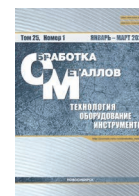




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)















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



Влияние продолжительности боромеднения на толщину диффузионного слоя и микротвердость углеродистых и легированных сталей

Степан Лысых^{1, a, *}, Василий Корнопольцев^{2, b}, Ундрах Мишигдоржийн^{1, c}, Юрий Хараев^{3, d},
 Александр Тихонов^{4, e}, Владимир Иванцовский^{5, f}, Никита Вахрушев^{5, g}

- ¹ Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия
² Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия
³ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская 40В, г. Улан-Удэ, 670013, Россия
⁴ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, г. Иркутск, 664074, Россия
⁵ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

- ^a  <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>,  lysyh.stepa@yandex.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-1970-2945>,  kompo@mail.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>,  undrakh@ipms.bsnet.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0001-6449-4175>,  kharaev@inbox.ru,
^e  <https://orcid.org/0000-0002-4917-9916>,  tihonovalex90@mail.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>,  ivancivskij@corp.nstu.ru,
^g  <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>,  vah_nikit@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669.1; 66.040

История статьи:

Поступила: 15 декабря 2022
 Рецензирование: 09 января 2023
 Принята к печати: 03 февраля 2023
 Доступно онлайн: 15 марта 2023

Ключевые слова:

Химико-термическая обработка (ХТО)
 Боромеднение
 Диффузионный слой
 Углеродистая сталь
 Легированная сталь
 Микротвердость
 Шероховатость

Финансирование:

Исследование углеродистых сталей 45 и У10 выполнено в рамках государственного задания БИП СО РАН № 0273-2021-0007. Исследование легированной стали 5ХНМ выполнено при финансовом обеспечении гранта Российского научного фонда (проект 19-79-10163-П).

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034) и ЦКП «Научные приборы» Бурятского государственного университета им. Доржи Банзарова. Авторы выражают благодарность Улаханову Николаю Сергеевичу и Гуляшинову Павлу Анатольевичу за помощь в координации экспериментальных исследований.

АННОТАЦИЯ

Введение. Боромеднение – один из способов химико-термической обработки (ХТО), направленный на получение диффузионных слоев с высокими физико-механическими свойствами на поверхности углеродистых и легированных сталей. Толщина диффузионного слоя является наиболее важной характеристикой ХТО, которая определяет глубину упрочнения. Следовательно, интенсивность и основные характеристики процесса ХТО (толщина слоя, распределение концентрации легирующего элемента) будут зависеть от условий проведения процесса (температуры, времени выдержки и количества легирующего элемента). **Целью настоящей работы** является определение температурно-временных параметров диффузионного боромеднения, способствующих получению диффузионных слоев с максимальной толщиной. **В работе рассмотрены** результаты исследований по упрочнению углеродистых и легированных сталей (на примере стали 45, У10 и 5ХНМ) нагревом в порошковых насыщающих смесях, содержащих бор и медь. Процесс боромеднения проводили в герметичных контейнерах с порошковой насыщающей смесью, состоящей из карбида бора, оксида меди и фторида натрия в качестве активатора при температуре 950 °С, в течение 3...5 ч. Полученные образцы с диффузионным слоем исследовали на оптическом и растровом электронном микроскопе (РЭМ); определены микротвердость, элементный и фазовый состав слоев, а также шероховатость полученных поверхностей. **Результаты и обсуждения.** Исследована микроструктура полученных диффузионных слоев, показаны диаграммы изменения толщины слоев и распределения микротвердости по глубине диффузионных слоев. Установлено, что при увеличении времени выдержки с 3 до 5 часов толщина диффузионного слоя возрастает от 120 до 170 мкм на стали 45; от 110 до 155 мкм на стали У10 и от 130 до 230 мкм на стали 5ХНМ. Выявлено постепенное снижение концентрации бора и меди по толщине слоя с 15...16 % и 2...3 % на поверхности соответственно до нулевых значений на границе с основным металлом. Установлено, что процесс боромеднения приводит к созданию более протяженных по глубине боридных слоев на поверхности углеродистых и легированных сталей по сравнению с чистым борированием. Причем увеличение продолжительности выдержки при проведении процесса способствует наибольшему увеличению толщины слоя на стали 5ХНМ. Проведено исследование микрогеометрии, показаны микрофотографии и профилограммы поверхностей образцов до и после боромеднения. Установлено, что шероховатость после боромеднения увеличивается в 2-3 раза по сравнению с исходной, а увеличение продолжительности процесса при этом не оказывает существенного влияния на шероховатость.

Для цитирования: Влияние продолжительности боромеднения на толщину диффузионного слоя и микротвердость углеродистых и легированных сталей / С.А. Лысых, В.Н. Корнопольцев, У.Л. Мишигдоржийн, Ю.П. Хараев, А.Г. Тихонов, В.В. Иванцовский, Н.В. Вахрушев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 131–148. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.1-131-148.

*Адрес для переписки

Лысых Степан Алексеевич, м.н.с.
 Институт физического материаловедения
 Сибирского отделения Российской академии наук,
 ул. Сахьяновой 6,
 670047, г. Улан-Удэ, Россия
 Тел.: 8-924-397-24-76, e-mail: lysyh.stepa@yandex.ru.

Введение

Задачи повышения надежности, работоспособности и долговечности деталей машин, конструкций и инструмента относятся к числу первоочередных задач в науке и технике. Для решения этих задач требуется разработка и внедрение эффективных методов, которые позволяют повысить многие эксплуатационные характеристики (коррозионную стойкость и износостойкость) путем поверхностного упрочнения.

Одним из распространенных методов поверхностного упрочнения является химико-термическая обработка (ХТО), которая направлена на повышение широкого спектра физико-механических свойств при эксплуатации деталей машин и инструмента. Сущность любого метода ХТО заключается в термическом и химическом воздействии на материал с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя.

Из анализа литературных данных следует, что одним из самых распространенных методов ХТО является борирование [1–6]. Процесс борирования известен более полувека, но применяется не так широко по сравнению с цементацией [7–10], азотированием и нитроцементацией [11–14]. В результате насыщения железуглеродистых сплавов бором на поверхности формируются слои, обладающие высокой твердостью (1600...2000 HV). Сдерживающим фактором широкого распространения борирования в машиностроении является высокая хрупкость и склонность к трещинообразованию поверхностных слоев после различных химико-термических способов обработки [15–17]. Существует

несколько способов снижения хрупкости боридного слоя:

- 1) получение однофазных слоев, которые состоят из фазы Fe_2B ;
- 2) получение более тонких слоев;
- 3) использование в составе насыщающей смеси совместно с бором таких элементов, как хром, медь, никель, алюминий и др. [21–24].

Особый интерес представляет один из методов ХТО – боромеднение. Данный метод направлен на увеличение толщины диффузионного слоя, а также на повышение пластичности диффузионного слоя. Авторами работ [21–23] установлено, что увеличение концентрации меди в составе насыщающей смеси способствует увеличению толщины диффузионного слоя.

Целью данной работы является исследование строения диффузионного слоя в зависимости от времени проведения комплексного насыщения поверхности образцов из стали 45, У10 и 5ХНМ бором и медью.

Методика исследований

Процесс диффузионного насыщения проводился в порошковой среде. В качестве исследуемых образцов использовались стали 45, У10 и 5ХНМ, химический состав которых представлен в табл. 1.

Насыщающая смесь включала в себя порошок карбида бора, алюминия и оксида меди. Фтористый натрий выступал активатором процесса насыщения.

Состав насыщающей смеси имел следующее процентное содержание компонентов: 47 % B_4C + 28 % CuO + 23 % Al + 2 % NaF . Оптимальное

Таблица 1

Table 1

Химический состав стали 45, У10 и 5ХНМ, масс. %

Chemical composition of Steel 45 (0.45% C), Steel U10 (1.0% C), and 0.5C-Cr-Ni-Mn steel, wt. %

Марка стали / Steel grade	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe	Mo
Сталь 45	0,42...0,5	0,17...0,37	0,5...0,8	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,25	~97	–
Сталь У10	0,96...1,03	0,17...0,33	0,17...0,33	до 0,25	до 0,028	до 0,03	до 0,2	до 0,25	~97	–
Сталь 5ХНМ	0,5...0,6	0,1...0,4	0,5...0,8	1,4...1,8	до 0,03	до 0,03	0,5...0,8	до 0,3	~95	0,15...0,3

количество оксида меди было выбрано исходя из работ [21–23], где были получены диффузионные слои с максимальной толщиной.

Подготовленные образцы помещали в контейнер, засыпали насыщающей смесью (рис. 1, а) и убирали в муфельную печь (рис. 1, б). Для предотвращения окислительных процессов, крышку контейнера герметизировали легкоплавким стеклом. Диффузионное насыщение проводилось при температуре 950 °С, в течение 3, 4 и 5 часов. Далее контейнер охлаждался на воздухе, образцы извлекались из него, очищались от остатков насыщающей смеси. Затем следовала подготовка образцов к металлографическим исследованиям.

Образцы закрепляли в струбицы, затем проводилось шлифование и полирование. Для выявления микроструктуры исследуемых образцов использовался химически активный раствор, состоящий из азотной кислоты (4 %) и спирта

(остальное). Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 2С, измерения микротвердости – на микротвердомере ПМТ-3М, нагрузка на алмазную пирамидку составляла 50 г. Элементный анализ исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JCM-6000 с элементным дисперсионным анализатором. Для изучения структуры протравленную поверхность образцов изучали в режиме вторичных электронов. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре D2 PHASER с линейным детектором LYNXEYE. Шаг измерения равнялся 0,02°, время обработки одного шага составляло 1,2 с. Исследование топографии с определением параметров шероховатости поверхностей полученных образцов осуществляли на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1 с программным обеспечением Vision64 [24, 25].



а



б

Рис. 1. Упакованные контейнеры (а), муфельная печь ЭКПС-50 (б)

Fig. 1. Packed containers (а), muffle furnace EKPS-50 (б)

Результаты и их обсуждение

В результате диффузионного поверхностного насыщения образцов бором и медью в течение часов были получены диффузионные слои толщиной от 110 до 130 мкм (рис. 2).

После проведения диффузионного боромеднения в течение 4 часов на поверхности образцов были получены диффузионные слои толщиной 140...220 мкм (рис. 3).

На рис. 2, а показан диффузионный слой стали 45 толщиной 120 мкм с твердостью 1800...1600 НВ. Диффузионный слой имеет «классическое» для боридного слоя строение в

виде игл. Характерной особенностью является глубокое внедрение игл в основу стали. Многие авторы считают, что это является причиной прочного сцепления диффузионного слоя с основой металла [26–29]. При этом иглы на концах имеют скругления. Наблюдается выделение карбоборидной фазы непосредственно от боридных игл, твердость которых составила 1200...1750 НВ. Переходная зона между слоем и основой стали не отличается от ферритно-перлитной структуры основы.

После проведения боромеднения стали 45 в течение 4 часов толщина слоя составила 140 мкм, что на 20 мкм больше по сравнению с

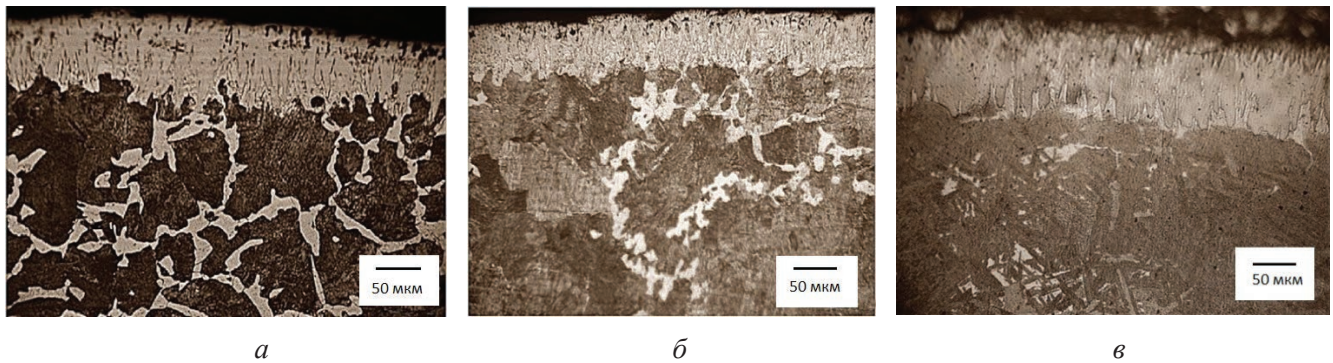


Рис. 2. Микроструктура диффузионного слоя после комплексного поверхностного насыщения бором и медью в течение 3 часов выдержки:

a – сталь 45, толщина слоя 120 мкм; *б* – сталь У10, толщина слоя 110 мкм; *в* – сталь 5ХНМ, толщина слоя 130 мкм

Fig. 2. Microstructure of the diffusion layer after complex surface saturation with boron and copper for 3 hours of soaking:

a – Steel 45 (0.45 % C), layer thickness is 120 μm; *б* – Steel U10 (1.0 % C), layer thickness is 110 μm; *в* – 0.5 C-Cr-Ni-Mn steel, layer thickness is 130 μm

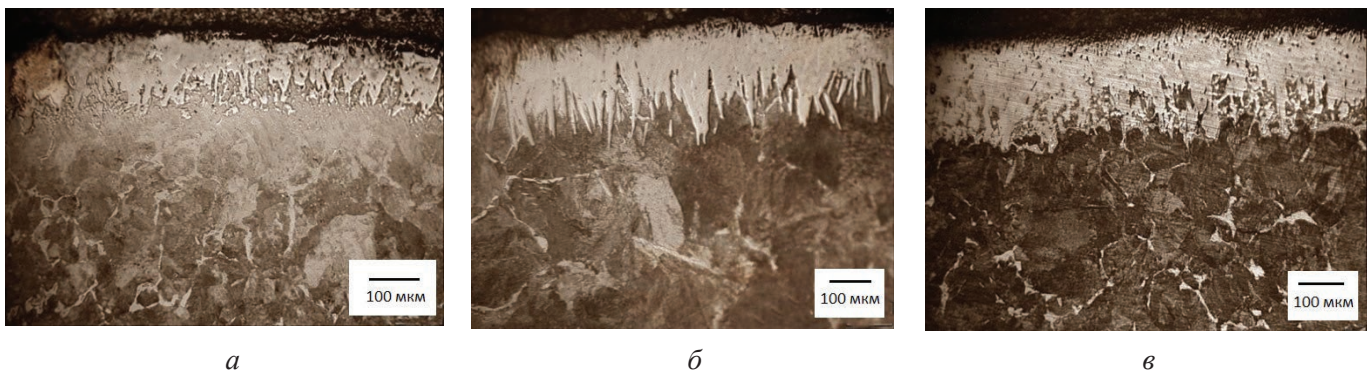


Рис. 3. Микроструктура диффузионного слоя после комплексного поверхностного насыщения бором и медью в течение 4 часов выдержки:

a – сталь 45, толщина слоя 160 мкм; *б* – сталь У10, толщина слоя 140 мкм; *в* – сталь 5ХНМ, толщина слоя 220 мкм

Fig. 3. Microstructure of the diffusion layer after complex surface saturation with boron and copper for 4 hours of soaking:

a – Steel 45 (0.45 % C), layer thickness is 160 μm; *б* – Steel U10 (1.0 % C), layer thickness is 140 μm; *в* – 0.5C-Cr-Ni-Mn steel, layer thickness is 220 μm

выдержкой в 3 часа (рис. 3, *a*). Микротвердость составила 2000 HV на поверхности с последующим снижением до 1600 HV на границе раздела слой–основание. Наблюдается срастание игл у основания с образованием сплошного слоя. Отсутствует примыкающая к боридным иглам карбоборидная фаза. Переходная зона представлена более явно в виде светлой ферритной прослойки, где максимальная концентрация бора достигает 4 %, далее она постепенно снижается по направлению к сердцевине образца. Структура стали сохраняет избыточный феррит (светлые включения), наблюдается также мартенсит с небольшим содержанием остаточного аустенита.

На поверхности инструментальной углеродистой стали У10 после 3 часов ХТО получен диффузионный слой толщиной 110 мкм, твердость которого составила 1975...1575 HV (рис. 2, *б*). Слой состоит из плотно прижатых друг к другу игл с невыраженной переходной зоной, которая представляет собой перлит с малым содержанием бора. Структура стали состоит из пластинчатого перлита, окруженного тонкой цементитной сеткой. Необходимо отметить наличие светлых скоагулированных включений, по-видимому, являющихся аустенитом.

После боромеднения стали У10 в течение 4 часов получен диффузионный слой толщиной

140 мкм, что на 30 мкм больше по сравнению с выдержкой данной стали в течение 3 часов (рис. 3, б). Увеличилась незначительно и микротвердость до 2050 HV на поверхности слоя с последующим снижением до 1600 HV на границе с основным металлом. Микроструктура свидетельствует о срастании игл и получении сплошного слоя в верхней и средней части слоя с сохранением игольчатой структуры на границе с основой. Наличие переходной зоны не наблюдается, а микроструктура основы представлена пластинчатым перлитом с цементитной сеткой.

Металлографические исследования структуры и диффузионного слоя стали 5ХНМ показали наличие диффузионного слоя толщиной 130 и 220 мкм при 3- и 4-часовом боромеднении соответственно (рис. 2, б и 3, б). Микротвердость составила 1800...1500 HV при 3-часовой выдержке и 2000...1650 HV при выдержке в течение 4 часов.

При проведении диффузионного насыщения бором и медью образцов из сталей 45, У10 и 5ХНМ в течение 5 часов наблюдается увеличение толщины диффузионного слоя на 10...15 мкм (рис. 5). На рис. 4, а изображена структура стали 45, где в отличие от предыдущих режимов боромеднения слой имеет ярко выраженное игольчатое строение в виде укрупненных игл с прямолинейным направлением к сердцевине образца. Отмечается увеличение микротвердости в

приповерхностной части слоя, где ее максимальное значение равно 2100 HV (рис. 6, а).

На поверхности образцов из стали У10 после 5-часового боромеднения диффузионный слой теряет игольчатое строение и приобретает вид сплошного слоя, о чем свидетельствует рис. 4, б. Прирост толщины составил 15 мкм, а максимальное значение микротвердости было равно 2000 HV (рис. 6, б).

Незначительные изменения структуры диффузионного слоя после 5-часового боромеднения претерпевают образцы из стали 5ХНМ (рис. 4, в). Толщина слоя была увеличена на 10 мкм (рис. 5). Игольчатое строение слоя остается неизменным, но наблюдается укрупнение игл. Стоит также отметить, что непосредственно к боридным иглам примыкают некоторые выделения, предположительно карбоборидного строения, которые имеют направление под некоторым углом относительно самих игл. Микротвердость и характер ее распределения остаются без изменений (рис. 6, в).

Увеличение содержания углерода в сталях 45 и У10 снижает среднюю толщину слоя при обоих выдержках. На стали 5ХНМ толщина слоя наибольшая, несмотря на промежуточное содержание углерода (рис. 4). Вероятно, легирующие элементы в стали играют роль в интенсификации диффузии при боромеднении.

На рис. 6 видно, что распределение микротвердости после боромеднения в течение 3, 4 и

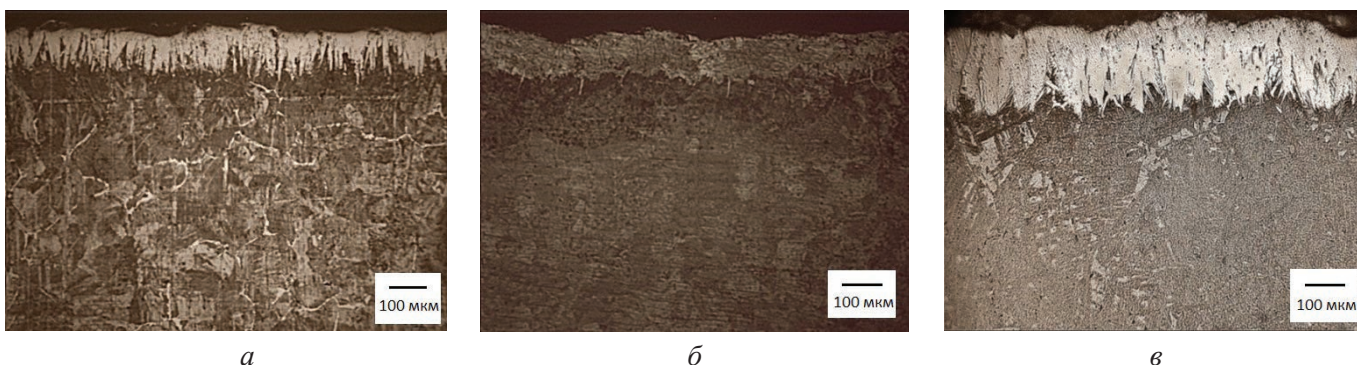


Рис. 4. Микроструктура диффузионного слоя после комплексного поверхностного насыщения бором и медью в течение 5 часов выдержки:

а – сталь 45, толщина слоя 170 мкм; б – сталь У10, толщина слоя 155 мкм; в – сталь 5ХНМ, толщина слоя 230 мкм

Fig. 4. Microstructure of the diffusion layer after complex surface saturation with boron and copper for 5 hours of exposure:

а – Steel 45 (0.45 % C), layer thickness is 170 μm; б – Steel U10 (1.0 % C), layer thickness is 155 μm; в – 0.5C-Cr-Ni-Mn steel, layer thickness is 230 μm

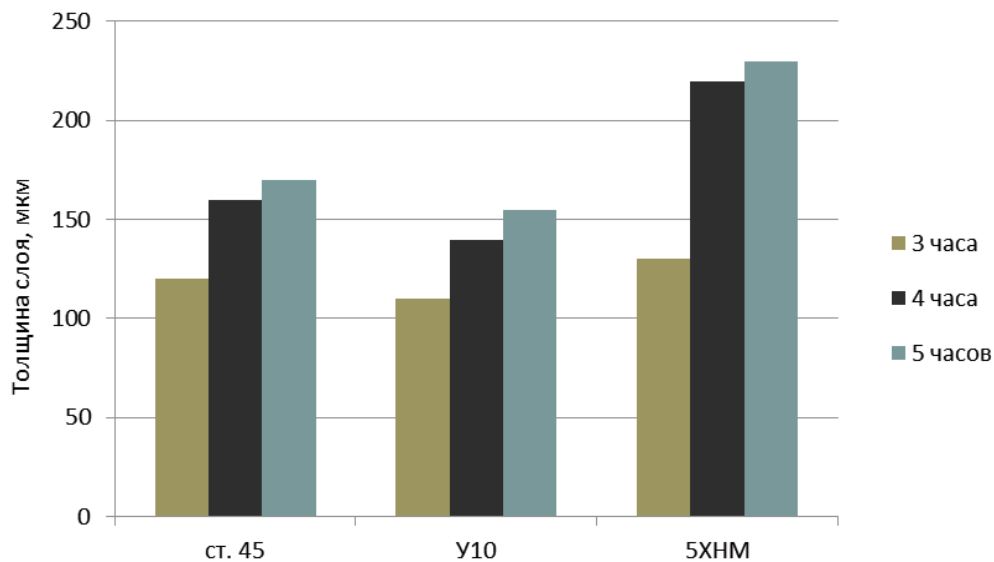


Рис. 5. Толщина диффузионного слоя, полученного в результате боромеднения образцов из стали 45, У10, 5ХНМ в течение 3, 4 и 5 часов

Fig. 5. The thickness of the diffusion layer formed after borocoppering of Steel 45 (0.45 % C), Steel U10 (1.0 % C), and 0.5C-Cr-Ni-Mn steel for 3, 4 and 5 hours

5 часов на всех сталях схожее и характеризуется плавным снижением значений от поверхности к основному металлу. Необходимо отметить, что микротвердость всех образцов по всей толщине слоя после 5-часового боромеднения выше на 100...150 HV по сравнению с микротвердостью образцов после боромеднения в течение 3 и 4 часов. Предположительно, что это связано с ростом содержания более твердой фазы FeV после 5-часового боромеднения.

Данные, приведенные в табл. 2 и на рис. 7, а, подтверждают наличие бора и меди в диффузионном слое на исследуемом образце из стали 45. Наблюдается уменьшение концентрации бора и меди по направлению от поверхности к границе раздела с основой. Углерод оттесняется в переходную зону, где его концентрация максимальна и составляет 0,56 %. Никель и марганец практически равномерно распределены по всей толщине диффузионного слоя. Наличие хрома обнаружено в переходной зоне. Следовательно, элементный анализ показывает характер распределения легирующих элементов, соответствующих химическому составу стали 45.

Результаты, представленные в табл. 3 и на рис. 7, б для стали У10, указывают на наличие бора на поверхности в количестве 16,81 % и постепенное снижение его концентрации до 0,68 %. Максимальное количество меди наблю-

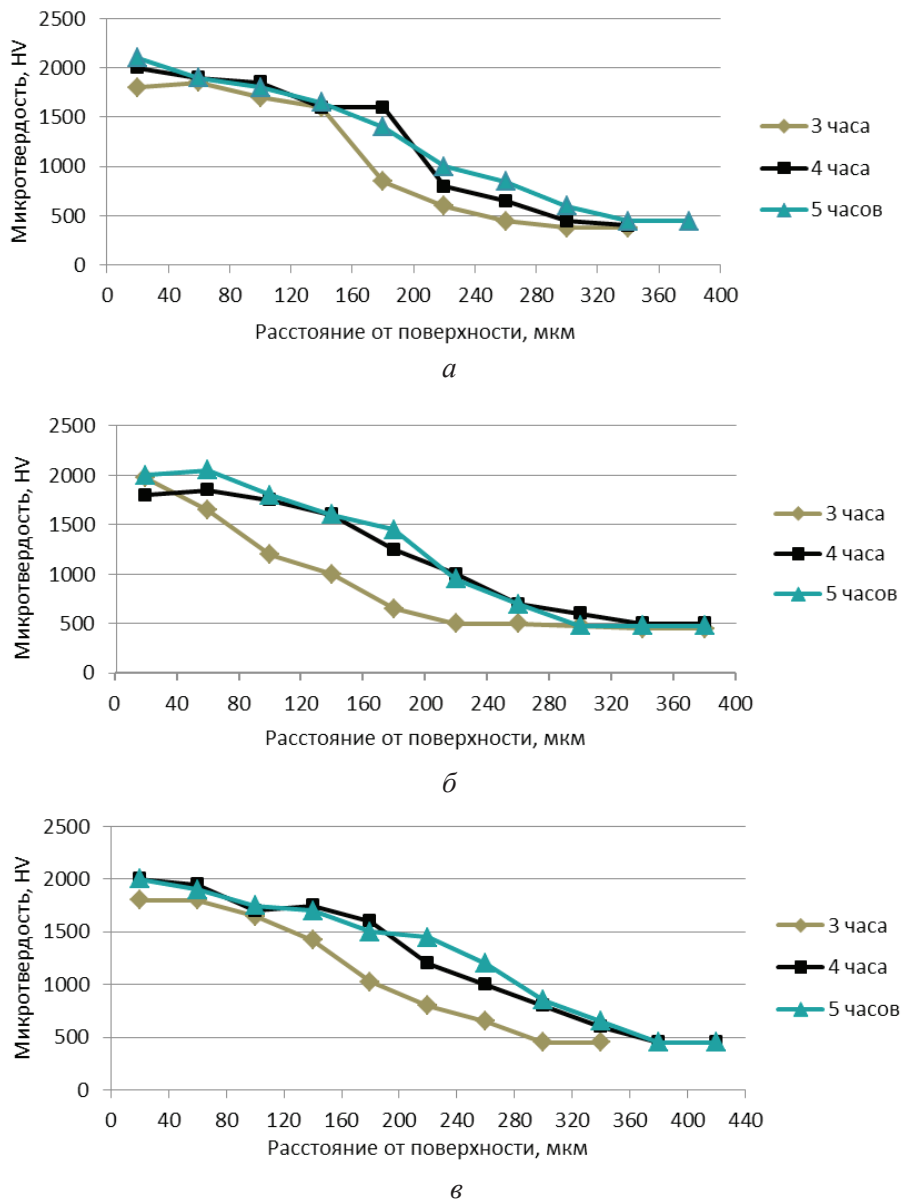
дается на поверхности диффузионного слоя и непосредственно под боридными иглами. Углерод оттесняется под боридный слой, где его содержание достигает 1,69 %. Хром и марганец равномерно распределены по всей толщине диффузионного слоя.

В табл. 4 представлен элементный состав стали 5ХНМ после боромеднения в течение 4 часов (рис. 7, в). Как и на предыдущих образцах, максимальная концентрация бора наблюдается на поверхности с последующим ее снижением по направлению к границе с основой. Максимальная концентрация углерода видна на поверхности и в переходной зоне. Алюминий, хром, никель, молибден и медь сконцентрированы в тех же зонах, что и углерод.

Рентгенофазовый анализ, проведенный на поверхности стали 45 (рис. 8) после боромеднения, демонстрирует наличие фаз FeV, Fe₂V. Невозможность определения меди, вероятнее всего, связана с ее малым количеством.

Рентгенограмма, полученная на стали У10 (рис. 9), демонстрирует наличие фазы Fe₂V и карбидной фазы Fe₃C. Стоит обратить внимание на отсутствие фазы FeV. Присутствие меди также не наблюдается.

В результате проведения рентгенофазового анализа образца из стали 5ХНМ (рис. 10) был установлен фазовый состав боридного слоя,



г

Рис. 6. Распределение микротвердости:

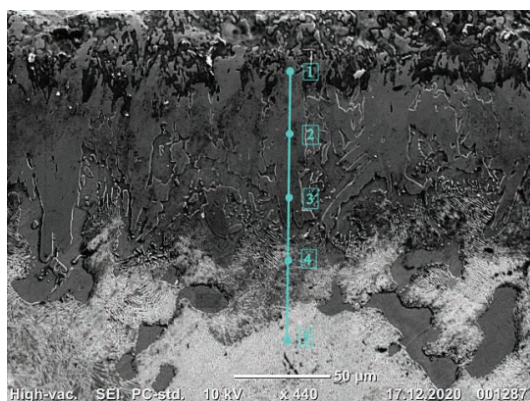
а – для стали 45; б – для стали U10; в – для стали 5XHM; г – микроструктура стали 45 после 4 часов выдержки с отпечатками измерения микротвердости

Fig. 6. Microhardness distribution:

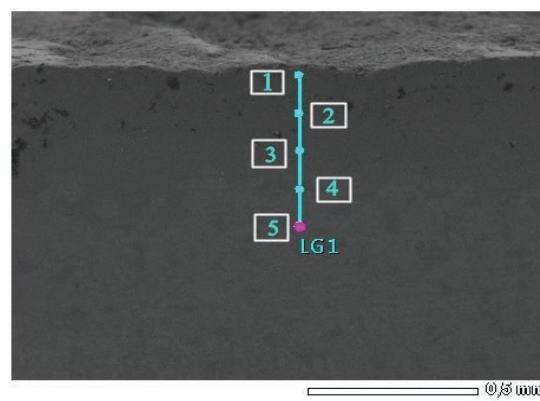
а – for Steel 45 (0.45 % C); б – for Steel U10 (1.0 % C); в – for 0.5C-Cr-Ni-Mn steel; г – microstructure of Steel 45 (0.45 % C) after 4 hours of soaking with points of indentation

Элементный состав диффузионного слоя на стали 45 после 4-часового боромеднения (рис. 7, а)
 The elemental composition of the diffusion layer on Steel 45 (0.45% C) after 4 hours of borocoppering (fig. 7, a)

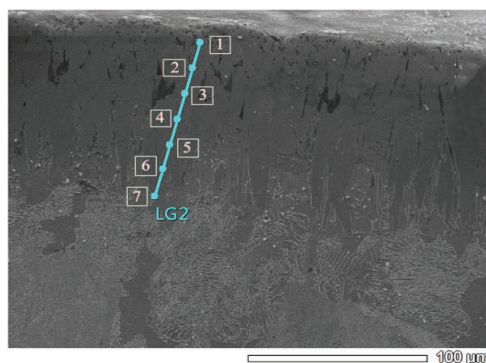
Точки спектра / Points of the spectrum	Химические элементы, масс.% / Chemical elements, mass%						
	B	C	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe
1	16,73	0,2	0,29	0,41	–	2,39	79,98
2	11,37	0,06	0,38	0,44	–	–	87,75
3	6,2	0,32	0,22	0,51	–	–	92,75
4	–	0,56	0,24	0,31	–	0,36	98,53
5	–	0,47	0,35	0,51	0,12	0,17	98,38



а



б



в

Рис. 7. Точки набора спектров в диффузионном слое на образце в процессе элементного анализа:
 а – сталь 45; б – сталь У10; в – сталь 5ХНМ после 4-часового боромеднения

Fig. 7. The points of the spectra counting in the diffusion layer on the sample during elemental analysis:
 а – Steel 45 (0.45 % C); б – Steel U10 (1.0 % C); в – 0.5C-Cr-Ni-Mn steel after 4 hours of borocoppering

который состоит из трех боридов: FeB , Fe_2B и Cr_5B_3 . Необходимо отметить, что медь выявлена в свободном виде, что подтверждает предположения, указанные в работе [21], где она не образует термически устойчивых соединений с бором, железом и углеродом.

В результате исследования микрогеометрии были получены трехмерные микротопографии, а также профилограммы поверхностей образцов после ХТО (рис. 11–13). Оценка шероховатости производилась по параметру Ra (см. табл. 5).

Элементный состав диффузионного слоя на стали У10 после 4-часового боромеднения (рис. 7, б)
The elemental composition of the diffusion layer on Steel U10 (1.0% C) after 4 hours of borocoppering (fig. 7, б)

Точки спектра / Points of the spectrum	Химические элементы, масс.% / Chemical elements, mass %								
	B	C	Al	Si	Cr	Mn	Ni	Fe	Cu
1	14,81	0,83	0,22	0,16	0,34	0,57	–	81,18	1,89
2	12,73	0,43	0,19	0,17	0,15	0,08	–	85,68	0,57
3	6,91	0,61	0,06	0,11	0,09	0,55	–	83,34	–
4	0,68	1,22	–	0,34	0,23	0,32	0,11	95,91	1,19
5	–	1,69	–	0,28	0,12	0,3	–	97,61	–

Элементный состав диффузионного слоя на стали 5ХНМ после 4-часового боромеднения (рис. 7, в)
The elemental composition of the diffusion layer on 0.5C-Cr-Ni-Mn steel after 4 hours of borocoppering (fig. 7, в)

Точки спектра / Points of the spectrum	Химические элементы, масс.% / Chemical elements, mass.%							
	B	C	Al	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
1	16,43	0,35	0,3	0,66	0,67	2,6	0,57	78,42
2	14,77	0,15	0,51	0,66	0,67	–	0,14	83,1
3	12,05	0,06	–	0,53	0,51	0,51	0,27	86,07
4	5,98	0,03	–	0,62	0,31	–	0,34	92,72
5	1,35	0,41	–	0,63	0,46	–	0,25	96,9
6	0,21	0,37	0,56	0,59	0,57	0,09	0,07	97,54
7	–	0,4	0,58	0,4	0,56	0,54	–	97,52

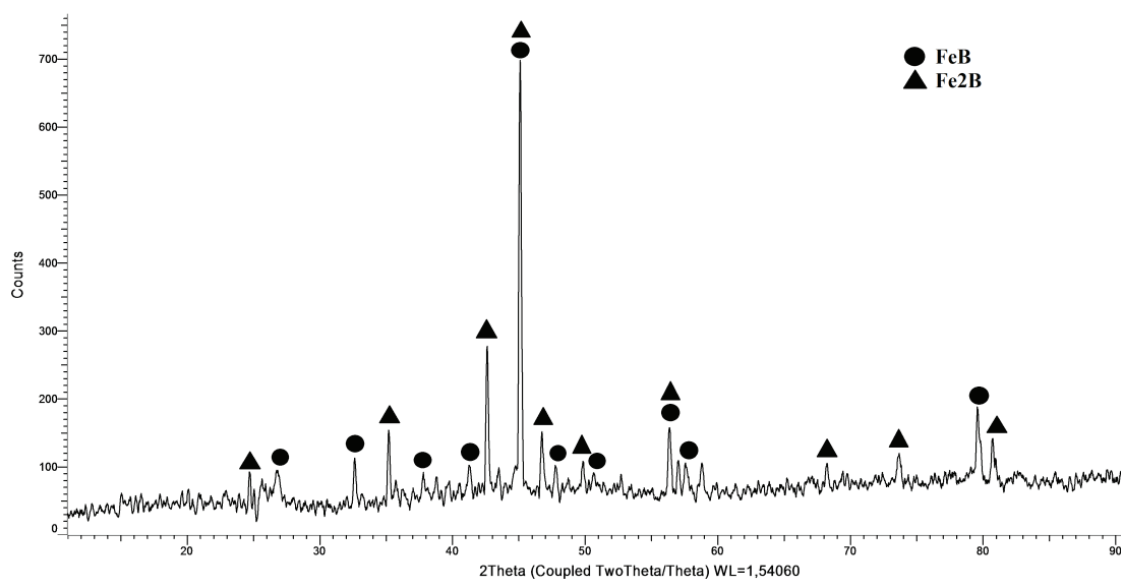


Рис. 8. Рентгенограмма образца из стали 45 после боромеднения в течение 4 часов
Fig. 8. XRD pattern of the specimen of Steel 45 (0.45 % C) after borocoppering for 4 hours

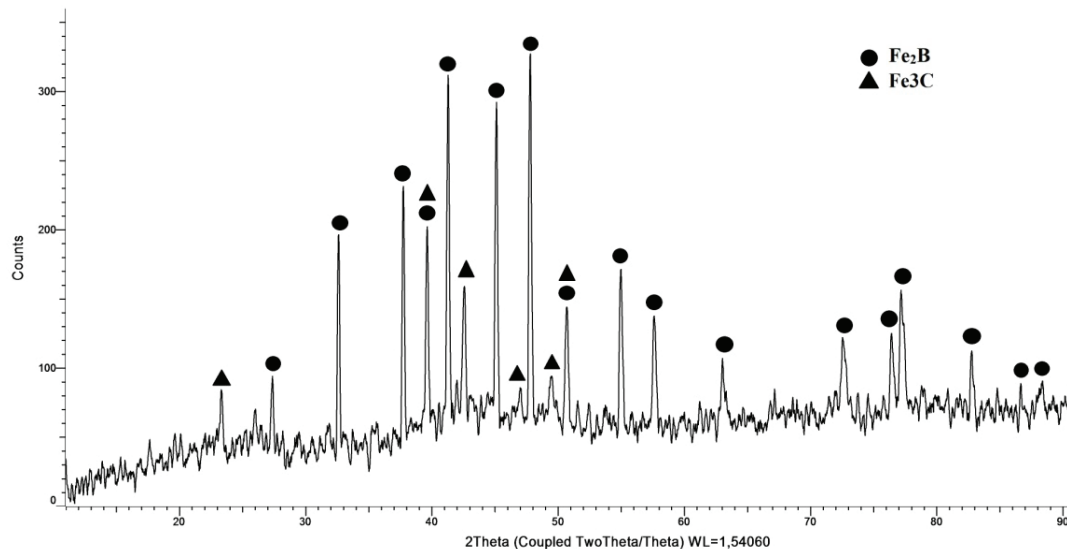


Рис. 9. Рентгенограмма образца из стали У10 после боромеднения в течение 4 часов
 Fig. 9. XRD pattern of the specimen of Steel U10 (1.0 % C) after borocoppering for 4 hours

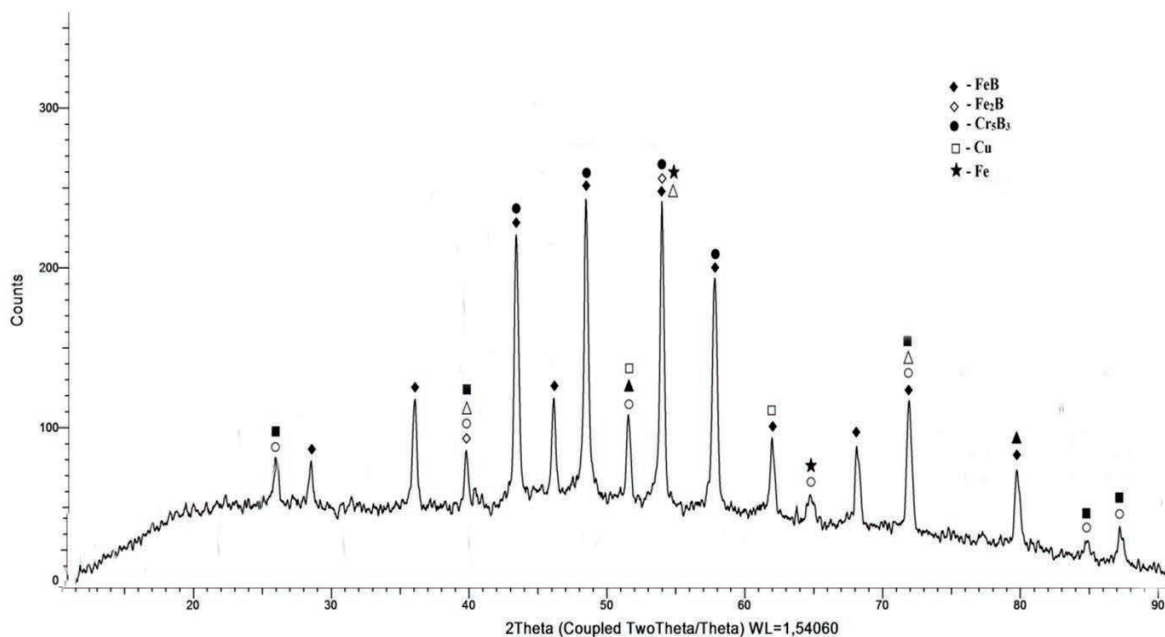


Рис. 10. Рентгенограмма образца из стали 5ХНМ после боромеднения в течение 4 часов
 Fig. 10. XRD pattern of the specimen made of 0.5C-Cr-Ni-Mn steel after borocoppering for 4 hours

Шероховатость сталей 45, У10 и 5ХНМ в исходном состоянии до проведения ХТО была сопоставима, и значения Ra находятся в пределах 0,06...0,084 мкм (рис. 11, а, 12, а, 13, а). После ХТО наблюдается рост высот микронеровностей по сравнению с исходными образцами для всех рассматриваемых материалов и времени обработки (рис. 11, б-г, 12, б-г, 13, б-г). После боромеднения установлен рост параметра Ra в 2-3 раза по сравнению с ис-

ходными образцами до обработки, при этом увеличение времени ХТО с 3 до 5 часов не приводит к дальнейшему увеличению шероховатости (см. табл. 5).

Полученная шероховатость после боромеднения (Ra 0,16...0,2 мкм) при исходной Ra 0,06...0,08 мкм удовлетворяет требованиям к шероховатости поверхностей большинства изделий машиностроения и не требует дополнительной последующей механической обработки.

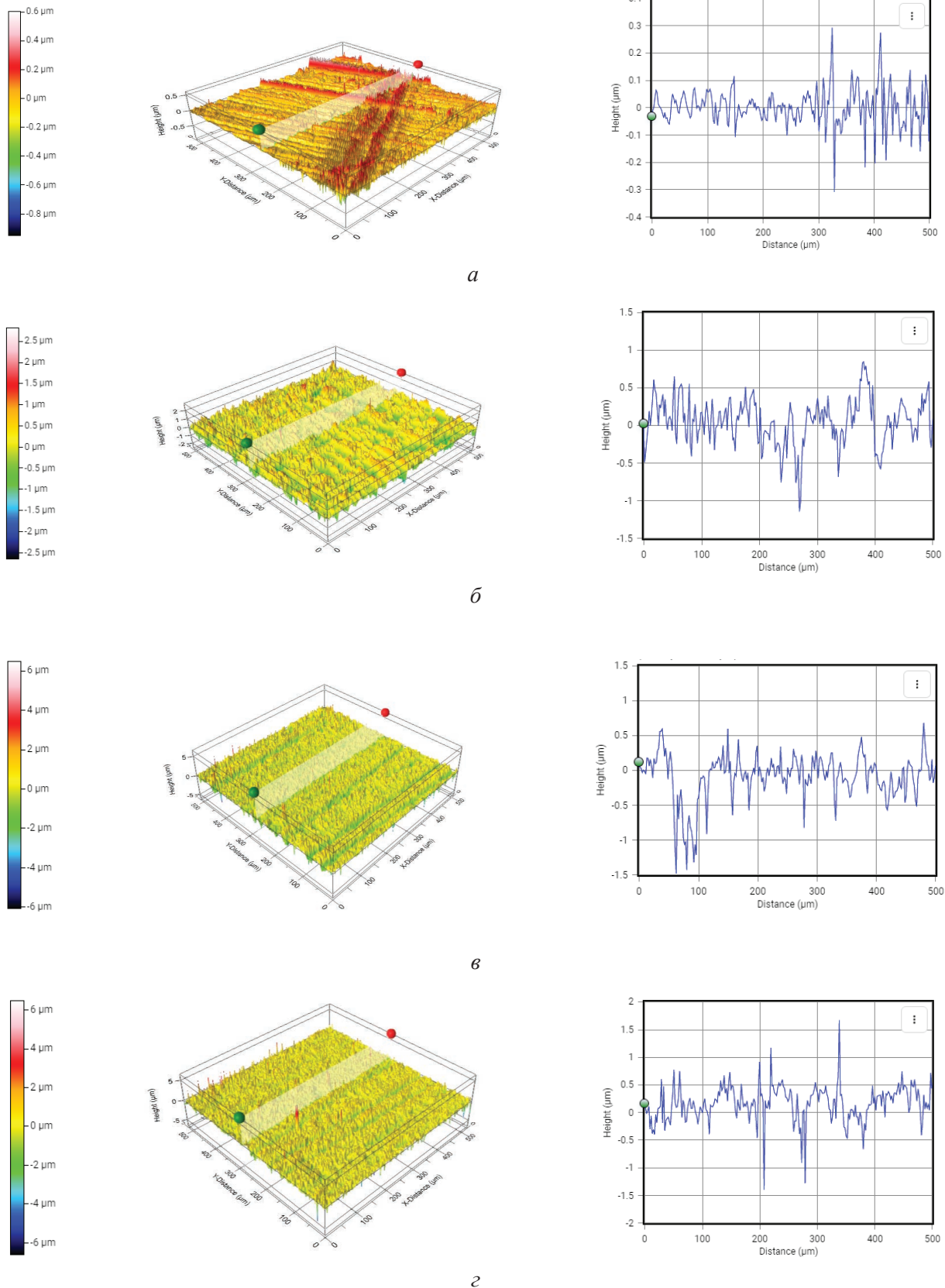


Рис. 11. Микрофотография поверхности образцов из стали 45:

a – исходного, без обработки; *б* – после боромеднения в течение 3 часов; *в* – после боромеднения в течение 4 часов; *г* – после боромеднения в течение 5 часов

Fig. 11. Microtopography of the surface of Steel 45 (0.45 % C) specimens:

a – initial, without treatment; *б* – after borocoppering for 3 hours; *в* – after borocoppering for 4 hours; *г* – after borocoppering for 5 hours

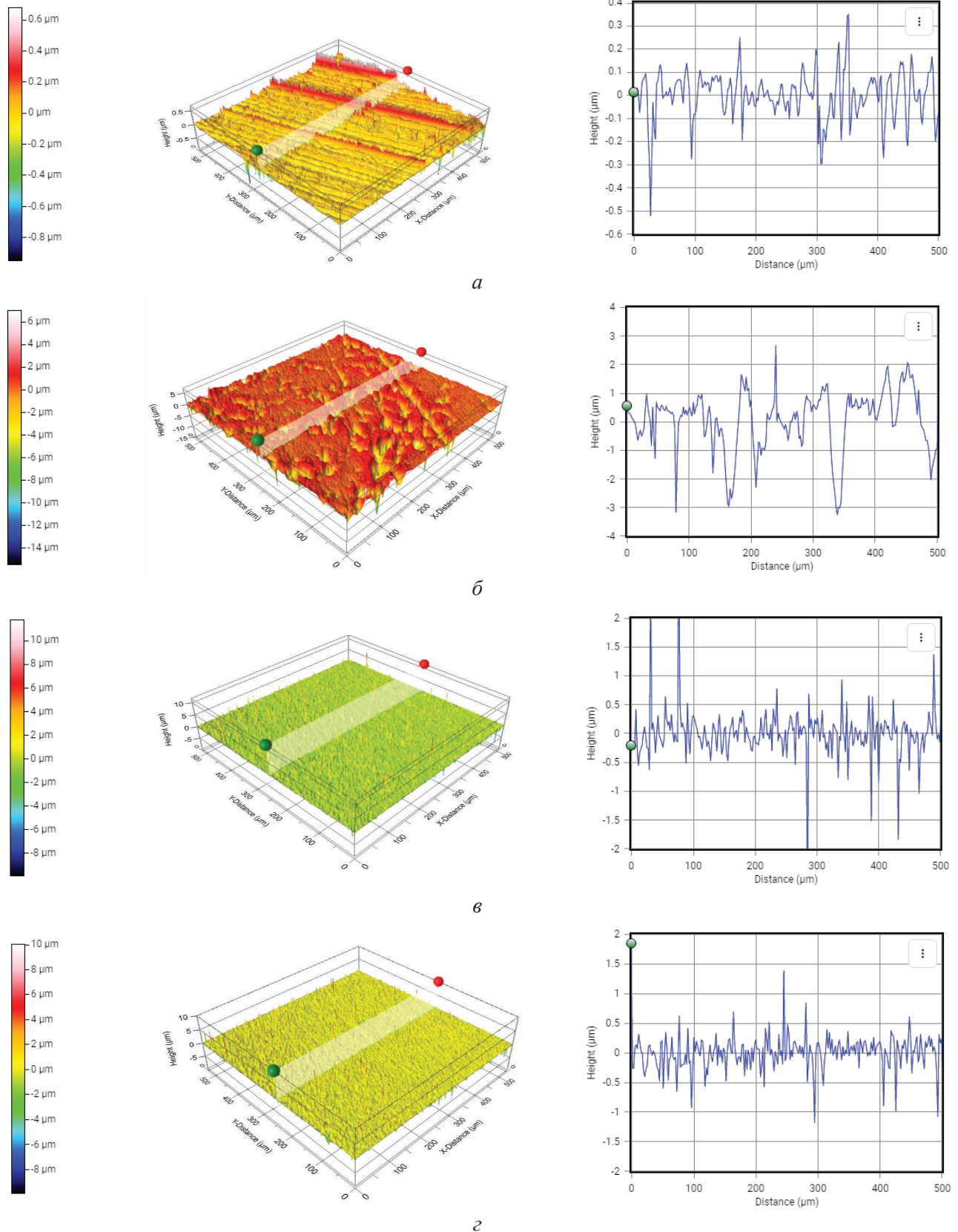


Рис. 12. Микротопография поверхности образцов из стали У10:

a – исходного, без обработки; *б* – после боромеднения в течение 3 часов; *в* – после боромеднения в течение 4 часов; *г* – после боромеднения в течение 5 часов

Fig. 12. Microtopography of the surface of Steel U10 (1.0 % C) specimens:

a – initial, without treatment; *б* – after borocoppering for 3 hours; *в* – after borocoppering for 4 hours; *г* – after borocoppering for 5 hours

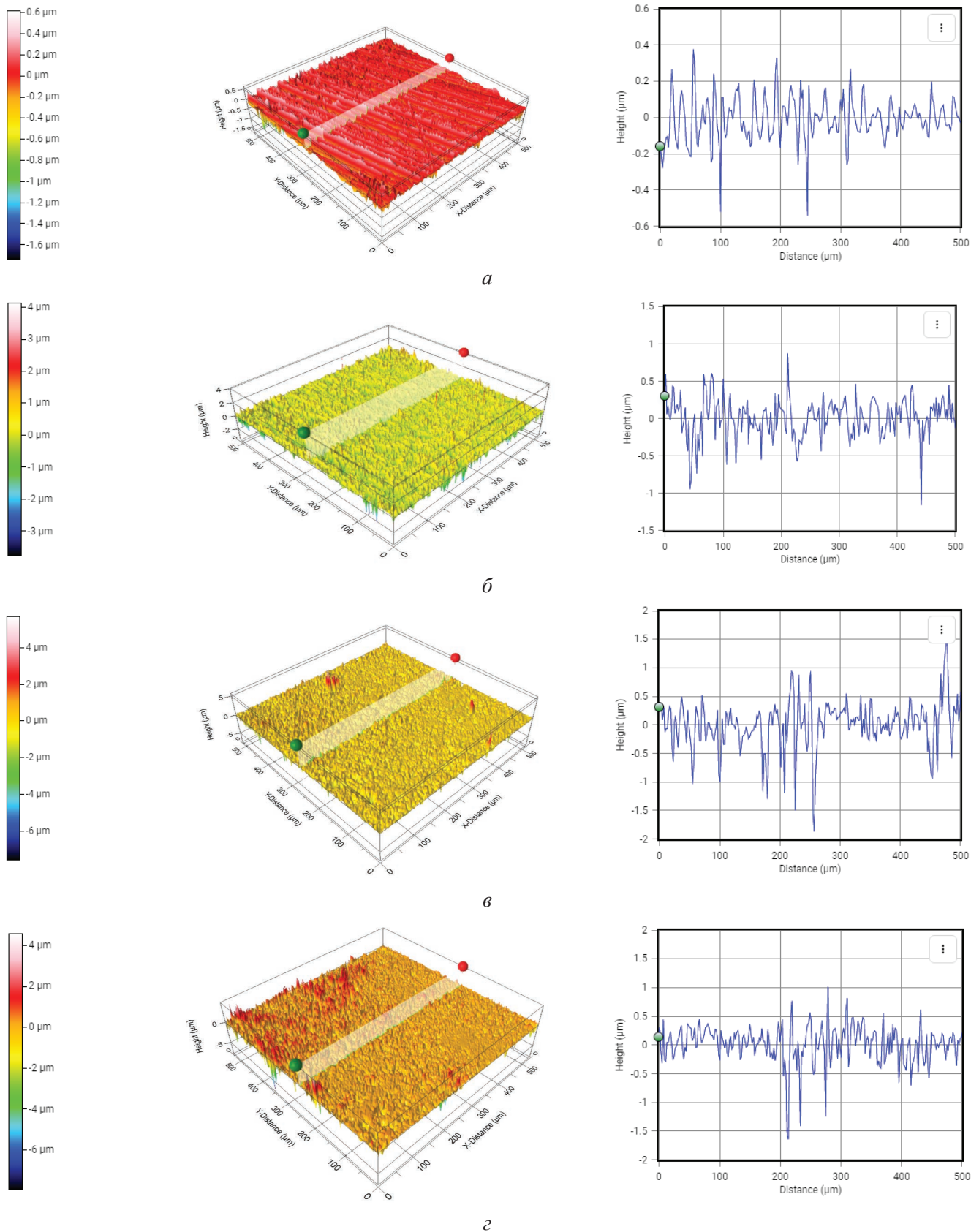


Рис. 13. Микротопография поверхности образцов из стали 5ХНМ:

a – исходного, без обработки; *б* – после боромеднения в течение 3 часов; *в* – после боромеднения в течение 4 часов; *г* – после боромеднения в течение 5 часов

Fig. 13. Microtopography of the surface of 0.5C-Cr-Ni-Mn steel specimens:

a – initial, without treatment; *б* – after borocoppering for 3 hours; *в* – after borocoppering for 4 hours; *г* – after borocoppering for 5 hours

Шероховатость поверхностей образцов после ХТО (рис. 11–13)
Roughness of the specimens after TCT (fig. 11–13)

Вид обработки	сталь 45	У10	5ХНМ
	Ra, мкм		
Исходный, без обработки	0,06	0,062	0,084
Боромеднение в течение 3 часов	0,2	0,187	0,175
Боромеднение в течение 4 часов	0,16	0,201	0,273
Боромеднение в течение 5 часов	0,176	0,189	0,211

Выводы

На основании проведенных исследований установлено, что насыщение образцов из сталей 45, У10 и 5ХНМ в течение 3, 4 и 5 часов приводит к образованию диффузионных слоев, толщина которых варьируется от 110 до 230 мкм.

Установлено, что прирост толщины диффузионного слоя на стали 45 составил 41 % при увеличении времени обработки на 2 часа. На сталях У10 и 5ХНМ значения прироста толщины слоя составили 40 и 77 % соответственно. Для указанных марок сталей рекомендуется более продолжительная выдержка при боромеднении.

Установлено, что при времени проведения диффузионного боромеднения в течение 4 часов наблюдается наибольший прирост толщины диффузионного слоя.

При исследовании микротопографии выявлено, что шероховатость после боромеднения увеличивается до Ra 0,16...0,2 мкм при исходной Ra 0,06...0,08 мкм для сталей 45, У10 и 5ХНМ, при этом продолжительность процесса не оказывает влияния на увеличение шероховатости.

Список литературы

1. Busby P.E., Warga M.E., Wells C. Diffusions and solubility of boron in iron and steel // JOM. – 1953. – Vol. 5. – P. 1463–1468. – DOI: 10.1007/BF03397637.
2. Boriding of steel: improvement of mechanical properties – a review / M. Prince, G. Surya Raj, D. Yaswanth Kumar, P. Gopalakrishnan // High Temperature Material Processes. – 2022. – Vol. 26 (2). – P. 43–89. – DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022041805.
3. Шевчук Е.П., Плотников В.А., Бектасова Г.С. Диффузия бора при борировании углеродистой стали // Известия Алтайского государственного университета. – 2021. – № 1 (117). – С. 64–65. – DOI: 10.14258/izvasu(2021)1-10.

4. FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics / L.G. Yu, X.J. Chen, K.A. Khor, G. Sundararajan // Acta Materialia. – 2005. – Vol. 53. – P. 2361–2368. – DOI: 10.1016/j.actamat.2005.01.043.

5. A microstructure comparison of Iron borides formed on AISI 1040 and D2 steels / J. Bernal-Ponce, A. Irvin-Martinez, E. Vera-Cardenas, A. Garcia-Barrientos, A. Medina-Flores, L. Bejar-Gomez, S. Borjas-Garcia // Microscopy and Microanalysis. – 2015. – Vol. 21, suppl. 3. – P. 1759–1760. – DOI: 10.1017/S1431927615009575.

6. Мишустин Н.М., Иванайский В.В., Ишков А.В. Состав, структура и свойства износостойких покрытий, полученных на сталях 65Г и 50ХГА при скоростном ТВЧ-борировании // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 2. – С. 68–72.

7. Балановский А.Е., Ву В. Плазменная поверхностная цементация с использованием графитового покрытия // Письма о материалах. – 2017. – Т. 7, № 2. – С. 175–179. – DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-175-179.

8. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening / A.D. Kolosov, V.E. Gozbenko, M.G. Shtayger, S.K. Kargapol'tsev, A.E. Balanovskiy, A.I. Karlina, A.V. Sivtsov, S.A. Nebogin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 560. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.

9. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction / T.G. Cherkasova, E.V. Cherkasova, A.V. Tikhomirova, N.V. Gilyazidinova, R.V. Klyuev, N.V. Martyushev, A.I. Karlina, V.Yu. Skiba // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1324–1330. – DOI: 10.1007/s11015-022-01278-2.

10. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions / R.A. Mamadaliev, P.V. Bakhmatov, N.V. Martyushev, V.Yu. Skeebea, A.I. Karlina // Metal-



lurgist. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1255–1264. – DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.

11. Alloying and modification of iron-carbon melts with natural and man-made materials / O.I. Nokhrina, R.A. Gizatulina, M.A. Golodova, I.E. Proshunin, D.V. Valuev, N.V. Martyushev, A.I. Karlina // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1429–1448. – DOI: 10.1007/s11015-022-01289-z.

12. Strengthening of metallurgical equipment parts by plasma surfacing in nitrogen atmosphere / N.N. Malushin, N.V. Martyushev, D.V. Valuev, A.I. Karlina, A.P. Kovalev, R.A. Gizatulina // *Metallurgist*. – 2022. – Vol. 65 (11–12). – P. 1468–1475. – DOI: 10.1007/s11015-022-01292-4.

13. *Balanovskiy A.E., Van Huy V.* Estimation of wear resistance of plasma-carburized steel surface in conditions of abrasive wear // *Journal of Friction and Wear*. – 2018. – Vol. 39. – P. 311–318. – DOI: 10.3103/S1068366618040025.

14. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc / A.E. Balanovskiy, M.G. Shtayger, A.I. Karlina, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, Yu.I. Karlina, A.S. Govorkov, B.O. Kuznetsov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 560. – P. 012138. – DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.

15. *Nguyen V.T., Astafeva N.A., Balanovskiy A.E.* Study of the formation of the alloyed surface layer during plasma heating of mixtures of Cu-Sn CrXCY alloys // *Tribology in Industry*. – 2021. – Vol. 43. – P. 386–396. – DOI: 10.24874/ti.1070.03.21.05.

16. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovsky, A.Yu. Teplykh, V.G. Burov, S.V. Veselov // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 207. – P. 245–253. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.

17. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding / I.A. Bataev, A.A. Bataev, M.G. Golkovski, D.S. Krivizhenko, A.A. Losinskaya, O.G. Lenivtseva // *Applied Surface Science*. – 2013. – Vol. 284, iss. 2. – P. 472–481. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.

18. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing / U. Mishigdorzhyn, Y. Chen, N. Ulakhanov, H. Liang // *Lubricants*. – 2020. – Vol. 8, iss. 3. – P. 26. – DOI: 10.3390/lubricants8030026.

19. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser / A. Bartkowska, D. Bartkowski, D. Przystacki,

J. Hajkowski, A. Miklaszewski // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11. – P. 608. – DOI: 10.3390/coatings11050608.

20. Laser surface modification of boronickelized medium carbon steel / A. Bartkowska, A. Pertek, M. Kulka, L. Klimek // *Optics and Laser Technology*. – 2015. – Vol. 74. – P. 145–157. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.05.014.

21. Исследование формирования диффузионных слоев на стали 20 при одновременном насыщении бором и медью / С.А. Лысых, Ю.П. Хараев, В.Н. Корнопольцев, В.А. Бутуханов // *Современные наукоемкие технологии*. – 2018. – № 9. – С. 56–60. – URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37159> (дата обращения: 06.02.2023).

22. Формирование диффузионных слоев и исследование шероховатости при комплексном насыщении поверхности стали 5ХНМ бором и медью / С.А. Лысых, Ю.П. Хараев, В.Н. Корнопольцев, Х.С. Чжун, Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев // *Ползуновский вестник*. – 2020. – № 3. – С. 77–82. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.013.

23. *Хараев Ю.П., Корнопольцев В.Н., Лысых С.А.* Определение состава смеси при поверхностном упрочнении стали бором и медью // *Ползуновский альманах*. – 2016. – № 4. – С. 142–144.

24. Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием В-Al-слоев химико-термической обработкой / Н.С. Улаханов, У.Л. Мишигдоржийн, А.Г. Тихонов, А.И. Шустов, А.С. Пятых // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2021. – Т. 1, № 12 (204). – С. 557–564. – DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.

25. *Pyatykh A., Savilov A., Timofeev S.* Investigation of Hadfield steel machinability in milling operations // *Key Engineering Materials*. – 2022. – Vol. 910. – P. 123–128. – DOI: 10.4028/p-8p4ud2.

26. *Ляхтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов. – М.: *Металлургия*, 1985. – 256 с.

27. *Лабунец В.Ф., Ворошин Л.Г., Киндарчук М.В.* Износостойкие боридные покрытия. – Киев: *Техника*, 1989. – 253 с.

28. *Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б.* Упрочняющие защитные покрытия в машиностроении. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 244 с. – ISBN 5-7691-1405-3.

29. *Кайдаш Н.Г., Четверикова Л.Н.* Структура и свойства боридосилицидных покрытий на железе и стали // *Вестник Черкасского национального университета*. Серия: Физико-математические науки. – 2007. – № 114. – С. 89–115.

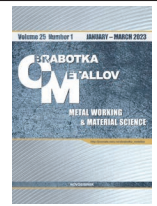
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



The effect of borocoppering duration on the composition, microstructure and microhardness of the surface of carbon and alloy steels

Stepan Lysykh^{1, a, *}, Vasily Kornopoltsev^{2, b}, Undrakh Mishigdorzhiiyn^{1, c}, Yuri Kharaev^{3, d},
Aleksandr Tikhonov^{4, e}, Vladimir Ivancivsky^{5, f}, Nikita Vakhrushev^{5, g}

¹ Institute of Physical Material Science of the Siberian Branch of the RAS, 6 Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation

² Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences, 6 Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047 Russian Federation

³ East Siberia State University of Technology and Management, 40V Kluchevskaya str, Ulan-Ude, 670013, Russian Federation

⁴ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

⁵ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-1421-5251>, lysyh.stepa@yandex.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1970-2945>, kompo@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>, undrakh@ipms.bscnet.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0001-6449-4175>, kharaev@inbox.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-4917-9916>, tihonovalex90@mail.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0001-9244-225X>, ivancivskij@corp.nstu.ru,

^g <https://orcid.org/0000-0002-2273-5329>, vah_nikit@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 December 2022

Revised: 09 January 2023

Accepted: 03 February 2023

Available online: 15 March 2023

Keywords:

Thermochemical treatment (TCT)

Borocoppering

Diffusion layer

Carbon steel

Alloy steel

Microhardness

Roughness

Funding

The study of carbon *Steel 45 (0.45% C)* and *Steel U10 (1.0% C)* was carried out within the framework of the state task of the BINM SB RAS No. 0273-2021-0007. The study of *0.5C-Cr-Ni-Mn* alloy steel was carried out with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation (project 19-79-10163-P).

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials" and the Science Center "Scientific Instruments" of the Dorji Banzarov Buryat State University. The authors express their gratitude to Ulakhanov Nikolay Sergeevich and Gulyashinov Pavel Anatolyevich for their help in coordinating experimental research.

ABSTRACT

Introduction. Borocoppering is one of the methods of thermochemical treatment (TCT) aimed at forming diffusion layers with high physical and mechanical properties on the surface of carbon and alloy steels. The thickness of the diffusion layer is the most important characteristic of the TCT, which determines the depth of hardening. Consequently, the intensity and main characteristics of the TCT (layer thickness, alloying element concentration profile) depend on the process conditions (temperature, duration, and amount of alloying element). **The purpose of this work** is to determine the temperature-time parameters of diffusion borocoppering, which contribute to the formation of diffusion layers with a maximum thickness. The paper considers the results of surface hardening of carbon and alloy steels (for example, *Steel 45 (0.45% C)*, *Steel U10 (1.0% C)*, and *0.5C-Cr-Ni-Mn* steel) by high-temperature soaking in powder mixtures containing boron and copper. Borocoppering was carried out in sealed containers with the powder mixture consisting of boron carbide, copper oxide, and sodium fluoride as an activator at a temperature of 950 °C for 3–5 h. The resulting specimens with a diffusion layer were examined using an optical microscope and a scanning electron microscope (SEM); the microhardness, elemental and phase composition of the layers were also determined, as well as the roughness of the obtained surfaces. **Results and discussions.** The microstructure of the obtained diffusion layers is studied; diagrams of the changes in the layers' thickness and the microhardness distribution over the layers' thickness are shown. It is established that with an increase in the soaking time from 3 to 5 h, the thickness of the diffusion layer increases from 120 to 170 μm on *Steel 45 (0.45% C)*; from 110 to 155 μm on *Steel U10 (1.0% C)* and from 130 to 230 μm on *0.5C-Cr-Ni-Mn* steel. A gradual decrease in the concentration of boron and copper along the layer thickness from 15–16% and 2–3% on the surface, respectively, to zero values at the boundary with the base metal is revealed. It is established that borocoppering to the formation of more thick boride layers on the surface of carbon and alloy steels compared to pure boriding. Moreover, an increase in the duration of soaking during the process contributes to the greatest increase in the thickness of the layer on *0.5C-Cr-Ni-Mn* steel. A study of microgeometry is carried out, microtopographies and profilograms of specimens' surfaces are shown before and after borocoppering. It is established that the roughness after borocoppering increases by 2–3 times compared to the initial one, and an increase in the duration of the process does not have a significant effect on the roughness.

For citation: Lysykh S.A., Kornopoltsev V.N., Mishigdorzhiiyn U.L., Kharaev Yu.P., Tikhonov A.G., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V. The effect of borocoppering duration on the composition, microstructure and microhardness of the surface of carbon and alloy steels. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 131–148. DOI:10.17212/1994-6309-2023-25.1-131-148. (In Russian).

* Corresponding author

Lysykh Stepan A., Junior researcher

Institute of Physical Material Science of the Siberian Branch of the RAS,

6 Sakhyanovoy str.,

670047, Ulan-Ude, Russian Federation

Tel.: 8-924-397-24-76, e-mail: lysyh.stepa@yandex.ru

References

1. Busby P.E., Warga M.E., Wells C. Diffusions and solubility of boron in iron and steel. *JOM*, 1953, vol. 5, pp. 1463–1468. DOI: 10.1007/BF03397637.
2. Prince M., Surya Raj G., Yaswanth Kumar D., Gopalakrishnan P. Boriding of steel: improvement of mechanical properties – a review. *High Temperature Material Processes*, 2022, vol. 26 (2), pp. 43–89. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022041805.
3. Shevchuk E.P., Plotnikov V.A., Bektasova G.S. Diffuziya bora pri borirovanii uglerodistoi stali [Boron diffusion during carbon steel boriding]. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya of Altai State University*, 2021, no. 1 (117), pp. 64–65. DOI: 10.14258/izvasu(2021)1-10.
4. Yu L.G., Chen X.J., Khor K.A., Sundararajan G. FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53, pp. 2361–2368. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.01.043.
5. Bernal-Ponce J., Irvin-Martinez A., Vera-Cardenas E., Garcia-Barrientos A., Medina-Flores A., Bejar-Gomez L., Borjas-Garcia S. A microstructure comparison of Iron borides formed on AISI 1040 and D2 steels. *Microscopy and Microanalysis*, 2015, vol. 21, suppl. 3, pp. 1759–1760. DOI: 10.1017/S1431927615009575.
6. Mishustin N.M., Ivanaiskii V.V., Ishkov A.V. Sostav, struktura i svoystva iznosostoikikh pokrytii, poluchennykh na stalyakh 65G i 50KhGA pri skorostnom TVCh-borirovanii [Composition, structure and properties of wear-resistant coatings obtained on steels 65G and 50KhGA with high-speed high-frequency boriding]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 2, pp. 68–72.
7. Balanovskii A.E., Vu V. Plazmennaya poverkhnostnaya tsementatsiya s ispol'zovaniem grafitovogo pokrytiya [Plasma surface carburizing with graphite paste]. *Pis'ma o materialakh = Letters on Materials*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 175–179. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-175-179.
8. Kolosov A.D., Gozbenko V.E., Shtayger M.G., Kargapoltsev S.K., Balanovskiy A.E., Karlina A.I., Sivtsov A.V., Nebogin S.A. Comparative evaluation of austenite grain in high-strength rail steel during welding, thermal processing and plasma surface hardening. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012185.
9. Cherkasova T.G., Cherkasova E.V., Tikhomirova A.V., Gilyazidinova N.V., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Karlina A.I., Skiba V.Yu. Study of matrix and rare elements in ash and slag waste of a thermal power plant concerning the possibility of their extraction. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1324–1330. DOI: 10.1007/s11015-022-01278-2.
10. Mamadaliev R.A., Bakhmatov P.V., Martyushev N.V., Skeebe V.Yu., Karlina A.I. Influence of welding regimes on structure and properties of steel 12KH18N10T weld metal in different spatial positions. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1255–1264. DOI: 10.1007/s11015-022-01271-9.
11. Nokhrina O.I., Gizatulin R.A., Golodova M.A., Proshunin I.E., Valuev D.V., Martyushev N.V., Karlina A.I. Alloying and modification of iron-carbon melts with natural and man-made materials. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1429–1448. DOI: 10.1007/s11015-022-01289-z.
12. Malushin N.N., Martyushev N.V., Valuev D.V., Karlina A.I., Kovalev A.P., Gizatulin R.A. Strengthening of metallurgical equipment parts by plasma surfacing in nitrogen atmosphere. *Metallurgist*, 2022, vol. 65 (11–12), pp. 1468–1475. DOI: 10.1007/s11015-022-01292-4.
13. Balanovskiy A.E., Van Huy V. Estimation of wear resistance of plasma-carburized steel surface in conditions of abrasive wear. *Journal of Friction and Wear*, 2018, vol. 39, pp. 311–318. DOI: 10.3103/S1068366618040025.
14. Balanovskiy A.E., Shtayger M.G., Karlina A.I., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Karlina Yu.I., Govorkov A.S., Kuznetsov B.O. Surface hardening of structural steel by cathode spot of welding arc. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 560, p. 012138. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012138.
15. Nguyen V.T., Astafeva N.A., Balanovskiy A.E. Study of the formation of the alloyed surface layer during plasma heating of mixtures of Cu-Sn CrXCY alloys. *Tribology in Industry*, 2021, vol. 43, pp. 386–396. DOI: 10.24874/ti.1070.03.21.05.
16. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Yu., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 207, pp. 245–253. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.06.081.
17. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, vol. 284, iss. 2, pp. 472–481. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.07.121.
18. Mishigdorzhiiyn U., Chen Y., Ulakhanov N., Liang H. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and boroaluminizing. *Lubricants*, 2020, vol. 8, iss. 3, p. 26. DOI: 10.3390/lubricants8030026.

19. Bartkowska A., Bartkowski D., Przystacki D., Hajkowski J., Miklaszewski A. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser. *Coatings*, 2021, vol. 11, p. 608. DOI: 10.3390/coatings11050608.
20. Bartkowska A., Pertek A., Kulka M., Klimek L. Laser surface modification of boronickelized medium carbon steel. *Optics and Laser Technology*, 2015, vol. 74, pp. 145–157. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.05.014.
21. Lysykh S.A., Kharaev Yu.P., Kornopoltsev V.N., Butukhanov V.A. Issledovanie formirovaniya diffuzionnykh sloev na stali 20 pri odnoremennom nasyshchenii borom i med'yu [The study of formation of diffusion layers on steel 20 with the simultaneous saturation with boron and copper]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*, 2018, no. 9, pp. 56–60.
22. Lysykh S.A., Kharaev Yu.P., Kornopoltsev V.N., Zhong H.X., Lygdenov B.D., Guryev A.M. Formirovanie diffuzionnykh sloev i issledovanie sherokhovatosti pri kompleksnom nasyshchenii poverkhnosti stali 5KhNM borom i med'yu [Formation of diffusion layers and investigation of roughness at complex saturation of the steel surface with 5KhNM boron and copper]. *Polzunovskii vestnik = Polzunov Bulletin*, 2020, no. 3, pp. 77–82. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.03.013.
23. Kharaev Yu.P., Kornopoltsev V.N., Lysykh S.A. Opredelenie sostava smesi pri poverkhnostnom uprochnenii stali borom i med'yu [Identification of a mixture of surface hardening steel with boron and copper]. *Polzunovskii al'manakh = Polzunov Almanac*, 2016, no. 4, pp. 142–144.
24. Ulakhanov N.S., Mishigdorzhiiyn U.L., Tikhonov A.G., Shustov A.I., Pyatykh A.S. Modifikatsiya poverkhnostnogo sloya shtampovykh stalei sozdaniem B-Al-sloev khimiko-termicheskoi obrabotkoi [Surface modification of die steels with B-Al-layers by thermal-chemical treatment]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Strengthening Technologies and Coatings*, 2021, vol. 17, no. 12 (204), pp. 557–564. DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564.
25. Pyatykh A., Savilov A., Timofeev S. Investigation of hadfield steel machinability in milling operations. *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910, pp. 123–128. DOI: 10.4028/p-8p4ud2.
26. Lakhtin Yu.M., Arzamasov B.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov* [Chemical-thermal treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 256 p.
27. Labunets V.F., Voroshnin L.G., Kindarchuk M.V. *Iznosostoikie boridnye pokrytiya* [Wear resistant boride coatings]. Kiev, Tekhnika Publ., 1989. 253 p.
28. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Hardening protective coatings in mechanical engineering]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2004. 244 p. ISBN 5-7691-1405-3.
29. Kaidash N.G., Chetverikova L.N. Struktura i svoistva boridosilitsidnykh pokrytii na zheleze i stali [Structure and properties of coatings borosilicide on iron and steel]. *Vestnik Cherkasskogo natsional'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki = Cherkasy University Bulletin: Physical and Mathematical Sciences*, 2007, no. 114, pp. 89–115.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 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/>).