



РАЗДЕЛ 1. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

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

УДК 621.793.6

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.021



СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЯХ

Иван Петрович Полянский¹, Роман Олегович Вихрев²,
Игорь Геннадьевич Сизов³

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

¹ i.polyansky@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7350-8791>

² vichrevr900@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5130-4336>

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

Аннотация. Борирование применяют с целью повышения эксплуатационной долговечности для различного рода инструмента и технологической оснастки. Преимуществ у боридных покрытий довольно много. К ним можно отнести высокую твердость, износостойкость, жаростойкость, коррозионную стойкость и т.д. Высокая твердость и износостойкость являются преобладающими из этих свойств.

В большинстве случаев разрушение деталей и инструмента начинается с поверхностных слоев, имеющих глубину от тысячных до сотых долей миллиметра. Поэтому стойкость к износу деталей, подвергнутых борированию, определяется не столько глубиной боридного покрытия, сколько его качеством и структурой.

В данной статье рассмотрено исследование формирования структуры и свойств на инструментальных сталях У12, 5ХНМ, 7ХЗ. В работе проведен металлографический анализ боридных покрытий на сталях. Определена микротвердость по глубине диффузионного покрытия в зависимости от марки стали. Проведены испытания на жаростойкость и сравнительный анализ износостойкости сталей, подвергнутых термической обработке и борированию. Дана оценка возможности применения борирования для данных сталей.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, борирование, металлографический анализ, микротвердость, жаростойкость, износостойкость.

Благодарности: результаты исследований выполнены при финансовой поддержке ФГБОУ ВО ВСГУТУ в рамках гранта «Молодые ученые ВСГУТУ» (Приказ 412од от 05.03.2022).

Для цитирования: 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. EDN: <https://elibrary.ru/IEWEWV>.

Original article

STRUCTURE AND PROPERTIES OF BORIDE COATINGS ON TOOL STEELS

Ivan P. Polyansky¹, Roman O. Vihrev², Igor G. Sizov³

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

¹ i.polyansky@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7350-8791>

² vichrevr900@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5130-4336>

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

Abstract. *Boriding is used to increase the operational durability for various kinds of tools and industrial equipment. Boride coatings have quite a few advantages. These include high hardness, wear resistance, heat resistance, corrosion resistance, etc. High hardness and wear resistance are the predominant of these properties.*

In most cases, the destruction of parts and tools begins with surface layers having a depth of thousandths to hundredths of a millimeter. Therefore, the wear resistance of parts subjected to boriding is determined not so much by the depth of the boride coating as by its quality and structure.

This article discusses the study of the formation of structure and properties on tool steels Y12, 5XHM, 7X3. In this work, a metallographic analysis of boride coatings on steels was carried out. The microhardness was determined by the depth of the diffusion coating depending on the steel grade. Tests for heat resistance and a comparative analysis of the wear resistance of steels subjected to heat treatment and boriding were carried out. An assessment of the possibility of using boriding for these steels is given.

Keywords: *chemical-thermal treatment, boriding, metallographic analysis, microhardness, heat resistance, wear resistance.*

Acknowledgements: *the research results were carried out with the financial support of the FSUE in VSGUT within the framework of the grant "Young scientists of VSGUT" (Order 412od of 05.03.2022).*

For citation: Polyansky, I.P., Vihrev, R.O. & Sizov, I.G. (2023). Structure and properties of boride coatings on tool steels. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 171-177. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.021. EDN: <https://elibrary.ru/IEWEWV>.

ВВЕДЕНИЕ

Диффузионное борирование является одним из распространенных способов повышения долговечности деталей и инструмента в различных отраслях машиностроения [1, 2]. Борированные детали обладают высокой твердостью, стойкостью к различным видам износа, могут работать в разных агрессивных средах и при повышенных температурах до 800 °С, не теряя при этом своих свойств. Опыт применения борирования показывает, что такой способ повышает стойкость штамповой оснастки от 2,5 до 10 раз, стойкость пресс-форм для изготовления деталей из сыпучих материалов – в 2–5 раз, инструмент для волочения и накатки – в 2–10 раз, детали различной технологической оснастки – до 12 раз, механизмы, работающие в условиях абразивного износа – до 6 раз, детали литейных машин и пресс-форм для литья – до 5–6 раз [3–7]. На основании литературных данных можно сделать однозначный вывод о том, что борирова-

ние в настоящее время является перспективным способом повышения долговечности деталей машин и инструмента и продолжает активно развиваться российскими и зарубежными учеными.

Цель работы: исследование формирования структуры и свойств боридных покрытий на инструментальных сталях У12, 5ХНМ, 7Х3.

МЕТОДЫ

В качестве исследуемых материалов использовали инструментальные стали, приведенные в таблице 1.

Легированные стали 5ХНМ и 7Х3 являются инструментальными штамповыми сталями и широко используются для горячего и холодного деформирования [8, 9]. Данные стали применяются преимущественно для крупногабаритных изделий, таких как пуансоны, матрицы, крупные молотовые штампы и т.п. В слабонагруженных условиях в качестве штампов, матриц допускается использовать сталь У12.

Таблица 1 – Химический состав сталей, масс.доля в % (ГОСТ 5950-2000)

Table 1 - The chemical composition of steels mass. share in % (GOST 5950-2000)

Марка стали	Химический состав								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Cu
5ХНМ	0.50–0.60	0.10–0.40	0.50–0.80	0.50–0.80	0.15–0.80	1.40–1.80	0.030	0.030	0.30
7Х3	0.65–0.75	0.15–0.35	0.50–0.80	3.20–3.80	0.20	0.35	0.030	0.030	0.30
У12	1.1–1.22	0.17–0.3	1.17–0.3	0.2	0.20	0.25	0.030	0.030	0.25

Термическую обработку и борирование сталей осуществляли в камерной печи СНОЛ-12/12.

Термическую обработку сталей проводили согласно справочным данным [8, 9].

Борирование проводили в контейнерах с плавким затвором в смеси, содержащей 95 % В₄С + 5 % NaF при температуре 950 °С и временем выдержки 4 часа.

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Альтами МЕТ-2С с цифровой камерой для фиксации изображений. Измерение твердости и микротвердости проводили на твердомерах РоквеллаТР 5006 и НV-1000 соответственно.

Жаростойкость оценивали согласно ГОСТ 6130-71, которую определяли путем выдержки образцов в печи при температуре 1000 °С в течение 50 часов, весовым методом по увеличению массы образца.

Изменение массы в процессе испытаний регистрировали периодически, через каждые 5 часов на аналитических весах. Охлаждение образцов перед взвешиванием проводили на спокойном воздухе. Каждая точка определялась как среднее арифметическое результатов испытания трех образцов.

Испытания на износостойкость проводили на машине трения типа Амслер модели МИ-1. Изменение массы образцов регистрировали периодически через каждые 10 минут на аналитических весах.

По результатам испытаний на жаро- и износостойкость строили кривые в программе «Microsoft Office Excel», которые позволили наглядно судить о зависимости набора и потери массы образцов от продолжительности испытаний.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате диффузионного насыщения бором были получены покрытия, представленные на рисунке 1.

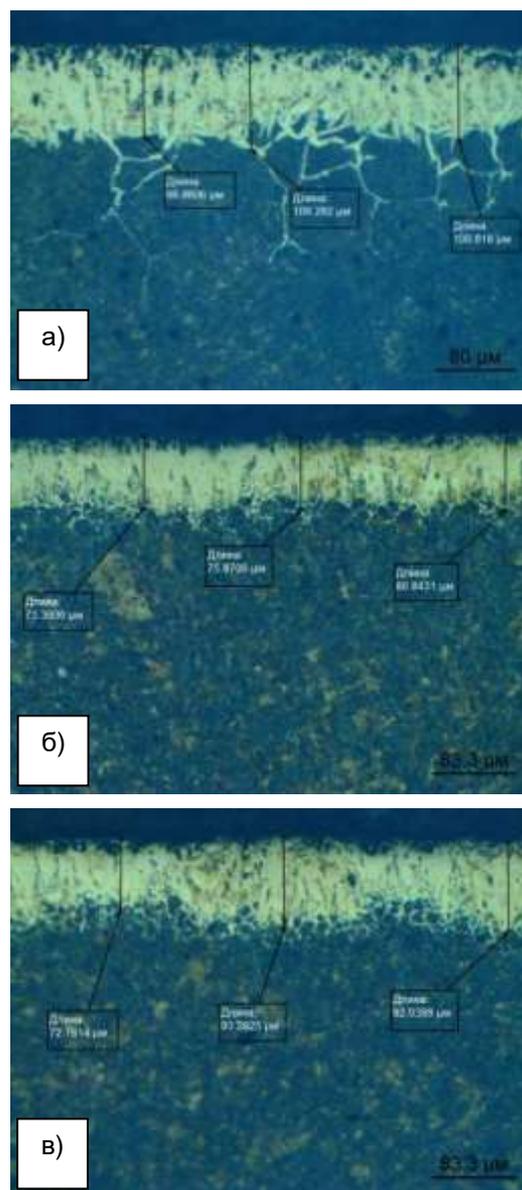


Рисунок 1 – Микроструктуры борированных покрытий на сталях при увеличении ×200:

а) 5ХНМ; б) 7Х3; в) У12

Figure 1 - Microstructures of borated coatings on steels at magnification ×200:

а) 5K, б) 7X3, в) U12

Основная часть покрытий на всех сталях состоит из игл, направленных вглубь основы, что характерно для борированных покрытий классического типа [10].

На стали У12 от основных игл происходит продолжение покрытия в виде разветвленных мелких игл с их дальнейшим переходом в структуру основного металла по границам цементитной сетки. Такое строение боридного покрытия характерно для высокоуглеродистых сталей.

На сталях 5ХНМ и 7Х3 структуры боридных покрытий имеют другой вид. При переходе от основных игл в зону основного металла эта фаза формируется в виде сетки.

Глубина диффузионных покрытий составляет: на стали 5ХНМ – 75 мкм, на 7Х3 – 80 мкм и У12 – 100 мкм.

Уменьшение толщины покрытия связано с количеством легирующих элементов в стали. То есть, чем больше в стали содержится легирующих элементов (хром, молибден, никель, азот, марганец и т.д.), тем затруднительнее проходит диффузионное насыщение [11].

Микротвердость по толщине покрытий на сталях У12, 5ХНМ и 7Х3 распределяется неравномерно. Зависимость распределения микротвердости по глубине упрочняющих покрытий показано на рисунке 2.

Микротвердость покрытий уменьшается по мере удаления от поверхности. На расстоянии 30 мкм составляет: У12 – 18000–18500 МПа, 5ХНМ – 17500–18000 МПа, 7Х3 – 17500–18000 МПа; на расстоянии от поверхности 60 мкм: У12 – 16500–17000 МПа, 5ХНМ – 16000–16500 МПа, 7Х3 – 15500–16000 МПа; на расстоянии от поверхности 90 мкм: У12 – 11500–12000 МПа, 5ХНМ – 12500–13000 МПа, 7Х3 – 12000–12500 МПа. Микротвердость переходной зоны основного металла составляет 4000–5000 МПа на всех сталях.

Результаты испытаний на жаростойкость сталей приведены на рисунках 3, а–в. Как видно из графиков, на сталях без обработки, ввиду высокой температуры ($T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), происходит их быстрое разрушение на первых часах испытаний (рисунок 3, а–в).

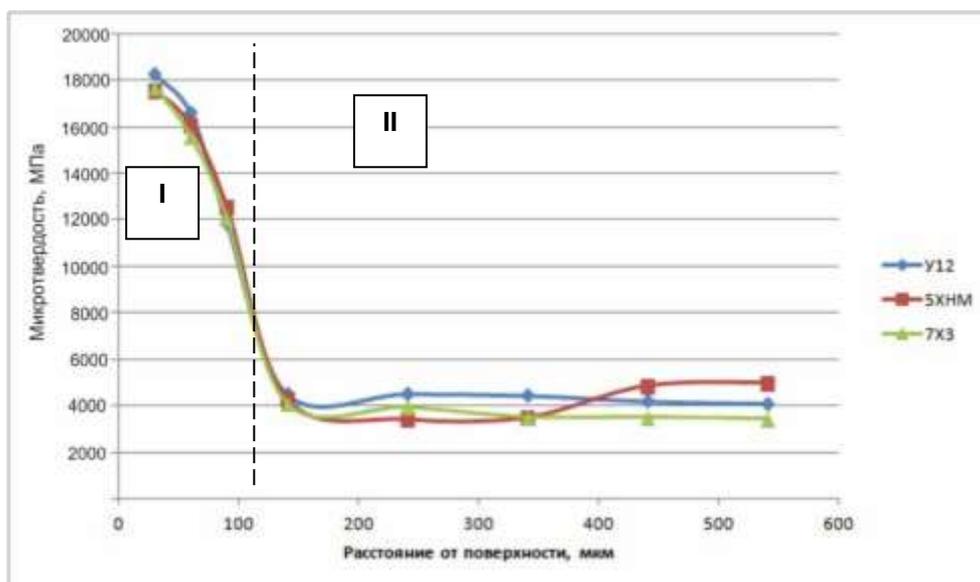


Рисунок 2 – График распределения микротвердости по глубине борированных покрытий: I – зона распределения микротвердости упрочняющего покрытия, II – зона распределения микротвердости переходной зоны и основного металла

Figure 2 is a graph of the microhardness distribution over the depth of borated coatings: I is the microhardness distribution zone of the reinforcing coating, II is the microhardness distribution zone of the transition zone and the base metal

Разрушение связано с обезуглероживанием поверхности, в результате чего на поверхности образуется обедненная углеродом зона в виде окалина, содержащей оксиды железа. Дальнейшее использование таких образцов будет невозможным, т.к. окалина расслаивается и нарушается форма образцов.

После борирования образцы показывают положительный эффект (рисунок 3, а–в). Для стали У12 заметное разрушение происходит после 15 часов (рисунок 3, а), а для сталей 5ХНМ и 7Х3 на промежутке от 15 до 20 часов (рисунок 3, б–в). Далее происходит значительный набор массы. Увеличение показате-

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЯХ

лей жаростойкости для сталей 5ХНМ и 7Х3 связано с их легированностью хромом и дру-

гими элементами, которые повышают механические свойства сталей.

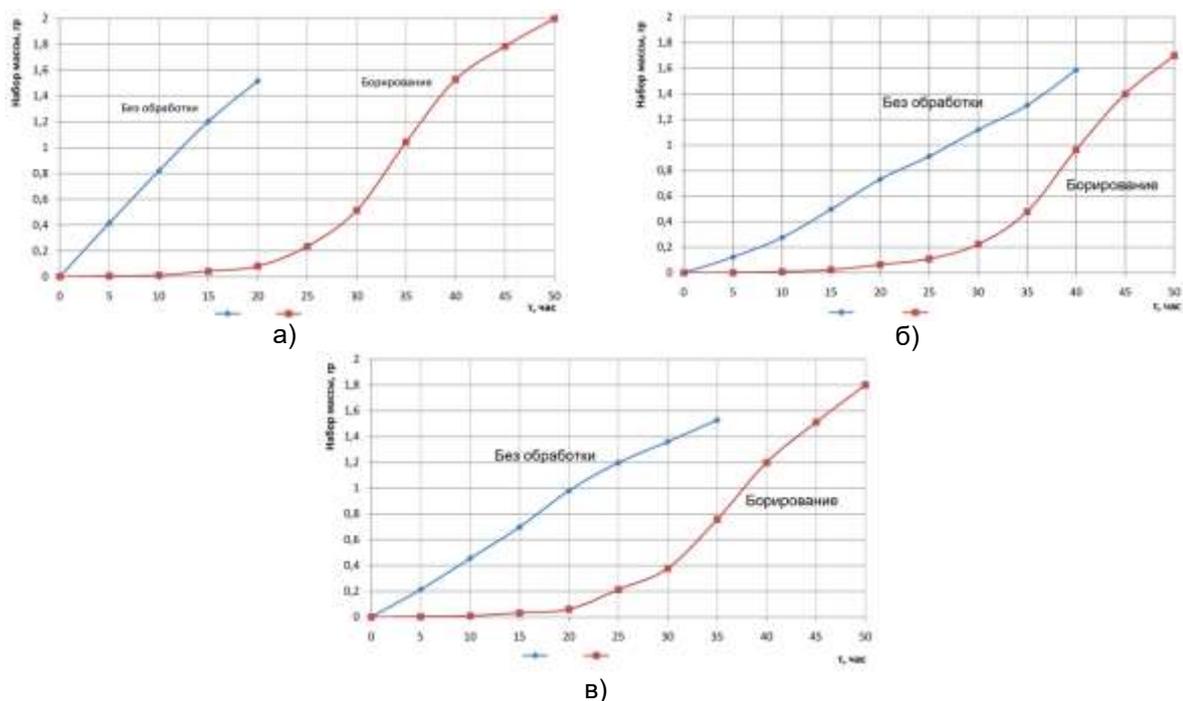


Рисунок 3 – Результаты испытаний на жаростойкость а) У12; б) 5ХНМ; в) 7Х3
Figure 3 - Results of heat resistance tests a) U12, b) 5XNM, c) 7X3

Испытания на износостойкость проводили на образцах, обработанных двумя способами.

В первом случае образцы из сталей У12, 5ХНМ, 7Х3 подвергали термической обработке (закалке с последующим отпуском). Также

для назначения температуры закалки руководствовались справочными данными [8, 9] (таблица 2). Режимы, при которых была проведена термическая обработка, приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Критические точки сталей [8–9]

Table 2 - Critical points of steels [8-9]

Марка стали	Критические точки, °С				
	Ac ₁	Ac ₃ (A _{cm})	Ar ₃ (Ar _{cm})	Ar ₁	Mn
У12	730	820	–	700	200
5ХНМ	730	780	640	610	230
7Х3	770	730	–	–	400

Таблица 3 – Режимы термической обработки

Table 3 - Heat treatment modes

Марка стали	Температура закалки, °С	Температура среднего отпуска, °С
У12	780 (охлаждение в воде)	350
5ХНМ	850 (охлаждение в масле)	
7Х3	870 (охлаждение в масле)	

Так как штамповый инструмент должен обладать высокой износостойкостью и при этом иметь высокую вязкость, температуру отпуска выбирали исходя из требований к механическим свойствам. Для всех образцов отпуск проводили при температуре 350 °С. Средний отпуск (300–400 °С) обеспечивает в изделиях относительно высокую твердость (HRC40-54) и

максимальный предел упругости при достаточном пределе прочности.

Термическая обработка проводилась по стандартным известным методикам в муфельной печи камерного типа (СНОЛ 12/12).

Твердость сталей после термической обработки приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Твердость сталей после термической обработки

Table 4 - Hardness of steels after heat treatment

Марка стали	Твердость стали после закалки, HRC	Твердость стали после отпуска, HRC
У12	65–67	56–58
5ХНМ	55–57	49–51
7Х3	58–60	51–53

Таким образом, на данных сталях были получены оптимальные значения твердости, отвечающие требованиям к штамповому инструменту.

Во втором случае перечисленные образцы сталей подвергали борированию по методике, описанной в методах и материалах исследования.

Результаты испытаний на износостойкость сталей, упрочненных борированием, приведены на рисунке 6, а–в.

Износостойкость сталей определяли по принципу изменения массы, по формуле:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_i}{m_1} \times 100 \%$$

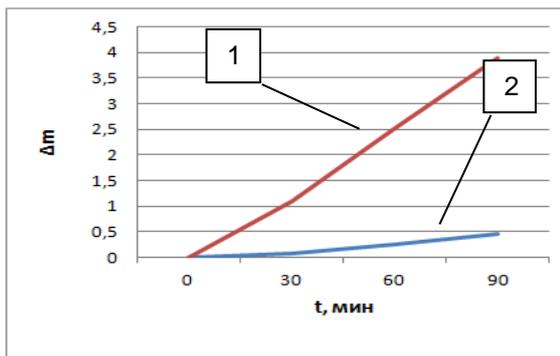
где: Δm – относительное изменение массы образца;

m_1 – начальная масса образца;

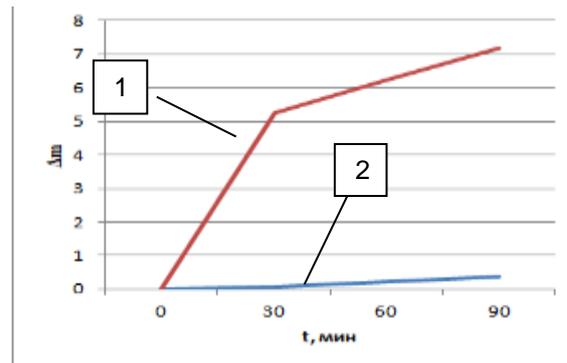
m_i – масса образца после испытаний.

Испытания проводили до полного разрушения упрочняющего покрытия.

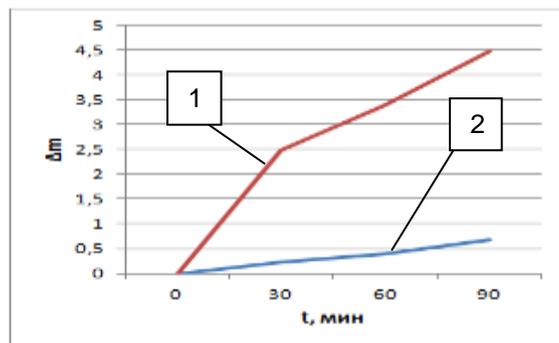
Из рисунков 4, а–в видно, что значительное изменение массы образцов после термической обработки происходит с первых минут испытаний. После борирования образцов видимые изменения происходят для стали У12 после 15 минут испытаний, для стали 5ХНМ после 30 минут и стали 7Х3 после 15 минут.



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Графики изменения массы сталей после термической обработки и борирования: а) У12; б) 5ХНМ; в) 7Х3; 1 – после термической обработки; 2 – после борирования

Figure 4 - Graphs of changes in the mass of steels after heat treatment and boration: а) U12, б) 5XNM, в) 7X3, 1 - after heat treatment, 2 - after boration

ВЫВОДЫ

Проведение металлографического анализа и определение микротвердости позволили сделать вывод, что значения микротвердости покрытия на стали 5ХНМ уступает

значениям микротвердости покрытия на стали У12 и уступает по толщине покрытиям на сталях У12 и 7Х3. Однако несмотря на это, упрочняющее покрытие на стали 5ХНМ имеет более высокие показатели по износостойко-

сти. Вероятнее всего это связано с формированием более пластичного слоя из-за входящих в состав стали легирующих элементов.

В зависимости от марки стали формируются диффузионные покрытия различной глубины и структуры. Глубина покрытий на сталях составляет: 5ХНМ – 75 мкм, 7Х3 – 80 мкм, У12 – 100 мкм.

Борирование позволяет существенно увеличить окислительную стойкость сталей при высоких температурах. Для стали У12 до 15 часов, для сталей 5ХНМ и 7Х3 до 20 часов. Рекомендуемый ресурс работы сталей при 1000 °С: У12 – 8–10 часов, 5ХНМ – 10–12 часов, 7Х3 – 10 часов.

Испытания на износостойкость показали, что образцы после борирования имеют повышенную стойкость к износу в условиях сухого трения–скольжения по сравнению образцами после термической обработки, которая применяется для упрочнения деталей на заводах.

На основе полученных данных можно рекомендовать борирование для повышения стойкости деталей, работающих в условиях повышенного износа, например, для упрочнения штампового инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворошнин Л.Г. Борирование стали. М. : Металлургия, 1978. 230 с.
2. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов: справ. пособие. Минск : Беларусь, 1981. 205 с.
3. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник / Г.В. Борисенко [и др.]. Москва : Изд-во: Металлургия, 1981, 424 с.
4. Упрочнение поверхностных слоев штамповых сталей борированием / Т.В. Емельянова [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 1 (145). С. 40–44.
5. Трахтенберг Б.Ф. Стойкость штампов и пути ее повышения. Куйбышев : Куйбышевское книжное издательство, 1964. 280 с.
6. Зубцов М.Е., Корсаков В.Д. Стойкость штампов. Л. : Машиностроение, 1971. 200 с.
7. Сорокин В.Г., Гервасьев М.А. Стали и сплавы. Марочник. М. : Интернет Инжиниринг, 2001. 608 с.
8. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 2003, 784 с.
9. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. Plasticity of Boronized Layers. Springer. 2016. P. 364
10. Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки. М. : Новое знание, 2010. 304 с.

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

Статья поступила в редакцию 09.12.2022; одобрена после рецензирования 13.03.2023; принята к публикации 21.03.2023.

The article was received by the editorial board on 09 Dec 2022; approved after editing on 13 Mar 2023; accepted for publication on 21 Mar 2023.

Информация об авторах

И. П. Полянский – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металловедение и технологии обработки материалов» Восточно-Сибирского государственного технологического университета.

Р. О. Вихрев – магистрант направления 22.04.02 Металлургия Восточно-Сибирского государственного технологического университета.

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

REFERENCES

1. Voroshnin, L.G. (1978). Boration of steel. M. : Metallurgy. (In Russ.).
2. Voroshnin, L.G. (1981). Boration of industrial steels and cast iron: reference.stipend. Minsk: Belarus.
3. Borisenok, G.V., Vasiliev, L.A. Voroshnin L.G. [et al.] (1981). Chemical and thermal treatment of metals and alloys. Reference book. Moscow : Publisher: Metallurgy, (1), 424 p. (In Russ.).
4. Emelyanova, T.V., Gryzunov, V.I., Priymak, E.Yu. & Firsova, N.V. (2017). Hardening of the surface layers of sheet steels by boration. Hardening technologies and coatings. 13. No. 1 (145). 40-44. (In Russ.).
5. Trachtenberg, B.F. (1964). Durability of stamps and ways to increase it. Kuibyshev: Kuibyshev Book Publishing House. (In Russ.).
6. Zubtsov, M.E. & Korsakov, V.D. (1971). Durability of stamps. L. : Mechanical Engineering. (In Russ.).
7. Sorokin, V.G. & Gervasyev, M.A. (2001). Steels and alloys. Marochnik. M. : Internet Engineering. (In Russ.).
8. Zubchenko, A.S. (2003). Vintage of steels and alloys. 2nd ed., reprint. and additional. M. : Mechanical Engineering. (In Russ.).
9. Krukovich, M.G., Prusakov, B.A. & Sizov, I.G. (2016). Plasticity of Boronized Layers. Springer. (In Russ.).
10. Voroshnin, L.G., Mendeleeva, O.L. & Smetkin, V.A. (2010). Theory and technology of chemical-thermal treatment. M. : Novoeznanie. (In Russ.).

Information about the authors

I.P. Polyansky - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Metallurgy and Materials Processing Technologies" of the East Siberian State Technological University.

R.O. Vikhrev - Master's student of the direction 22.04.02 Metallurgy of the East Siberian State University of Technology.

I.G. Sizov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the East Siberian State Technological University.