*Ползуновский вестник. 2025. № 1. С. 197–202.*
*Polzunovskiy vestnik. 2025;1: 197–202.*

Научная статья
2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 621.785.539
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.024 EDN: HSLCXM

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА, МАРГАНЦА И КРЕМНИЯ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ НА ПАРАМЕТРЫ ДИФФУЗИИ ПРИ БОРИРОВАНИИ

**Сергей Геннадьевич Иванов [1], Михаил Алексеевич Гурьев [2], Сергей Анатольевич Земляков [3], Михаил Николаевич Зенин [4], Алексей Михайлович Гурьев [5]**

[1] Инновационный центр современных текстильных технологий (Лаборатория Цзяньху) (Шаосин, КНР),
[1] Ключевая лаборатория цифрового текстильного оборудования в провинции Хубэй, Уханьский текстильный университет (Ухань, КНР)
[1, 2, 4, 5] Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия
[2] Zhejiang Briliant Refrigeration Equipment Co., Ltd (Синчан, КНР).
[3, 5] Уханьский текстильный университет (Ухань, КНР)
[1] i@ivanovserg.ru, https://orcid.org/0000-0002-5965-0249
[2] gurievma@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9191-1787
[3] kobalt_20@mail.ru,
[4] mikhail.zenin.96@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3772-0987
[5] gurievam@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7570-8877

***Аннотация.*** *В работе приведены систематизированные статистические данные о влиянии содержания углерода и основных легирующих элементов (кремний и марганец) на параметры диффузии и толщину боридного слоя для большинства используемых в промышленности марок углеродистых сталей, начиная с малоуглеродистой стали 15 и заканчивая заэвтектоидными инструментальными сталями до У10 включительно. Насыщение поверхности сталей бором проведено при температурах 850, 950 и 1050 ºС в ранее разработанной и запатентованной оригинальной насыщающей среде. Показано, что повышение содержания углерода в реальных сталях приводит к понижению энергии активации диффузии бора. Согласно проведенному исследованию, снижение энергии активации носит не монотонный характер и зависит прежде всего от содержания углерода, максимальная скорость снижения энергии активации диффузии бора наблюдается в интервале концентраций углерода от 0,45 до 0,60 масс. %. Сравнение полученных данных с данными других исследователей показало высокую сходимость полученных значений энергии активации. Определенный в этой работе «коридор» возможных значений, которые может принимать функция энергии активации на различных марках углеродистой стали в зависимости от содержания углерода, кремния и марганца, имеет перспективы использования в практической работе с целью прогнозирования толщины диффузионного боридного слоя. Это позволит прогнозировать эксплуатационные характеристики борированных деталей, а также подбирать материал детали и оптимизировать процесс борирования с целью получения оптимального соотношения «цена–качество» применительно к готовым упрочненным деталям.*

***Ключевые слова:*** *сталь, борирование, энергия активации, диффузия, углерод, бор, коэффициент диффузии, химико-термическая обработка.*

***Для цитирования*:** Оценка влияния содержания углерода, марганца и кремния в углеродистых сталях на параметры диффузии при борировании / С. Г. Иванов [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 197–202. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.024. EDN: https://elibrary.ru/HSLCXM.

Original article

# EFFECT OF THE CARBON, MANGANESE AND SILICON CONTENT IN CARBON STEELS ON THE DIFFUSION PARAMETERS OF THE DIFFUSION BORONIZING LAYER

**Sergey G. Ivanov [1], Mikhail A. Guriev [2], Sergey A. Zemljakov [3], Mikhail N. Zenin [4], Aleksey M. Guriev [5]**

[1] Innovative Center of Modern Textile Technologies (Jianhu Laboratory), Shaosing, China
[1] Key Laboratory of Digital Textile Equipment in Hubei Province, Wuhan Textile University (Wuhan, China)

© Иванов С. Г., Гурьев М. А., Земляков С. А., Зенин М. Н., Гурьев А. М., 2025

[1, 2, 4, 5] Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia
[3, 5] Wuhan Textile University (Wuhan, China)
[1] i@ivanovserg.ru, https://orcid.org/0000-0002-5965-0249
[2] gurievma@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9191-1787
[3] kobalt_20@mail.ru, Wuhan Textile University, Wuhan, China
[4] mikhail.zenin.96@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3772-0987
[5] gurievam@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7570-8877

***Abstract.*** *The paper presents systematic statistical data on the effect of the content of carbon and the main alloying elements (silicon and manganese) on the diffusion parameters and the thickness of the boride layer for most grades of carbon steels used in industry, starting with low-carbon steel 15 and ending with hypereutectoid tool steels up to including U10. The saturation of the steel surface with boron was carried out at temperatures of 850, 950 and 1050 °C in a previously developed and patented original saturating medium. It is shown that an increase in the carbon content in real steels leads to a decrease in the activation energy of boron diffusion. According to the study, the decrease in the activation energy is not monotonous and depends primarily on the carbon content, the maximum rate of decrease in the activation energy of boron diffusion is observed in the range of carbon concentrations from 0.45 to 0.60 wt. %. A comparison of the obtained data with the data of other researchers showed a high convergence of the obtained activation energy values. The range of values defined in this work, which the activation energy function can take for various grades of carbon steel, depending on the content of carbon, silicon and manganese, has prospects for use in practical work to predict the thickness of the diffusion boride layer. This will make it possible to predict the performance characteristics of borated parts, as well as to select the material of the part and optimize the boronizing process in order to obtain an optimal price-quality ratio in relation to finished hardened parts.*

***Keywords:*** *steel, boronizing, activation energy, diffusion, carbon, boron, carbon steel.*

***For citation:*** Ivanov, S. G., Guriev, M. A., Zemljakov, S. A., Zenin, M. N. & Guriev, A. M. (2025). Effect of the carbon, manganese and silicon content in carbon steels on the diffusion parameters of the diffusion boronizing layer. *Polzunovskiy vestnik,* (1), 197-202. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.024. EDN: https://elibrary.ru/HSLCXM.

## ВВЕДЕНИЕ

При работе большая часть инструмента, рабочих органов и деталей машин в процессе эксплуатации подвергается воздействию различных факторов износа, которые сопряжены с трением, термической и химической коррозией. Воздействие этих факторов приводит деградации поверхности и геометрических параметров изделий в результате износа, окисления, трещинообразования и деформации, наблюдается выход из строя как детали, так и механизма в целом. Для повышения эксплуатационных характеристик материалов и защиты металлических поверхностей от воздействия факторов износа широко используются покрытия. При этом продолжающийся поиск новых и оптимизация уже известных способов повышения эксплуатационных свойств инструмента, рабочих органов и деталей машин с целью продления срока их службы представляют собой одну из важных задач [1–3].

Для улучшения производительности и продления срока службы широко применяются методы объемного и поверхностного упрочнения: объемная и поверхностная закалка (в том числе на вторичную твердость), нанесение покрытий методами термического, лазерного и плазменного напыления и т.д. Вышеуказанные методы поверхностной обработки могут повысить твердость и устойчивость к износу инструмента, рабочих органов и деталей машин, однако все они имеют некоторые ограничения, включая плохое сцепление покрытия с основой, сложность управления параметрами процесса и часто – невозможность поверхностного упрочнения сложнопрофильных деталей (в том числе внутренних полостей в таких деталях) в целом. Химико-термическая обработка поверхности является альтернативой методам поверхностного упрочнения напылением и наплавкой [3–6]. Повышение характеристик поверхности за счет образования различных соединений (оксидов, карбидов, боридов, нитридов, интерметаллидов и т.д.) в результате поверхностного диффузионного насыщения кислородом, углеродом, бором, азотом и другими элементами широко применяется в промышленности. Одним из перспективных методов поверхностного упрочнения является диффузионное борирование. Однако на настоящий момент в литературе имеются разрозненные данные о применении борирования к некоторым конкретным сталям [7–9]. Ведутся попытки систематизировать накопленные данные и вывести определенные зависимости влияния химического состава насыщаемой стали на механические и эксплуатационные свойства боридных покрытий на них. При использовании таких данных можно с определенной степенью точности прогнозировать результат, получаемый на различных сталях.

## МЕТОДЫ

В настоящей работе предложена систематизация данных о влиянии содержания углерода в стали на параметры диффузии и толщину боридного слоя для большинства используемых в промышленности углеродистых сталей (таблица 1), начиная с углеродистой стали 15 и заканчивая заэвтектоидными инструментальными сталями вплоть до У10 включительно. Все использованные в работе образцы сталей были подобраны таким образом, чтобы они имели сопоставимый химический состав по другим легирующим элементам (кремний, марганец, сера, фосфор, хром, никель, медь и т.д.).

Подбор соответствующих плавок сталей стал возможен благодаря более чем десятилетнему сотрудничеству с предприятиями на базе Центра коллективного пользования и Инжинирингового Центра «ХимБиоМаш» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (АлтГТУ), в результате которого удалось найти и отобрать соответствующие образцы промышленно произведенных

сталей с требуемым химическим составом.

Насыщение поверхности сталей бором проводили в камерной печи типа СНОЛ, оснащенной ПИД-регулятором «Термодат 16Е3», при температурах 850, 950 и 1050 ºС разработанным и запатентованным составом [10], выдержку при данных температурах осуществляли в течение 2 ч. После окончания выдержки контейнеры с упакованными образцами извлекали из печи и охлаждали на спокойном воздухе до комнатной температуры, после чего осуществляли выбивку образцов. Использовали образцы KCU тип 1 по ГОСТ 9454-78. Количество одинаковых образцов для каждой экспериментальной точки – 3 шт. После извлечения из контейнера образцы промывали в теплом мыльном растворе и высушивали в этиловом спирте.

Таблица 1 – Химический состав сталей / Table 1 – Chemical composition of Steels

| Образец | Марка стали | Содержание основных легирующих элементов, масс. % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Содержание по ГОСТ* | | | Реальный хим. состав** | | |
| | | C | Si | Mn | C | Si | Mn |
| *1* | Сталь 15 | 0,155±0,035 | 0,270±0,100 | 0,500±0,150 | 0,155±0,028 | 0,253±0,081 | 0,484±0,130 |
| *2* | Сталь 20 | 0,205±0,035 | 0,270±0,100 | 0,500±0,150 | 0,207±0,031 | 0,266±0,089 | 0,493±0,135 |
| *3* | Сталь 35 | 0,360±0,040 | 0,270±0,100 | 0,650±0,150 | 0,358±0,035 | 0,268±0,090 | 0,495±0,134 |
| *4* | Сталь 45 | 0,460±0,040 | 0,270±0,100 | 0,650±0,150 | 0,460±0,027 | 0,260±0,082 | 0,643±0,126 |
| *5* | Сталь 50 | 0,510±0,040 | 0,270±0,100 | 0,650±0,150 | 0,511±0,023 | 0,259±0,082 | 0,641±0,087 |
| *6* | Сталь 60 | 0,610±0,040 | 0,270±0,100 | 0,650±0,150 | 0,607±0,025 | 0,261±0,086 | 0,649±0,095 |
| *7* | У7А | 0,695±0,045 | 0,250±0,080 | 0,225±0,055 | 0,699±0,023 | 0,260±0,052 | 0,225±0,049 |
| *8* | У8А | 0,795±0,045 | 0,250±0,080 | 0,225±0,055 | 0,795±0,032 | 0,246±0,069 | 0,221±0,043 |
| *9* | У9А | 0,895±0,045 | 0,250±0,080 | 0,225±0,055 | 0,900±0,028 | 0,245±0,067 | 0,218±0,044 |
| *10* | У10А | 1,020±0,070 | 0,250±0,080 | 0,225±0,055 | 1,021±0,063 | 0,250±0,071 | 0,225±0,044 |

*содержание остальных примесей оценивалось по фактическим данным, полученным методами оптико-эмиссионной спектрометрии:
содержание Cr, Niи Cu в большинстве исследованных сталей находилось в пределах соответственно 0,083±0,033; 0,118±0,022 и 0,067±0,034 масс. %;
содержание S и P во всех исследованных сталях находилось в пределах соответственно 0,0114±0,0067 и 0,0128±0,0013 масс. %
**Реальный хим. состав – результат статистической обработки состава реальных сталей, определенного на оптико-эмиссионном спектрометре «G.N.R. Solaris CCD Plus». Стали для анализа предоставлялись предприятиями Алтайского края в рамках проведения НИОКР на базе ЦКП АлтГТУ и ИЦ «ХимБиоМаш» АлтГТУ в период с 2015 по 2024 гг.

Размер статистической выборки по разным маркам сталей, накопленный в период времени с января 2015 г. по сентябрь 2024 г., перечисленный в таблице 1, составлял:

- для сталей – Сталь 15, Сталь 20 (Образец 1 и Образец 2 соответственно), по 650 уникальных образцов (плавок) по каждой марке стали;

- для сталей – Сталь 35, Сталь 45, Сталь 50 и Сталь 60 (Образцы с 3 по 6 соответственно), по 820 уникальных образцов (плавок) по каждой марке стали;

- сталей У7А, У8А, У9А, У10А (образцы с 7 по 10 соответственно), не менее 120 уникальных образцов (плавок) по каждой марке стали.

Диффузионные процессы могут быть ускорены путем использования различных приемов, основным из которых является повышение температуры процесса диффузионного насыщения. Однако чем выше температура процесса диффузионного насыщения, тем сильнее проявляются такие негативные эффекты, как рост зерна и вероятность формирования неблагоприятной макро- и микроструктуры, что, в свою очередь, приводит к увеличению коробления изделия, а также снижению эксплуатационных характеристик упрочняемых изделий за счет снижения, прежде всего, таких важных характеристик, как усталостная прочность, пластичность и ударная вязкость. Вторым способом повышения скорости диффузии можно считать подбор состава упрочняемой стали и взаимосвязанная с составом стали оптимизация химического состава насыщающей среды за счет добавок в борирующую смесь небольших количеств соединений элементов, которые способствуют образованию большего количества активных атомов бора, например соединения церия и других редкоземельных металлов, либо за счет высокой растворимости в насыщаемом материале (как, например, хром в железе) способны формировать большее количество дефектов кристаллической решетки. Оба приведенных выше способа ускоряют диффузию, в том числе и бора, увеличивая толщину борированного слоя, не приводя к негативным последствиям [11–16]. При этом химический состав большинства коммерческих сталей в зависимости от степени легирования может иметь значительный разброс по содержанию химических элементов, который может изменяться от сотых долей процента до нескольких процентов.

Научная школа д.т.н., профессора А.М. Гурьева известна своими работами в области термической и химико-термической обработки металлов и сплавов, разработки технологий и насыщающих сред для борирования, начиная с 2000 года [17]. За прошедшие четверть века накоплен весьма значительный объем как теоретических, так и экспериментальных данных, который позволяет с достаточной степенью достоверности интерпретировать полученные данные в попытках создания полуэмпирических моделей процессов диффузионного борирования с целью оценки влияния параметров процесса борирования на структурно-фазовое состояние, толщину, механические и эксплуатационные характеристики получаемых боридных покрытий на сталях и сплавах с целью прогнозирования свойств готовых упрочненных деталей, инструмента и рабочих органов машин.

Оценку диффузионного потенциала проводят согласно уравнению Аррениуса, связь между вре-

менем борирования, толщиной борированного слоя и коэффициентом роста выражается следующим уравнением [14–16]:

$$h^2 = 2D\tau, \quad (1)$$

где h – толщина борированного слоя, мкм;
D – коэффициент диффузии, м$^2$·с;
T – время борирования, с.

Из уравнения Аррениуса, с учетом коэффициента диффузии D, абсолютной температуры T, К, активационной энергии диффузии Q, Дж/моль, газовой постоянной R =8,314 Дж/(моль·К) и константы диффузии D0, м$^2$·с, можно получить следующее уравнение:

$$LnD = LnD_0 - \frac{Q}{RT}. \quad (2)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В предыдущей работе [18] нами для оценки диффузионного потенциала были использованы специально подобранные углеродистые стали, в которых изменялось лишь содержание углерода, тогда как в данной работе предпринята попытка оценить корреляцию между «оптимальным» химическим составом насыщаемых сталей и многими коммерческими составами сталей с целью оценки влияния разброса относительно среднего процентного содержания химических элементов в стали согласно соответствующих ГОСТ, на значение коэффициента диффузии бора в стали. Это необходимо в промышленном производстве с целью наиболее полного прогнозирования таких параметров, как толщина диффузионных боридных покрытий, а также ресурс их работы и износостойкость.

Из уравнения 1, зная толщину диффузионного боридного слоя, которую можно измерить металлографическим способом на поперечных шлифах, параметры процесса насыщения (температуру и продолжительность высокотемпературной выдержки), можно определить коэффициент диффузии бора D:

$$D = h\sqrt{2\tau}\,. \quad (3)$$

Используя выражение (2), подставив в которое вычисленные по выражению (3) значения коэффициента диффузии D, мы имеем возможность построить график зависимости натурального логарифма коэффициента диффузии от обратной температуры (ln D от 1/T). Этот график позволяет достаточно легко оценить константу диффузии D0 и энергию активации Q. Энергия активации Q может быть найдена из выражения [11–13, 18–22]:

$$Q = -R \cdot tg\varphi\,, \quad (4)$$

где tg φ – тангенс угла наклона графика коэффициента диффузии от обратной температуры (ln D от 1/T).

Анализ данных по диффузии и энергии активации процесса диффузии, имеющихся в доступной литературе [5, 16–34], показал, что наиболее часто применяемой характеристикой является показатель энергии активации диффузии, который в меньшей степени зависит от температурно-временных параметров процесса диффузионного борирования, однако в большей степени отражает влияние химического состава насыщаемого материала и насыщающей среды на параметр диффузии, а, следовательно, – на кинетику процесса диффузии и, как следствие, – на толщину и другие характеристики бориного слоя. Так, в работах [5, 16–29] указывается, что энергия активации процесса диффузии бора в малоуглеродистых сталях составляет от 118 до 228 кДж/моль, при этом с ростом содержания углерода в стали вплоть до значений приблизительно 0,45–0,5 масс. % энергия активации диффузии бора демонстрирует рост, что в целом также хорошо согласуется с данными, представленными нами в предыдущей нашей работе [18]. Далее, по мере увеличения содержания углерода в стали выше значений 0,45–0,5 масс. % исследования указывают на некоторое снижение энергии активации диффузии бора вплоть до значений 148 кДж/моль при борировании серого чугуна [29].

В целом, для средне- и высокоуглеродистых сталей данных по параметрам диффузии бора значительно меньше, чем для низко- и среднеуглеродистых сталей. Наиболее вероятно, это объясняется тем, что борированию наиболее часто подвергают углеродистые стали с содержанием углерода в интервале 0,2–0,5 масс. %, что опять же объяснимо тем, что данные марки стали наиболее распространены в современном мире благодаря отличному сочетанию их цены и конструкционных характеристик.

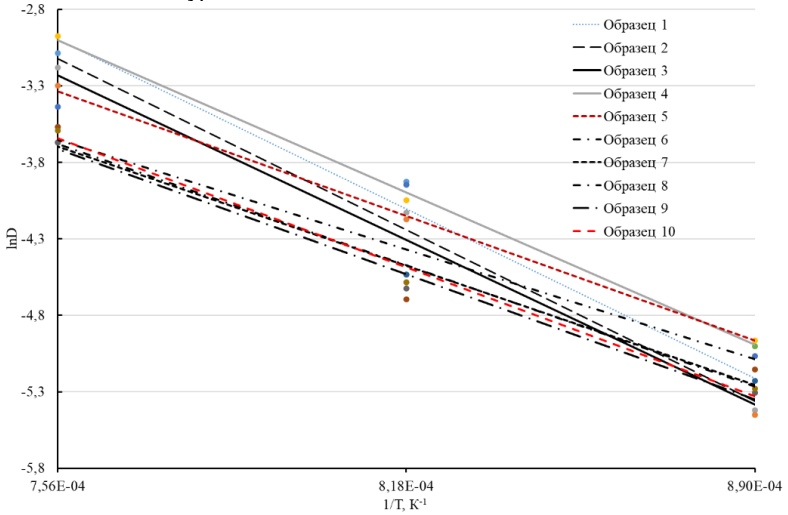


Рисунок 1 –Зависимости lnD от обратной температуры 1/T для образцов, приведенных в таблице 1

Figure 1 – The dependences of lnD on the return temperature of 1/T for the samples shown in Table 1

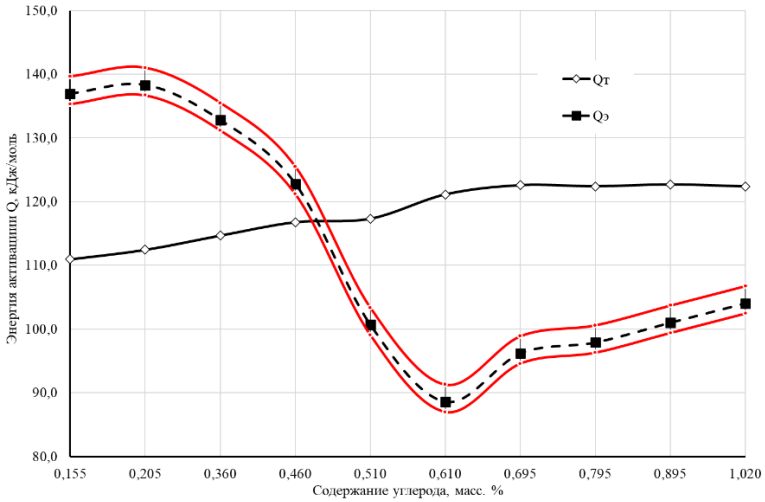


Рисунок 2 – Зависимость энергии активации диффузии Q от содержания углерода в стали, где $Q_т$ – кривая зависимости энергии активации от содержания углерода при практически одинаковом содержании прочих легирующих элементов (более подробно – см. [18]), $Q_э$ – кривая зависимости энергии активации диффузии бора, построенная по экспериментальным данным, полученным на коммерческих сталях. Красные линии – границы допустимых значений, которые принимает энергия активации

Figure 2 – The dependence of the activation energy of diffusion Q on the carbon content in steel, where $Q_T$ is the curve of the dependence of the activation energy on the carbon content with almost the same content of other alloying elements (for more details, see [18]), $Q_э$ is the curve of the dependence of the activation energy of boron diffusion, constructed according to experimental data, produced on commercial steels. The red lines are the boundaries of the permissible values that the activation energy takes

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из представленных графиков 1 и 2, кривая энергии активации, построенная только с учетом влияния углерода, имеет вид плавно возрастающей с плато в районе содержаний углерода 0,45–0,52 масс. %, относительно резким подъемом при содержании углерода от 0,52 до 0,61 масс. % и далее – опять практически прямая линия, параллельная оси OX. В случае построения кривой энергии активации на реальных коммерческих сталях, то есть с учетом содержания кремния и марганца, вид кривой приобретает более сложный характер: незначительный плавный подъем энергии активации в интервале концентраций углерода от 0,155 до 0,200 масс. % сменяется относительно плавным ее снижением в интервале концентраций углерода от 0,200 до 0,450 масс. %. И далее процесс снижения энергии активации ускоряется вплоть до значения минимального экстремума при концентрации углерода порядка 0,610 масс. %, после чего опять следует подъем энергии активации.

Исходя из того, что построение кривой энергии активации QЭ осуществляли по данным экспериментальных исследований, а также учитывая, что на каждую марку стали (т.е. точку, или условный образец) приходилось по десять образцов реальных сталей, два из которых гарантированно имели крайние значения показателей концентрации углерода, кремния и марганца.

Определенный в данной работе «коридор» возможных значений, которые может принимать функция энергии активации на различных марках углеродистой стали в зависимости от содержания углерода, кремния и марганца, возможно использовать в практической работе с целью прогнозирования толщины диффузионного боридного слоя. Кроме того, возможно дальнейшее развитие направления компьютерного моделирования процесса диффузионного насыщения различных (конструкционных, инструментальных, специальных и др.) сталей, имеющих возможно более широкий химический состав. Что, в свою очередь, позволит сэкономить огромное количество трудовых, временных и энергетических затрат на определение оптимального режима борирования реальных изделий. Дальнейшее расширение модели, помимо прогнозирования физических характеристик диффузионных боридных покрытий, позволит производить также расчеты и некоторых механических характеристик боридного слоя, что, в свою очередь, позволит прогнозировать эксплуатационные характеристики борированных деталей, а также подбирать материал детали и оптимизировать процесс борирования с целью получения наиболее оптимального соотношения «цена–качество» применительно к готовым упрочненным деталям. То есть оптимизировать как материал детали, так и технологические параметры процесса ее борирования с целью получения наиболее высокого ресурса работы при возможно наименьших затратах на процесс изготовления такой детали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davis J.R. Bonding. Surface Hardening of Steels - Understanding the Basics, 1st ed. ASM International: Novelty, OH, USA, 2002. 349 p.

2. Ghalehbandi S.M., Biglari F. Predicting damage and failure under thermomechanical fatigue in hot forging tools // Engineering Failure Analysis. 2020. V. 113. P. 104545. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104545.

3. Advances in Ceramic Armor XI: A Collection of Papers Presented at the 39th International Conference on Advanced Ceramics and Composites / Editor: Jerry C. La Salvia, 15.10.2015. 147 p. DOI: 10.1002/9781119211549.

4. Ворошнин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск : Наука и техника, 1981. 296 с.

5. ASM International Handbook Comitee. ASM Handbook. Volume 5. Surface Engineering. 1994. 2535 p.

6. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / Г.В. Борисенок, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин [и др.]. Москва : Металлургия, 1981. 424 с.

7. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. Минск : Наукова думка, 1981. 205 с.

8. Kulka M., Pertek A., Klimek L. The influence of carbon

content in the borided Fe-alloys on the microstructure of iron borides // Materials Characterization. 2006. Vol. 56. № 3. P. 232–240. DOI: 10.1016/j.matchar.2005.11.013.

9. Мельник П.И. Диффузионное насыщение железа и твердофазные реакции в сплавах. Москва : Металлургия, 1993. с128.

10. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей: пат. 2345175 Рос. Федерация №20070403, заявл. 03.04.2007; опубл. 27.01.2009. Бюл. № 3. 7 с.

11. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М. : Металлургия, 1978. 248 с.

12. Пригожин И., Дефэй Р. Химическая термодинамика. Пер. с англ. Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2010. 533 с.

13. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А. Введение в физику поверхности. Москва : Наука, 2006. 490 с.

14. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. 3-е изд. Москва : Высшая школа, 2000. 494 с.

15. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности. Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2008. 568 с.

16. ASM International Handbook Committee. ASM Handbook. Volume 4. Heat Treating. 1991. 2173 p.

17. Физические основы термоциклического борирования сталей / Гурьев А.М. [и др.]. Барнаул, АлтГТУ, 2000. 216 с.

18. Влияние содержания углерода в стали на параметры диффузии бора и толщину диффузионного покрытия при борировании / Гурьев М. А. [и др.] // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2024. Т. 49. № 3. С. 95–106.

19. Pack-boriding of low alloy steel: microstructure evolution and migration behaviour of alloying elements / A. K. Litoria [et al.] // Philosophical Magazine. 2019. DOI: 10.1080/14786435.2019.1680890.

20. Guerri Y.El., Mebarek B., Keddam M. Confrontation of linear versus nonlinear approach in $Fe_2B$ boridelayer thickness predictions // Zastita Materijala 2024. V. 65. № 1. P. 97–109.

21. Bouarour B., Keddam M., Boumaali B. Growth kinetics of diiron boride ($Fe_2B$) layer on a carbon steel by four approaches // Koroze a Ochrana Materialu. 2022. Vol. 66. № 1. P. 1–6.

22. El G.Y., Mebarek B., Keddam M. Impact of the diffusion coeffi-cient calculation on predicting $Fe_2B$ boride layer thickness // Koroze a Ochrana Materialu. 2022. Vol. 66. № 1. P. 25–35.

23. Evaluating the Corrosion Behaviour of Borided Carbon Steel C35 / Kaouka A. [et al.] // Materials Research. 2022. V. 25. P. 37–44.

24. Türkmen I., Yalamaç E., Boumaali B. Investigation of tribological behaviour and diffusion model of $Fe_2B$ layer formed by pack-boriding on SAE 1020 steel // Surface and Coatings Technology. 2019. V. 377. p. 124888.

25. Türkmen I., Yalamaç E. Growth of the $Fe_2B$ layer on SAE 1020 steel employed a boron source of $H_3BO_3$ during the powder-pack boriding method // Journal of Alloys and Compounds. 2018. V. 744. P. 658–666.

26. Kaouka A., Allaoui O., Keddam M. Growth kinetics of the boride layers formed on SAE 1035 steel // Materiaux et Techniques. 2014. V. 101. № 7. P. 705.

27. Şen Ş., Şen U., Bindal C. An approach to kinetic study of borided steels // Surface and Coatings Technology. 2005. V. 191. № 2–3. P. 274–285.

28. Brakman C.M., Gommers A.W.J., Mittemeijer E.J. Boriding of Fe and Fe–C, Fe–Cr, and Fe–Ni alloys; Boride-layer growth kinetics // Journal of Materials Research. 1989. V. 4. № 6. P. 1354–1370.

29. Kinetic Analysis of Pack-Borided Gray Cast Iron / Azouani O. [et al.] // Materials Performance and Characterization. 2021. V. 10. № 1. P. 20200176.

30. Boronizing mechanism of cemented carbides and their wear resistance / Lin G. [et al.] // Intern. J of Refractory Metals and Hard Materials. 2013. V. 41. P. 351–355. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2013.05.008.

31. Delai O., Xia C., Shiqiang L. Growth kinetics of the FeB/$Fe_2B$ boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling // J. of Materials Research and Technology. 2021. V. 11. P. 1272–1280.

32. Mathew M., Rajendrakumar P. Optimization of process parameters of boro-carburized low carbon steel for tensile strength by Taquchi method with grey relational analysis // Materials & Design. 2011. V. 32. P. 3637–3644.

33. Pertek A., Kulka M. Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel // Surface and Coatings Technology. 2003. V. 173. P 309–314. DOI: 10.1016/j.optlastec.2011.11.016.

34. FeB/Fe2B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics / Yu L. [et al.] // Acta Materialia. 2005. V. 53. P. 2361l–2368. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.01.043.

### *Информация об авторах*

*С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник направления материаловедения и упрочнения металлов и сплавов, Инновационный центр современных текстильных технологий (Лаборатория Цзяньху) (КНР), Ключевая лаборатория цифрового текстильного оборудования в провинции Хубэй, Уханьский текстильный университет (Ухань, КНР), профессор Уханьского текстильного университета (КНР); заведующий ЛМИ ИЦ «ХимБиоМаш», ведущий научный сотрудник научного управления Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

*М. А. Гурьев – кандидат технических наук, технический директор, Zhejiang Briliant Refrigeration Equipment Co., Ltd (КНР), доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

*С. А. Земляков – кандидат технических наук, профессор Уханьского текстильного университета (КНР).*

*М. Н. Зенин – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.*

*А. М. Гурьев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой начертательной геометрии и графики Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова; профессор Уханьского текстильного университета (КНР); главный научный сотрудник Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd. (КНР).*

### *Information about the authors*

*S.G. Ivanov - Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher in the field of materials science and strengthening of metals and alloys, Innovative Center for Modern Textile Technologies (Jianhu Laboratory) (China), Key Laboratory of Digital Textile Equipment in Hubei Province, Wuhan Textile University (Wuhan, China); Head of the LMI IC "Khimbiomash", Leading Researcher at the Scientific Department of the Polzunov Altai State Technical University.*

*M.A. Guryev - Candidate of Technical Sciences, Technical Director, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd (China), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment at the Polzunov Altai State Technical University.*

*S.A. Zemlyakov - Candidate of Technical Sciences, Professor of Wuhan Textile University (China).*

*M.N. Zenin - PhD student at Polzunov Altai State Technical University.*

*A.M. Guryev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Descriptive Geometry and Graphics, Polzunov Altai State Technical University, Professor, Wuhan Textile University (China); Chief Researcher, Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd. (China).*

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

*Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.*

*The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.*