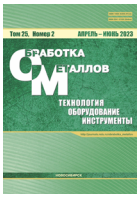
Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2023 Том 25 № 2 с. 93–103
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-93-103

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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



Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки борсодержащей обмазки

Андрей Балановский [a], ***Ван Винь Нгуен*** [b, *], ***Наталья Астафьева*** [c], ***Руслан Гусев*** [d]

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-6466-6587, fuco.64@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0001-6514-9015, nguyenvanvinh190596@gmail.com
[c] https://orcid.org/0000-0003-4957-9597, anstella@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0003-4217-1329, deltadota_99@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669-15:621.793.6

История статьи:
Поступила: 02 марта 2023
Рецензирование: 24 марта 2023
Принята к печати: 12 апреля 2023
Доступно онлайн: 15 июня 2023

Ключевые слова:
Плазменная наплавка
Аморфный бор
Бориды железа
Покрытие

Благодарности
Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из эффективных термохимических методов повышения твердости стали является борирование путем диффузии атомов бора в стальную поверхность при высоких температурах. В результате борирования на поверхности стали образуются покрытия, состоящие из столбчатых кристаллов FeB и Fe_2B. Объёмная доля фаз и толщина покрытий зависят от температуры нагрева и химического состава исходного материала и насыщающей среды. Основной недостаток этих боридных слоев – их высокая хрупкость. Борирование за счет плазменного нагрева является одной из альтернатив процессу диффузионного борирования для сведения к минимуму хрупкости борированного слоя. **Цель работы:** формирование боридных покрытий на низкоуглеродистой стали с использованием технологии плазменной наплавки. **Методы исследования:** определение содержания химических элементов с помощью электронно-зондового микроанализатора, металлографические исследования, анализ фазового состава наплавленного слоя покрытия, а также измерение микротвердости покрытия после плазменной наплавки. **В работе исследованы** боридные покрытия, полученные на низкоуглеродистой стали 20 методом плазменной наплавки борсодержащей обмазки. В качестве легирующего элемента использовался аморфный бор в виде порошка. Параметром, варьируемым в процессе плазменной наплавки, являлась сила тока (120, 140 и 160 А). **Результаты и обсуждения.** На основании выполненных исследований установлено, что возможно получить боридные слои на поверхности стали с использованием метода плазменной наплавки. Отмечено, что поверхностный слой покрытия 1-го и 2-го образцов после плазменной наплавки имеет гетерогенную структуру, состоящую из рядов различных зон. Первая зона имеет заэвтектическое строение и состоит из первичных боридов FeB и Fe_2B, которые находятся в эвтектике, состоящей из Fe_2B и α-Fe. Вторая зона покрытия сверху границы с основным металлом представлена колониями эвтектики из Fe_2B и α-Fe. На 3-м образце структура имеет доэвтектическое строение из боридной эвтектики и первичных дендритов α-твердого раствора бора в железе. Максимальная твердость зафиксирована на поверхности первого образца и составляет 1575 HV. Глубина упрочненного слоя повысилась с увеличением силы тока, однако значение твердости и содержание бора уменьшались после обработки. Небольшой градиент твердости, наблюдаемый по глубине покрытия, а также постепенное снижение твердости благодаря наличию переходной зоны считаются благоприятными для хорошей адгезии боридного слоя к поверхности основного материала.

Для цитирования: Структура и свойства низкоуглеродистой стали после плазменной наплавки борсодержащей обмазки / А.Е. Балановский, В.В. Нгуен, Н.А. Астафьева, Р.Ю. Гусев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 93–103. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-93-103.

Введение

Известно, что при эксплуатации стальных деталей и инструментов наиболее интенсивным внешним воздействиям подвергаются поверхностные слои, поэтому зачастую структура и свойства поверхностных слоев оказывают решающее влияние на работоспособность изделий в целом. Следовательно, создание поверхностных слоев с необходимыми функциональными свойствами более выгодно, чем получение стали с аналогичными свойствами, а в ряде случаев является единственно возможным техническим решением [1–3].

Борирование – это один из перспективных методов повышения поверхностной твердости и износостойкости, стойкости к окислению

***Адрес для переписки**
Нгуен Ван Винь, аспирант
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
ул. Лермонтова, 83,
664074, г. Иркутск, Россия
Тел.: 89050160252, **e-mail:** nguyenvanvinh190596@gmail.com

и коррозии деталей машиностроения. Существует несколько методов борирования: порошковый, химический и электролитический [4–7]. Отмечено, что процесс диффузионного борирования характеризуется большой длительностью (8–10 ч) и малой глубиной упрочнения (менее 200 мкм) [8–10]. Кроме того, насыщение поверхности стали бором обычно приводит к образованию FeB и Fe_2B, имеющих игольчатую микроструктуру. Такая микроструктура делает боридный слой очень хрупким. Это не позволяет эффективно использовать борированные детали в случаях, когда они подвергаются ударным и высоким локальным нагрузкам в процессе эксплуатации. Разрушение игольчатой структуры на поверхности приводит к образованию глобулярной структуры, которая может существенно повысить прочность и пластичность поверхности [11].

Насыщение поверхности стали бором с использованием лазера, электронного луча или плазменной дуги [12–15] позволяет сократить процесс борирования до 0,1–1 мин и получить глубину упрочнения в диапазоне 1–5 мм. В работе [16] использовали порошок CrB для легирования поверхности углеродистой стали с помощью лазера. Результаты показали, что при низкой скорости сканирования (10 мм/с) микроструктура и свойства легированного слоя однородны. Авторы работы [17] с помощью лазера проводили модификации структуры борированной стали без нарушения микроструктуры и свойств основного металла. Обнаружено, что лазерная модификация поверхности с мощностью 250 Вт уменьшает градиент твердости легированного слоя к основному металлу и приводит к значительному повышению пластичности и ударной вязкости стали. Авторы работы [18] исследовали процесс борирования и отметили, что лазерное борирование низкоуглеродистой стали может быть выполнено быстрее и без какой-либо предварительной обработки. Было обнаружено, что наиболее желательной микроструктурой для борирования лазером стали AISI 1018 является Fe_2B, которая имеет высокую твердость в диапазоне 1300–1700 HV и сжимающее напряжение на обрабатываемой поверхности. Порошковый карбид бора использовался для поверхностного упрочнения с помощью электронного луча [19]. Авторы отметили, что упрочненный слой после обработки имеет дендритную структуру и твердость поверхности в шесть раз большую по сравнению со стальной подложкой. Авторами работы [20] проведено исследование структуры и свойств боридных покрытий, полученных на стали AISI 1018 с использованием источника плазменного нагрева. По результатам исследования отмечено, что толщина покрытий составляла от 1 до 1,5 мм, твердость – от 400 до 1600 HV. Скорость изнашивания борированных покрытий примерно на четыре порядка ниже скорости изнашивания стальной подложки. Из анализа литературы следует, что боридные покрытия на стальной подложке можно получить с использованием источников нагрева лазером, электронным лучом и плазменной дугой. Кроме этого отметим, что работ с использованием плазменного поверхностного нагрева для борирования сталей очень мало.

Целью настоящей работы является формирование боридных покрытий на низкоуглеродистой стали с помощью технологии плазменной наплавки. Для достижения поставленной цели проведены исследования микроструктуры и фазового состава, а также измерения микротвердости наплавленных покрытий.

Методика исследований

В качестве основного материала использовалась сталь 20, в состав которой входят следующие компоненты: C 0,17–0,24 %, Si 0,17–0,37 %, Mn 0,35–0,65 %, Ni до 0,25 %, S до 0,04 %, P до 0,04 %, Cr до 0,25 %, Fe ~ 98 %. Образцы вырезаны в виде пластины размером 75×15×15 мм и отшлифованы наждачной бумагой до зернистости 1200. Суспензию готовили путем смешивания порошка аморфного бора с клеем БФ-6 в весовой пропорции 1:1 и предварительно наносили на поверхность каждого образца. Толщина обмазки зафиксирована 1 мм. После этого образцы с обмазкой просушили в сушильном шкафу при температуре 60 °C в течение 2 ч. Оборудование для плазменной наплавки схематически представлено на рис. 1. Во всех режимах обработки постоянными параметрами были напряжение 30 В, скорость перемещения стола с образцом 4 мм/с, расстояние между поверхностью образца и электродом 3 мм, диаметр сопла 5 мм и расход защитного газа 18 л/мин. В качестве переменного параметра служила сила тока (см. таблицу).

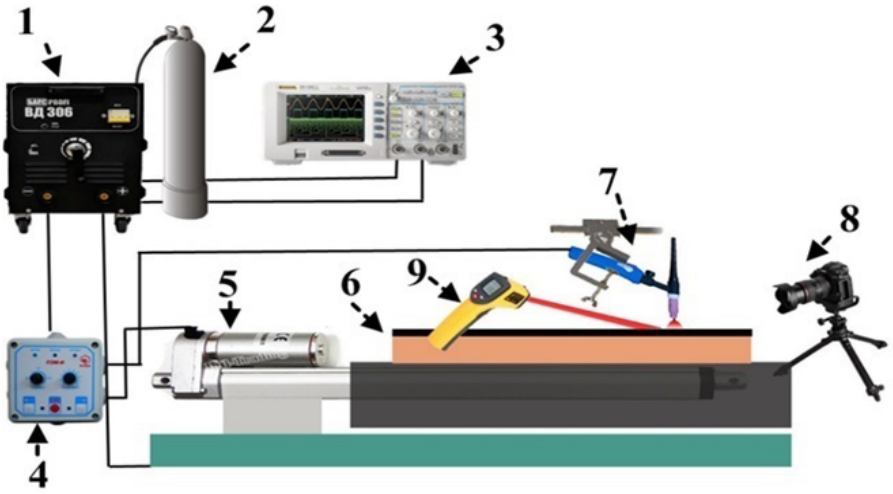


Рис. 1. Схема плазменной обработки:

1 – источник питания; *2* – баллон с аргоном; *3* – осциллограф; *4* – блок управления; *5* – электрический двигатель; *6* – образец с обмазкой; *7* – горелка; *8* – фотоаппарат; *9* – инфракрасный термометр

Fig. 1. Plasma-jet hard-facing scheme:

1 – power source; *2* – argon bottle; *3* – oscillation detector; *4* – control block; *5* – electric motor; *6* – specimen with smearing; *7* – plasma torch; *8* – camera; *9* – infrared thermometer

Параметры процесса плазменной наплавки

Parameters of the plasma-jet hard-facing process

№ образца / Specimen No.	Ток, А / Current, A	Способ обработки / Processing method
1	120	Одна дорожка
2	140	
3	160	

Микроструктура наплавочных слоев исследована на оптическом микроскопе МЕТ-2 и двухлучевом сканирующем микроскопе (многолучевая система) JIB-4500. Для определения содержания бора в наплавленном слое покрытия использовался метод электронно-зондового микроанализа.

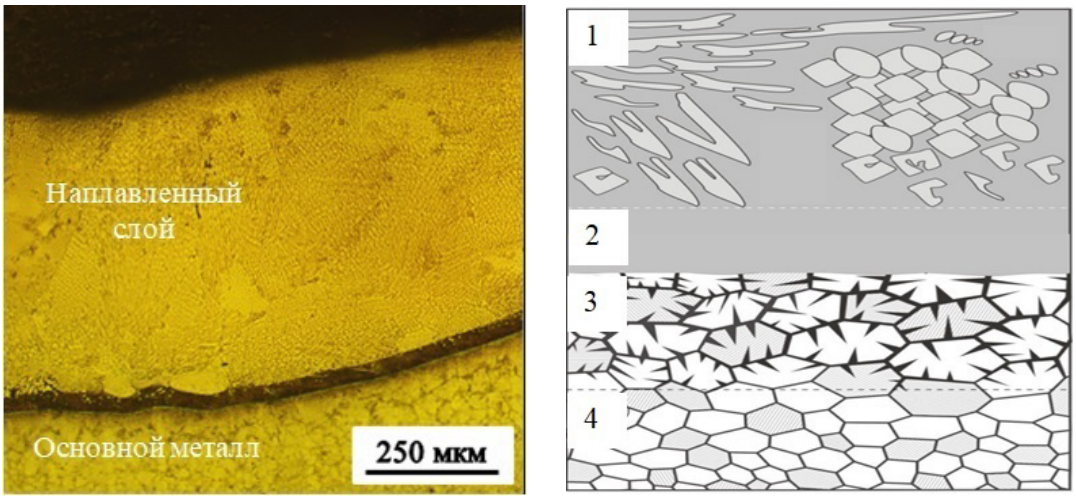
Метод электронно-зондового микроанализа заключается в следующем: пучок высокоускоренных электронов падает на небольшую поверхность образца (~1 мкм^2), далее выходящие рентгеновские лучи выбираются на основе их длины волны с использованием условия дифракции на принятом кристалле, а затем количественно определяется концентрация элементов путем сравнения интенсивностей характеристических рентгеновских лучей от каждого элемента, который присутствует в образце, с интенсивностью того же излучения, испускаемого эталоном. Исследование фазового состава покрытий после плазменной наплавки проводилось на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000 с использованием CuKα-излучения. Образцы сканировали в режиме пошагового сканирования в диапазоне 5–85° с шагом 5° при 40 кВ и 40 мА. Измерение микротвердости легированного слоя выполнялось с помощью микротвердомера Shimadzu HMV-2.

Результаты и их обсуждение

В процессе металлографических исследований образцов установлено, что способ плазменного оплавления обмазки, содержащей аморфный бор и связующее вещество клея БФ-6, позволяет получить слои покрытия без трещин и пор. На рис. 2, *а* представлена микроструктура поперечного сечения первого образца после плазменной наплавки.

Первая зона характеризуется наличием структуры заэвтектического типа, которая состоит из первичных кристаллов боридных фаз FeB и Fe_2B различной морфологии, находящихся в эвтектической матрице, состоящей из Fe_2B и α-Fe (рис. 3).

Морфология боридов изменяется от овальной (рис. 4, *а*) до столбчатой (рис. 4, *б*). Кроме того, в наплавленном слое наблюдались бориды железа с неполным зарастанием граней (рис. 4, *в*).



а *б*

Рис. 2. Микрофотография (*а*) и схема (*б*) строения поперечного сечения первого образца после плазменной наплавки:

1 – зона заэвтектического типа с боридами железа различной морфологии; *2* – зона эвтектического строения; *3* – зона термического влияния; *4* – основной металл

Fig. 2. Micrograph (*a*) and scheme (*б*) of the 1st specimen cross section structure after plasma-jet hard-facing:

1 – hypereutectic zone with iron borides of various structures; *2* – eutectic zone; *3* – heat affected zone; *4* – base metal

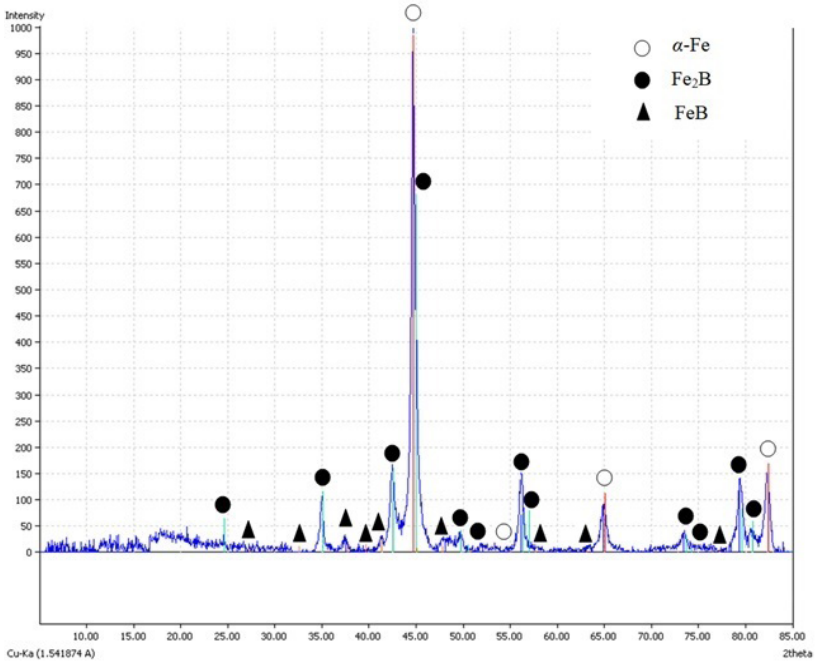


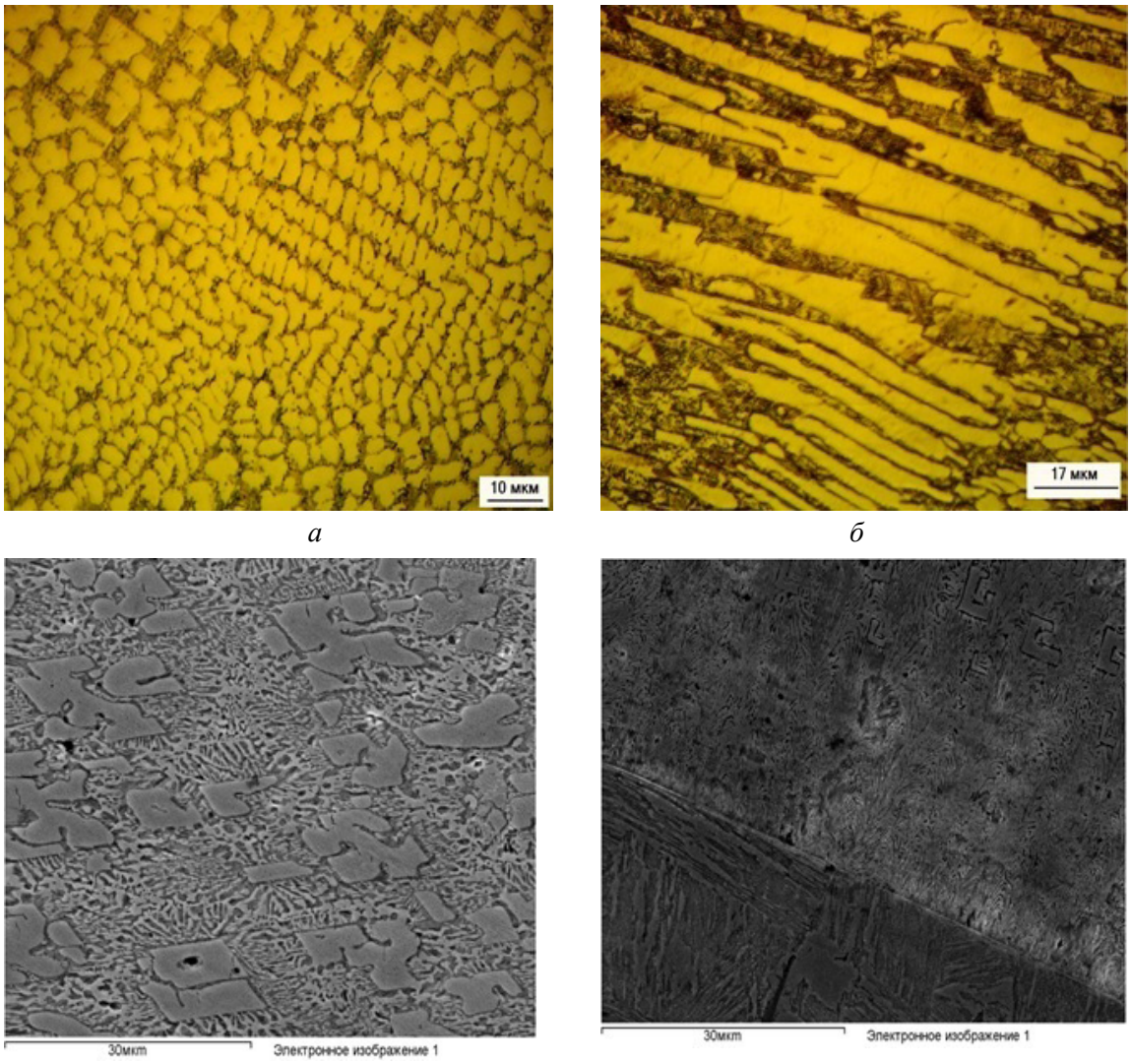
Рис. 3. Рентгенограмма первого образца после плазменной наплавки

Fig. 3. X-ray pattern of the first specimen after plasma-jet hard-facing

В области покрытия вблизи основного металла структура слоя шириной 100 мкм представлена лишь колониями эвтектики (рис. 4, *г*), потому что концентрации бора недостаточно для выделения боридов. Внизу наплавленного слоя образовалась зона термического влияния с укрупнением зерен, связанным с нагревом до высоких температур. Далее расположена зона со структурой основного металла. Содержание бора в наплавленном слое составляет 12,35 %.

Получена также гетерогенная структура поверхностного слоя второго образца после плазменной наплавки (рис. 5). При этом отмечено, что доля первичных боридов в наплавленном слое покрытия намного меньше. Содержание бора в наплавленном слое уменьшается и составляет 9,23 %. Микроструктура слоя покрытия состоит из первичных боридов железа FeB и Fe_2B, которые находятся в матрице эвтектики, состоящей из Fe_2B и α-Fe, как показано на рис. 5.

Рентгеновский анализ показывает наличие первичных боридов FeB и Fe_2B на поверхности стали после плазменной наплавки (рис. 6). В нижней части покрытия около границы с основным металом (рис. 5, *г*) микроструктура также представлена колониями эвтектики из Fe_2B и α-Fe, но ширина слоя увеличилась и составляет 200 мкм.



а *б*

в *г*

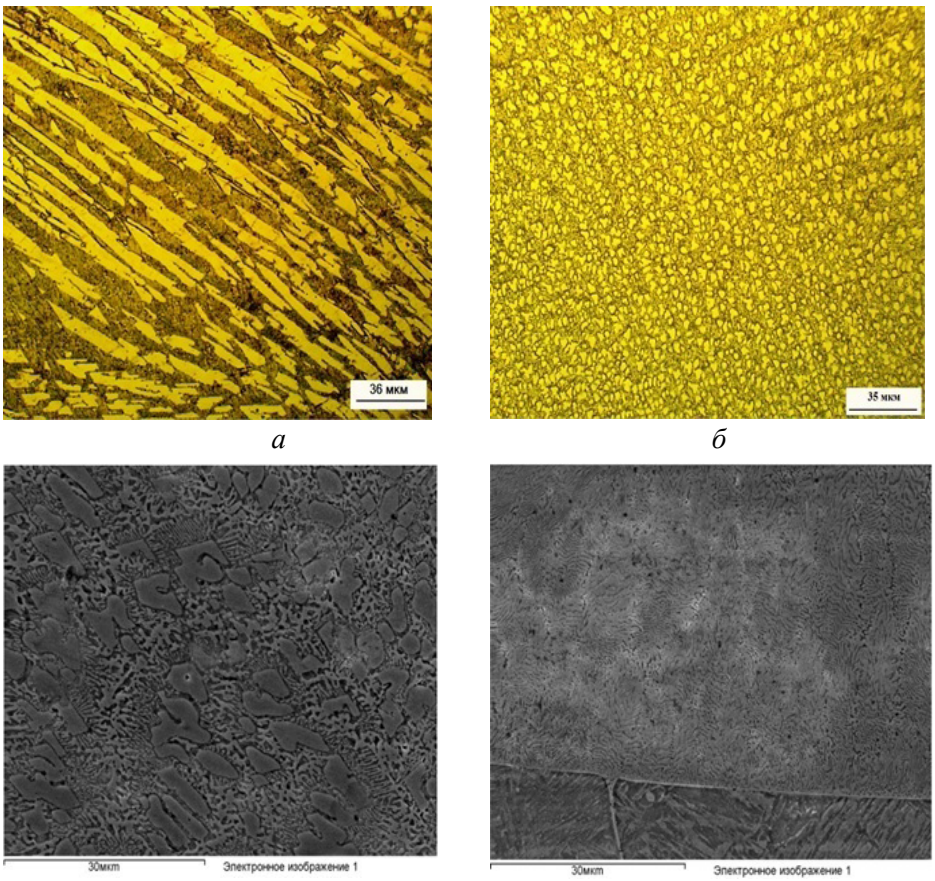
Рис. 4. Микроструктура первого образца после плазменной наплавки:
а, *б*, *в* – верхняя часть покрытия; *г* – нижняя часть покрытия около границы с основным металлом

Fig. 4. Microstructure of the 1st specimen after plasma-jet hard-facing:
а, *б*, *в* – the upper part of coating; *г* – the lower part of the coating near the boundary with the base metal

На рис. 7 представлена микроструктура наплавленного слоя покрытия третьего образца после плазменной наплавки. Он имеет доэвтектическую структуру, состоящую из боридной эвтектики и первичных дендритов α-твердого раствора бора в железе.

Согласно данным рентгеновского анализа (рис. 8) основными фазами покрытия являются Fe_2B и α-Fe. Содержание бора в наплавленном слое покрытия составляет 3,4 %. При рассмотрении бинарных фазовых диаграмм Fe-B видно, что микроструктуры хорошо согласуются с этими фазовыми диаграммами [18]. Известно, что сплавы железа с бором относятся к сплавам эвтектического типа, где эвтектика образована твердым раствором α-Fe и Fe_2B. При концентрации бора 3,83 мас.%, сплав является 100 %-ной эвтектикой.

В ходе исследования микроструктуры наплавленного слоя покрытия после плазменной наплавки было проведено определение содержания бора по глубине слоя методом электронно-зондового микроанализа. Результаты определения содержания бора по глубине наплавленного слоя представлены на рис. 9. Из полученной диаграммы видно, что содержание бора в наплавленном слое покрытия уменьшается от поверхности покрытия до основного металла. При этом в наплавленном слое первого образца содержание бора выше на 1,5–2 %, чем у второго образца, и выше на 7–8 %, чем у третьего образца в зависимости от глубины наплавленного слоя.



а *б*

в *г*

Рис. 5. Микроструктура второго образца после плазменной наплавки: *а*, *б*, *в* – верхняя часть покрытия; *г* – нижняя часть покрытия около границы с основным металлом

Fig. 5. Microstructure of the 2nd specimen after plasma-jet hard-facing: *а*, *б*, *в* – the upper part of coating; *г* – the lower part of the coating near the boundary with the base metal

На рис. 10 показано распределение микротвердости по глубине борированного слоя при различных силах тока после плазменного борирования. При увеличении силы тока от 120 до 160 А глубина упрочнения повышалась от 0,625 до 1,95 мм. Максимальная твердость 1547 HV для стали 20 наблюдалась на глубине 0,075 мм от поверхности слоя, что характерно для борирования за счет образования твердых боридов железа. Частицы борида железа являются высокопрочной фазой, которая определяет степень упрочнения в легированном слое. Эти более высокие значения твердости связаны с более высоким содержанием бора, что привело к образованию большого количества первичных боридов FeB и Fe_2B. Увеличение тока до 140 А приводит к увеличению толщины верхнего покрытия до 1,125 мм, а максимальная твердость падает до 1293 HV. Это объясняется тем, что чем выше сила тока,

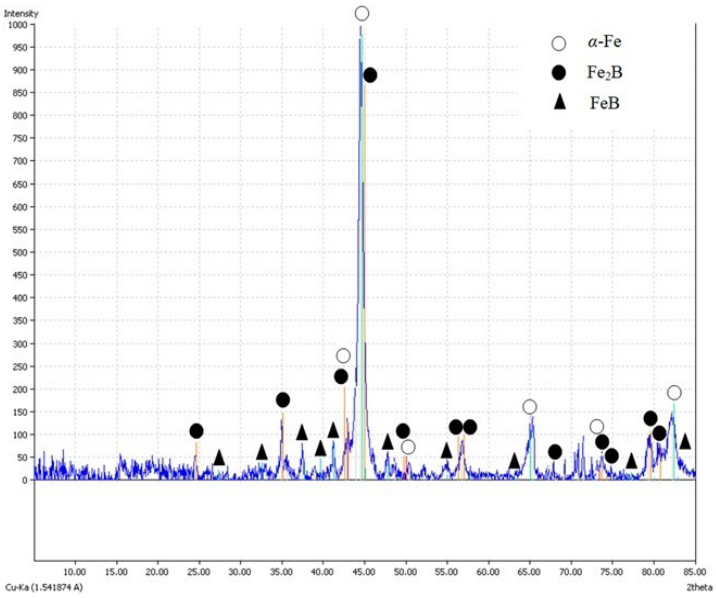
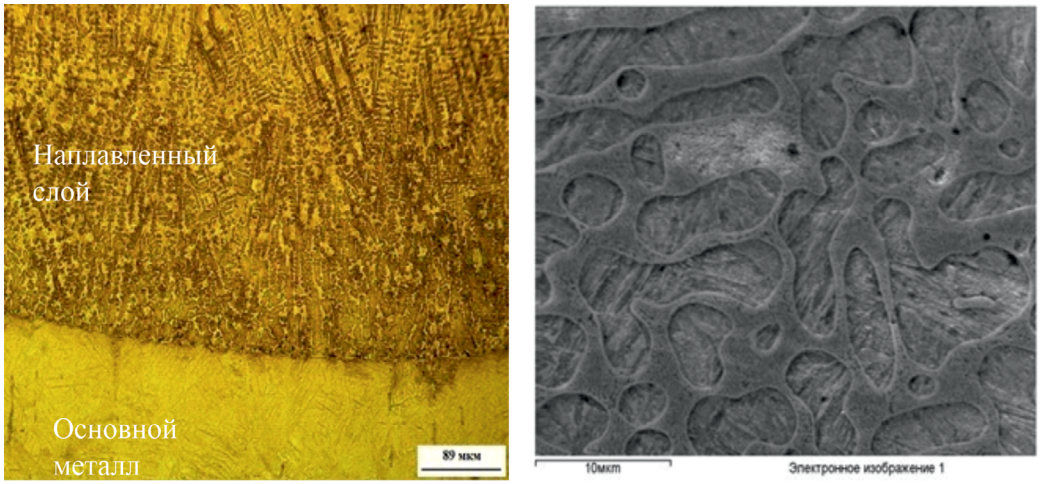


Рис. 6. Рентгенограмма второго образца после плазменной наплавки

Fig. 6. X-ray pattern of the 2nd specimen after plasma-jet hard-facing



а *б*

Рис. 7. Микроструктура наплавленного слоя третьего образца после плазменной наплавки:
а – оптический микроскоп; *б* – сканирующий электронный микроскоп

Fig. 7. Microstructure of the 3rd specimen after plasma-jet hard-facing:
a – optical microscopy; *б* – scanning electron microscopy

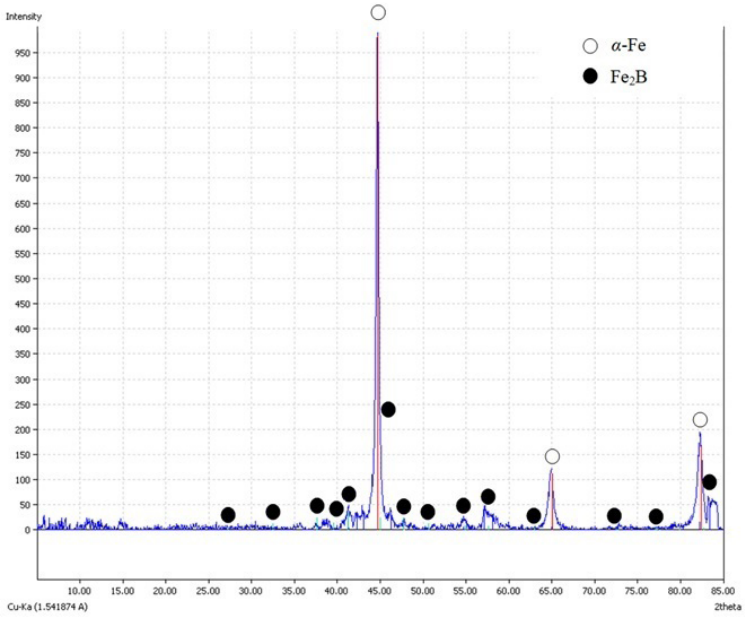


Рис. 8. Рентгенограмма третьего образца после плазменной наплавки

Fig. 8. X-ray pattern of the 3rd specimen after plasma-jet hard-facing

тем больше разбавление наплавочной смеси основным материалом. В результате этого концентрация бора в наплавленном слое уменьшалась, и наоборот, доля эвтектической составляющей увеличивалась. Самое низкое значение твердости легированного слоя измерено при силе тока 160 А и составляет 452 HV, потому что поверхностный слой после борирования имеет доэвтектическую структуру и самое низкое содержание бора.

Интересно отметить, что небольшой градиент твердости, наблюдаемый по глубине покрытия, а также постепенное снижение твердости благодаря наличию переходной зоны считаются благоприятными для хорошей адгезии боридного слоя к поверхности основного материала. Например, резкий скачок твердости между боридными слоями и подложкой, наблюдаемый в слоях, полученных диффузионным борированием, считается одной из основных причин плохой адгезии, приводящей к отслаиванию и расщеплению покрытий.

Выводы

1. В ходе проведенных исследований установлено, что возможно получить боридные слои на поверхности стали с использованием технологии плазменной наплавки борсодержащей обмазки.

2. Отмечено, что поверхностный слой покрытия 1-го и 2-го образцов после плазменной наплавки имеет гетерогенную структуру, состоящую из рядов различных зон. Первая зона имеет заэвтектическое строение из первичных боридов FeB и Fe_2B, находящихся в эвтектике, которая состоит из Fe_2B и α-Fe. Вторая зона покрытия сверху границы с основным металлом представлена колониями эвтектики из Fe_2B и α-Fe. На 3-м

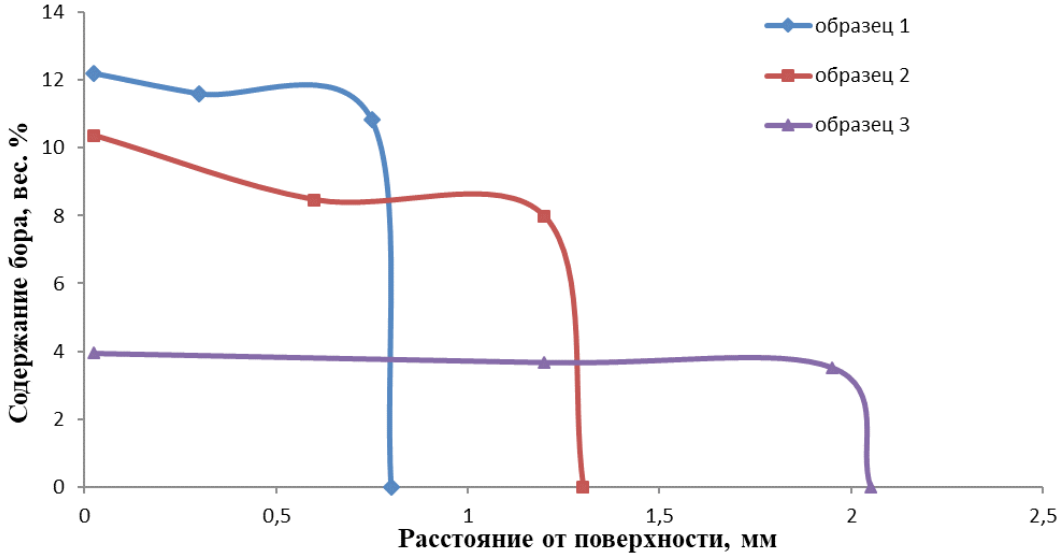


Рис. 9. Распределение бора по глубине слоя на стали после плазменной наплавки
Fig. 9. Distribution of boron over the layer depth on steels after plasma-jet hard-facing

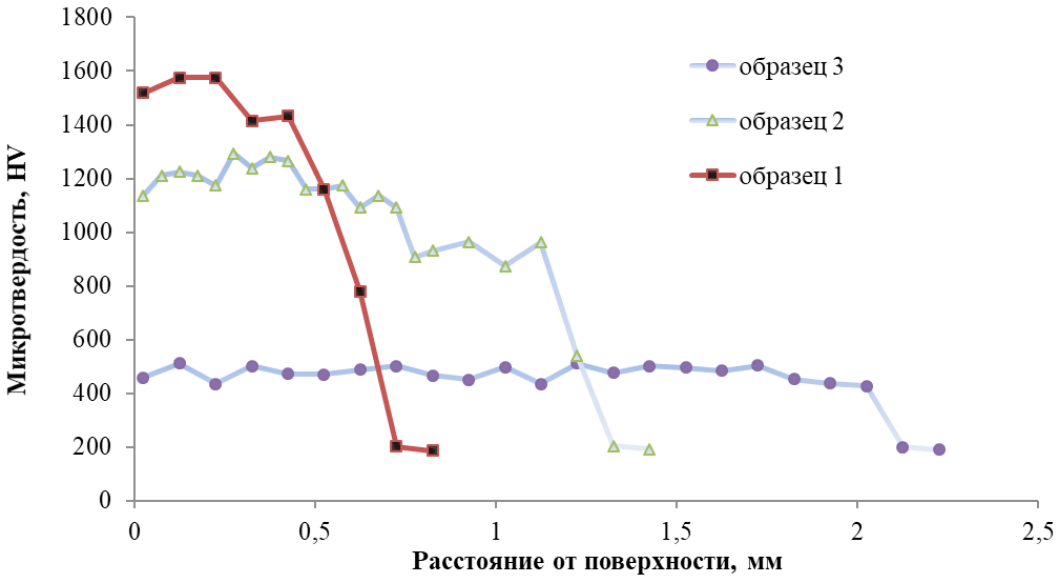


Рис. 10. Распределение микротвердости по глубине упрочненных слоев
Fig. 10. Distribution of microhardness over the depth of hardened layers

образце структура имеет доэвтектическое строение из боридной эвтектики и первичных дендритов α-твердого раствора бора в железе.

3. Максимальная микротвердость легированного слоя зафиксирована при силе тока 120 А и составляет 1575 HV. Глубина упрочненного слоя повысилась с увеличением силы тока, однако значение твердости и содержание бора уменьшались. Небольшой градиент твердости, наблюдаемый по глубине покрытия, а также постепенное снижение твердости благодаря наличию переходной зоны считаются благоприятными для хорошей адгезии боридного слоя к поверхности основного материала.

Список литературы

1. *Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А.* Теория и технология химико-термической обработки. – М.: Новое знание, 2010. – 304 с. – ISBN 978-5-94735-149-1.

2. Повышение электрической прочности ускоряющего зазора в источнике электронов с плазменным катодом / В.И. Шин, П.В. Москвин, М.С. Воробьев,

В.Н. Девятков, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 2. – С. 69–75. – DOI: 10.31857/S0032816221020191.

3. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / под ред. Н.Н. Коваля, Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 298 с. – ISBN 978-5-89503-577-1.

4. *Гуляшинов П.А., Мишигдоржийн У.Л., Улаханов Н.С.* Влияние механоактивации порошковой смеси на структуру и свойства бороалитированных малоуглеродистых сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 151–162. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-151-162.

5. *Yan P.X., Su Y.C.* Metal surface modification by B-C-nitriding in a two-temperature-stage process // Materials Chemistry and Physics. – 1995. – Vol. 39, iss. 4. – P. 304–308. – DOI: 10.1016/0254-0584(94)01444-L.

6. Structural and strength characterization of steels subjected to bonding thermochemical process / E. Meléndez, I. Campos, E. Rocha, M.A. Barrón // Materials Science and Engineering: A. – 1997. – Vol. 234–236. – P. 900–903. – DOI: 10.1016/S0921-5093(97)00389-4.

7. *Bindal C., Üçisik A.H.* Characterization of borides formed on impurity-controlled chromium-based low alloy steels // Surface and Coatings Technology. – 1999. – Vol. 122, iss. 2–3. – P. 208–213. – DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00294-7.

8. *Ворошнин Л.Г.* Борирование промышленных сталей и чугунов: справочное пособие. – Минск: Беларусь, 1981. – 205 с.

9. *Lin L., Han K.* Optimization of surface properties by flame spray coating and boriding // Surface and Coatings Technology. – 1998. – Vol. 106, iss. 2–3. – P. 100–105. – DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00501-5.

10. *Kim H.-J., Grossi S., Kweon Y.-G.* Wear performance of metamorphic alloy coatings // Wear. – 1999. – Vol. 232, iss. 1. – P. 51–60. – DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00160-X.

11. *Eroglu M.* Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203, iss. 16. – P. 2229–2235. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.010.

12. *Bourithis L., Papadimitriou G.* Boriding a plain carbon steel with the plasma transferred arc process using boron and chromium diboride powders: microstructure and wear properties // Materials Letters. – 2003. – Vol. 57, iss. 12. – P. 1835–1839. – DOI: 10.1016/S0167-577X(02)01077-7.

13. *Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P.* The structure and properties of boride layers obtained as a result of electron-beam chemical-thermal treatment // Metal Science and Heat Treatment. – 2001. – Vol. 11. – P. 45–46.

14. Characteristics and abrasive wear resistance of plasma alloyed layers based on tin bronze and chromium carbide / A.E. Balanovskiy, Nguyen Van Trieu, Nguyen Van Vinh, N.A. Astafieva // Tribology in Industry. – 2022. – Vol. 44 (3). – P. 518–527. – DOI: 10.24874/ti.1274.03.22.06.

15. *Kulka M., Pertek A.* Microstructure and properties of borocarburized 15CrNi6 steel after laser surface modification // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 236, iss. 1–4. – P. 98–105. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.04.005.

16. *Glozman A., Bamberger M.* Phase transitions and microstructure of a laser-induced steel surface alloying // Metallurgical and materials transactions. A. – 1997. – Vol. 28. – P. 1699–1703. – DOI: 10.1007/s11661-997-0261-9.

17. Laser surface modification of low carbon borided steels / P. Gopalakrishnan, P. Shankar, R.V. Subba Rao, M. Sundar, S.S. Ramakrishnan // Scripta Materialia. – 2001. – Vol. 44, iss. 5. – P. 707–712. – DOI: 10.1016/S1359-6462(00)00674-6.

18. *Tayal M., Mukherjee K.* Localized boriding of low-carbon steel using a Nd:YAG laser // Journal of Materials Science. – 1994. – Vol. 29, iss. 21. – P. 5699–5702. – DOI: 10.1007/BF00349967.

19. Surface modification of mild steel with Boron Carbide reinforcement by electron beam melting / M. Iqbal, I. Shaukat, A. Mahmood, K. Abbas, M.A. Haq // Vacuum. – 2010. – Vol. 85, iss. 1. – P. 45–47. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2010.03.009.

20. *Bourithis L., Papaefthymiou S., Papadimitriou G.D.* Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties // Applied Surface Science. – 2002. – Vol. 200. – P. 203–218. – DOI: 10.1016/S0169-4332(02)00901-7.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

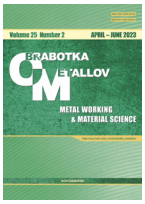
© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2023 vol. 25 no. 2 pp. 93–103
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-93-103

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

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



Structure and properties of low carbon steel after plasma-jet hard-facing of boron-containing coating

Andrey Balanovsky [a], ***Van Vinh Nguyen*** [2, b, *], ***Natalia Astafieva*** [c], ***Ruslan Gusev*** [d]

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-6466-6587, fuco.64@mail.ru, [b] https://orcid.org/0000-0001-6514-9015, nguyenvanvinh190596@gmail.com
[c] https://orcid.org/0000-0003-4957-9597, anstella@mail.ru, [d] https://orcid.org/0000-0003-4217-1329, deltadota_99@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 02 March 2023
Revised: 24 March 2023
Accepted: 12 April 2023
Available online: 15 June 2023

Keywords:
Plasma cladding
Amorphous boron
Iron borides
Coating

Acknowledgements
Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. One of the effective thermochemical methods for increasing the hardness of steel is boronizing by diffusion of boron atoms into the steel surface at high temperatures. As a result of boronizing, coatings are formed on the steel surface, consisting of columnar crystals of *FeB* and Fe_2B. The volume fraction of phases and the thickness of the coatings depend on the heating temperature and the chemical composition of the base material and the saturating medium. The main disadvantage of these boronized layers is its high brittleness. Boronizing by plasma heating is one of the alternatives to the diffusion boronizing process to minimize the brittleness of the boronized layer. **The purpose of the work:** to form boride coatings on low-carbon steel using plasma-jet hard-facing. **The research methods** are: determination of the content of chemical elements using an electron probe micro-analyzer, metallographic studies, analysis of the phase composition of the boronized layer, as well as measurement of the microhardness of the coating after plasma-jet hard-facing. **In this work** boronized layers obtained on low-carbon steel 20 by plasma-jet hard-facing of a boron-containing coating are studied. Powdered amorphous boron was used as an alloying element. The parameter varied during plasma-jet hard-facing process is the current strength (120 A, 140 A and 160 A). **Results and discussions.** Based on the studies performed, it is found that it is possible to form boronized layers on the steel surface using plasma-jet hard-facing method. It is noted that the surface layer of the coating of the 1st and 2nd specimens after plasma-jet hard-facing has a heterogeneous structure, consisting of rows of different zones. The first zone has a hypereutectic structure, which consists of primary borides *FeB* and Fe_2B, located in the eutectic, consisting of Fe_2B and *α-Fe*. The second zone above the boundary with the base metal is represented by eutectic colonies composed of Fe_2B and *α-Fe*. The third specimen is characterized by a hypoeutectic structure consisting of boride eutectic and primary dendrites of the *α*-solid solution of boron in iron. The maximum hardness is fixed on the surface of the first specimen and is 1,575 HV. The depth of the hardened layer increases with increasing current, but the hardness value and boron content decrease after treatment. The slight hardness gradient observed over the depth of the coating, as well as the gradual decrease in hardness due to the presence of the transition zone, are considered favorable for good adhesion of the boronized layer to the surface of the base material.

For citation: Balanovsky A.E., Nguyen V.V., Astafieva N.A., Gusev R.Yu. Structure and properties of low carbon steel after plasma-jet hard-facing of boron-containing coating. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 93–103. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.2-93-103. (In Russian).

References

1. Voroshnin L.G., Mendeleeva O.L., Smetkin V.A. *Teoriya i tekhnologiya khimiko-termicheskoi obrabotki* [Theory and technology of chemical and heat treatment]. Moscow, Novoe znanie Publ., 2010. 304 p. ISBN 978-5-94735-149-1.

2. Shin V.I., Moskvin P.V., Vorobyev M.S., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Yu., Koval' N.N. Povyshenie elektricheskoi prochnosti uskoryayushchego zazora v istochnike elektronov s plazmennym katodom [Increasing the electrical strength of the accelerating gap in an electron source with a plasma cathode]. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and Experimental Techniques*, 2021, no. 2, pp. 69–75. DOI: 10.31857/S0032816221020191.

*** Corresponding author**
Nguyen Van Vinh, Post-graduate Student
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontova st.,
664074, Irkutsk, Russian Federation
Tel.: 89050160252, **e-mail:** nguyenvanvinh190596@gmail.com

3. Koval' N.N., Ivanov Yu.F., eds. *Evolyutsiya struktury poverkhnostnogo sloya stali, podvergnutoi elektronno-ionno-plazmennym metodam obrabotki* [Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma processing methods]. Tomsk, NTL Publ., 2016. 298 p. ISBN 978-5-89503-577-1.

4. Gulyashinov P.A., Mishigdorzhiyn U.L., Ulakhanov N.S. Vliyanie mekhanoaktivatsii poroshkovoi smesi na strukturu i svoistva boroalitirovannykh malouglerodistykh stalei [Effect of mechanical activation of the powder mixture on the structure and properties of boro-aluminized low-carbon steels]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 151–162. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-151-162.

5. Yan P.X., Su Y.C. Metal surface modification by B-C-nitriding in a two-temperature-stage process. *Materials Chemistry and Physics*, 1995, vol. 39, iss. 4, pp. 304–308. DOI: 10.1016/0254-0584(94)01444-L.

6. Meléndez E., Campos I., Rocha E., Barrón M.A. Structural and strength characterization of steels subjected to bonding thermochemical process. *Materials Science and Engineering: A*, 1997, vol. 234–236, pp. 900–903. DOI: 10.1016/S0921-5093(97)00389-4.

7. Bindal C., Üçisik A.H. Characterization of borides formed on impurity-controlled chromium-based low alloy steels. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 122, iss. 2–3, pp. 208–213. DOI: 10.1016/S0257-8972(99)00294-7.

8. Voroshnin L.G. *Borirovanie promyshlennykh stalei i chugunov* [Borating of industrial steels and cast irons]. Minsk, Belarus' Publ., 1981. 205 p.

9. Lin L., Han K. Optimization of surface properties by flame spray coating and boriding. *Surface and Coatings Technology*, 1998, vol. 106, iss. 2–3, pp. 100–105. DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00501-5.

10. Kim H.-J., Grossi S., Kweon Y.-G. Wear performance of metamorphic alloy coatings. *Wear*, 1999, vol. 232, iss. 1, pp. 51–60. DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00160-X.

11. Eroglu M. Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness. *Surface and Coatings Technology*, 2009, vol. 203, iss. 16, pp. 2229–2235. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.010.

12. Bourithis L., Papadimitriou G. Boriding a plain carbon steel with the plasma transferred arc process using boron and chromium diboride powders: microstructure and wear properties. *Materials Letters*, 2003, vol. 57, iss. 12, pp. 1835–1839. DOI: 10.1016/S0167-577X(02)01077-7.

13. Sizov I.G., Smirnyagina N.N., Semenov A.P. The structure and properties of boride layers obtained as a result of electron-beam chemical-thermal treatment. *Metal Science and Heat Treatment*, 2001, vol. 11, pp. 45–46.

14. Balanovskiy A.E., Nguyen Van Trieu, Nguyen Van Vinh, Astafieva N.A. Characteristics and abrasive wear resistance of plasma alloyed layers based on tin bronze and chromium carbide. *Tribology in Industry*, 2022, vol. 44 (3), pp. 518–527. DOI: 10.24874/ti.1274.03.22.06.

15. Kulka M., Pertek A. Microstructure and properties of borocarburized 15CrNi6 steel after laser surface modification. *Applied Surface Science*, 2004, vol. 236, iss. 1–4, pp. 98–105. DOI: 10.1016/j.apsusc.2004.04.005.

16. Glozman A., Bamberger M. Phase transitions and microstructure of a laser-induced steel surface alloying. *Metallurgical and materials transactions. A*, 1997, vol. 28, pp. 1699–1703. DOI: 10.1007/s11661-997-0261-9.

17. Gopalakrishnan P., Shankar P., Subba Rao R.V., Sundar M., Ramakrishnan S.S. Laser surface modification of low carbon borided steels. *Scripta Materialia*, 2001, vol. 44, iss. 5, pp. 707–712. DOI: 10.1016/S1359-6462(00)00674-6.

18. Tayal M., Mukherjee K. Localized boriding of low-carbon steel using a Nd:YAG laser. *Journal of Materials Science*, 1994, vol. 29, iss. 21, pp. 5699–5702. DOI: 10.1007/BF00349967.

19. Iqbal M., Shaukat I., Mahmood A., Abbas K., Haq M.A. Surface modification of mild steel with Boron Carbide reinforcement by electron beam melting. *Vacuum*, 2010, vol. 85, iss. 1, pp. 45–47. DOI: 10.1016/j.vacuum.2010.03.009.

20. Bourithis L., Papaefthymiou S., Papadimitriou G.D. Plasma transferred arc boriding of a low carbon steel: microstructure and wear properties. *Applied Surface Science*, 2002, vol. 200, pp. 203–218. DOI: 10.1016/S0169-4332(02)00901-7.

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).