

Оригинальная статья

УДК 66.094.55

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-30-36

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СТАЛИ НА ПАРАМЕТРЫ ДИФФУЗИИ БОРА И ТОЛЩИНУ ДИФФУЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ БОРИРОВАНИИ

© 2024 г. М. А. Гурьев^{1, 2, 3}, С. Г. Иванов^{1, 2}, Ц. Чжэн^{1, 2}, А. М. Гурьев^{1, 2}

¹Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Россия, 656038, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, 46)

²Уханьский текстильный университет (Китай, 430200, провинция Хубэй, Ухань, ул. ФангЖи, 1)

³Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. (Китай, 312000, провинция Чжэцзян, Шаосин, уезд Синьчан)

Аннотация. В настоящей работе приведены систематизированные данные о влиянии содержания углерода в стали на параметры диффузии и толщину боридного слоя для большинства используемых в промышленности углеродистых сталей, начиная с углеродистой стали 15 и заканчивая заэвтектическими инструментальными сталями вплоть до У10 включительно. Насыщение поверхности сталей бором проведено при температурах 850, 950 и 1050 °С ранее разработанной и запатентованной насыщающей средой. Повышение содержания углерода в стали приводит к повышению энергии активации диффузии бора, что, в свою очередь, влечет снижение толщины диффузионного слоя. При этом снижение энергии активации носит не монотонный характер и зависит как от содержания углерода в стали, так и от температуры процесса насыщения. Повышение температуры процесса насыщения приводит к понижению энергии активации диффузии бора в среднем на 5 кДж/моль на каждые 100 °С. Повышение содержания углерода приводит к снижению толщины боридного слоя, причем в наибольшей степени это заметно при промышленно применяемых температурных интервалах борирования – от 950 до 1050 °С. Наиболее значительное снижение толщины боридного слоя происходит при содержании углерода в интервале от 0,35 до 0,50 масс. %. В интервалах содержания углерода в стали от 0,15 до 0,35 и от 0,50 до 0,95 масс. % характер снижения толщины боридного слоя можно считать линейным.

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

Для цитирования: Гурьев М.А., Иванов С.Г., Чжэн Ц., Гурьев А.М. Влияние содержания углерода в стали на параметры диффузии бора и толщину диффузионного покрытия при борировании. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):30–36. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-30-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-30-36)

Original article

THE EFFECT OF THE CARBON CONTENT IN STEEL ON PARAMETERS OF BORON DIFFUSION AND THICKNESS OF DIFFUSION COATING DURING BORATION

© 2024 M. A. Guryev^{1, 2, 3}, S. G. Ivanov^{1, 2}, Q. Zheng^{1, 2}, A. M. Guryev^{1, 2}

¹Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Ave., Barnaul, Altai Territory, 656038, Russia Federation)

²Wuhan Textile University (1 Fangzhi Str., Hubei, Wuhan, 430200, China)

³Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. (Xinchang, Shaoxing, Zhejiang, 312000, China)

Abstract. This paper presents systematized data on the effect of carbon content in steel on the diffusion parameters and thickness of the boride layer for most carbon steels used in industry, starting with carbon steel 15 and ending with hypereutectic tool

steels up to and including U10. Saturation of the steel surface with boron was carried out at temperatures of 850, 950 and 1050 °C using a previously developed and patented saturating medium. An increase in the carbon content in steel leads to an increase in the activation energy of boron diffusion, which in turn leads to a decrease in the thickness of the diffusion layer. At the same time, the decrease in the activation energy is not monotonous and depends on both the carbon content in steel and the temperature of the saturation process. An increase in the temperature of the saturation process leads to a decrease in the activation energy of boron diffusion - on average by 5 kJ/mol for every 100 °C. An increase in the carbon content leads to a decrease in the thickness of the boride layer, and this is most noticeable in the industrially used temperature ranges of boriding - from 950 to 1050 °C. The most significant decrease in the thickness of the boride layer occurs with an increase in the carbon content in the range from 0.35 to 0.50 wt. %. In the ranges of carbon content in steel from 0.15 to 0.35 and from 0.5 to 0.95 wt. %, the nature of the decrease in the thickness of the boride layer can be considered linear.

Keywords: steel, boriding, activation energy, diffusion, carbon, boron, diffusion coefficient, chemical-thermal treatment

For citation: Guryev M.A., Ivanov S.G., Zheng Q., Guryev A.M. Influence of carbon content in steel on boron diffusion parameters and diffusion coating thickness during borizing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):30–36. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)30-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)30-36)

Введение

При работе большая часть инструмента, рабочих органов и деталей машин подвергается воздействию повышенных температур, что сопряжено с трением, термической и химической коррозией, и, в свою очередь, приводит к износу, окислению, трещинам и деформации. В итоге наблюдается деградация геометрических параметров работающей детали и выход из строя как детали, так и механизма в целом. Поиск способов повышения эксплуатационных свойств инструмента, рабочих органов и деталей машин и продления срока их службы представляет собой значительный вызов [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 [4 – 6]. При этом одним из перспективных и актуальных методов поверхностного упрочнения является борирование. Однако на настоящий момент в литературе имеются лишь точечные 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 исследования

В настоящей работе предприняты попытки систематизировать данные о влиянии содержания углерода в стали на параметры диффузии и толщину боридного слоя для большинства используемых в промышленности углеродистых сталей (табл. 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 °C 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. Использо-

Химический состав сталей
Table 1. Chemical composition of steels

Образец	Марка (примерная)	Содержание основных легирующих элементов, масс. %*				
		C	Si	Mn	S	P
1	Сталь 15	0,149	0,179	0,585	0,012	0,012
2	Сталь 20	0,215	0,176	0,575	0,012	0,013
3	Сталь 35	0,365	0,183	0,574	0,012	0,010
4	Сталь 45	0,436	0,184	0,586	0,014	0,013
5	Сталь 45	0,481	0,189	0,578	0,012	0,012
6	Сталь 50	0,503	0,186	0,578	0,013	0,013
7	Сталь 60	0,592	0,187	0,592	0,012	0,012
8	У7А	0,712	0,189	0,245	0,012	0,012
9	У8А	0,803	0,187	0,247	0,011	0,012
10	У9А	0,898	0,183	0,249	0,013	0,011
11	У10А	0,966	0,192	0,245	0,010	0,013

*Содержания меди и никеля находились в пределах 0,03 – 0,04 масс. %.

ли образцы КСУ 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.

Борирование – это процесс реакционной диффузии, который можно разделить на два этапа. Первый этап – образование активных атомов бора в насыщающей среде, их диффузия к насыщаемой поверхности и адсорбция на ней. Этот этап занимает относительно небольшую долю времени процесса борирования. Второй этап – это процесс диффузии активных атомов бора или их групп из поверхностных слоев материала в его объем. Повышение температуры позволяет ускорить процесс генерации активных атомов бора насыщающей средой и одновременно снизить энергию активации диффузии активных атомов. Это ускоряет диффузию бора и увеличивает толщину борированного слоя [11 – 13].

Согласно уравнению Аррениуса, связь между временем 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, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – 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 D_0 , $\text{м}^2/\text{с}$, можно получить следующее уравнение:

$$\ln D = \ln D_0 - Q/RT. \quad (2)$$

Результаты и обсуждение

Из уравнений (1) и (2) можно получить значения коэффициента диффузии при различных температурах насыщения и содержаниях углерода (табл. 2) (индекс при D обозначает абсолютную температуру: $D_{1123} = 850$ °С; $D_{1223} = 950$ °С; $D_{1323} = 1050$ °С).

Как видно из таблицы, по мере возрастания концентрации углерода в сталях коэффициент диффузии бора в них уменьшается, что объяснимо тем, что в процессе диффузии бор вынужден вытеснять углерод из поверхности насыщаемого материала вглубь. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию энергетических затрат на процесс диффузии бора в кристаллической решетке железа и, как следствие, – к росту энергии активации диффузии бора, что сопровождается замедлением процесса диффузии и снижением толщины слоя боридов. Данный факт подтверждается многими авторами [17 – 19], при этом отмечается, что помимо снижения толщины слоя боридов имеются также и положительные аспекты: слой становится более плотным и компактным в силу того, что по мере повышения содержания углерода и легирующих элементов в стали формируются боридные иглы одинаковой длины. Кроме того, повышение содержания легирующих элементов, в том числе и углерода в стали, как отмечается в работах [20; 21], приводит к повышению механических характеристик боридного покрытия, прежде всего – его твердости.

Коэффициенты диффузии бора при различных содержаниях углерода в стали
Table 2. Diffusion coefficients of boron at different carbon contents in steel

Содержание углерода в стали, масс. %	Коэффициент диффузии, м ² /с		
	D_{1123}	D_{1223}	D_{1323}
0,149	$5,88 \cdot 10^{-11}$	$2,69 \cdot 10^{-10}$	$9,08 \cdot 10^{-10}$
0,215	$5,26 \cdot 10^{-11}$	$2,29 \cdot 10^{-10}$	$7,75 \cdot 10^{-10}$
0,365	$5,00 \cdot 10^{-11}$	$1,83 \cdot 10^{-10}$	$5,40 \cdot 10^{-10}$
0,436	$4,33 \cdot 10^{-11}$	$1,45 \cdot 10^{-10}$	$4,27 \cdot 10^{-10}$
0,481	$4,08 \cdot 10^{-11}$	$1,40 \cdot 10^{-10}$	$4,00 \cdot 10^{-10}$
0,503	$3,63 \cdot 10^{-11}$	$1,12 \cdot 10^{-10}$	$3,03 \cdot 10^{-10}$
0,592	$3,43 \cdot 10^{-11}$	$8,38 \cdot 10^{-11}$	$2,64 \cdot 10^{-10}$
0,712	$3,34 \cdot 10^{-11}$	$6,08 \cdot 10^{-11}$	$2,45 \cdot 10^{-10}$
0,803	$3,35 \cdot 10^{-11}$	$6,62 \cdot 10^{-11}$	$2,37 \cdot 10^{-10}$
0,898	$3,53 \cdot 10^{-11}$	$7,02 \cdot 10^{-11}$	$1,98 \cdot 10^{-10}$
0,966	$3,72 \cdot 10^{-11}$	$7,25 \cdot 10^{-11}$	$2,00 \cdot 10^{-10}$

Как видно из рис. 1, повышение содержания углерода в стали приводит к росту энергии активации диффузии бора, что, в свою очередь, влечет снижение толщины диффузионного слоя. При этом снижение энергии активации носит не монотонный характер и зависит как от содержания углерода в стали, так и от температуры процесса насыщения. Например, при температуре насыщения 850 °С, считающейся минимально возможной температурой для процесса борирования [7; 16], энергия активации диффузии бора изменяется с 116 кДж/моль при содержании углерода в стали порядка 0,15 масс. % до 121 кДж/моль при содер-

жании углерода в стали порядка 0,75 масс. %. Начиная с содержания углерода в стали на уровне 0,8 масс. % наблюдается тренд на снижение энергии активации. Похожие тренды наблюдаются и при других температурах насыщения бором, при этом кривые изменения энергии активации имеют несколько перегибов, в частности, в интервале содержаний углерода в стали с 0,35 до 0,50 масс. % и с 0,7 до 0,8 масс. %. Повышение температуры процесса насыщения приводит к понижению энергии активации диффузии бора в среднем на 5 кДж/моль на каждые 100 °С.

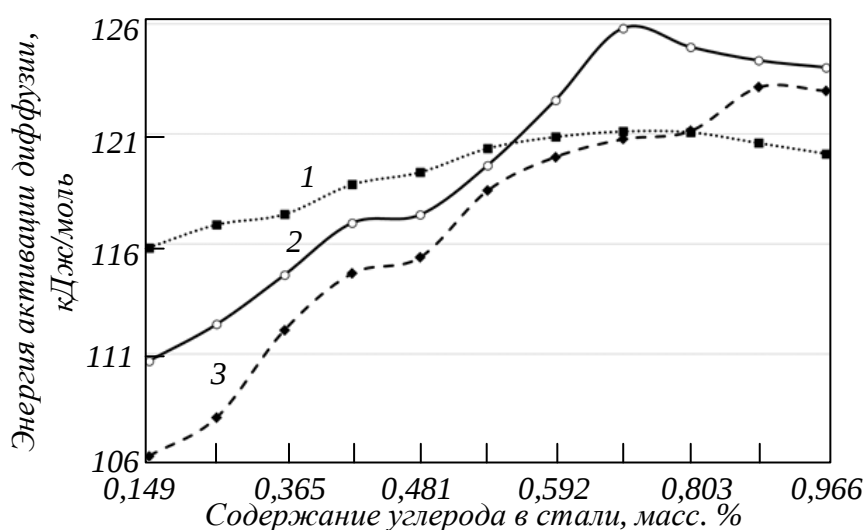


Рис. 1. Влияние содержания углерода в стали на энергию активации диффузии бора при температурах борирования 850, 950 и 1050 °С (1 – 3)

Fig. 1. Effect of carbon content in steel on the activation energy of boron diffusion at boriding temperatures 850, 950 and 1050 °С (1 – 3)

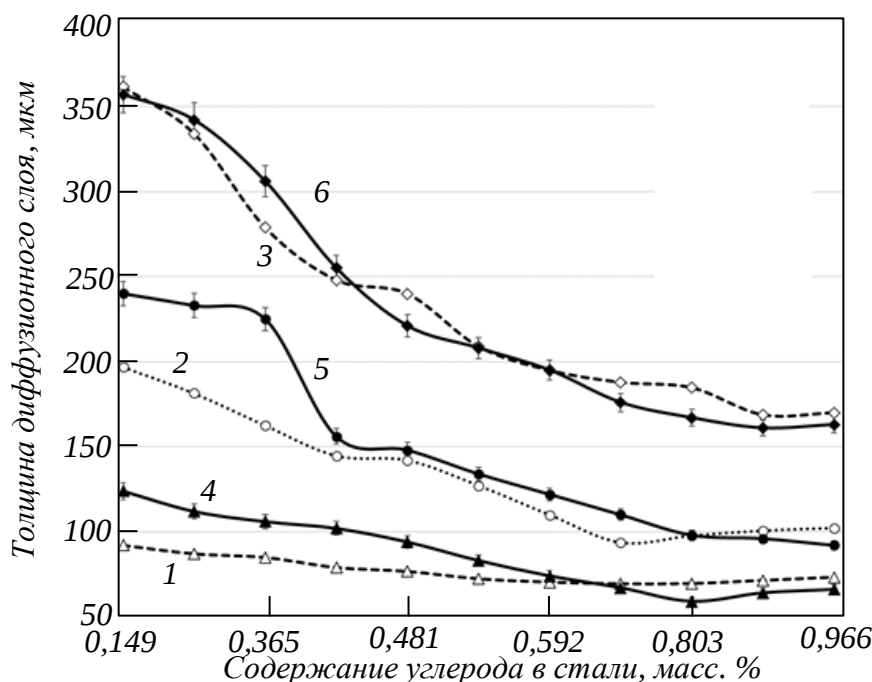


Рис. 2. Влияние содержания углерода в стали на толщину слоя боридов при температурах борирования 850 °С (1, 4), 950 °С (2, 5) и 1050 °С (3, 6):

1 – 3 – расчет; 4 – 6 – эксперимент

Fig. 2. Effect of carbon content in steel on the thickness of the boride layer at boriding temperatures

850 °С (1, 4), 950 °С (2, 5) and 1050 °С (3, 6):

1 – 3 – calculation; 4 – 6 – experiment

На рис. 2 приведены расчетные (1 – 3) и экспериментально определенные (4 – 6) толщины диффузионного слоя при температурах процесса насыщения 850, 950 и 1050 °С. Расчет толщины слоя боридов проводился согласно выражениям (1) и (2). Экспериментальное определение толщины слоя боридов осуществляли на поперечных микрошлифах соответствующих образцов стали после процесса насыщения при помощи программного пакета «ThixoMet PRO» и оптического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer Z1m». За соответствующее значение толщины слоя боридов брали среднее арифметическое 200 измерений толщины слоя на дистанции 1 мм.

Выводы

Анализ графиков распределения толщины слоя боридов в зависимости от содержания в стали углерода позволяет сделать вывод о том, что повышение содержания углерода однозначно приводит к снижению толщины боридного слоя. В наибольшей степени это заметно при промышленно применяемых температурных интервалах борирования – от 950 до 1050 °С. Наиболее значительное снижение толщины боридного слоя происходит при повышении содержания углерода в интервале от 0,35 до 0,50 масс. %. В интервалах содержания углерода в стали от 0,15 до 0,35 и от 0,50 до 0,95 масс. % характер снижения толщины боридного слоя можно считать практически линейным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Emamverdian A.A., Sun Y., Cao C., Pruncu C., Wang Y. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies)-a review. *Engineering Failure Analysis*. 2021;129(18): 105678. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105678>
- Widomski P., Gronostajski Z. Comprehensive review of methods for increasing the durability of hot forging tools. *Procedia Manufacturing*. 2020;47:349–355. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.280>
- Ghalehbandi S.M., Biglari F. Predicting damage and failure under thermomechanical fatigue in hot forging tools. *Engineering Failure Analysis*. 2020;113:104545. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104545>
- Ворошнин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1981:296.
- ASM International Handbook Comitee. ASM Handbook. Vol. 5. Surface Engineering. 1994:2535. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00006-2)
- Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / Г.В. Борисенко, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин, и др. Москва: Металлургия, 1981:424.

7. Ворошнин Л.Г. *Борирование промышленных сталей и чугунов*. Минск: Научная думка, 1981:205.
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;56(3):232–240. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.11.013>
9. Мельник П.И. Диффузионное насыщение железа и твердофазные реакции в сплавах. Москва: Металлургия, 1993:128.
10. Пат. 2345175 РФ. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, Б.Д. Лыгденов, С.А. Земляков, О.А. Власова, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев; Заявл. 03.04.2007; опубл. 27.01.2009. Бюл. № 3.
11. Бокштейн Б.С., Бокштейн С.З., Жуховицкий А.А. *Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах*. Москва: Металлургия, 1974:280.
12. Пригожин И., Дефэй Р. *Химическая термодинамика* / Пер. с англ. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2010:533.
13. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А. Введение в физику поверхности. Москва: Наука, 2006:490.
14. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. *Физика твердого тела*. 3-е изд. Москва: Высшая школа, 2000:494.
15. Ролдугин В.И. *Физикохимия поверхности*. Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2008:568.
16. ASM International Handbook Committee. ASM Handbook. Volume 4. Heat Treating. 1991:2173.
17. Lin G., Zhang Z., Qiu Z., Luo X., Wang J., Zhao F. Boronizing mechanism of cemented carbides and their wear resistance. *Intern. J of Refractory Metals and Hard Materials*. 2013;41:351–355. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.05.008>
18. Delai O., Xia C., Shiqiang L. Growth kinetics of the FeB/Fe₂B boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling. *J of Materials Research and Technology*. 2021;11:1272–1280. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.109>
19. Mathew M., Rajendrakumar P. Optimization of process parameters of boro-carburized low carbon steel for tensile strength by Taguchi method with grey relational analysis. *Materials & Design*. 2011;32:3637–3644. <https://doi.org/10.1007/s12588-015-9128-x>
20. Pertek A., Kulka M. Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*. 2003;173:309–314. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.11.016>
21. Yu L., Chen X., Khor K.A., Sundararajan G. FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics. *Acta Materialia*. 2005;53:2361–2368. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.01.043>

REFERENCES

1. Emamverdian A.A., Sun Y., Cao C., Pruncu C., Wang Y. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies)-a review. *Engineering Failure Analysis*. 2021;129(18):105678. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105678>
2. Widomski P., Gronostajski Z. Comprehensive review of methods for increasing the durability of hot forging tools. *Procedia Manufacturing*. 2020;47:349–355. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.280>
3. Ghalehbandi S.M., Biglari F. Predicting damage and failure under thermomechanical fatigue in hot forging tools. *Engineering Failure Analysis*. 2020;113:104545. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104545>
4. Voroshnin L.G. *Multicomponent diffusion coatings*. Minsk: Science and Technology, 1981:296. (In Russ.).
5. ASM International Handbook Committee. ASM Handbook. Vol. 5. Surface Engineering. 1994:2535. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00006-2)
6. *Chemical and thermal treatment of metals and alloys: Handbook* / G.V. Borisenok, L.A. Vasiliev, L.G. Voroshnin, etc. Moscow: Metallurgiya, 1981:424. (In Russ.).
7. Voroshnin L.G. *Boration of industrial steels and cast iron*. Minsk: Naukova dumka, 1981:205. (In Russ.).
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;56(3):232–240. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.11.013>
9. Melnik P.I. *Diffusion saturation of iron and solid-phase reactions in alloys*. Moscow: Metallurgy, 1993:128. (In Russ.).
10. Method of hardening parts made of structural and tool steels / Guryev A.M., Ivanov S.G., Lygdenov B.D., Zemlyakov S.A., Vlasova O.A., Kosheleva E.A., Guryev M.A. Pat. 2345175 RF. *Byulleten' izobretenii*. 2009, no. 3. (In Russ.).
11. Bokshtein B.S., Bokshtein S.Z., Zhukhovitsky A.A. Thermodynamics and kinetics of diffusion in solids. Moscow: Metallurgy, 1974:280. (In Russ.).

12. Prigozhin I., Defey R. *Chemical thermodynamics* / Trans. Eng. Moscow: Binom. Laboratory of Knowledge, 2010:533. (In Russ.)
13. Oura K., Lifshits V.G., Saranin A.A. *Introduction to surface physics*. Moscow: Nauka, 2006:490. (In Russ.).
14. Pavlov P.V., Khokhlov A.F. *Solid state physics*. 3rd ed. Moscow: Higher School, 2000:494. (In Russ.).
15. Roldugin V.I. *Physical chemistry of the surface*. Dolgoprudny: Intel-lect Publishing House, 2008:568. (In Russ.).
16. ASM International Handbook Committee. *ASM Handbook*. Vol. 4. Heat Treating. 1991:2173.
17. Lin G., Zhang Z., Qiu Z., Luo X., Wang J., Zhao F. Boronizing mechanism of cemented carbides and their wear resistance. *Intern. J of Refractory Metals and Hard Materials*. 2013;41:351–355.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.05.008>
18. Delai O., Xia C., Shiqiang L. Growth kinetics of the FeB/Fe₂B boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling. *J of Materials Research and Technology*. 2021;11:1272–1280.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.109>
19. 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;32:3637–3644.
<https://doi.org/10.1007/s12588-015-9128-x>
20. Pertek A., Kulka M. Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*. 2003;173:309–314.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.11.016>
21. Yu L., Chen X., Khor K.A., Sundararajan G. FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics. *Acta Materialia*. 2005;53:2361–2368.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.01.043>

Сведения об авторах

Михаил Алексеевич Гурьев, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; профессор, Уханьский текстильный университет; ведущий инженер, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd.
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787
SPIN-код: 6084-1112

Сергей Геннадьевич Иванов, д.т.н., заведующий ЛМИ ИЦ «ХимБиоМаш», ведущий научный сотрудник

НИИ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; профессор, Уханьский текстильный университет
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249
SPIN-код: 1249-4949

Цюань Чжэн, аспирант, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Уханьский текстильный университет
E-mail: 361870277@qq.com
ORCID: 0000-0002-4596-1302

Алексей Михайлович Гурьев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой начертательной геометрии и графики, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; профессор, Уханьский текстильный университет
E-mail: gurievam@mail.ru
ORCID: -0002-7570-8877
SPIN-код: 1134-0006

Information about the authors:

Mikhail A. Guryev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University (AltSTU); Professor, Wuhan Textile University; Lead Engineer, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd.
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787
SPIN-код: 6084-1112

Sergei G. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of LMI IC "ChemBioMash", Leading Researcher at SD, I.I. Polzunov Altai State Technical University; Professor, Wuhan Textile University
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249
SPIN-код: 1249-4949

Q. Zheng, Postgraduate student, Wuhan Textile University, Polzunov Altai State Technical University
E-mail: 361870277@qq.com
ORCID: 0000-0002-4596-1302

Alexey M. Guryev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. Head of department, I.I. Polzunov Altai State Technical University; Professor, Wuhan Textile University
E-mail: gurievam@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7570-8877
SPIN-код: 1134-0006

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

Поступила в редакцию 20.08.2024
 После доработки 02.09.2024
 Принята к публикации 04.09.2024

Received 20.08.2024
 Revised 02.09.2024
 Accepted 04.09.2024