



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Влияние борирования и алитирования на структуру и микротвердость низкоуглеродистых сталей

Павел Гуляшинов<sup>1, а, \*</sup>, Ундрах Мишигдоржийн<sup>2, б</sup>, Николай Улаханов<sup>3, 2, с</sup>

<sup>1</sup> Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой, 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия

<sup>2</sup> Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия

<sup>3</sup> Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, ул. Ключевская 40В, г. Улан-Удэ, 670013, Россия

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6776-9314>, [gulpasha@mail.ru](mailto:gulpasha@mail.ru), <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>, [undrakh@ipms.bscnet.ru](mailto:undrakh@ipms.bscnet.ru),

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0635-4577>, [nulahanov@mail.ru](mailto:nulahanov@mail.ru).

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 669 - 15:621.793.6

#### История статьи:

Поступила: 15 марта 2022

Рецензирование: 06 апреля 2022

Принята к печати: 27 апреля 2022

Доступно онлайн: 15 июня 2022

#### Ключевые слова:

Химико-термическая

обработка (ХТО)

Борирование

Алитирование

Карбид бора

Алюминий

Углеродистая сталь

Легированная сталь

#### Финансирование:

Исследование выполнено при финансовом обеспечении гранта Российского Научного Фонда (проект 19-79-10163).

#### Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

#### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Борирование и алитирование являются одними из наиболее эффективных методов повышения эксплуатационных свойств (коррозионная стойкость, жаро- и износостойкость) деталей машин и инструментов. Твердофазные способы проведения данных методов химико-термической обработки (ХТО) требуют длительной выдержки при высокой температуре, что отрицательно влияет на структуру и свойства материала основы. В связи с этим подбор обоснованных температурно-временных параметров процессов твердофазного борирования и алитирования является актуальной задачей. **Цель настоящей работы** заключается в оценке влияния процессов низкотемпературного борирования и алитирования на структуру и микротвердость диффузионных слоев на поверхности низкоуглеродистых сталей. **В работе рассмотрены** две марки сталей с содержанием углерода до 0,4 %: низкоуглеродистая сталь Ст3 и легированная сталь 3Х2В8Ф. Использование второй стали вызвано необходимостью выявить влияние легирующих элементов в стали на толщину диффузионных слоев и их состав. В качестве источников бора и алюминия выбраны порошковые смеси на основе карбида бора и алюминия. **Результаты и обсуждения.** Установлено, что при температуре процесса 900 °С и выдержке 2 часа после борирования на поверхности обеих сталей образуются бориды железа. При этом на стали Ст3 рентгенофазовым анализом (РФА) обнаружено два бориды: FeB и Fe<sub>2</sub>B, а на стали 3Х2В8Ф – только фаза Fe<sub>2</sub>B. После алитирования обеих сталей образуется алюминий, содержащий фазы, такие как Al<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Толщина полученного диффузионного слоя на Ст3 после борировании составляет 35 мкм, при алитировании – 65 мкм. Толщина диффузионного слоя на стали 3Х2В8Ф равна 15 мкм после борирования и 50 мкм после алитирования, что значительно меньше, чем на углеродистой стали, и, очевидно, связано с влиянием легирующих элементов. ХТО привела к значительному повышению микротвердости поверхности образцов. Так, максимальная микротвердость стали Ст3 возросла до 1920 HV, а стали 3Х2В8Ф до 1685 HV после борирования. Микротвердость после алитирования сопоставима для обеих сталей и равна 1000...1100 HV. Элементный анализ верхних участков диффузионных слоев показал соответствие содержания бора (7...9 %) и алюминия (50...53 %) обнаруженным РФА боридам и алюминидом железа. Во всех случаях наблюдается плавное снижение диффундирующих элементов по направлению от поверхности к основе.

**Для цитирования:** Гуляшинов П.А., Мишигдоржийн У.Л., Улаханов Н.С. Влияние борирования и алитирования на структуру и микротвердость низкоуглеродистых сталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 91–101. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-91-101.

## Введение

Важной проблемой современного материаловедения является повышение прочности и износостойкости инструментов и различных деталей машин за счет применения диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов раз-

#### \*Адрес для переписки

Гуляшинов Павел Анатольевич, к.т.н., научный сотрудник  
Байкальский институт природопользования  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
ул. Сахьяновой, 6,  
670047, г. Улан-Удэ, Россия  
Тел.: 8 (3012) 43-36-76, e-mail: [gulpasha@mail.ru](mailto:gulpasha@mail.ru).

личными химическими элементами. При применении термической обработки (закалка, отпуск) невозможно достичь заданных механических и эксплуатационных свойств. Альтернативой является химико-термическая обработка (ХТО), заключающаяся в диффузионном насыщении поверхности металлов и сплавов различными химическими элементами. Детали, подвергнутые ХТО, могут заменить собой изделия из дорогих специальных сталей и сплавов [1, 2].

В настоящее время известно несколько методов ХТО. В зависимости от насыщающей среды различают: газовые, жидкостные и твердофазные (в порошковых средах и пастах) [3, 4].

Как известно, борированные слои имеют высокую твердость, коррозионную стойкость и износостойкость. В случае с борированием в порошковых смесях и пастах наибольшее распространение получили насыщающие смеси на основе карбида бора [5]. Алитирование представляет собой насыщение поверхности алюминием для придания окалиностойкости при высоких температурах и для повышения сопротивления атмосферной коррозии. Для алитирования используются разнообразные смеси, состоящие из порошков алюминия или ферро-алюминия, оксида алюминия и др. [6, 7].

Необходимо отметить, что твердофазные способы проведения данных методов ХТО требуют длительной выдержки при высокой температуре, что отрицательно влияет на структуру и свойства материала основы.

Известны другие методы повышения поверхностных свойств деталей машин, не требующие длительного температурного воздействия на материал основы. В первую очередь это методы обработки концентрированными потоками энергии (КПЭ), такие как лазерная и электронно-лучевая обработка (ЭЛО), способные за короткий промежуток времени нагреть участок поверхности материала [8–10]. Известны способы комбинированной обработки, сочетающие последовательные процессы ХТО с последующей лазерной и электронно-лучевой обработкой [11–13]. Последний способ позволяет модифицировать предварительно полученный диффузионный слой и устранить его дефекты (слоистость и фазовую неоднородность по глубине слоя, хрупкость, высокую поверхностную шероховатость).

Необходимо отметить, что способы упрочнения КПЭ требуют специального дорогостоящего оборудования. Их применение оправдано в случае получения свойств, недостижимых традиционной обработкой. Таким образом, можно предложить комбинированный способ обработки изделий, где на первом этапе проводится ХТО с целью получения сплошного покрытия по всей площади поверхности. Далее наиболее ответственные участки будут дополнительно подвержены ЭЛО с целью модификации диффузионных слоев. Возможно также проведение электронно-лучевого легирования (ЭЛЛ). Например, сначала проводят порошковое алитирование с печным нагревом, затем ЭЛЛ карбидом бора или, наоборот, традиционное борирование с последующим ЭЛЛ алюминием. Совмещенный процесс насыщения бором и алюминием (бороалитирование) позволяет синтезировать слои полифункционального назначения [14,15].

Данная статья содержит материалы по первому этапу обработки как самостоятельных процессов, повышающих комплекс физико-механических свойств сталей по всей площади изделия.

Цель настоящей работы заключается в установлении влияния борирования и алитирования на структуру и свойства диффузионного слоя на поверхности низкоуглеродистых сталей. В работе приведены результаты апробации низкотемпературных режимов ХТО и проведен сравнительный анализ структуры и свойств на примере двух марок сталей.

### Методика исследований

В качестве насыщающих смесей использовались порошкообразные материалы: карбид бора  $B_4C$  марки F-220, алюминиевый порошок марки ПА-4 (ГОСТ 6058-73), оксид алюминия  $Al_2O_3$  чда (ГОСТ 8136-85), натрий фтористый  $NaF$  чда (ГОСТ 4463-76).

Для процесса борирования использовалась смесь 96 %  $B_4C$  + 4 %  $NaF$ . Смесь для алитирования состояла из 48 %  $Al$  (порошок) + 48 %  $Al_2O_3$  + 4 %  $NaF$ .

Процессы ХТО в порошках проводились в лабораторной печи ПМ-16П-ТД при температуре 900 °С. ХТО подверглись образцы из сталей Ст3 и штамповой стали 3Х2В8Ф размером 20×20×10 мм. Продолжительность процесса

обработки составляла 2 ч. Сталь Ст3 применялась в несущих элементах сварных и несварных конструкций и деталей (состав, в % (весовых): Fe  $\approx$  97, C 0,14...0,22, Si 0,15...0,3, Mn 0,4...0,65). Сталь 3Х2В8Ф применяется в тяжелонагруженном прессовом инструменте при горячем деформировании легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов (состав, в % (весовых): Fe  $\approx$  87, C 0,3...0,4, Si 0,15...0,4, Mn 0,15...0,4, Cr 2,2...2,7, W 7,5...8,5, V 0,2...0,5, Mo до 0,5). Порошковая смесь засыпалась в тигель вместе с исследуемыми образцами, далее тигель упаковывался и герметизировался сверху плавким затвором. Охлаждение тиглей проводилось на открытом воздухе при комнатной температуре. Далее тигли вскрывались, образцы зачищались от остатков насыщающей смеси.

Состав и структуру диффузионного слоя определяли на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL (Япония) с системой микроанализа INCA Energy 350, Oxford Instruments (Великобритания) в ЦКП «Прогресс» ФГБОУ ВО Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления.

Фазовый состав на поверхности образцов определялся на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker AXS в медном излучении с интервалом съемки 10...70° в ЦКП БИП СО РАН.

Определение микротвердости насыщенных слоев осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3М. Нагрузка составляла 50 г. Для расче-

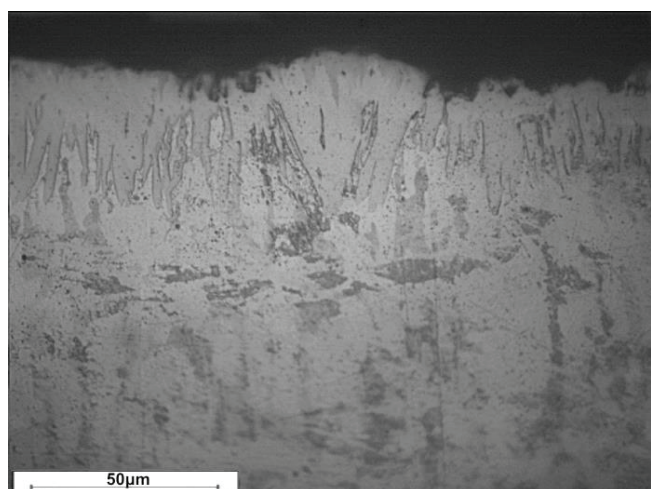
та микротвердости применялся программный комплекс Nexsys ImageExpert MicroHandness 2 (ГОСТ 9450–76). Снимки микроструктур были сделаны с помощью металлографического микроскопа «МЕТАМ РВ-34» с цифровой камерой «Altami Studio» (Россия). Для определения толщины диффузионного слоя использовали программный комплекс Nexsys ImageExpert Pro 3.0.

### Результаты и их обсуждение

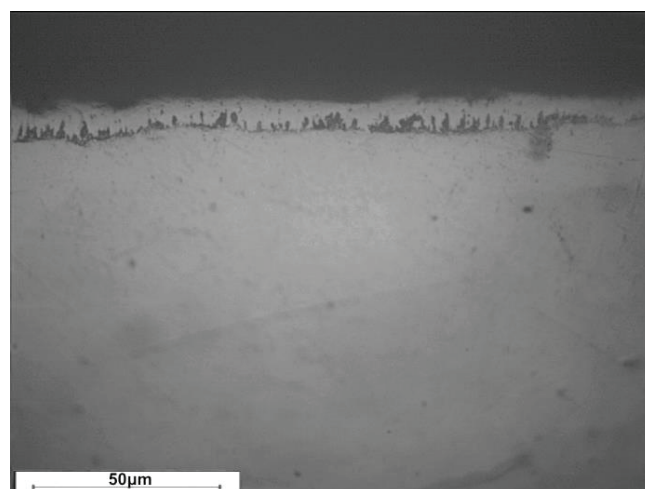
Процессы борирования и алитирования проводились на образцах стали Ст3 и 3Х2В8Ф при температуре 900 °С с выдержкой 2 ч.

На рис. 1 и 2 представлены микрофотографии структуры сталей после ХТО.

На рисунках отчетливо видна характерная для борированных слоев игольчатая структура. Толщина полученного диффузионного слоя на Ст3 составляет 35 мкм, а на легированной стали – 15 мкм. Известно, что борирование низкоуглеродистой стали при тех же температурно-временных режимах в металлотермических смесях (на основе оксидов бора и алюминия) обеспечивает толщину слоя 50 мкм [16]. На стали 3Х2В8Ф образовался слой гораздо меньшей толщины по сравнению с низкоуглеродистой сталью. Это связано с высокой концентрацией легирующих элементов, затрудняющих диффузию бора. Полученный слой сопоставим по толщине с борированными слоями, полученными жидкостным методом и в пастах различного состава [16].



а



б

Рис. 1. Микроструктуры стали Ст3 (а) и 3Х2В8Ф (б) после борирования

Fig. 1. Microstructures of St3 (a) and 3Cr2W8V (b) steels after boriding



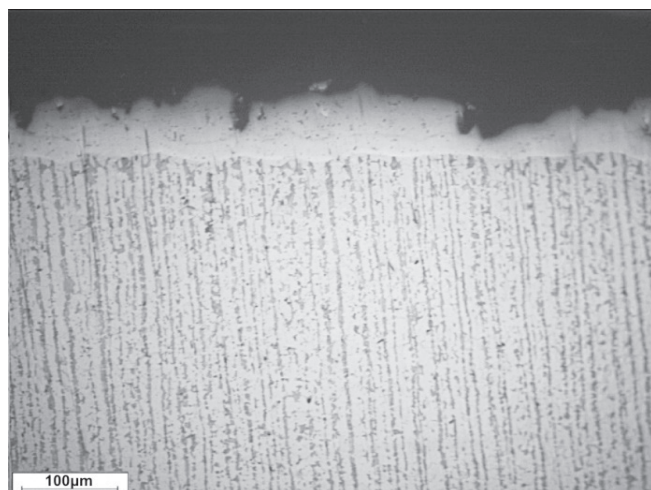
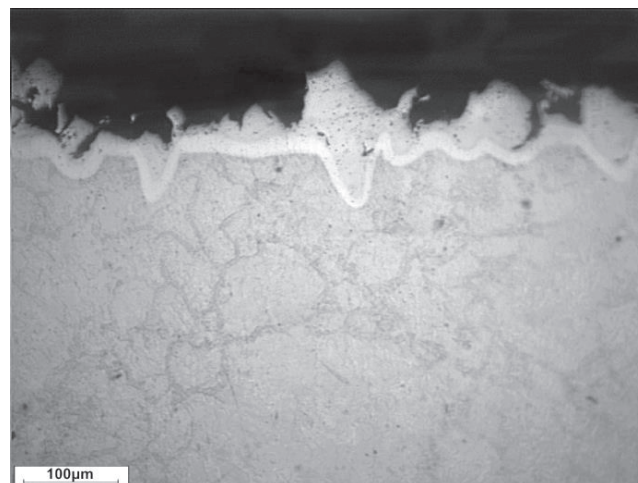

*a*

*б*

Рис. 2. Микроструктуры стали Ст3 (*a*) и 3Х2В8Ф (*б*) после алитирования

Fig. 2. Microstructures of St3 (*a*) and 3Cr2W8V (*б*) steels after aluminizing

На рис. 2, *a*, *б* показаны структуры исследуемых сталей после алитирования. На стали Ст3 образовался более ровный поверхностный слой, состоящий в основном из  $Al_5Fe_2$ . На границе с основным металлом образуются по мере удаления от поверхности фазы  $AlFe$ ,  $AlFe_3$  и твердый раствор в  $\alpha$ -Fe [17–19]. Толщина диффузионного слоя на стали Ст3 равна 65 мкм, что сопоставимо со слоями, полученными алитированием, напылением и в расплавах солей (гальванический способ) [17].

На образце из стали 3Х2В8Ф виден слой средней толщины 50 мкм с неравномерной границей раздела с основным металлом. Локальные участки экстремумов толщины слоя, по-видимому, являются местами проплавления поверхности стали и частичного перехода в жидкое состояние на данных участках, что также сопровождается повышенной диффузией пропорционально повышению температуры. Последнее может быть вызвано прохождением экзотермической реакции восстановления металлов. При этом фазовый состав аналогичен составу на углеродистой стали Ст3, где алюминиды железа дополнительно легированы Cr, W и V.

Низкое качество поверхности после алитирования связано с высокой реакционной способностью алюминия, сопровождающейся взаимодействием с кислородом и другими элементами атмосферного воздуха [20].

На рис. 3 показана диаграмма распределения микротвердости по глубине после процесса борирования для обеих сталей.

Максимальная микротвердость для стали Ст3 наблюдается на поверхности слоя и на глубине до 10...15 мкм и достигает 1919,6 HV, что характерно для борирования за счет образования твердых боридов железа. На стали 3Х2В8Ф максимальное значение (1684,8 HV) наблюдается на глубине 15 мкм от поверхности, вероятно, в зоне с самой высокой концентрацией боридов.

На рис. 4 представлена диаграмма распределения микротвердости по глубине после процесса алитирования для обеих сталей.

Интерес вызывают полученные диаграммы распределения микротвердости после процесса алитирования для стали 3Х2В8Ф. Максимальное значение микротвердости для Ст3 составило 996 HV, а для стали 3Х2В8Ф оно достигло достаточно высоких показателей – 1119 HV. На данной диаграмме присутствует характерное увеличение микротвердости на глубине 150...180 мкм от поверхности. Локальное увеличение микротвердости соответствует переходной зоне непосредственно под слоем, что может указывать на повышенное содержание карбидов хрома и вольфрама. Повышение концентрации последних является результатом их вытеснения диффундирующим с поверхности алюминием. Вытеснение карбидов в глубь основного

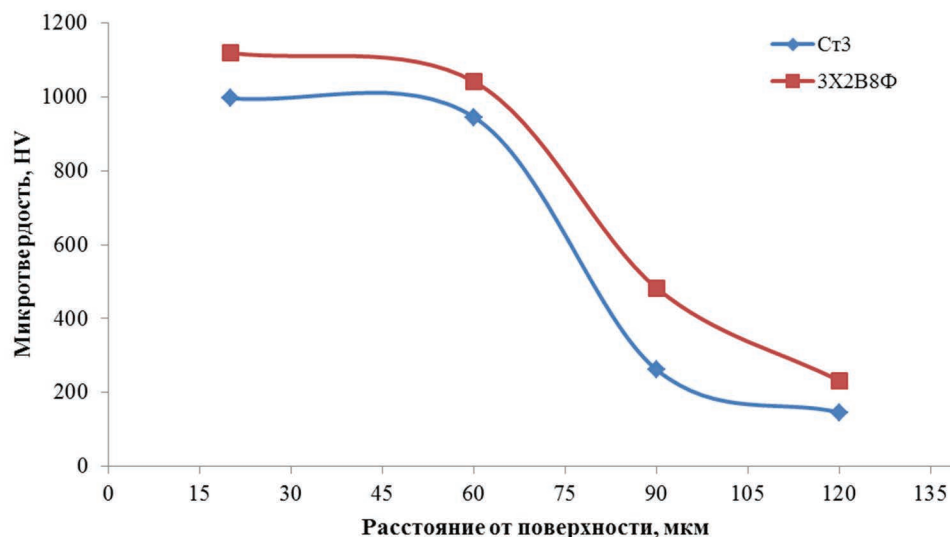


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине слоя на сталях после борирования

Fig. 3. Microhardness distribution over the layer depth on steels after boriding

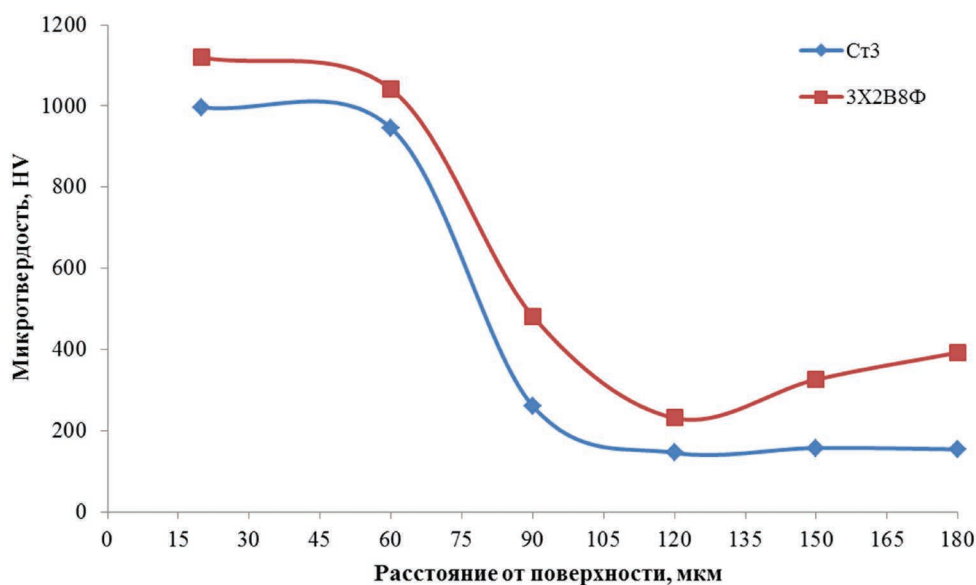


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине слоя на сталях после алитирования

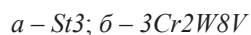
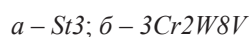
Fig. 4. Microhardness distribution over the layer depth on the steels after aluminizing

металла связано с их взаимной нерастворимостью с алюминидом [21].

Образцы после ХТО были направлены на РФА для определения фазового состава поверхностного диффузионного слоя. На рис. 5, а изображена рентгенограмма при борировании стали Ст3, на поверхности образуются фазы FeB и Fe<sub>2</sub>B. При борировании стали 3X2B8Ф (рис. 5, б) образуется только фаза Fe<sub>2</sub>B.

На рис. 6, а представлена рентгенограмма после процесса алитирования стали Ст3, на поверхности образуются фазы Al<sub>5</sub>Fe<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При алитировании стали 3X2B8Ф идентифицируются фазы Al<sub>5</sub>Fe<sub>2</sub>, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Дальнейшие исследования заключались в определении содержания В и Al в диффузионном слое и переходных зонах. На рис. 7, а показано распределение В для Ст3 и 3X2B8Ф со-



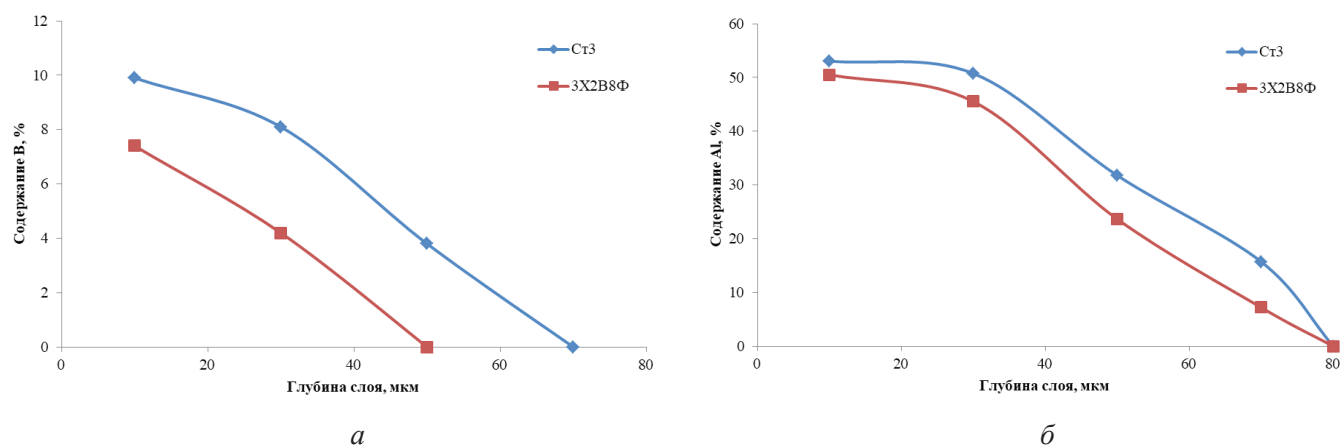


Рис. 7. Распределение бора и алюминия по глубине слоя на сталях после борирования (а) и алитирования (б) соответственно

Fig. 7. Distribution of boron and aluminum over the layer thickness on the steels after boriding (a) and aluminizing (b) respectively

разуются бориды железа. При этом на стали Ст3 рентгенофазовым анализом (РФА) обнаружено два борида  $\text{FeB}$  и  $\text{Fe}_2\text{B}$ , а на стали 3Х2В8Ф – только фаза  $\text{Fe}_2\text{B}$ . После алитирования обеих сталей образуются алюминийсодержащие фазы, такие как  $\text{Al}_5\text{Fe}_2$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Толщина полученного диффузионного слоя на легированной стали меньше, чем на углеродистой стали, что связано с влиянием легирующих элементов, тормозящих диффузию бора и алюминия. Максимальная микротвердость наблюдается на стали Ст3, она составляет 1920 HV после борирования, что объясняется присутствием в ее составе двух боридов железа, на стали 3Х2В8Ф максимальное значение микротвердости достигло 1620 HV. Микротвердость после алитирования сопоставима для обеих сталей, она равна 1000...1100 HV.

### 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. Kulka M. Trends in thermochemical techniques of boriding // Kulka M. Current trends in boriding: Techniques. – Cham, Switzerland: Springer, 2019. – P. 17–98. – (Engineering materials). – DOI: 10.1007/978-3-030-06782-3\_4.
3. Atul S.C., Adalarasan R., Santhanakumar M. Study on slurry paste boronizing of 410 martensitic stainless steel using taguchi based desirability analysis (TDA) // International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering. – 2015. – Vol. 5. – P. 64–77. – DOI: 10.4018/IJMMME.2015070104.

4. Nakajo H, Nishimoto A. Boronizing of CoCrFeMn-Ni high-entropy alloys using spark plasma sintering // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2022. – Vol. 6. – P. 29. – DOI: 10.3390/jmmp6020029.

5. Campos-Silva I.E., Rodriguez-Castro G.A. Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels // Thermochemical Surface Engineering of Steels. – 2015. – Vol. 62. – P. 651–702. – DOI: 10.1533/9780857096524.5.651.

6. Effect of aluminizing and oxidation on the thermal fatigue damage of hot work tool steels for high pressure die casting applications / M. Salem, S. Le Roux, G. Dour, P. Lamesle, K. Choquet, F. Rézaï-Aria // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 119. – P. 126–138. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.09.018.

7. Formation and phase transformation of aluminide coating prepared by low-temperature aluminizing process / Y. Sun, J. Dong, P. Zhao, B. Dou // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Vol. 330. – P. 234–240. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.025.

8. 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.

9. Разработка физических основ комплексного электронно-ионно-плазменного инжиниринга поверхности материалов и изделий / Ю.Ф. Иванов, Н.Н. Коваль, Е.А. Петрикова, О.В. Крысина, В.В. Шугуров, Ю.Х. Ахмадеев, И.В. Лопатин, А.Д. Тересов, О.С. Толкачев // Научные технологии в проектах РНФ. Сибирь / под ред. С.Г. Псахье, Ю.П. Шаркеева. – Томск, 2017. – Гл. 1. – С. 5–35. – ISBN 978-5-89503-607-5.

10. 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.
11. 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.
12. Zenker R. Electron beam surface technologies // *Encyclopedia of Tribology* / Q.J. Wang and Y.-W. Chung (Eds.). – Boston, MA: Springer, 2013. – ISBN 978-0-387-92898-2. – DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5\_723.
13. 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. Przestacki, J. Hajkowski, A. Miklaszewski // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11. – P. 608. – DOI: 10.3390/coatings11050608.
14. Microstructure and wear behavior of tungsten hot-work steel after boriding and borooaluminizing / U. Mishigdorzhijn, Y. Chen, N. Ulakhanov, H. Liang // *Lubricants*. – 2020. – Vol. 8, iss. 3. – P. 26. – DOI: 10.3390/lubricants8030026.
15. 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.
16. Рябов В.Р. Алитирование стали. – М.: Металлургия, 1973. – 240 с.
17. Даненко В.Ф., Гуревич Л.М., Понкратова Г.В. О влиянии алитирования на структуру и свойства стали Ст3 // *Известия ВолгГТУ*. – 2014. – № 9. – С. 30–34.
18. Скорилов А.В., Ульяновская Э.В. Кинетика процесса поверхностного алитирования порошковых сталей // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2018. – № 3 (199). – С. 134–139. – DOI: 10.17213/0321-2653-2018-3-134-139.
19. Структура и фазовый состав защитных покрытий на стали, полученных методами жидкофазного алитирования / И.Г. Бродова, И.Г. Ширинкина, Ю.П. Зайков, В.А. Ковров, Ю.М. Штефанюк, В.В. Пингин, Д.А. Виноградов, М.В. Голубев, Т.И. Яблонских, В.В. Астафьев // *Физика металлов и материаловедение*. – 2015. – Т. 116, № 9. – С. 928–936. – DOI: 10.7868/S0015323015090041.
20. Jurči P., Hudáková M. Diffusion boronizing of H11 hot work tool steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2011. – Vol. 20. – P. 1180–1187. – DOI: 10.1007/s11665-010-9750-x.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 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/>)

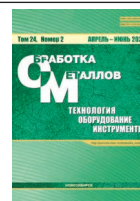




# Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Influence of boriding and aluminizing processes on the structure and properties of low-carbon steels

Pavel Gulyashinov<sup>1, a, \*</sup>, Undrakh Mishigdorzhyn<sup>2, b</sup>, Nikolay Ulakhanov<sup>3, 2, c</sup>

<sup>1</sup> Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences, 6 Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Physical Material Science of the Siberian Branch of the RAS, 6 Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation

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

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6776-9314>, [gulpasha@mail.ru](mailto:gulpasha@mail.ru), <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7863-9045>, [undrakh@ipms.bsnet.ru](mailto:undrakh@ipms.bsnet.ru),

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0635-4577>, [nulahanov@mail.ru](mailto:nulahanov@mail.ru).

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 15 March 2022

Revised: 06 April 2022

Accepted: 27 April 2022

Available online: 15 June 2022

##### Keywords:

Thermochemical treatment (TCT)

Boriding

Aluminizing

Boron carbide

Aluminum

Carbon steel

Alloy steel

##### Funding

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project 19-79-10163).

##### Acknowledgements

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

#### ABSTRACT

**Introduction.** Boriding and aluminizing are among the effective methods for improving the performance properties (corrosion resistance, heat resistance and wear resistance) of machine parts and tools. Solid-phase methods of carrying out techniques of thermochemical treatment (TCT) require long-term exposure at elevated temperatures, which negatively affects the structure and properties of the base material. From these positions, the selection of reasonable temperature-time parameters of solid-phase boriding and aluminizing processes is an urgent task. **The purpose of this work** is to assess the effect of low-temperature boriding and aluminizing processes on the structure and microhardness of diffusion layers on the surface of low-carbon steels. The paper considers two grades of steels with a carbon content of up to 0.4 %: low-carbon steel *St3* and alloy steel *3Cr2W8V*. The use of the second steel is due to the need to identify the effect of alloying elements in steel on the thickness of diffusion layers and its composition. Powder mixtures based on boron carbide and aluminum carbide are selected as sources of boron and aluminum. **Results and discussions.** It is found at a process temperature of 900 °C and holding for 2 hours after boriding, iron borides are formed on the surface of both steels. At the same time, two borides *FeB* and *Fe<sub>2</sub>B* are detected on *St3* steel by X-ray phase analysis (XRD), and only the *Fe<sub>2</sub>B* phase is detected on *3Cr2W8V* steel. After aluminizing, aluminum-containing phases such as *Al<sub>4</sub>Fe<sub>3</sub>*, *Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>* and *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* are formed in both steels. The thickness of the resulting diffusion layer on *St3* after boriding is 35 μm, after aluminizing – 65 μm. The thickness of the diffusion layer on *3Cr2W8V* steel is equal to 15 μm after boriding and 50 μm after aluminizing, which is significantly less than on carbon steel and is obviously due to the effect of alloying elements. It is established that TCT leads to a significant increase in the microhardness of the samples surface. Thus, the maximum microhardness of *St3* steel increased to 2,000 HV, and the maximum microhardness of *3Cr2W8V* steel increased to 1,700 HV after boriding. The microhardness after aluminizing is comparable for both steels and is equal to 1,000–1,100 HV. Elemental analysis of the upper sections of the diffusion layers shows that the content of boron (7–9 %) and aluminum (50–53 %) corresponds to the detected XRD iron borides and aluminides. In all cases, there is a gradual decrease in the diffusing elements in the direction from the surface to the base.

**For citation:** Gulyashinov P.A., Mishigdorzhyn U.L., Ulakhanov N.S. Influence of boriding and aluminizing processes on the structure and properties of low-carbon steels. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = Metal Working and Material Science, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 91–101. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-91-101. (In Russian).

#### References

1. Voroshnin L.G., Mendeleva 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.

#### \* Corresponding author

Gulyashinov Pavel A., Ph.D. (Engineering), Scientific Associate  
 Baikal Institute of Nature Management Siberian  
 branch of the Russian Academy of sciences  
 6 Sakhyanovoy str.,  
 670047, Ulan-Ude, Russian Federation  
 Tel.: 8 (3012) 43-36-76, e-mail: [gulpasha@mail.ru](mailto:gulpasha@mail.ru)

2. Kulka M. Trends in thermochemical techniques of boriding. Kulka M. *Current trends in boriding: Techniques*. Cham, Switzerland, Springer, 2019, pp. 17–98. DOI: 10.1007/978-3-030-06782-3\_4.
3. Atul S.C., Adalarasan R., Santhanakumar M. Study on slurry paste boronizing of 410 martensitic stainless steel using taguchi based desirability analysis (TDA). *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, 2015, vol. 5, pp. 64–77. DOI: 10.4018/IJMMME.2015070104.
4. Nakajo H, Nishimoto A. Boronizing of CoCrFeMnNi high-entropy alloys using spark plasma sintering. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022, vol. 6, p. 29. DOI: 10.3390/jmmp6020029.
5. Campos-Silva I.E., Rodriguez-Castro G.A. Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. *Thermochemical Surface Engineering of Steels*, 2015, vol. 62, pp. 651–702. DOI: 10.1533/9780857096524.5.651.
6. Salem M., Le Roux S., Dour G., Lamesle P., Choquet K., Rézaï-Aria F. Effect of aluminizing and oxidation on the thermal fatigue damage of hot work tool steels for high pressure die casting applications. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 119, pp. 126–138. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.09.018.
7. Sun Y., Dong J., Zhao P., Dou B. Formation and phase transformation of aluminide coating prepared by low-temperature aluminizing process. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 330, pp. 234–240. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.10.025.
8. Shin V.I., Moskvina 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.
9. Ivanov Yu.F., Koval' N.N., Petrikova E.A., Krysina O.V., Shugurov V.V., Akhmadeev Yu.Kh., Lopatin I.V., Teresov A.D., Tolkachev O.S. Razrabotka fizicheskikh osnov kompleksnogo elektronno-ionno-plazmennogo inzhiniringa poverkhnosti materialov i izdelii [Development of the physical foundations of complex electron-ion-plasma engineering of the surface of materials and products]. *Naukoemkie tekhnologii v proektakh RNF. Sibir' [High technologies in RSF projects. Siberia]*. Tomsk, NTL Publ., 2017, ch. 1, pp. 5–35. ISBN 978-5-89503-607-5.
10. Koval' N.N., Ivanov Yu.F., eds. *Evolutsiya 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.
11. 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.
12. Zenker R. Electron beam surface technologies. *Encyclopedia of Tribology*. Wang Q.J., Chung Y.-W. (Eds.). Boston, MA, Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5\_723.
13. Bartkowska A., Bartkowski D., Przestacki 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.
14. Mishigdorzhyn 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.
15. Gulyashinov P.A., Mishigdorzhyn U.L., Ulakhanov N.S. Vliyanie mekhanoaktivatsii poroshkovoi smesi na strukturu i svoystva 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.
16. Ryabov V.R. *Alitirovanie stali* [Aluminizing steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 240 p.
17. Danenko V.F., Gurevich L.M., Ponkratova G.V. O vliyani alitirovaniya na strukturu i svoystva stali St3 [On the effect of aluminizing on the structure and properties of steel St3]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2014, no. 9, pp. 30–34.

18. Skorikov A.V., Ul'yanovskaya E.V. Kinetika protsessa poverkhnostnogo alitirovaniya poroshkovykh stalei [Kinetics of the process of surface aluminizing of powder steels]. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, 2018, no. 3 (199), pp. 134–139. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-3-134-139.

19. Brodova I.G., Shirinkina I.G., Zaikov Yu.P., Kovrov V.A., Shtefanyuk Yu.M., Pingin V.V., Vinogradov D.A., Golubev M.V., Yablonskikh T.I., Astaf'ev V.V. Struktura i fazovyi sostav zashchitnykh pokrytii na stali, poluchennykh metodami zhidkofaznogo alitirovaniya [Structure and phase composition of protective coatings on steel obtained by liquid-phase aluminizing]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2015, vol. 116, no. 9, pp. 928–936. DOI: 10.7868/S0015323015090041.

20. Jurči P., Hudáková M. Diffusion boronizing of H11 hot work tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20, pp. 1180–1187. DOI: 10.1007/s11665-010-9750-x.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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/>).