



Научная статья

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

УДК 669

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.042



ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ БОРИРОВАННОГО СЛОЯ НА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ

Владимир Иванович Мосоров ¹, Константин Сергеевич Коробков ²,
Игорь Геннадьевич Сизов ³

^{1,2,3} Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия

¹ vlmosorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0193-5310>

² k_korobkov00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5192-2140>

³ sigperlit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4468-784X>

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния содержания углерода в углеродистых сталях на параметры диффузии при борировании. Проведена серия экспериментов с различным содержанием углерода (0,2–1,0 %), температурами (900–950 °С) и временем процесса (3–4 ч). Установлено, что с увеличением содержания углерода существенно возрастает энергия активации диффузии бора (от 74,68 до 167,39 кДж/моль), что приводит к снижению скорости формирования борированного слоя.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, диффузия, борирование, углеродистая сталь.

Для цитирования: Мосоров В. И., Коробков К. С., Сизов И. Г. Влияние энергии активации на формирование борированного слоя на углеродистых сталях // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 240–243. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.042. EDN: <https://elibrary.ru/FQLWMS>.

Original article

EFFECT OF ACTIVATION ENERGY ON FORMATION OF A BORON-CONTAINING LAYER ON CARBON STEELS

Vladimir I. Mosorov ¹, Konstantin S. Korobkov ², Igor G. Sizov ³

^{1,2,3} East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

¹ vlmosorov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0193-5310>

² k_korobkov00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5192-2140>

³ sigperlit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4468-784X>

Abstract. The paper presents the results of a study of the effect of carbon content in carbonaceous steels on the diffusion parameters during boration. A series of experiments with different carbon content (0.2–1.0%), temperatures (900–950 °C) and process time (3–4 hours) were carried out. It was found that with an increase in carbon content, the activation energy of boron diffusion increases significantly (from 74.68 to 167.39 kJ/mol), which leads to a decrease in the rate of formation of the boron layer.

Keywords: chemical-thermal treatment, diffusion, boration, carbon steel.

For citation: Mosorov, V.I., Korobkov, K.S. & Sizov, I.G. (2025). Effect of activation energy on formation of a borated layer on carbon steels. Polzunovskiy vestnik, (3), 240–243. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.042. EDN: <https://elibrary.ru/FQLWMS>.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации инструментов и деталей машин происходит интенсивный износ поверхностных слоев, что существенно сокращает срок их службы. Одним из эффективных методов повышения эксплуатационных характеристик является химико-термическая обработка, в частности, борирование, что позволяет значительно повысить твердость, износостойкость и коррозионную стойкость поверхностных слоев деталей [1, 2, 3].

Борирование представляет собой процесс насыщения поверхностного слоя стальных изделий бором, в результате которого формируются бориды железа, об-

ладающие высокой твердостью (до 2000 HV) и износостойкостью [4]. Эффективность процесса борирования существенно зависит от химического состава обрабатываемых сталей, в частности, от содержания углерода.

В литературе отсутствует единое мнение относительно механизма влияния углерода на кинетику процесса диффузии бора. Имеющиеся исследования показывают, что с увеличением содержания углерода энергия активации диффузии бора возрастает, однако точные количественные закономерности этого явления не установлены. Некоторые работы описывают наличие связи между содержанием углерода и коэффициентом диффузии, но полученные данные огра-

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ БОРИРОВАННОГО СЛОЯ НА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ

ничены узким диапазоном концентраций углерода, что не позволяет сделать обобщённые выводы [5–9].

Целью данной работы является количественная оценка влияния содержания углерода в углеродистых сталях на параметры диффузии при борировании.

МЕТОДЫ

В исследовании использовались образцы углеродистых сталей с содержанием углерода от 0,2 % до 1,0 %. Химический состав использованных сталей представлен в таблице 1.

Борирование проводилось в порошковых смесях на основе карбида бора (B_4C) с различными добавками (Al_2O_3 , $K(BF_4)$, NH_4Cl , FeO). Процесс осуществлялся при температурах 900 °C и 950 °C в течение 3 и 4 часов в герметичных контейнерах из жаростойкой стали с плавким затвором. После борирования образцы разрезались, шлифовались и полировались для металлографических исследований.

Глубина борированного слоя измерялась с помощью металлографического микроскопа с точностью ± 5 мкм. На основе экспериментальных данных рассчитывались коэффициенты диффузии по формуле 1:

$$D = h^2 / (4t), \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии (m^2/c), h – глубина борированного слоя (м), t – время процесса (с).

Энергия активации процесса диффузии определялась по формуле 2 уравнению Аррениуса:

Таблица 1 – Химический состав углеродистых сталей, в % / Table 1 – Chemical composition of carbon steels, in %

Марка	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu
Сталь 20	0,17–0,24	0,17–0,33	0,–0,8	до 0,035	до 0,03	до 0,30	до 0,25	до 0,30
Сталь 45	0,42–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8	0,04	0,035	< 0,25	0,25	< 0,25
Сталь У10	0,95–1,09	0,17–0,33	0,17–0,33	< 0,03	0,03	< 0,25	0,2	< 0,25

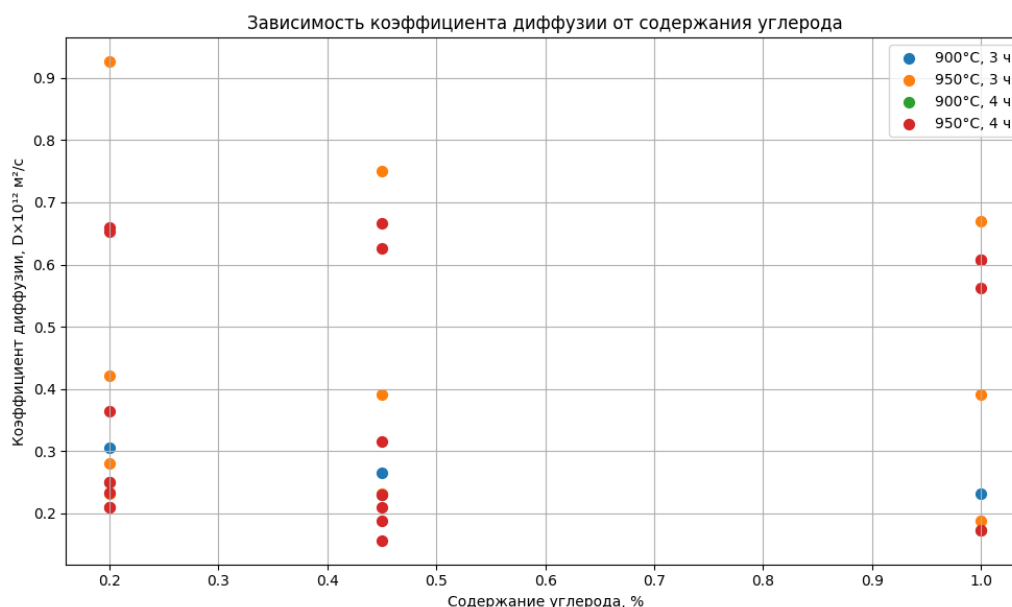


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента диффузии от содержания углерода

Figure 1 – Dependence of the diffusion coefficient on the carbon content

ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние температуры на коэффициент диффузии. Температурная зависимость коэффициента диффузии исследовалась с использованием графика Аррениуса (рисунок 2, который показывает зависи-

$$D = D_0 \exp(-Q/RT), \quad (2)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель (m^2/c), Q – энергия активации (Дж/моль), R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К)), T – абсолютная температура (К).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние содержания углерода на коэффициент диффузии.

Экспериментальные данные показывают, что коэффициент диффузии бора существенно зависит от содержания углерода в стали (рис. 1). Установлено, что для всех исследованных температур и времени процесса с увеличением содержания углерода коэффициент диффузии снижается. Это объясняется тем, что углерод образует карбиды, которые препятствуют диффузии атомов бора в кристаллической решетке железа.

Максимальные значения коэффициента диффузии наблюдаются при содержании углерода 0,2 % и температуре 950 °C ($D \approx 0,9 \cdot 10^{-10} m^2/c$). При увеличении содержания углерода до 1,0 % коэффициент диффузии снижается примерно на 35–40% при тех же условиях процесса. Интересно отметить, что разброс значений коэффициента диффузии при одинаковом содержании углерода связан с влиянием других факторов, в частности, состава насыщающей среды.

мость натурального логарифма коэффициента диффузии от обратной температуры). По наклону прямых на этом графике были определены значения энергии активации для различных содержаний углерода:

- при $C = 0.2\%$: $Q = 74.68$ кДж/моль, $D_0 = 5.44 \cdot 10^{-10} m^2/c$;

- при $C = 0.45\%$: $Q = 82.17$ кДж/моль, $D_0 = 1.05 \cdot 10^{-9}$ м²/с;
 - при $C = 1.0\%$: $Q = 167.39$ кДж/моль, $D_0 = 5.69 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Полученные результаты указывают на существенное увеличение энергии активации с ростом содержания углерода. Особенно значителен скачок при переходе от 0,45 % до 1,0 % С (более чем в 2 раза). Это свидетельствует о качественном изменении механизма диффузии бора при высоком содержании углерода, что, вероятно, связано с образованием карбидных фаз и изменением микроструктуры стали.

Следует отметить компенсационный эффект: одновременное увеличение энергии активации и предэкспоненциального множителя. При $C = 1,0$ % предэкспоненциальный множитель D_0 на несколько порядков выше, чем при $C = 0,2$ % и $C = 0,45$ %. Это может быть связано с изменением механизма диффузии и свидетельствует о более сложном характере взаимодействия бора с углеродистыми сталями с высоким содержанием углерода.

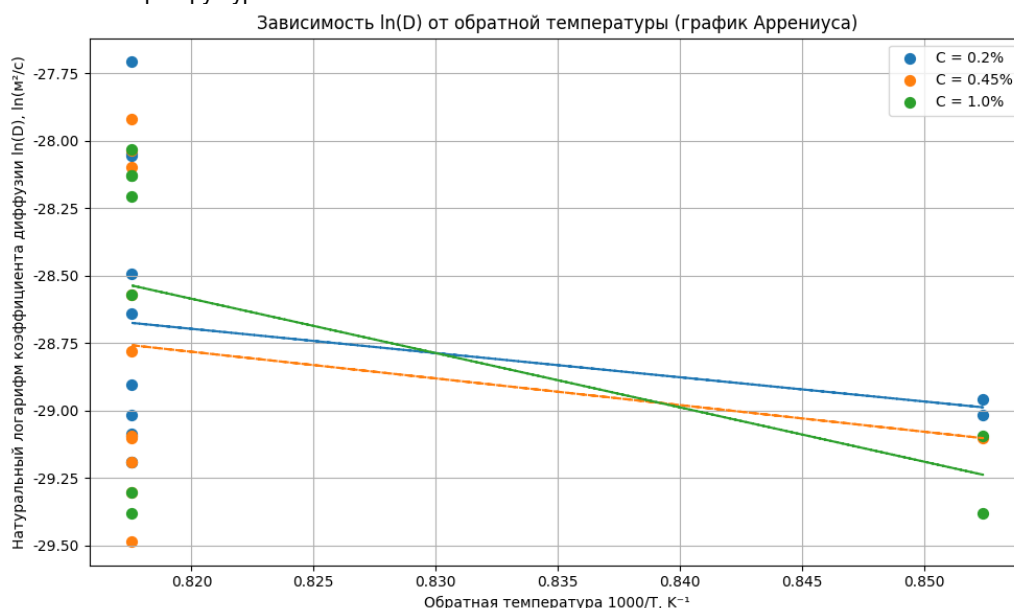


Рисунок 2 – Зависимость $\ln(D)$ от обратной температуры (график Аррениуса)

Figure 2 – $\ln(D)$ versus inverse temperature (Arrhenius plot)

Динамика формирования борированного слоя. На рисунке 3 представлена зависимость глубины борированного слоя от времени процесса для различных содержаний углерода и температур. Экспериментальные точки и теоретические кривые (пунк-

тирные линии) показывают, что зависимость глубины слоя от времени соответствует параболическому закону: $h = \sqrt{D \cdot 4 \cdot t}$, что подтверждает диффузионный механизм формирования боридного слоя.

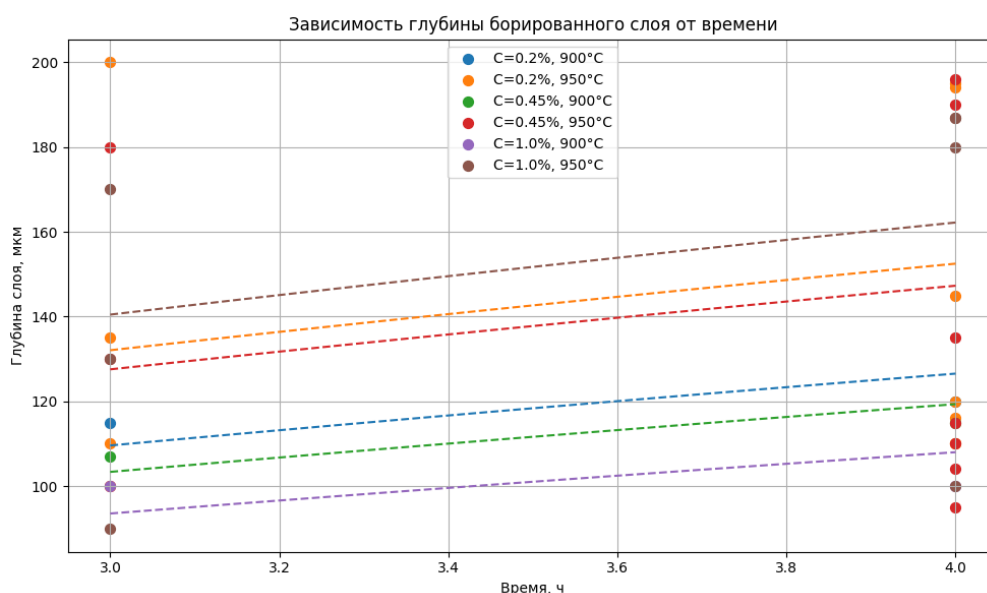


Рисунок 3 – Зависимость глубины борированного слоя от времени

Figure 3 – Dependence of the depth of the borated layer on time

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ БОРИРОВАННОГО СЛОЯ НА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что содержание углерода в стали оказывает существенное влияние на параметры диффузии при борировании. С увеличением содержания углерода от 0,2 % до 1,0 % энергия активации диффузии бора возрастает с 74,68 до 167,39 кДж/моль, что приводит к снижению скорости формирования борированного слоя.

Определен компенсационный эффект, заключающийся в одновременном увеличении энергии активации и предэкспоненциального множителя с ростом содержания углерода в стали. При содержании углерода 1,0 % наблюдается качественное изменение механизма диффузии бора, что связано с образованием карбидных фаз и изменением микроструктуры стали.

Показано, что для высокоуглеродистых сталей ($C \approx 1,0\%$) повышение температуры процесса является более эффективным способом увеличения глубины борированного слоя, чем увеличение продолжительности процесса, из-за высокой энергии активации диффузии.

Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки оптимальных режимов борирования деталей из углеродистых сталей с различным содержанием углерода и могут быть использованы в машиностроительном производстве для повышения эксплуатационных характеристик деталей и инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
2. Физические основы термоциклического борирования сталей / А.М. Гурьев [и др.]. Барнаул: ООО "Научно-исследовательский центр "Системы управления", 2000. 216 с.
3. Лыгденов Б.Д., Мосоров В.И., Мижитов А.Ц. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 45 и 5ХНВ // Вестник ВСГТУ. 2011. № 1. С. 25–31.
4. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. М.: Металлургия, 1978. 240 с.
5. Абишева З.М. Влияние легирующих элементов на боридный слой изделий // Международный студенческий научный вестник. 2020. № 1. С. 29.
6. Козлов А.М., Кишкинская М.А. К механизму формирования борированного слоя на низкоуглеродистых легированных сталях // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 5. С. 369–375.
7. Влияние состава и фракции насыщающей смеси на морфологию диффузионных боридных покрытий / А.М. Гурьев [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2012. № 10. С. 49.
8. Полянский И.П., Вихрев Р.О., Сизов И.Г. Структура и свойства боридных покрытий на инструментальных сталях // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 171–177. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.021.
9. Баландин Ю.А. Диффузионное борирование, никелирование и бороникелирование инструментальных

сталей в псевдооживленном слое // Известия Челябинского научного центра, Выпуск 4(17), 2002.

Информация об авторах

В. И. Мосоров – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металловедение и технологии обработки материалов» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления.

К. С. Коробков – аспирант кафедры «Металловедение и технологии обработки материалов» Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления.

И. Г. Сизов – доктор технических наук, профессор, ректор Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления.

REFERENCES

1. Krukovich, M.G., Prusakov, B.A. & Sizov, I.G. (2010). Moscow: FIZMATLIT, 384 p.
2. Guryev, A.M., Kozlov, E.V., Ignatenko, L.N., & Popova, N.A. [et al.]. (2000). Physical Foundations of Thermocyclic Boronization of Steels. Barnaul: Scientific Research Center "Control Systems" LLC. 216 p.
3. Lygdenov, B.D., Mosorov, V.I. & Mizhitov, A.Ts. (2011). Research of the Phase Composition and Defect State of Gradient Structures of Borated Steels 45 and 5KhNV // Vestnik VSGUTI. No. 1. P. 25-31.
4. Voroshnin, L.G. & Lyakhovich, L.S. (1978). Boriding of Steel. Moscow: Metallurgy. 240 p.
5. Abisheva, Z.M. (2020). Influence of Alloying Elements on the Boride Layer of Products // International Student Scientific Bulletin. No. 1. P. 29.
6. Kozlov, A.M. & Kishkinskaya, M.A. (2023). On the Mechanism of Formation of a Borated Layer on Low-Carbon Alloyed Steels // Izvestiya of Tula State University. Technical Sciences. No. 5. P. 369-375.
7. Guryev, A.M., Kurkina, L.A., Ivanova, S.A., & Ivanova, T.G. (2012). Influence of the composition and fraction of the saturating mixture on the morphology of diffusion boride coatings. Modern Science-Intensive Technologies. No. 10. P. 49.
8. Polyansky, I.P., Vikhrev, R.O. & Sizov, I.G. (2023). Structure and Properties of Boride Coatings on Tool Steels // Polzunovsky Vestnik. No. 1. Pp. 171-177. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.021.
9. Balandin, Yu.A. (2002). Diffusion Boriding, Nickel Plating, and Boronickel Plating of Tool Steels in a Fluidized Bed // Izvestiya of the Chelyabinsk Scientific Center, Issue 4(17).

Information about the authors

V.I. Mosorov - is a Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, and Head of the Department of Metallurgy and Material Processing Technologies at the East Siberian State University of Technology and Management.

K.S. Korobkov - is a postgraduate student at the Department of Metallurgy and Material Processing Technologies at the East Siberian State University of Technology and Management.

I.G. Sizov - is a Doctor of Technical Sciences, Professor, and Rector of the East Siberian State University of Technology and Management.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 19 Nov 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.