1 содержал 10 % CuO, состав № 2 – 30 % CuO. Карбид бора и алюминий – остальное. Образцы помещались в герметичный контейнер и засыпались насыщающей смесью. Для предотвра-

щения окислительных процессов поверхность контейнеров засыпали легкоплавким стеклом. Процесс проводился в течении 4-х часов при температуре 950 °С в муфельной печи. После контейнеры вынимались, охлаждались на воздухе и образцы следовали для дальнейшей подготовки к металлографическим исследованиям. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 2С. Измерения микротвердости были проведены на микротвердомере ПМТ-3М, нагрузка на алмазную пирамидку составляла 50 г.

Таблица 1. Химический состав АРМКО-железа, масс. %

Table 1. Chemical composition of ARMCO-iron, wt. %

Марка стали	Химический состав, масс. %							
	C	Mn	P	S	Ni	Cu	Sn	Fe
АРМКО-железо	0,020	0,2	0,015	0,015	0,007	0,06	,001	остальное

Результаты и их обсуждение

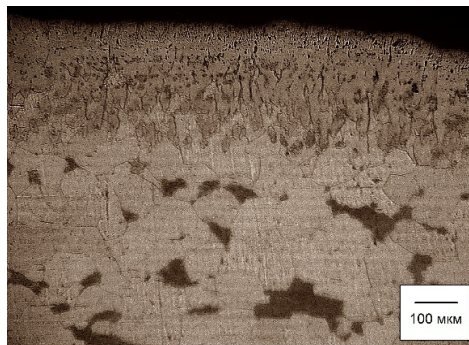
В результате проведения диффузионного насыщения образцов из АРМКО-железа в порошковых средах содержащих бор и медь, на поверхности были получены слои толщиной от 120 до 220 мкм (рис.1 и 2).

Введение в состав насыщающей смеси 10 % Си привело к формированию диффузион-

ного слоя толщиной 120 мкм (рис.1а). Слой имеет «классическое» игольчатое строение, Иглы на концах имеют скругления. Иглы расположены не перпендикулярно относительно поверхности образца, а под некоторым углом. Стоит отметить наличие сплошной зоны боридов, толщина которой составляет 40-80 мкм.



а)



б)

Рис.1. Микроструктура диффузионного слоя образцов из АРМКО-железа: а) при применении состава № 1, б) при применении состава № 2

Fig.1. Microstructure of the diffusion layer of samples from ARMCO-iron: а) when using composition No. 1, б) when using composition No. 2

Содержание в составе насыщающей смеси 30 % Си способствует образованию диффузионного слоя толщиной 210-220 мкм (рис.3). Диффузионный слой полностью теряет игольчатое строение и приобретает вид сплошного слоя с примыкающей перьевидной фазой. Стоит предположить, что это боридные включения, так как образование какой-либо легированной

фазы маловероятно из-за низкого содержания легирующих элементов в стали.

Микроструктура АРМКО-железа представляет собой зерна феррита или феррита с небольшим количеством третичного цементита [9]. После проведения боромеднения, количество третичного цементита непосредственно под слоем и в переходной зоне значительно увеличивается.

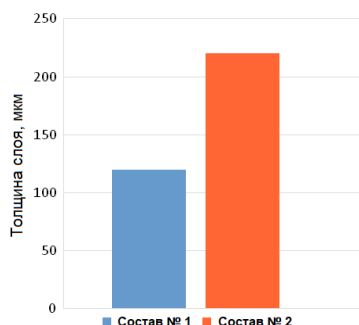


Рис.2. Толщина диффузионного слоя на образцах из АРМКО-железа в зависимости от состава насыщающей смеси

Fig.2. The thickness of the diffusion layer on samples of ARMCO-iron depending on the composition of the saturating mixture

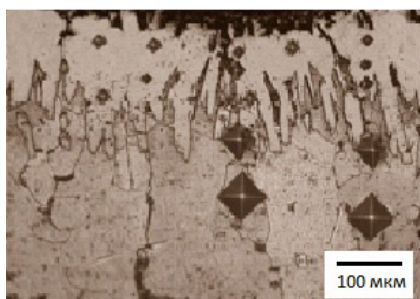


Рис.3. Распределение отпечатков по толщине диффузионного слоя образцов из АРМКО-железа

Fig.3. Distribution of imprints over the thickness of the diffusion layer from ARMCO-iron

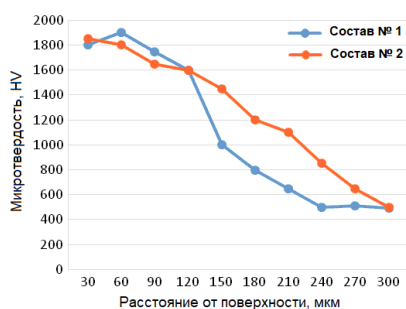


Рис.4. Распределение микротвердости на образцах из АРМКО-железа при использовании состава № 1 и № 2

Fig.5. Distribution of microhardness on samples from ARMCO-iron using compositions No. 1 and No. 2

Исследования определения микротвердости показали, что максимальное значение при использовании состава № 1 равнялось 1900 НВ (рис.4). Далее происходит снижение значений микротвердости и наблюдается резкое её снижение на границе слой-переходная зона. Твердость основы составила 490 НВ. Стоит отме-

тить, что микротвердость по всей толщине диффузионного слоя относится к фазе FeB. Резкий перепад значений микротвердости способствует к скалыванию слоя при ударных или переменных динамических нагрузках.

Микротвердость диффузионного слоя при использовании состава № 2 показана на рис.4. Максимальное значение отмечается на поверхности слоя и составляет 1850 НВ. Далее происходит плавное снижение микротвердости, без резких скачкообразных переходов. В данном случае можно предположить, что значения микротвердости соответствуют фазам FeB и Fe₂B, где преобладающей фазой является Fe₂B.

Выводы

1. Увеличение концентрации меди в составе насыщающей смеси приводит к увеличению толщины диффузионного слоя.

2. Лавирование меди в составе смеси оказывает влияние на структуру и строение слоя.

3. Наиболее благоприятное распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя наблюдается при использовании состава № 2, с максимальным содержанием меди в составе насыщающей смеси.

Материалы, представленные в данной статье, докладывались на XXII Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств» (11-13 августа 2023 г., г. Барнаул).

Список литературы

1. Одарченко В.И., Казначеева Д.А., Щербakov В.Г. Исследование борирования сплавов на железной основе при различных температурах // В сб. трудов межд. науч. конференции «XXIII Туловские чтения (школа молодых ученых)». Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. С. 328–332.

2. Гуляшинов П.А., Мишигдоржийн У.Л., Улаханов Н.С. Влияние борирования и алитирования на структуру и микротвердость низкоуглеродистых сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24, № 2. С. 91–101.

3. Корнопольцев В.Н., Мосоров В.И. Получение комплексных боридных покрытий и исследование насыщающей способности смесей при повторных использованиях // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 403–411.

4. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Лыгденев Б.Д., Власова О.А., Кошелева Е.А. и др. Влияние параметров борохромирования на структуру стали и

физико-механические свойства диффузионного слоя // Ползуновский вестник. 2007. № 3. С. 28–34.

5. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Власова О.А. Совершенствование технологии химико-термической обработки инструментальных сталей // Обработка металлов. 2009. Т. 42, № 1. С. 14–15.

6. 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.

7. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Кошелева Е.А., Власова О.А., Гурьев М.А. Комплексное насыщение сталей бором и хромом – борохромирование // Ползуновский альманах. 2008. № 3. С. 53–54.

8. Иванов С.Г., Гармаева И.А., Андросов А.П., Зобнев В.В., Гурьев М.А., Марков В.А. Фазовые превращения и структура комплексных боридных покрытий // Ползуновский вестник. 2012. № 1–1. С. 106–108.

9. Маслов Ю.Н., Ситов Н.Н., Жукова М.Н. Электротехническое и конструкционное материаловедение: учебное пособие/ ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019. 109 с.

Информация об авторах

С. А. Лысых – младший научный сотрудник Института физического материаловедения СО РАН.

У. Л. Мишигдоржийн – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института физического материаловедения СО РАН.

В. Н. Корнопольцев – кандидат технических наук, научный сотрудник Байкальского института природопользования СО РАН.

С. Ц. Хе – инженер Подшипникового завода Сансьон.

Ю. П. Хараев – кандидат технических наук, Подшипникового завода Сансьон.

References

1. Odarchenko, V. I., Kaznacheyeva, D. A. & Shcherbakov, V. G. (2017). Issledovaniye borirovaniya splavov na zheleznoy osnove pri razlichnykh temperaturakh. V sb. trudov mezhd. nauch. konferentsii «XXIII Tupolevskiy chteniya (shkola molodykh uchenykh)». Kazan': KNITU-KAI. P. 328–332. (In Russ.).

2. Gulyashinov, P. A., Mishigdorzhiiyn, U. L. & Ulakhanov, N. S. (2022). Vliyaniye borirovaniya i alitirovaniya na strukturu i mikrotverdst'

nizkouglerodistykh staley. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovaniye, instrumenty)*, 24(2), 91–101. (In Russ.).

3. Kornopol'tsev, V. N. & Mosorov, V. I. (2014). Polucheniyе kompleksnykh boridnykh pokrytiy i issledovaniye nasyshchayushchey sposobnosti smesey pri povtornykh ispol'zovaniyakh. Aktual'nyye problemy v mashinostroyenii, (1), 403–411. (In Russ.).

4. Gur'yev, A. M., Ivanov, S. G., Lygdenov, B. D., Vlasova, O. A. & Kosheleva, E. A. et al. (2007). Vliyaniye parametrov borokhromirovaniya na strukturu stali i fiziko-mekhanicheskiye svoystva diffuzionnogo sloya. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 28–34. (In Russ.).

5. Gur'yev, A. M., Lygdenov, B. D. & Vlasova, O. A. (2009). Sovershenstvovaniye tekhnologii khimiko-termicheskoy obrabotki instrumental'nykh staley. *Obrabotka metallov*, 42(1), 14–15. (In Russ.).

6. Gur'yev, A. M., Lygdenov, B. D., Gur'yev, M. A., Mey, Shunchi & Vlasova, O. A. (2015). Borirovaniye malouglerodistoy stali. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*, (12–4), 572–573. (In Russ.).

7. Ivanov, S. G., Gur'yev, A. M., Kosheleva, E. A., Vlasova, O. A. & Gur'yev, M. A. (2008). Kompleksnoye nasyshcheniye staley borom i khromom – borokhromirovaniye. *Polzunovskiy al'manakh*, (3), 53–54. (In Russ.).

8. Ivanov, S. G., Garmayeva, I. A., Androsov, A. P., Zobnev, V. V., Gur'yev, M. A. & Markov, V. A. (2012). Fazovyye prevrashcheniya i struktura kompleksnykh boridnykh pokrytiy. *Polzunovskiy vestnik*, (1–1), 106–108. (In Russ.).

9. Maslov, Yu. N., Sitov, N. N. & Zhukova, M. N. (2019). Elektrotekhnicheskoye i konstruksionnoye materialovedeniye: uchebnoye posobiye/ VSHTTE SPbGUPTD. SPb. P. 109. (In Russ.).

Information about the authors

S. A. Lysykh – Junior Researcher, Institute of Physical Materials Science SB RAS.

U. L. Mishigdorzhiiyn – Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, Institute of Physical Materials Science SB RAS.

V. N. Kornopol'tsev – Candidate of Technical Sciences, Researcher, Baikal Institute of Nature Management SB RAS.

X. Z. He – Engineer, Sanxiong Bearing Co., Ltd.

Yu. P. Kharaev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Sanxiong Bearing Co., Ltd.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 25.07.2023; одобрена после рецензирования 21.08.2023; принята к публикации 04.09.2023.

The article was received by the editorial board on 25 July 23; approved after reviewing 21 Aug. 23; accepted for publication 04 Sept. 23.