

УДК 621.785

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ БОРИДНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЕЙ 45 И У10

© 2024 г. С. А. Лысых^{a,*}, П. В. Москвин^b, М. С. Воробьев^b, В. Н. Корнопольцев^c,
У. Л. Мишигдоржийн^a, Ю. П. Хараев^d, А. С. Милонов^a

^aИнститут физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047 Россия

^bИнститут сильноточной электроники СО РАН, Томск, 634055 Россия

^cБайкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, 670047 Россия

^dВосточно-Сибирский государственный университет технологий и управления СО РАН, Улан-Удэ, 670013 Россия

*e-mail: lysyh.stepa@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.01.2024 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 20.03.2024 г.

Представлены результаты поверхностного упрочнения образцов сталей 45 и У10 комплексным насыщением бором и медью, а также последующим воздействием на слой электронного пучка при использовании источника с плазменным катодом в целях повышения ряда физико-механических свойств боридных слоев, в частности пластичности и износостойкости. Проведен сравнительный анализ строения диффузационного слоя после боромеднения и последующей модификации этого слоя электронным пучком. Проанализирована морфология диффузационного слоя, исследованы микротвердость, элементный и фазовый составы. Проведена оценка пластичности полученных диффузационных слоев до и после обработки электронным пучком.

Ключевые слова: боромеднение, сталь 45, сталь У10, диффузионный слой, микроструктура, микротвердость, пластичность, электронно-пучковая обработка.

DOI: 10.31857/S1028096024120091, EDN: QWTTFF

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наиболее перспективными технологиями поверхностного упрочнения деталей являются методы физико-химического модифицирования, т.е. целенаправленное изменение свойств поверхности материала в результате внешнего технологического воздействия. К таким способам относится химико-термическая обработка. В результате диффузии легирующего элемента возможно получение диффузационных слоев различной толщины, твердости и функционального назначения. К самому известному методу химико-термической обработки, безусловно, можно отнести борирование, под которым следует понимать диффузионное насыщение поверхности железоуглеродистых сплавов бором при нагреве и выдерживании в активной среде. После борирования на поверхности сплавов образуются слои повышенной твердости, износостойкости,

обладающие рядом других повышенных физико-механических свойств. Однако борирование имеет и несколько отрицательных характеристик, сказывающихся на работоспособности упрочненных деталей. К ним следует отнести высокую хрупкость, вследствие которой возможно образование трещин и дальнейшее скальвание боридного слоя и отделение от основы металла [1–5].

Для снижения ряда отрицательных характеристик борирования отечественными и зарубежными учеными разработаны технологии комплексного насыщения поверхностей железоуглеродистых сплавов бором совместно с другими элементами (алюминием, хромом, титаном и другими элементами). В результате комплексного насыщения на поверхности стальных образцов формируются двухфазные слои на основе бора (FeB и Fe_2B). В некоторых случаях высококорицтвая фаза FeB может полностью отсутствовать,

поэтому слои, состоящие из фазы Fe_2B , имеют меньшую микротвердость, увеличенную пластичность. В результате проблемы трещинообразования и скальвания диффузационного слоя частично решаются.

В последние годы большой научный задел был получен при обработке поверхностных слоев металлических материалов с применением нескольких технологий, одна из которых — обработка электронным пучком. Применение сразу нескольких методов обработки позволяет минимизировать недостатки, присущие отдельно взятым технологиям [6].

Целью настоящей работы было исследование строения диффузационных слоев после комплексного насыщения поверхности образцов сталей 45 и У10 с последующей модификацией импульсным электронным пучком.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалами исследования были углеродистая конструкционная сталь 45 и инструментальная сталь У10, химический состав которых представлен в табл. 1.

Процесс поверхностного диффузационного насыщения образцов бором и медью проводили в порошковой насыщающей смеси состава 62% $\text{B}_4\text{C} + 17\% \text{CuO} + 19\% \text{Al} + 2\% \text{NaF}$. Образцы погружали в контейнер и засыпали насыщающей смесью. Для предотвращения попадания кислорода поверх контейнера засыпали легкоплавкое стекло. Исходя из данных [7–9] оптимальное время выдерживания составляло 4 ч. Процесс проводили в муфельной печи ЭКПС-50 при температуре 950°C. Далее контейнер вынимали и охлаждали на открытом воздухе. После образцы подготавливали к металлографическим исследованиям.

Для обработки электронным пучком боромедленного слоя использовали источник электронов “СОЛО” с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления (рис. 1) [10, 11]. Этот источник в составе одноименной экспериментальной установки входит в Комплекс

уникальных электрофизических установок России “УНИКУУМ” в Институте сильноточной электроники СО РАН.

Обработку электронным пучком проводили в среде аргона при давлении в вакуумной камере 35 мПа в магнитном поле с индукцией до 100 мТл. Энергия электронов в процессе обработки достигала 25 кэВ, диаметр пучка электронов составлял около 3 см. Ток пучка изменяли в течение импульса длительностью 950 мкс в пределах 20–120 А таким образом, чтобы температура на поверхности образца через 150 мкс после начала воздействия составляла около 1500°C. Исследуемую область образцов подвергали воздействию трех импульсов, временной интервал между которыми составлял 3 с. Характерные осцилограммы представлены на рис. 2.

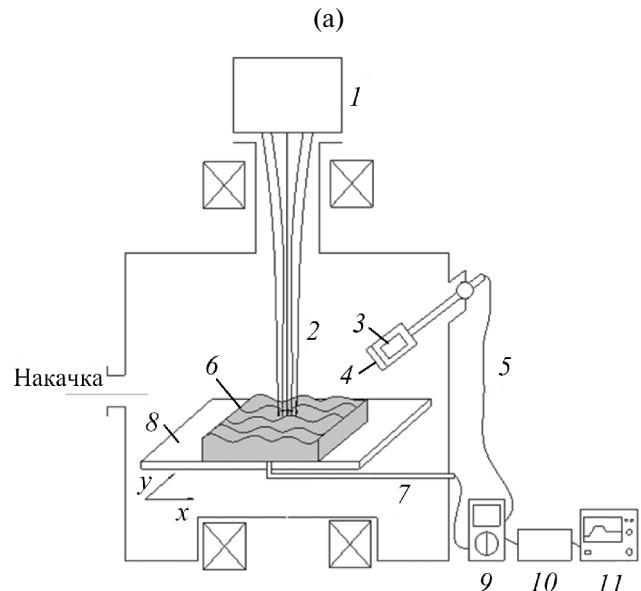
Металлографические исследования выполняли на оптическом микроскопе “Альтами МЕТ 2С”. Микротвердость и балл хрупкости определяли на микротвердомере ПМТ-3М, нагрузка на алмазную пирамидку составляла 50 и 200 г. Элементный анализ исследовали в растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JCM-6510LV с элементным дисперсионным анализатором в ЦКП “Прогресс” ВСГУТУ. Для изучения структуры протравленной поверхности образцов использовали режим детектирования вторичных электронов. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре D2 Phaser с линейным детектором LYNXEYE. Шаг измерения составлял 0.02°, время обработки одного шага 1.2 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате поверхностного упрочнения бором и медью образцов сталей 45 и У10 были получены диффузионные слои толщиной 130–145 мкм (рис. 3). Диффузионный слой, полученный на образце стали 45 (рис. 3а), имеет компактное строение, т.е. иглы боридов располагаются перпендикулярно плоскости поверхности, плотно прижимаясь к друг другу. Концы игл имеют скругленную форму. Это объясняется влиянием легирующих элементов (углерода, никеля

Таблица 1. Химический состав сталей 45 и У10

Марка стали	Химический состав, мас. %					
	C	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe
Сталь 45	0.42–0.5	0.5–0.8	до 0.25	до 0.25	до 0.25	97
Сталь У10	0.96–1.03	0.17–0.33	до 0.25	до 0.2	до 0.25	97



(б)



Рис. 1. Схема обработки в импульсной электронно-лучевой установке (а) и внешний вид установки “СОЛО” (ИСЭ СО РАН) (б): 1 — плазменный катод; 2 — электронный пучок; 3 — линза; 4 — кварцевое стекло; 5 — оптоволоконный кабель; 6 — образец; 7 — термопара; 8 — стол-манипулятор; 9 — мультиметр; 10 — высокоскоростной инфракрасный пирометр; 11 — осциллограф.

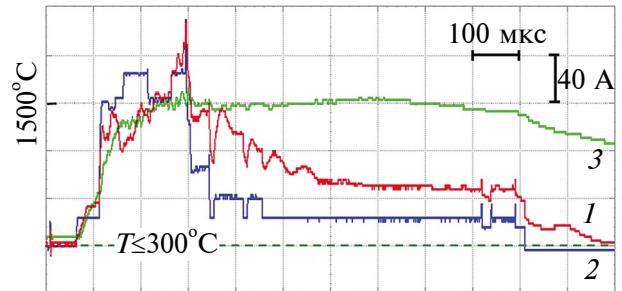


Рис. 2. Характерные осциллограммы тока разряда I_d (1) плазменного катода, тока в цепи ускоряющего промежутка источника электронов I_g (2) и выходного сигнала высокоскоростного пирометра T [$^{\circ}$ C] (3): $T = 300 + 400n_{\text{кл}}$, где $n_{\text{кл}}$ — число клеток.

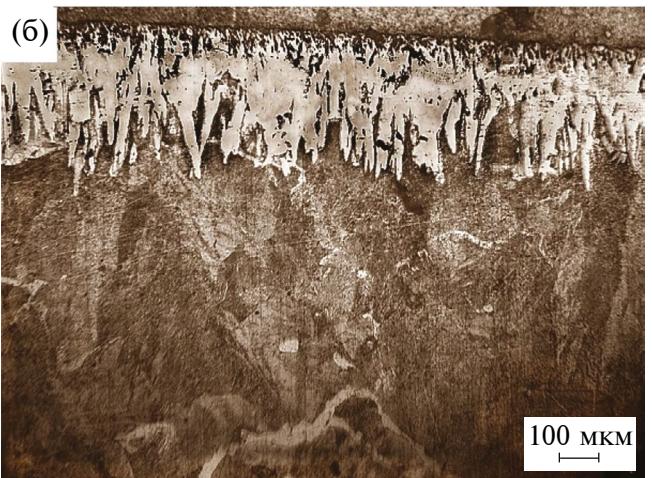
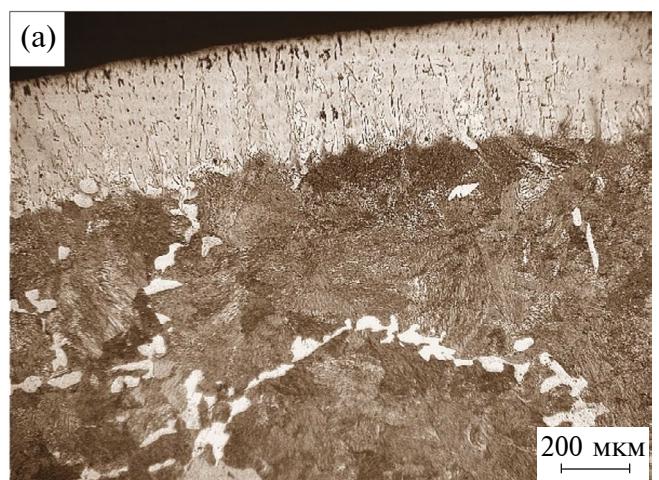


Рис. 3. РЭМ-изображение диффузионного слоя сталей 45 (а) и У10 (б) после комплексного поверхностного насыщения бором и медью.

или хрома), оттесненных при диффузии бора или содержащихся в стали в виде карбидов, которые тормозят продольный рост боридного слоя [12].

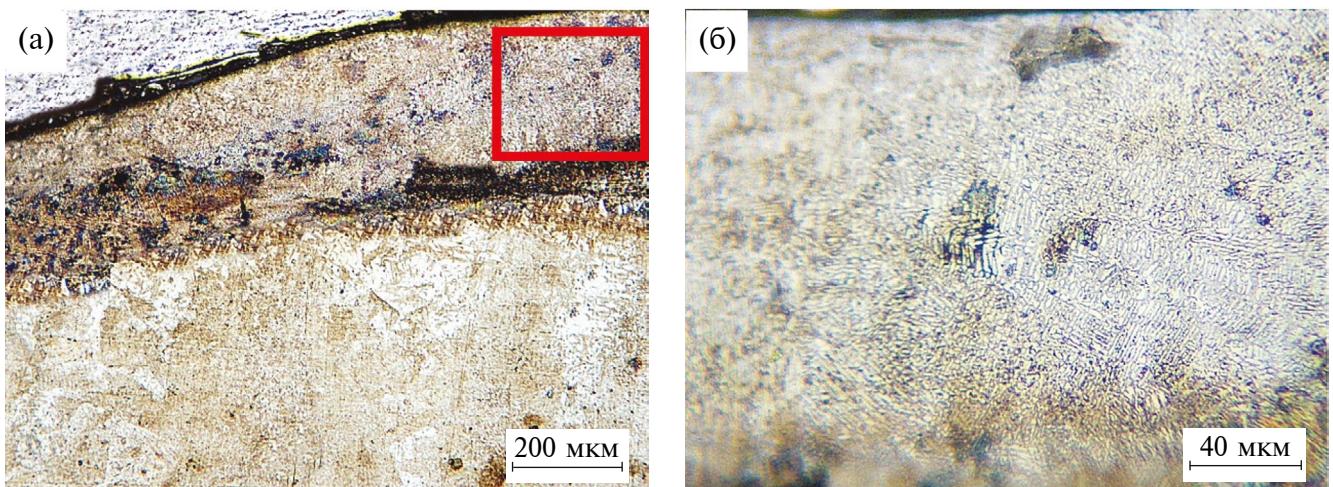


Рис. 4. РЭМ-изображение образца стали 45 после боромеднения с последующей обработкой электронным пучком (а) и увеличенный участок, выделенный квадратом (б).

Диффузионный слой стали У10, наоборот, в отличие от слоя стали 45 не имеет компактного строения (рис. 3б). Концы игл скруглены, а их рост происходит не только по нормали к поверхности, но и под некоторым углом [5]. Отличительной особенностью является глубокое внедрение игл в основу стали, что многие авторы считают причиной прочного сцепления диффузионного слоя с металлической основой [13–15].

В результате воздействия электронного пучка на поверхности образца стали 45 был получен диффузионный слой толщиной 165 мкм (рис. 4). Прирост составил 35 мкм. Слой теряет игольчатую структуру, становится сплошным и приобретает темный цвет, который отчетливо виден после травления. На границе слой–основа наблюдается переходная зона

в виде концов боридных игл. Диффузионный слой на поверхности образца стали У10 после обработки электронным пучком, как и в случае стали 45, становится сплошным (рис. 5). Толщина составляет 185 мкм, что на 40 мкм больше по сравнению с боромеднением. На границе слой–основа наблюдаются концы боридных игл толщиной 20–40 мкм.

Максимальная микротвердость сплошного слоя на поверхности образца стали 45 после обработки электронным пучком снижается до 1380 HV по сравнению с 1800 HV после боромеднения, а микротвердость слоя на поверхности образца стали У10 существенно снижается до 1390 HV (рис. 6). Далее следует плавное снижение твердости без резких перепадов. После боромеднения микротвердость составила 1900 HV.

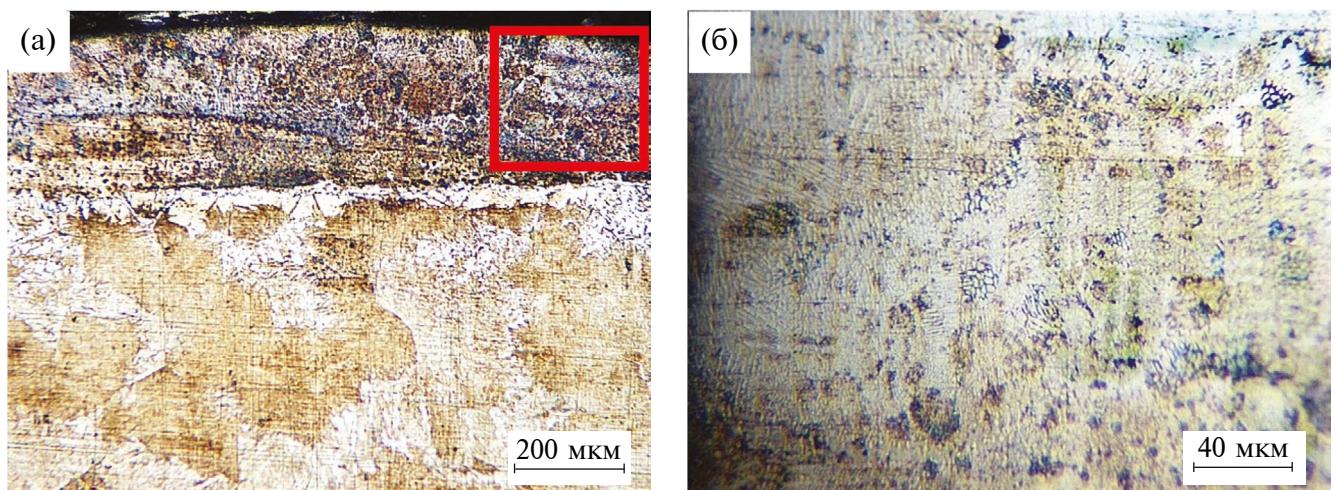


Рис. 5. РЭМ-изображение образца стали У10 после боромеднения с последующей обработкой электронным пучком (а) и увеличенный участок, выделенный квадратом (б).

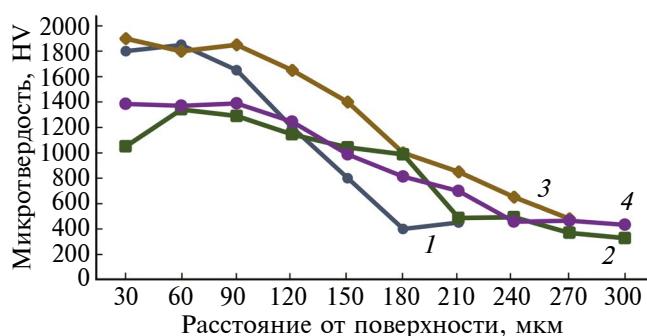


Рис. 6. Распределение микротвердости образцов сталей 45 (1, 2) и У10 (3, 4) после химико-термической обработки (1, 3) и боромеднения с последующей обработкой электронным пучком (2, 4).

Таблица 2. Элементный состав диффузионного слоя на поверхности образца стали 45 после боромеднения совместно с обработкой электронным пучком (мас. %)

Номер спектра	C	Cr	B	Mn	Ni	Cu	Fe
1	0.54	0.18	11.21	0.25	0.12	0.22	87.48
2	0.68	0.17	7.64	0.18	0.09	0.12	91.12
3	0.37	0.12	7.83	0.16	0.11	0.16	91.25
4	0.42	0.14	—	0.43	0.16	0.06	98.79
5	0.46	0.16	—	0.38	0.18	0.03	98.79

Таблица 3. Элементный состав диффузионного слоя на поверхности образца стали марки У10 после боромеднения совместно с обработкой электронным пучком (мас. %)

Номер спектра	C	Cr	B	Mn	Ni	Cu	Fe
1	0.87	0.14	10.46	0.18	0.14	0.14	88.07
2	0.73	0.12	8.39	0.21	0.11	0.08	90.36
3	0.76	0.08	8.03	0.2	0.09	—	90.84
4	0.89	0.16	—	0.28	0.14	—	98.53
5	0.82	0.18	—	0.3	0.16	0.16	98.38

Элементный анализ образца стали 45 после боромеднения совместно с обработкой электронным пучком показал, что концентрация бора в слое после воздействия электронного пучка снижается и достигает 11.21 мас. % (табл. 2). В слое присутствуют углерод, хром, марганец и никель. На поверхности также обнаружена медь в количестве 0.22 мас. %.

По данным элементного анализа диффузионного слоя на поверхности образца стали У10 при боромеднении совместно с обработкой электронным пучком концентрация бора уменьшилась до 10.46 мас. % (табл. 3). Углерод в максимальном количестве присутствует на поверхности и под диффузионным слоем. Также слой легирован всеми элементами, входящими в состав стали.

Рентгенофазовый анализ показал, что диффузионный слой стали 45 состоит из фаз Fe_2B , AlB_2 и AlCu (рис. 7). Алюминий в состав стали 45 не входит, его присутствие в поверхностном слое может быть вызвано попаданием из насыщаю-

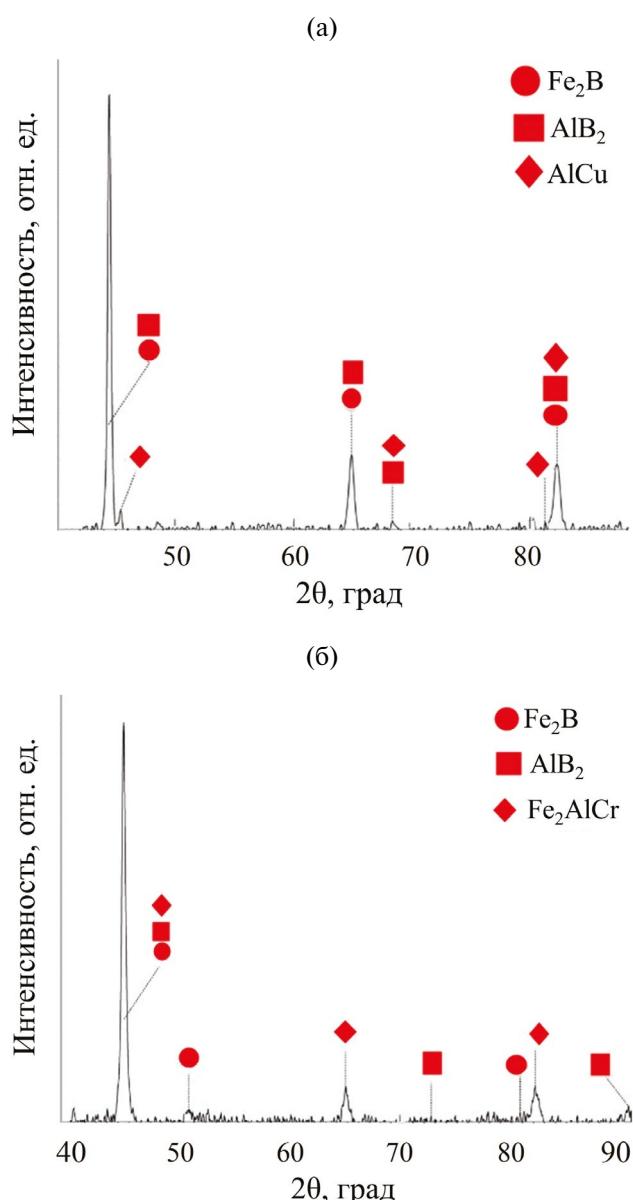


Рис. 7. Дифрактограммы образцов сталей 45 (а) и У10 (б).

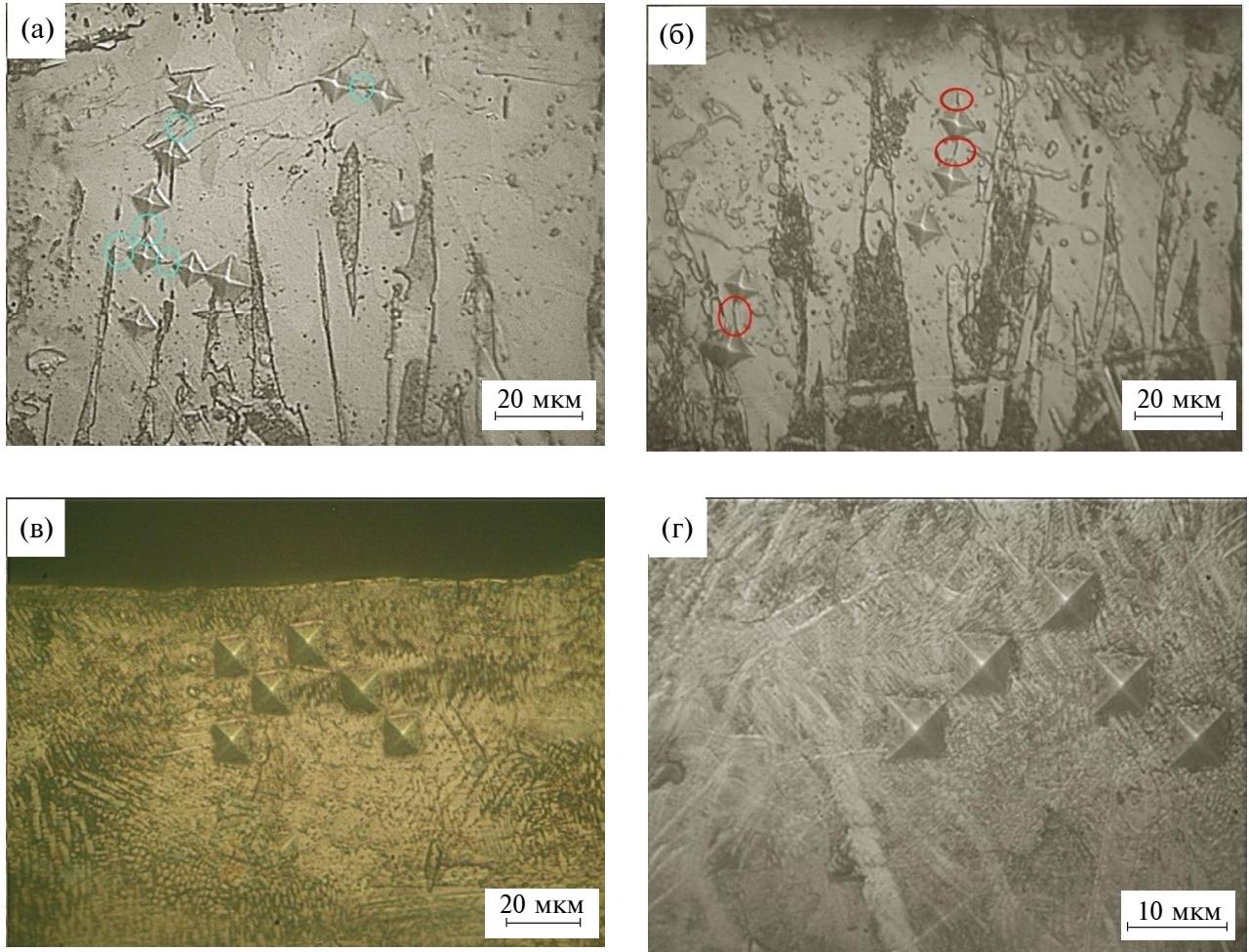


Рис. 8. РЭМ-изображения сталей 45 (а, в) и У10 (б, г) в ходе измерения предельной пластичности после: а – борированием; б – боромеднении; в, г – боромеднения с последующей обработкой электронным пучком.

щей смеси при химико-термической обработке. Наличие фазы FeB не подтверждено, о чем свидетельствует табл. 2, количество бора соответствует только фазе Fe₂B. Диффузационный слой стали У10 состоит из фаз Fe₂B, AlB₂ и Fe₂AlCr. Предположительно, диффузационный слой был легирован алюминием в процессе химико-термической обработки.

На рис. 8 изображены отпечатки, определяющие хрупкость диффузационных слоев на образцах сталей 45 и У10 после борирования (рис. 8а), боромеднения (рис. 8б) и боромеднения совместно с обработкой электронным пучком (рис. 8в, г). Для оценки хрупкости диффузационных слоев определяли предельную пластичность $\epsilon_{\text{пред}}$ по формуле $\epsilon_{\text{пред}} = D_{\text{отп}} / L_{\text{тр}}$ [16], где $D_{\text{отп}}$ – диагональ отпечатка, $L_{\text{тр}}$ – длина трещины между отпечатками (рис. 8а, б, табл. 4). Из результатов исследований следует, что по сравнению с борированием при боромеднении величина пластической деформации увеличивается в 1.7–1.8 раз. Вероятно, это связано

Таблица 4. Результаты измерения предельной пластичности

$D_{\text{отп}}$	$L_{\text{тр}}$	$\epsilon_{\text{пред}}$
Борирование (рис. 8а)		
3.85	3.09	1.24
4.01	2.96	1.35
3.25	2.61	1.25
3.65	2.82	1.29
Боромеднение (рис. 8б)		
5.33	2.98	1.79
7.16	3.26	2.19
6.83	3.27	2.08
8.21	3.76	2.18

Примечание. После боромеднения совместно с обработкой электронным пучком трещины между отпечатками не обнаружены (рис. 8в, г).

с образованием фазы Fe₂B. После боромеднения с последующим воздействием электронного пучка трещины между отпечатками не обнаружены (рис. 8в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате боромеднения толщина диффузионного слоя стала 130–145 мкм, при последующем воздействии электронного пучка прирост толщины составил 35–40 мкм.

Микротвердость слоя после обработки электронным пучком снизилась до 1380 HV по сравнению с боромеднением, после которого максимальное значение микротвердости составило 1900 HV.

Предельная пластичность при боромеднении в 1.7–1.8 раз выше по сравнению с чистым борированием. После боромеднения совместно с обработкой электронным пучком трещины между отпечатками не обнаружены, что свидетельствует о высокой пластичности модифицированного слоя, превосходящей пластичность исходного диффузионного слоя.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10163-П) и в рамках государственного задания БИП СО РАН № 0273-2021-0007.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Куркина Л.А., Федотов Н.И., Бутуханов В.А. // Обработка металлов (технология—оборудование—инструменты). 2012. № 2 (55). С. 62.
2. Одарченко В.И., Казначеева Д.А., Шербаков В.Г. // XXIII Туполевские чтения (Школа молодых ученых). Т. 1. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2017. С. 328.
3. Гуляшинов П.А. // Обработка металлов (технология—оборудование—инструменты). 2022. № 2 (24). С. 91.
4. Мустафина Т.В., Мустафин Г.А., Марширов И.В. // Ползуновский вестн. 2015. № 3. С. 15. http://elib.altstu.ru/journals/Files/archive/pv/2015/PV_3_2015.pdf
5. Крукович М.Г. // Евразийский союз ученых. 2020. № 10 (79). С. 30. <http://doi.org/10.31618/ESU/2413-9335.2020.6.79.1075>
6. Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. // Ползуновский вестн. 2022. № 3. С. 204. <http://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028>
7. Астрашаб Е.В., Шербаков В.Г. // XXIII Туполевские чтения (Школа молодых ученых). Т. 1. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2017. С. 230.
8. Корнопольцев В.Н., Мосоров В.И. // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 403.
9. Галынская Н.А., Кухарева Н.Г., Нисс В.С., Петрович С.Н. // Вестн. БНТУ. 2011. № 4. С. 15.
10. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.V. // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. P. 243. <http://doi.org/10.1017/S026303460321212X>
11. Vorobyov M.S., Moskvin P.V., Shin V.I., Koval N.N., Ashurova K.T., Doroshkevich S.Yu., Devyatkov V.N., Torba M.S., Levanisov V.A. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 10. С. 38. <http://doi.org/10.21883/PJTF.2021.10.50972.18719>
12. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Грешилов А.Д., Земляков С.А. // Обработка металлов. 2011. № 3 (52). С. 35.
13. Nokhrina O.I., Gizatulin R.A., Golodova M.A., Proshunin I.E., Valuev D.V., Martyushev N.V., Karlina A.I. // Metallurgist. 2022. V. 65. № 11–12. P. 1429. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01289-z>
14. Mishigdorzhbyn U., Chen Y., Ulakhanov N., Liang H. // Lubricants. 2020. V. 8. Iss. 3. P. 26. <http://doi.org/10.3390/lubricants8030026>
15. Шевчук Е.П., Плотников В.А., Бектасова Г.С. // Изв. АлтГУ. Физика. 2021. № 1 (117). С. 64. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2021\)1-10](https://doi.org/10.14258/izvasu(2021)1-10)
16. Скуднов В.А. Предельные пластические деформации металлов. М.: Металлургия, 1989. 176 с.

ELECTRON BEAM MODIFICATION OF BORIDE DIFFUSION LAYERS ON THE SURFACE OF STEELS 45 AND U10

S. A. Lysykh^{1,*}, P. V. Moskvin², M. S. Vorobyov², V. N. Kornopoltsev³,
U. L. Mishigdorzhiiyn¹, Yu. P. Kharaev⁴, A. S. Milonov¹

¹*Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, 670047 Russia*

²*Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, 634055 Russia*

³*The Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, 670047 Russia*

⁴*East Siberia State University of Technology and Management SB RAS, Ulan-Ude, 670013 Russia*

*e-mail: lysyh.stepa@yandex.ru

We present the results of surface hardening of samples made of steels 45 and U10 by complex saturation with boron and copper, as well as subsequent processing of the layer with an electron beam using a source with a plasma cathode in order to increase a number of physical and mechanical properties of boride layers, in particular ductility and wear resistance. A comparative analysis of the structure of the diffusion layer after borocoppering and subsequent modification of this layer with an electron beam was carried out. The morphology of the diffusion layer was analyzed. Microhardness, elemental and phase compositions were studied. The plasticity of the resulting diffusion layers was evaluated before and after electron beam processing.

Keywords: borocoppering, steel 45, steel U10, diffusion layer, microstructure, microhardness, plasticity, electron beam processing.