



Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
УДК 621.785.539

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.024

EDN: PYBRES

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ БОРИРОВАНИИ СТАЛЕЙ

Денис Михайлович Мордасов¹, Павел Александрович Шерстеникин²

^{1,2} Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

¹ dmmordasov@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3940-1661>

² pavelstark68rus@gmail.com

Аннотация. При разработке борсодержащих составов для твердофазного борирования необходимо четко понимать физико-химические особенности процессов, происходящих в реакционном пространстве при рабочей температуре. В настоящей работе представлены результаты анализа химических процессов, происходящих при борировании в порошковых смесях на основе $B_{\text{аморф}} - Na_2B_4O_7$ и $B_4C - NH_4Cl$ с добавкой в виде порошка отработанного керамического сварочного флюса алюминатно-основного типа. В ходе экспериментальных исследований проведено твердофазное борирование конструкционной углеродистой стали в разработанных составах при температуре 900 °C в течение 2 часов и металлографический анализ полученных диффузионных слоев. В результате термодинамического анализа определены реакции, не имеющие термодинамических ограничений. Показано, что активация бора во всех исследуемых составах происходит преимущественно за счет разложения фторида бора, который синтезируется в реакционном пространстве. К образованию фторида бора приводят реакции с участием галогенидов B , Fe , Ca (в смесях $B_4C - NH_4Cl$) и Na , Ca (в смесях $B_{\text{аморф}} - Na_2B_4O_7$). В составах $B_4C - NH_4Cl$ синтезируется большее количество активного бора за счет протекания большего количества термодинамически предпочтительных химических превращений, приводящих к образованию BF_3 . В результате металлографического анализа показано, что глубина диффузионного слоя при борировании в составах на основе $B_4C - NH_4Cl$ более чем в 2 раза превышает глубину, полученную при использовании составов на основе $B_{\text{аморф}} - Na_2B_4O_7$, а микротвердость выше на 30 %. Теоретически доказана и подтверждена экспериментально возможность использования отработанного керамического сварочного флюса в качестве компонента борирующих составов, выполняющего одновременно роль инертной добавки (SiO_2 , MnO , CaO , MgO , Al_2O_3 , FeO , TiO_2 , ZrO_2) и активатора процесса борирования (CaF_2).

Ключевые слова: твердофазное борирование, сварочный флюс, термодинамический анализ, металлографический анализ, микротвердость, диффузионный слой.

Для цитирования: Мордасов Д. М., Шерстеникин П. А. Анализ процессов, происходящих при твердофазном борировании сталей // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 147–151. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.024. EDN: 4<https://elibrary.ru/PYBRES>.

Original article

ANALYSIS OF PROCESSES OCCURRING DURING SOLID-PHASE BORIDING OF STEELS

Denis M. Mordasov¹, Pavel A. Sherstenikin²

^{1,2} Tambov State Technical University, Tambov, Russia

¹ dmmordasov@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0003-3940-1661>

² pavelstark68rus@gmail.com

Abstract. When developing boron-containing compositions for solid-phase boriding, it is necessary to clearly understand the physicochemical features of the processes occurring in the reaction space at the operating temperature. This paper presents the results of an analysis of the chemical processes occurring during boriding in powder mixtures based on $B_{\text{аморф}} - Na_2B_4O_7$ and $B_4C - NH_4Cl$ with an additive in the form of spent ceramic welding flux powder of the aluminate-basic type. In the course of experimental studies, solid-phase boriding of construction carbon steel in the developed compositions was carried out at a temperature of 900 °C for 2 hours and a metallographic analysis of the obtained diffusion layers was carried out. As a result of thermodynamic analysis, reactions were determined that have no thermodynamic limitations. It is shown that boron activation in all the studied compositions occurs mainly due to the decomposition of boron fluoride, which is synthesized in the reaction space. Boron fluoride is formed by reactions involving halides of B , Fe , Ca (in $B_4C - NH_4Cl$ mixtures) and Na , Ca (in $B_{\text{аморф}} - Na_2B_4O_7$ mixtures). In $B_4C - NH_4Cl$ compositions, a greater amount of active boron is synthesized due to a greater number of thermodynamically preferred chemical transformations leading to the formation of BF_3 . As a result of metallographic analysis, it was shown that the depth of the diffusion layer during boriding in $B_4C - NH_4Cl$ -based compositions is more than 2 times greater than the depth obtained using $B_{\text{аморф}} - Na_2B_4O_7$ -based compositions, and the microhardness is 30 % higher. The possibility of using spent ceramic welding flux as a component of borating compositions, which simultaneously acts as an inert additive (SiO_2 , MnO , CaO , MgO , Al_2O_3 , FeO , TiO_2 , ZrO_2) and an activator of the borating process (CaF_2), has been theoretically proven and experimentally confirmed.

Keywords: solid-phase boriding, welding flux, thermodynamic analysis, metallographic analysis, microhardness, diffusion layer.

© Мордасов Д. М., Шерстеникин П. А., 2025

POLZUNOVSKIY VESTNIK № 4 2025

147

For citation: Mordasov, D. M. & Sherstenikin, P. A. (2025). Analysis of processes occurring during solid-phase boriding of steels. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 147-151. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.024. EDN: <https://elibrary.ru/PYBRES>

ВВЕДЕНИЕ

Среди многочисленной группы методов химико-термического поверхностного упрочнения металлов и сплавов особое место занимают методы диффузионного боридного упрочнения, в том числе с одновременным внедрением других элементов (алюминий, кремний, хром, азот и др.) [1-5].

Борсодержащие диффузионные слои обладают наивысшей микротвердостью среди слоев с другими упрочняющими фазами, высокой коррозионной стойкостью, устойчивостью к воздействию щелочей, жаростойкостью до 800°C, повышенной износостойкостью, в т.ч. и при высоких температурах.

В зависимости от агрегатного состояния борсодержащей среды, различают методы жидкостного и газового борирования, борирование в пастах и в порошках [6]. Каждый из вышеперечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки при решении определенных технологических задач. Наибольшее применение в промышленном производстве получили методы газового и жидкостного борирования, позволяющие обрабатывать одновременно большие партии деталей. Однако, такие методы нецелесообразно применять в условиях единичного и мелкосерийного производства в связи с высоким расходом борсодержащих веществ и проблемами, связанными с их дальнейшей утилизацией. Данная задача может быть решена с использованием методов борирования в пастах или в порошках. Несмотря на очевидные преимущества борирования в обмазках, у таких методов есть и недостатки, связанные с вредными выделениями газовой фазы при горении связующих, а также с необходимостью трудоемкой очистки изделий от остатков пасты.

При решении задач борирования мелких деталей в небольших количествах эффективным является применение технологий твердофазного борирования, где в качестве борсодержащей среды используются порошки аморфного бора, карбида бора, ферробора, ферроборана и др. Реализация таких технологий осуществляется с применением герметизируемых и открытых контейнеров, в вакууме, в защитных атмосферах, в псевдоожженном слое, в токопроводящих смесях.

С экономической точки зрения, наибольший интерес представляют технологии твердофазного борирования с применением контейнеров с минимальной степенью герметизации, реализуемые в электрических камерных печах. Разработка таких технологий связана с научно-обоснованным выбором состава порошковой шихты на основе изучения физико-химических процессов, протекающих в реакционном пространстве.

В связи с применением для твердофазного борирования многокомпонентных порошковых шихт, при температурах борирования имеет место большое количество химических реакций между этими компонентами, образующимися промежуточными веществами, поверхностью обрабатываемого изделия, веществами, присутствующими в газовом пространстве контейнера. Характер протекания этих реакций зависит от температуры, химического сродства между соответствующими веществами, очередности протекания реакций и образования взаимодействующих веществ, концентрации компонентов в шихте и т.д. В настоящее время сохраняется актуальность изучения процессов,

протекающих при различных видах химико-термической обработки, в том числе и борирования.

Многие авторы [3, 7-9] при объяснении процессов борирования приводят химические уравнения для доказательства протекания которых определяют изменение энергии Гиббса.

При разработке состава шихты для твердофазного борирования и изучения опыта других исследователей, выявлено, что несмотря на многолетние исследования в этой области, наиболее полное описание происходящих химических процессов отсутствует:

- приводятся химические уравнения без анализа возможности их протекания как таковых, так и при температурах процесса;

- приводятся приближенные расчеты, в которых изменение энергии Гиббса при температурах протекания процесса определяют по значениям изменения энтропии и энталпии при 25°C, не учитывая при этом изменение изобарной теплоемкости;

- некоторые авторы, не обращая внимания на единицы измерения термохимических величин, сводят в одну таблицу данные как в системе СИ, так и с использованием внесистемных единиц «ккал».

Представленный в работе анализ химических процессов не претендует на абсолютную полноту учета всех взаимодействий. Нами предпринята попытка выявления и оценки основных химических реакций, протекающих при твердофазном борировании в используемых порошковых смесях.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное изучение процесса борирования конструкционной углеродистой стали в порошковых смесях различного состава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретические исследования процессов, происходящих при твердофазном борировании, осуществлялись путем проведения термодинамического анализа протекающих химических реакций [10]. Исходными данными для проведения термодинамического анализа являлись стандартные энталпии образования веществ (H^0_{298}), стандартные энтропии S^0_{298} , а также значения коэффициентов полинома, отражающего температурную зависимость изобарной теплоемкости (1):

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3 + \frac{E}{T^2}, \quad (1)$$

где $C_p(T)$ – изобарная теплоемкость; A, B, C, D, E – коэффициенты полинома; T – абсолютная температура.

Для произвольной температуры энталпия образования вещества (H^0_T) и энтропия (S^0_T) определяются по формулам (10):

$$H^0_T = H^0_{298} + \int_{298}^T C_p(T)dT, \quad (2)$$

$$S^0_T = S^0_{298} + \int_{298}^T \frac{C_p(T)}{T}dT. \quad (3)$$

С учетом (1) уравнения (2) и (3) принимают вид:

$$H^0_T = At + B\frac{t^2}{2} + C\frac{t^3}{3} + D\frac{t^4}{4} - \frac{E}{t} + F, \quad (2)$$

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ БОРИРОВАНИИ СТАЛЕЙ

$$S_T^0 = A \ln(t) + Bt + C \frac{t^2}{2} + D \frac{t^3}{3} - \frac{E}{2t^2} + G, \quad (3)$$

где F, G – коэффициенты; $t = T/1000$.

При проведении исследований значения коэффициентов A, B, C, D, E, F, G для индивидуальных веществ определялись с использованием базы термохимических данных Национального института стандартов и технологий (NIST, <http://webbook.nist.gov>).

После определения термодинамических свойств (H_T^0, S_T^0) индивидуальных веществ, изменение энергии Гиббса (ΔG_T^0) в результате протекания соответствующей реакции определялось по формуле

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T \Delta S_T^0, \quad (4)$$

где

$$\Delta H_T^0 = \sum_{i=1}^k (n_i H_{T,i}^0)^{\text{прод}} - \sum_{j=1}^m (n_j H_{T,j}^0)^{\text{исх}},$$

$$\Delta S_T^0 = \sum_{i=1}^k (n_i S_{T,i}^0)^{\text{прод}} - \sum_{j=1}^m (n_j S_{T,j}^0)^{\text{исх}},$$

n – количество (моль) вещества, участвующего в реакции; m, k – количество исходных веществ и продуктов реакции, соответственно.

О возможности протекания химической реакции судят в зависимости от величины рассчитанного значения ΔG_T^0 :

- $\Delta G_T^0 > 0$, реакция термодинамически запрещена (не может протекать самопроизвольно в прямом направлении);

- $\Delta G_T^0 < 0$, не имеет термодинамических ограничений (реакция самопроизвольно протекает в прямом направлении);

- $\Delta G_T^0 = 0$, реакция может протекать как в прямом, так и в обратном направлениях.

Таблица 1 - Составы борсодержащих смесей

Table 1 - Compositions of boron mixtures

№ смеси	Состав
1	70 % B _{аморфн} 5 % NaF 20 % Na ₂ B ₄ O ₇ (бура) 5 % отраб. флюс UF-02
2	70 % B _{аморфн} 25 % Na ₂ B ₄ O ₇ (бура) 5 % отраб. флюс UF-02
3	75 % B ₄ C 20 % NH ₄ Cl 5 % отраб. флюс UF-02
4	55 % B ₄ C 40 % NH ₄ Cl 5 % отраб. флюс UF-02

Проведение экспериментальных исследований заключалось в термодиффузионном насыщении поверхности стальных образцов из стали Ст3 размером 50×20×3 в контейнере размером 100×100×50 с песчанным затвором. Процесс проводился при 900°C в муфельной печи СНОЛ 6/11 в течение 2 часов.

В таблице 1 представлены составы борсодержащих смесей.

В состав каждой смеси введена добавка в виде отработанного керамического сварочного флюса UF-02 алюминатно-основного типа в качестве компонента, выполняющего одновременно роль инертной добавки (SiO₂, MnO, CaO, MgO, Al₂O₃, FeO, TiO₂, ZrO₂) и активатора процесса борирования (CaF₂). Отработанный флюс имеет следующий химический состав:

SiO₂ - 18-24 %; MnO - 5-8 %; CaO - 2-3 %; MgO – 19-25 %; Al₂O₃ – 23-30 %; CaF₂ - 8-12 %; FeO - 5-10 %; TiO₂ - <1%; ZrO₂ - <1%. Данный материал (изначально в виде шлаковых корок) представляет собой отходы производств с использованием автоматической сварки и наплавки под флюсом и подлежит утилизации. Количество таких отходов в рамках одного предприятия исчисляется десятками тонн в год.

Оценка результатов борирования осуществлялась путем металлографического анализа образцов, подвергнутых электролитическому травлению, с использованием оптического микроскопа Levenhuk IMM1000 и измерения микротвердости на поперечных шлифах с помощью микротвердомера ПМТ-3М.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно современным представлениям, процесс борирования протекает в три этапа:

- активация бора и образование на поверхности детали насыщающих атомов бора;

- адсорбция поверхностью детали атомов бора, образование межатомных связей с поверхностью;

- диффузия атомов бора вглубь детали.

Основой всех процессов борирования является разработка состава борсодержащей среды и технологических режимов, позволяющих получить в реакционном пространстве активные атомы бора. В результате проведенных теоретических исследований было проанализировано более 100 возможных реакций, в том числе приводимых другими авторами при анализе процессов борирования, и определена возможность их протекания при температуре 900°C.

В таблице 2 представлены реакции, не имеющие термодинамических ограничений, протекающие при борировании в составах 1 и 2. К образованию активного бора в таких составах происходит в следующей последовательности BF₃ → BF → B_{акт}. К возникновению газообразного фторида бора на поверхности стали приводит воздействие на нее компонентов шихты CaF₂ и NaF. При этом CaF₂ имеет большую реакционную способность.

Таблица 2 – Химические реакции, протекающие при борировании в составах 1 и 2

Table 2 – Chemical reactions occurring during boriding in compositions 1 and 2

Реакция	$\Delta G_{1173}^0, \text{ кДж/моль}$
4B+3O ₂ → 2B ₂ O ₃	-1962,3
2Fe+2CaF ₂ + O ₂ → 2FeF ₂ +2CaO	-57,6
4Fe+6CaF ₂ + 3O ₂ → 4FeF ₃ +6CaO	-23,1
12NaF+4B+3O ₂ → 2BF ₃ +6Na ₂ O	-362,0
6CaF ₂ +4B +3O ₂ →4BF ₃ +6CaO	-1158,7
Na ₂ B ₄ O ₇ + Na ₂ O → 4NaBO ₂	-238,7
NaBO ₂ +B ₂ O ₃ +3NaF→2BF ₃ +Na ₄ B ₂ O ₅	-18,6
2FeF ₃ + B ₂ O ₃ → 2BF ₃ +Fe ₂ O ₃	-108,5
3FeF ₂ + B ₂ O ₃ → 2BF ₃ +3FeO	-102,6
BF ₃ → BF + F ₂ ↑	-1956,5
3BF → BF ₃ +3B _{акт}	-466,3
2BF+Fe → FeF ₂ +2B _{акт}	-145,7
3BF+Fe → FeF ₃ +3B _{акт}	-181,0
2Fe+ B _{акт} → Fe ₂ B	-0,8
Fe+ B _{акт} → FeB	-1,2
Fe ₂ B+Fe → 2FeB	-69,4

В таблице 3 приведены химические реакции, протекающие при борировании в составах 3 и 4. Также, как и при использовании составов на основе

аморфного бора, активация бора происходит преимущественно за счет разложения фторида бора. В отличие от составов 1 и 2, при использовании составов 3 и 4 синтезируется большее количество активного бора за счет протекания большего количества термодинамически предпочтительных химических превращений, приводящих к образованию BF_3 . Увеличение возможных путей получения фторида бора связано с синтезом в реакционном пространстве хлоридов железа и бора.

На рисунке 1 представлены микроструктуры диффузионных слоев на стали Ст3, борированной в смесях 1 и 2; на рисунок 2 – в смесях 3 и 4.

Сравнительный анализ микроструктур показывает, что при одинаковой температуре и времени процесса борирования, диффузионное насыщение в смесях на основе B_4C и NH_4Cl проходит эффективнее, чем при использовании смесей на основе аморфного бора и буры, что подтверждает результаты проведенного термодинамического анализа (табл. 2, 3).

Таблица 3 – Химические реакции, протекающие при борировании в составах 3 и 4

Table 3 – Chemical reactions occurring during boriding in compositions 3 and 4

Реакция	$\Delta G_{1173}^0, \text{ кДж/моль}$
$\text{B}_4\text{C} + 4\text{O}_2 \rightarrow 2\text{B}_2\text{O}_3 + \text{CO}_2 \uparrow$	-2424,5
$2\text{B}_4\text{C} + 7\text{O}_2 \rightarrow 4\text{B}_2\text{O}_3 + 2\text{CO} \uparrow$	-4644,9
$\text{B}_4\text{C} + 8\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}_2\text{B} + \text{CO}_2 \uparrow$	-333,6
$\text{B}_4\text{C} + 4\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{FeB} + \text{CO}_2 \uparrow$	-473,7
$\text{B}_4\text{C} + 6\text{CaF}_2 + 4\text{O}_2 \rightarrow 4\text{BF}_3 + 6\text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$	-1500,4
$\text{NH}_4\text{Cl} \rightarrow \text{NH}_3 \uparrow + \text{HCl} \uparrow$	-128,9
$2\text{Fe} + 2\text{HCl} \uparrow \rightarrow 2\text{FeCl}_2 + \text{H}_2 \uparrow$	-499,8
$2\text{B}_4\text{C} + 12\text{FeCl}_2 + 7\text{O}_2 \rightarrow 8\text{BCl}_3 + 12\text{FeO} + 2\text{CO} \uparrow$	-2555,0
$\text{B}_4\text{C} + 12\text{HCl} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{BCl}_3 + \text{CO}_2 \uparrow + 6\text{H}_2 \uparrow$	-488,4
$2\text{BCl}_3 + 3\text{CaF}_2 \rightarrow 2\text{BF}_3 + 3\text{CaCl}_2$	-216,3
$\text{B}_4\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{B}_{\text{акт}} + \text{CO}_2 \uparrow$	-336,2
$2\text{B}_4\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 8\text{B}_{\text{акт}} + 2\text{CO} \uparrow$	-311,2
$4\text{Fe} + 6\text{CaF}_2 + 3\text{O}_2 \rightarrow 4\text{FeF}_3 + 6\text{CaO}$	-23,1
$2\text{Fe} + 2\text{CaF}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeF}_2 + 2\text{CaO}$	-57,6
$2\text{BCl}_3 + 3\text{FeF}_2 \rightarrow 2\text{BF}_3 + 3\text{FeCl}_2$	-431,7
$\text{BCl}_3 + \text{FeF}_3 \rightarrow \text{BF}_3 + \text{FeCl}_3$	-151,3
$2\text{FeF}_3 + \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{BF}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-108,5
$3\text{FeF}_2 + \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{BF}_3 + 3\text{FeO}$	-102,6
$\text{BF}_3 \rightarrow \text{BF} + \text{F}_2 \uparrow$	-1956,5
$3\text{BF} \rightarrow \text{BF}_3 + 3\text{B}_{\text{акт}}$	-466,3
$2\text{BF} + \text{Fe} \rightarrow \text{FeF}_2 + 2\text{B}_{\text{акт}}$	-145,7
$3\text{BF} + \text{Fe} \rightarrow \text{FeF}_3 + 3\text{B}_{\text{акт}}$	-181,0
$2\text{Fe} + \text{B}_{\text{акт}} \rightarrow \text{Fe}_2\text{B}$	-0,8
$\text{Fe} + \text{B}_{\text{акт}} \rightarrow \text{FeB}$	-1,2
$\text{Fe}_2\text{B} + \text{Fe} \rightarrow 2\text{FeB}$	-69,4

В таблице 4 представлены средние значения величин микротвердости и глубины полученных диффузионных слоев.

Таблица 4 – Характеристики борированных слоев

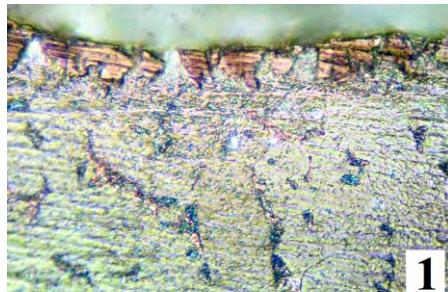
Table 4 – Characteristics of borated layers

№ образца	Глубина слоя, $h, \text{ мкм}$	Микротвердость, HV_{50}
без обработки	0	120
1 (в смеси 1)	30	1245
2 (в смеси 2)	38	1387
3 (в смеси 3)	75	1774
4 (в смеси 4)	105	1890

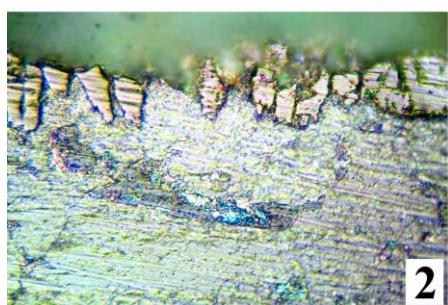
Различия более чем в 2 раза по глубине диффузионного слоя у образцов 1 и 2 по сравнению с 3 и

150

4, а также их микротвердости на 30 %, обусловлено различными концентрациями образующегося активного бора в реакционном пространстве.



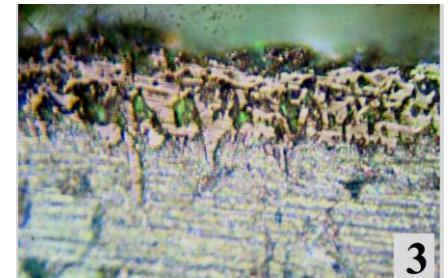
1



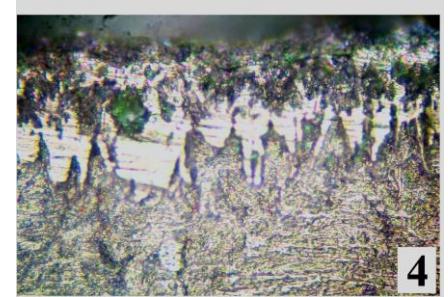
2

Рисунок 1 – Микроструктуры диффузионных слоев при борировании в смесях 1 и 2 (1000×)

Figure 1 – Microstructures of diffusion layers during boriding in mixtures 1 and 2 (1000×)



3



4

Рисунок 2 – Микроструктуры диффузионных слоев при борировании в смесях 3 и 4 (1000×)

Figure 2 – Microstructures of diffusion layers during boriding in mixtures 3 and 4 (1000×)

ВЫВОДЫ

В результате термодинамического анализа химических реакций, предположительно протекающих в реакционном пространстве при температуре 900°C, в составах на основе $\text{B}_{\text{аморф}}$ - $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и B_4C - NH_4Cl определены реакции, не имеющие термодинамических ограничений.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМ БОРИРОВАНИИ СТАЛЕЙ

Анализ протекающих процессов показал, что

- активация бора во всех составах происходит преимущественно за счет разложения фторида бора, который синтезируется в реакционном пространстве;
- к образованию фторида бора приводят реакции с участием галогенидов В, Fe, Ca (в смесях $B_4C - NH_4Cl$) и Na, Ca (в смесях $B_{\text{аморфн}} - Na_2B_4O_7$);
- при использовании составов $B_4C - NH_4Cl$ синтезируется большее количество активного бора за счет протекания большего количества термодинамически предпочтительных химических превращений, приводящих к образованию BF_3 .

Теоретически доказана и подтверждена экспериментально возможность использования отработанного керамического сварочного флюса UF-02 алюминатно-основного типа в качестве компонента, выполняющего одновременно роль инертной добавки (SiO_2 , MnO , CaO , MgO , Al_2O_3 , FeO , TiO_2 , ZrO_2) и активатора процесса борирования (CaF_2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пищов М.Н., Бельский С.Е., Царук Ф.Ф. Влияние процессов борирования и боросилицирования на характеристики поверхностного упрочненного слоя деталей трансмиссий лесных мобильных машин // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020 №1 (228). С. 223-228.
2. Гурьев, А.М., Иванов С.Г., Лыгденов Б.Д., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Гармаева И.А. Влияние параметров борохромирования на структуру стали и физико-механические свойства диффузионного слоя // Ползуновский вестник. 2007 № 3. С. 28-34.
3. Полянский И.П., Мишигдоржийн У.Л., Сизов И.Г. Термодинамический анализ формирования диффузионных слоев, полученных при бороалитировании из обмазок // Ползуновский вестник. 2016, № 3. С. 160-163.
4. Федирко В.Н., Самборский А.В. Исследование износостойкости термодиффузионных боридонитридных покрытий на титане // Трение и износ. 2012. Т. 33, № 5. С. 528-536.
5. Смолякова М.Ю., Вершинин Д.С. Исследование трибологических характеристик, модифицированных ионами азота слоев на титановом сплаве BT16 // Вестник ТГГУ. 2012 Т. 18, № 4. С. 1062-1066.
6. Ворошнин, Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов (Справ. пособие). Минск: Беларусь, 1981. 205 с.
7. Атанасова Й.Р., Митеv И.Н. Термодинамический анализ жидкостного бороалитирования // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. 2003, Т. 2, № 4. С. 110-112.
8. Ишков А.В., Иванайский В.В., Кривочуров Н.Т. и др. Термодинамическое обоснование химических реакций в системе $b4c$ боратный флюс Fe при ТВЧ. // Известия АлтГУ. 2014. № 3 (83). С. 199-203. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-36.
9. Pugacheva N.B., Bykova T.M. A study of boriding methods, an analysis of the structure and properties of the obtained coatings // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2020. Iss. 2. P. 38–60. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.038-060.
10. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013 96 с.

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

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.

Информация об авторах

Д. М. Мордасов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология» Тамбовского государственного технического университета

П. А. Шерстениkin – магистрант кафедры «Материалы и технология» Тамбовского государственного технического университета.

REFERENCES

1. Pishchov, M.N., Bel'skij, S.E. & Caruk F.F. (2020) Influence of boriding and borosiliconizing processes on the characteristics of the surface hardened layer of transmission parts of forestry mobile machines. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyayemyh resursov*, (№1 (228)), 223-228. (In Russ.).
2. Gur'ev, A.M., Ivanov, S.G., Lygdenov, B.D., Vlasova, O.A., Kosheleva, E.A., Gur'ev, M.A. & Garmaeva, I.A. (2007) Influence of boron-chromium plating parameters on the structure of steel and the physical and mechanical properties of the diffusion layer. *Polzunovskiy vestnik*, (№ 3), 28-34. (In Russ.).
3. Polyanskij, I.P., Mishigdorzhjin, U.L. & Sizov, I.G. (2016) Thermodynamic analysis of the formation of diffusion layers obtained during boroalitizing from coatings. *Polzunovskiy vestnik*, (№ 3), 160-163. (In Russ.).
4. Fedirko, V.N. & Samborskij, A.V. (2012) Study of wear resistance of thermal diffusion boronitrile coatings on titanium. *Journal of Friction and Wear*, (Vol. 33, № 5), 528-536. (In Russ.).
5. Smolyakova, M.Yu & Vershinin D.S. (2012) Study of tribological characteristics of layers modified with nitrogen ions on titanium alloy VT16. *Transactions TSTU*, (Vol. 18, № 4), 1062-1066. (In Russ.).
6. Voroshnin, L.G. (1981) Borating of industrial steels and cast irons (Reference manual). Minsk: Belarus. (In Russ.).
7. Atanasova, J.R. & Mitev, I.N. (2003) Thermodynamic analysis of liquid boroalitizing. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V*, (Vol. 2, № 4), 110-112. (In Russ.).
8. Ishkov, A.V., Ivanajskij, V.V., Krivochurov, N.T., Aulov, V.F., Koval', D.V., Sokolov, A.V., Novozhenov V.A. & Novozhenov, A.V. (2014) Thermodynamic justification of chemical reactions in the $b4c$ Fe borate flux system under high-frequency heating. *Izvestiya of Altai State University*, (№ 3 (83)), 199-203. (In Russ.). DOI 10.14258/izvasu(2014)3.1-36.
9. Pugacheva, N.B. & Bykova, T.M. (2020) A study of boriding methods, an analysis of the structure and properties of the obtained coatings. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, (Iss. 2.), 38–60. (In Russ.). DOI: 10.17804/2410-9908.2020.2.038-060.
10. Belov, G.V. & Trusov, B.G. (2013) Thermodynamic modeling of chemically reacting systems. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. (In Russ.).

Information about the authors

D. M. Mordasov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Materials and Technology» of Tambov State Technical University.

P. A. Sherstennikin – Master's student of the Department of «Materials and Technology» of Tambov State Technical University.