

**Оригинальная статья**

УДК 621.793.6

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-85-92

**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СЛОЕВ НА СТАЛИ МАРКИ 5ХНМ, ПОЛУЧЕННЫХ  
ПОРОШКОВЫМ БОРОМЕДНЕНИЕМ**

© 2025 г. С. А. Лысых<sup>1</sup>, В. Н. Корнопольцев<sup>2</sup>, С. В. Калашников<sup>1</sup>, У. Л. Мишигдоржийн<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физического материаловедения СО РАН (Россия, 670047, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6)

<sup>2</sup>Байкальский институт природопользования СО РАН (Россия, 670047, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6)

**Аннотация.** Износостойкость конструкционных сталей имеет большое влияние на технологию и экономику в машиностроении. Одни из наиболее дорогих производственных оснасток являются штампы, которые работают в сложных условиях и подвержены износу. Развитие способов упрочнения их поверхности, снижающие износ и увеличивающие тем самым ресурс штампов, очень важное направление как с точки зрения технологии их изготовления, так и с точки зрения экономии средств благодаря увеличению жизненного цикла производственной оснастки. Для изготовления штамповой оснастки при крупносерийном производстве в настоящее время используют преимущественно сталь марки 5ХНМ. Рассмотрена технология процесса химико-термической обработки рассматриваемой стали путем боромеднения с целью повышения износостойкости ее поверхности. Процесс боромеднения проводили в муфельной печи с использованием герметичных контейнеров в смеси, содержащей 62 % В<sub>4</sub>С, 17 % CuO, 19 % Al, 2 % NaF, при температуре 950 °С и временем выдержки 4 ч. Структура полученного упрочняющего покрытия игольчатая. Поверхностная твердость благодаря упрочняющему слою достигла 1850 HV и снижается до 1000 HV на глубине 180 мкм. Для измерения износа применяли машину трения с интегральным методом оценки. В процессе износа покрытия происходит обильное отделение мелких частиц металла и диффузионного слоя. Отделившиеся частицы, попадая в зону механического контакта деталей, вызывают микрорезание их поверхности. Однако, несмотря на это, сопротивление износу стали с покрытием возросло более чем в 22 раза по результатам тридцатиминутного испытания на машине трения. В качестве сравнительной технологии упрочнения применяли термическую обработку стали, в результате которой ее износостойкость возросла лишь в 2,6 раза при тех же условиях испытаний.

**Ключевые слова:** упрочнение, упрочняющие покрытия, износостойкость, сталь марки 5ХНМ, химико-термическая обработка, боромеднение, диффузионный слой

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, научная тема № 0270-2024-0010.

**Благодарности.** Исследование проведено с применением приборной базы ЦКП «Научные приборы» Бурятского государственного университета им. Доржи Банзарова.

**Для цитирования:** Лысых С.А., Корнопольцев В.Н., Калашников С.В., Мишигдоржийн У.Л. Износостойкость слоев на стали марки 5ХНМ, полученных порошковым боромеднением. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):85–92. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-85-92](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-85-92)

*Original article*

**WEAR RESISTANCE OF LAYERS ON 5KHNM GRADE STEEL OBTAINED BY POWDER BOROMEDNING**

© 2025 S. A. Lysykh<sup>1</sup>, V. N. Kornopoltsev<sup>2</sup>, S. V. Kalashnikov<sup>1</sup>, U. L. Mishigdorzhii<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences* (st. Sakhyanova, 6, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russian Federation)

<sup>2</sup>*Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences* (st. Sakhyanova, 6, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russian Federation)

**Abstract.** The wear resistance of structural steels has a great impact on technology and economics in mechanical engineering. One of the most expensive production bases are stamps, which operate in difficult conditions and are subject to wear. The development of methods for strengthening their surfaces, which reduce wear and thereby increase the life of stamps, is a very important direction both from the point of view of their manufacturing technology and from the point of view of cost savings due to an increase in the life cycle of production equipment. Currently, 5KHNM grade steel is used primarily for the manufacture of die tooling in large-scale production. The technology of the process of chemical and thermal treatment of the steel in question by boromining in order to increase the wear resistance of its surface is considered. The boromining process was carried out in a steel furnace using sealed containers in a mixture containing 62 % B<sub>4</sub>C, 17 % CuO, 19 % Al, 2 % NaF, at a temperature of 950 °C and a holding time of 4 h. The structure of the resulting reinforcing coating is needle-like. The surface hardness due to the reinforcing layer has reached 1850 HV and decreases to 1000 HV at a depth of 180 microns. A friction machine with an integral evaluation method was used to measure wear. During the process of coating wear, there is an abundant separation of small metal particles and the diffusion layer. The separated particles, falling into the zone of mechanical contact of the parts, cause micro-cutting of their surface. However, despite this, the wear resistance of coated steel increased by more than 22 times according to the results of a thirty-minute test on a friction machine. Heat treatment of steel was used as a comparative hardening technology, as a result of which its wear resistance increased only 2.6 times under the same test conditions.

**Keywords:** hardening, reinforcing coatings, wear resistance, 5XHM steel, chemical-thermal treatment, boron-copper plating, diffusion layer

**Financing.** The work was carried out with financial support from the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, scientific topic no. 0270-2024-0010.

**Acknowledgments.** The study was carried out using the instrumentation base of the Scientific Instruments Shared Use Center of the Buryat State University named after Dorzhi Banzarov.

**For citation:** Lysykh S.A., Kornopoltsev V.N., Kalashnikov S.V., Mishigdorzhii U.L. Wear resistance of layers on 5KHNM grade steel obtained by powder boromedning. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):85–92. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-85-92](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-85-92)

**Введение**

Проблема повышения износостойкости конструкционных материалов является одной из наиболее актуальных для современного материаловедения [1; 2]. Надежность работы и долговечность технических деталей, узлов, инструмента во многом обусловлены явлением трения и возникающего в результате него изнашивания [3; 4]. На восстановление машин или агрегатов, вышедших из строя в результате износа, затрачиваются огромные средства, возрастает время простоя оборудования [5]. Например, на ремонт тракторов задействовано в 4 раза больше производственных

мощностей, чем на их изготовление [6]. Проанализировано и подсчитано, что за срок службы трактора Т-130 на запасные части для его ремонта и техническое обслуживание нужно израсходовать в среднем столько же металла, сколько масса самого трактор (12·10<sup>3</sup> кг).

Явления трения и изнашивания взаимно обусловлены: трение приводит к изнашиванию, а изнашивание поверхностей деталей или инструмента в ходе работы приводит к изменению трения.

В настоящее время при изготовлении штампов для крупносерийного производства используется преимущественно сталь марки 5XHM.

**Химический состав стали марки 5ХНМ (ГОСТ 5950 – 2000)****Table 1. Chemical composition of 5ХНМ steel (GOST 5950 – 2000)**

Марка стали	Содержание элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Cu	Fe
5ХНМ	0,5 – 0,6	0,1 – 0,4	0,5 – 0,8	0,5 – 0,8	0,15 – 0,8	1,4 – 1,8	до 0,03	до 0,03	до 0,3	не менее 94,44

Достоинствами этой стали принято считать достаточно высокую пластичность и ударную вязкость при удовлетворительной прочности. В работах [7; 8] выделены важные проблемы, связанные со стойкостью штампового инструмента из стали марки 5ХНМ, в том числе и с ее износостойкостью. Для решения этой проблемы предлагается проведение процесса химико-термической обработки (ХТО) – боромеднения, позволяющего получить поверхностный слой (достаточно широко применяемый и как антикоррозионное покрытие [9], и как упрочняющий слой [10; 11]). Процесс включает в себя применение комплексного насыщения поверхности стали марки 5ХНМ бором и медью, в результате которого формируется диффузионный боридный слой высокой твердости. Использование бор-медных покрытий изучено недостаточно полно [12], особенно для рассматриваемой стали.

Целью настоящей работы является повышение износостойкости стали марки 5ХНМ комплексным боромеднением ее поверхности, а также сравнительный анализ с образцом, упрочненным термической обработкой (закалкой).

**Методика исследований**

Образцами служили заготовки из стали марки 5ХНМ прямоугольной формы (15 × 10 × 25 мм). Химический состав стали марки 5ХНМ представлен в табл. 1.

Термическую обработку [13] и процесс боромеднения [14] проводили в муфельной печи ЭКПС-50. Процесс боромеднения осуществляли в герметичных контейнерах в смеси, содержащей 62 % В<sub>4</sub>С, 17 % CuO, 19 % Al, 2 % NaF, при температуре 950 °С и временем выдержки 4 ч. Металлографию поперечных шлифов проводили на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 2С. Измерение микротвердости осуществляли с помощью микротвердомера ПМТ-3М с нагрузкой на алмазную пирамидку 50 гс. Элементный микроанализ проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6000 с элементным дисперсионным анализом. Ускоряющее напряжение 15 кВ. Износостойкость определяли на машине

трения, аналогичной СМЦ-2, по схеме диск – плоскость (рис. 1).

Для измерения износа применяли интегральный метод оценки (используется для определения износа небольших деталей со взвешиванием до и после испытаний), то есть оценка суммарного износа по изменению массы образца [15]. Перед взвешиванием детали тщательно промывали и просушивали [5]. Измерение массы образцов фиксировали каждые 10 мин на аналитических весах AND HR-100А с точностью измерения 10<sup>-4</sup> г. Материалом контртела выступал ролик из закаленной стали марки 45 диаметром 50 мм. Притирку контртела проводили в течение 15 мин, радиальное биение не превышало 0,01 мм. Скорость вращения контртела была постоянной (60 об/мин). Нагрузка на образцы составляла 627 Н, необходимо отметить, что при меньших нагрузках на образец потеря массы на аналитических весах так же фиксировали.

**Результаты исследований**

В результате диффузионного боромеднения стали марки 5ХНМ на поверхности были получены слои толщиной 90 – 120 мкм (рис. 2). Диффузионный слой имеет «классическое» игольчатое строение, присущее строению слоя после борирования. Иглы укрупнены и срastaются на поверхности, образуя сплошной слой. Наибольшее значение микротвердости (1850 НV) фиксировали на поверхности. Далее происходило плавное снижение твердости до 1650 – 1000 НV. Твердость структуры и переходной зоны составляла 850 – 600 НV (рис. 3); образцов, прошедших термическую обработку – 40–45 HRC.

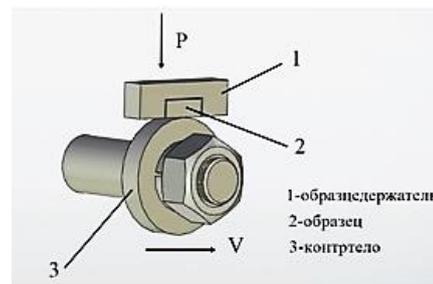


Рис. 1. Схема проведения исследований на износостойкость

Fig. 1. Wear resistance research scheme

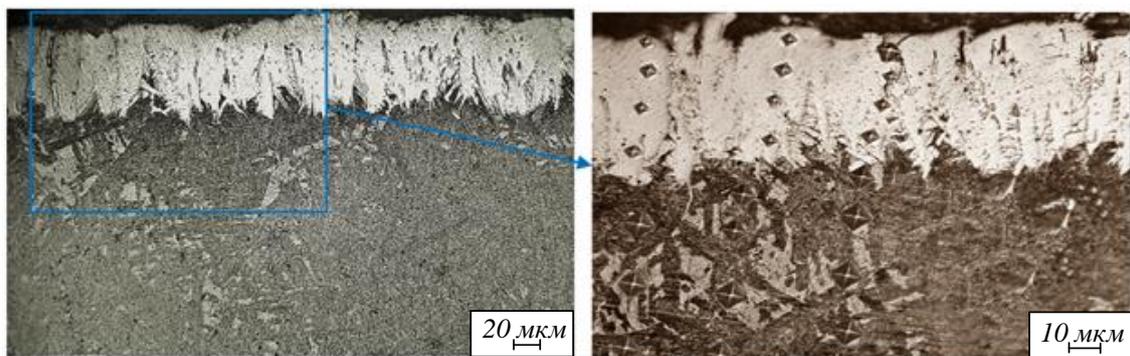


Рис. 2. Микроструктура образцов из стали марки 5XNM после насыщения поверхности бором и медью  
 Fig. 2. Microstructure of 5XNM steel samples after surface saturation with boron and copper

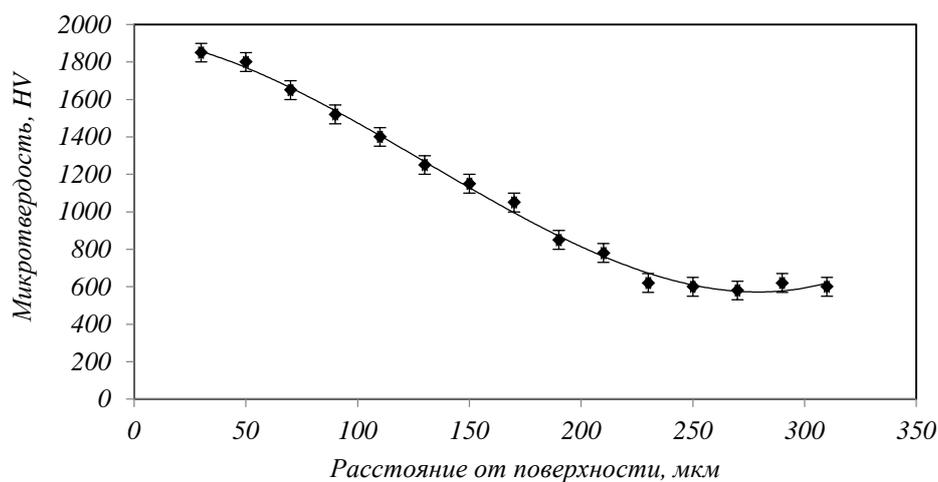


Рис. 3. Распределение микротвердости диффузионного слоя образцов из стали марки 5XNM после насыщения поверхности бором и медью  
 Fig. 3. Distribution of microhardness of the diffusion layer of samples made of 5XNM steel after saturation of the surface with boron and copper

Оценочная характеристика повышения или снижения износостойкости будет определена по потери массы исследуемых материалов при одинаковых режимах нагружения. Определим расстояние, прошедшее колесом (контртелом) за 10 и 40 мин испытания на износ. Длина окружности контртела составляет 15,7 см. За 10 мин контртело совершит 600 оборотов, а за 40 мин – 2400 оборотов. Путь за 10 мин составит 94,2 м, а за 40 мин – 376,8 м. Испытания на износостойкость образцов после ХТО сопровождались отделением мелкодисперсных включений (рис. 4). Образцы после проведения испытаний на износ представлены на рис. 5.

В результате испытаний установлено следующее:

- процесс сопровождается обильным отделением мелких частиц металла и диффузионного слоя (рис. 4), что приводит к изменению геометрии испытываемого образца и контртела;

- отделившиеся частицы от диффузионного слоя, имея высокую микротвердость, попадают в зону контакта образца и контртела, тем самым происходит процесс аналогичный процессу резания.

В контексте исследования механизма абразивного износа рассматриваемый процесс называют микрорезанием (рис. 5). Из-за асимметричной геометрии высокотвердых частиц он сопровождается высокочастотным звуком, подобно точению изношенным инструментом.



Рис. 4. Микрочастицы металла, образованные в результате износа контртела и образца из стали марки 5XNM после ХТО  
 Fig. 4. Metal microparticles formed as a result of wear of the counterbody and the 5XNM steel sample after chemical treatment

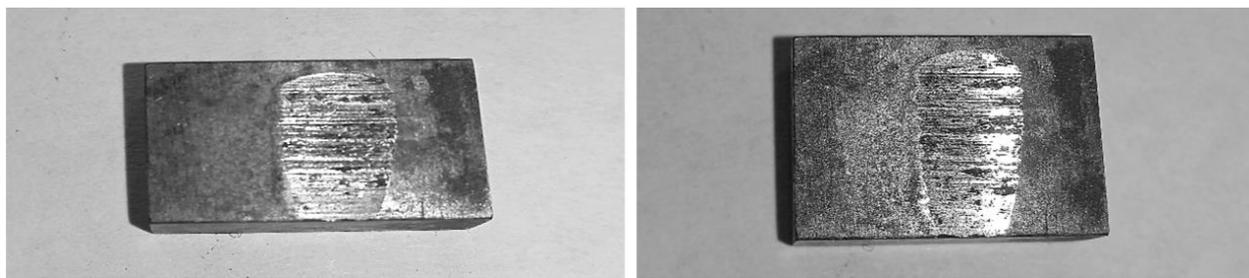


Рис. 5. Образцы из стали марки 5XHM после испытания на износ  
Fig. 5. Samples 5XHM after wear testing

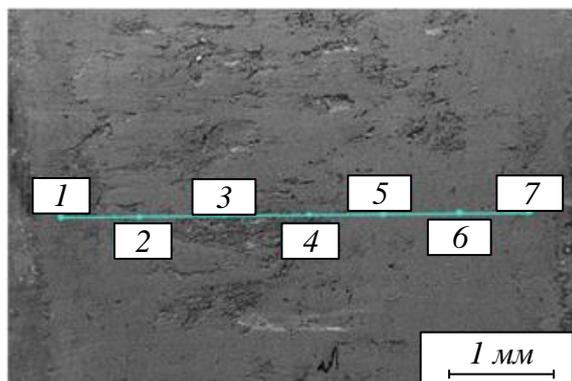


Рис. 6. Точки спектра контактного пятна стали марки 5XHM после проведения испытаний на износ  
Fig. 6. Points of the spectrum of the contact spot of 5XHM steel after wear tests

В настоящей работе был проведен элементный анализ нескольких участков контактного пятна образца (рис. 6). Результаты элементного состава приведены в табл. 2. Углерод присутствует в чистом виде, тогда как все остальные элементы находятся в состоянии оксидов ( $B_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $CuO$ ,  $NiO$ ,  $MoO_3$ ). Оксидные пленки на черных и цветных металлах часто отличаются по плотности от основного металла. Из-за этого оксидные пленки имеют разрывы или трещины, внутрь ко-

торых попадает кислород, процесс окисления металлов продолжается. Для рассматриваемых металлов характерными являются более толстые слои оксидов, которые в процессе трения могут легко разрушаться и образовывать мелкие частицы абразива. Окислительные процессы на поверхности металлов могут играть важную роль в ускорении химических изменений смазки, которые часто приводят к образованию пленки полимеризованного материала на самих металлических поверхностях. Они могут быть вредными, вызывая пригорание поршневых колец в ДВС. Однако полимеризационная пленка может служить защитным слоем при абразивном износе. При сухом трении обычно образуются более толстые и насыщенные пленки оксидов, близких по составу и свойствам к известным оксидам металла. В зависимости от условий трения (прежде всего от температуры) на железе образуются пленки, содержащие оксиды  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  и  $Fe_3O_4$  [16].

На рис. 7 представлена зависимость потери массы от времени при испытаниях образцов из стали марки 5XHM в различных структурных состояниях. Аналогичными можно считать данные, если вместо времени добавить путь контртела, совершенного за определенный промежуток времени. При одинаковой нагрузке и пути,

Т а б л и ц а 2

### Элементный состав контактного пятна в контрольных точках

Table 2. Elemental composition of the contact spot at control points

Точка измерения	Содержание элементов, %								
	B	C	O	Al	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
1	3,75	1,34	7,29	5,86	1,27	1,24	0,61	0,31	78,33
2	0,24	2,61	4,51	2,81	0,94	–	0,81	0,62	87,46
3	–	1,24	3,5	1,41	0,63	0,87	–	0,55	91,8
4	–	6,33	4,47	0,28	1,33	1,22	1,34	0,22	84,81
5	–	2,84	11,19	0,57	0,77	1,53	2,83	0,43	79,84
6	0,12	1,67	6,24	1,24	1,03	0,92	3,55	0,38	84,85
7	2,84	1,29	7,24	3,52	0,9	1,08	2,41	0,47	80,25

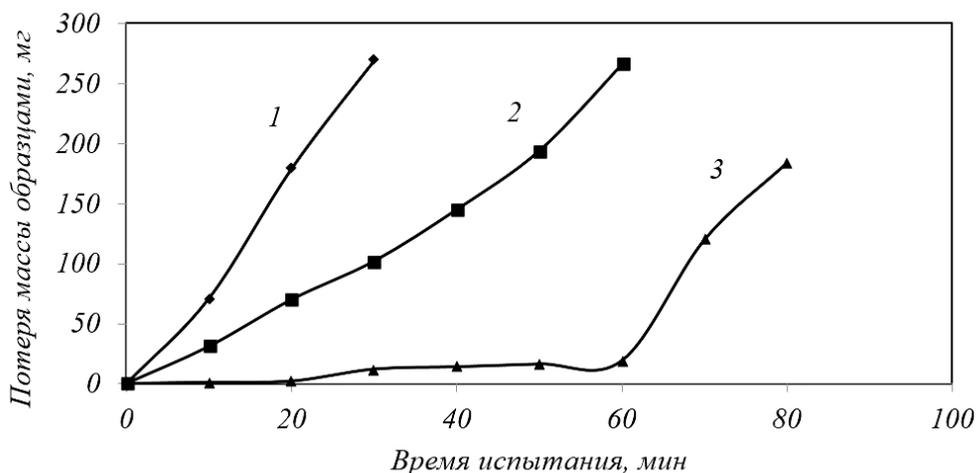


Рис. 7. Зависимость потери массы от времени при испытании на износ образцов из стали марки 5ХНМ в отожженном состоянии (1), после термической обработки (2) и ХТО (3)  
 Fig. 7. Dependence of mass loss on time during wear testing of 5KHNM steel samples in the annealed state (1), after heat treatment (2) and CTO (3)

пройденным контртелом, наименьшую износостойкость имеет образец в отожженном состоянии. Динамика потери массы образца после термической обработки неизменна в процессе всего испытания (в среднем  $0,035 \pm 0,1$  г за 10 мин). Наименьшую потерю массы при износе продемонстрировали образцы после ХТО. После термической обработки и ХТО сопротивление износу возросло в 2,6 и 22,4 раза после 30 мин испытания по сравнению с образцом без обработки в отожженном состоянии.

### Выводы

Результаты проведенного исследования показали высокие возможности покрытия стали марки 5ХНМ, полученного при химико-термической обработке в виде боромеднения, которое проводили в смеси  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}$  и  $\text{NaF}$  при температуре  $950^\circ\text{C}$  с выдержкой в течении 4 ч.

В результате диффузионного боромеднения на поверхности стали были получены покрытия толщиной 90 – 120 мкм с наибольшей микротвердостью (1850 HV) на поверхности.

Процесс износа обработанной поверхности стали сопровождается обильным отделением мелких частиц металла и диффузионного слоя. Эти частицы, имея высокую микротвердость, попадают в зону контакта тел и приводят к интенсификации износа.

Установлено, что износостойкость образцов из стали марки 5ХНМ после ХТО примерно в 22 раза выше, чем у образцов в исходном состоянии. Образцы, прошедшие термическую обработку в виде закалки и старения показали повышение износостойкости лишь в 2,6 раза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжкин А.А., Зотов В.В., Глоба Д.П., Висторопская Ф.А. Трибохимический аспект влияния износостойких покрытий на износ при резании. *Вестник ДГТУ*. 2010;10(6):844–857.
2. Bulloch J.H., Henderson J.L. Some considerations of wear and hardfacing materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1991;46:251–267.
3. Коротков В.А., Ананьев С.П., Злоказов М.В. Износостойкость сталей с плазменной закалкой и карбонитрацией. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ. 2014:104.
4. Ahn D.-G. Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013;14:1271–1283.
5. Галынская Н.А., Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Бабуль Т., Обухович З. Исследование износостойкости боридных покрытий, полученных из композиционных порошковых сред. *Наука и техника*. 2012;1:10–16.
6. Емельянова Т.В., Грызунов В.И., Приймак Е.Ю., Фирсова Н.В. Упрочнение поверхностных слоев штамповых сталей борированием. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2017;13(1):40–44.
7. Трахтенберг Б.Ф. *Стойкость штампов и пути ее повышения*. Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство. 1964:280.
8. Сорокин В.Г. *Стали и сплавы. Марочник*. Москва: Интермет Инжиниринг. 2001:608.
9. Salyi Z., Kaptay G., Koncz-Horvath D., Somlyai-Sipos L., Zoltan Kovacs P., Lukacs A., Benke M. Boride Coatings on Steel Protecting

it Against Corrosion by a Liquid Lead-Free Solder Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022;53:730–743.

10. Anthymidis K.G., Trakali A., Tsipas D.N. Production and Characterization of Boride Coatings on Steels. *Key Engineering Materials*. 2019;827:61–66.
11. Xu R., Zhang J., Li Z., Zhang S., Zhang Y. Research Status of Metal Boride Hard Coatings. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2020;9(12):223–226.
12. Malinochka Ya.N., Koval'chuk G.Z., Yarmosh V.N. Structure and properties of low-carbon steel alloyed with boron and copper. *Structural Steels*. 1982;24:760–765.
13. Полюшкин Н.Г. *Основы теории трения, износа и смазки*. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т., 2013:192.
14. Ivanov A.S., Karmanov D.V., Vdovina O.N. Surface saturation of low-carbon martensite steels with boron and copper. *Chemicothermal Treatment Published*. 1999;41:246–249.
15. Pashechko M., Dziedzic K., Jozwik J. Analysis of Wear Resistance of Borided Steel C45. *Materials*. 2020;13(23):5529.
16. Тавтилов И.Ш. *Практикум по основам теории трения, изнашивания и триботехническим испытаниям*. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т., 2017:231.
1. Ryzhkin A.A., Zotov V.V., Globa D.P., Vistoropskaya F.A. Tribochemical aspect of the influence of wear-resistant coatings on wear during cutting. *Vestnik DGTU*. 2010;10(6):844–857. (In Russ.).
2. Bulloch J.H., Henderson J.L. Some considerations of wear and hardfacing materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1991;46:251–267.  
Korotkov V.A., Anan'ev S.P., Zlokazov M.V. *Wear resistance of steels with plasma hardening and carbonitration*. Nizhnii Tagil: NTI (branch) UrFU, 2014:104. (In Russ.).
3. Ahn D.-G. Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013;14:1271–1283.
4. Galynskaya N.A., Kukhareva N.G., Petrovich S.N., Babul' T., Obukhovich Z. Study of the wear resistance of boride coatings obtained from composite powder media. *Nauka i tekhnika*. 2012;1:10–16. (In Russ.).
5. Emel'yanova T.V., Gryzunov V.I., Priimak E.Yu., Firsova N.V. Hardening of surface layers of die steels by boriding. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2017;13(1):40–44. (In Russ.).
6. Trakhtenberg B.F. *Durability of dies and ways to improve it*. Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1964:280. (In Russ.).
7. Sorokin V.G. *Steels and alloys. Vintage*. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2001:608. (In Russ.).
8. Salyi Z., Kaptay G., Koncz-Horvath D., Somlyai-Sipos L., Zoltan Kovacs P., Lukacs A., Benke M. Boride Coatings on Steel Protecting it Against Corrosion by a Liquid Lead-Free Solder Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022;53:730–743.
9. Anthymidis K.G., Trakali A., Tsipas D.N. Production and Characterization of Boride Coatings on Steels. *Key Engineering Materials*. 2019;827:61–66.
10. Xu R., Zhang J., Li Z., Zhang S., Zhang Y. Research Status of Metal Boride Hard Coatings. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2020;9(12):223–226.
11. Malinochka Ya.N., Koval'chuk G.Z., Yarmosh V.N. Structure and properties of low-carbon steel alloyed with boron and copper. *Structural Steels*. 1982;24:760–765.
12. Polyushkin N.G. *Fundamentals of the theory of friction, wear and lubrication*. Krasnoyarsk: Krasnoyarskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2013:192. (In Russ.).
13. Ivanov A.S., Karmanov D.V., Vdovina O.N. Surface saturation of low-carbon martensite steels with boron and copper. *Chemicothermal Treatment Published*. 1999;41:246–249.
14. Pashechko M., Dziedzic K., Jozwik J. Analysis of Wear Resistance of Borided Steel C45. *Materials*. 2020; 13(23):5529.
15. Tavtilov I.Sh. *Workshop on the basics of the theory of friction, wear and tribological testing*. Orenburg: Orenburgskii gosudarstvennyi universitet, 2017:231. (In Russ.).

#### REFERENCES

#### Сведения об авторах:

**Степан Алексеевич Лысых**, м.н.с. лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН  
**E-mail:** lysyh.stepa@yandex.ru  
**ORCID:** 0000-0002-1421-5251  
**SPIN-код:** 6995-9590

**Василий Николаевич Корнопольцев**, к.т.н., н.с. лаборатории химии полимеров, Бурятский институт природопользования СО РАН  
**E-mail:** kompro@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0003-1970-2945

**Сергей Васильевич Калашиников**, к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН  
*E-mail*: betch\_kail@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0003-3272-0072  
*SPIN-код*: 3164-6450

**Ундрах Лхагвасуренович Мишигдоржийн**, к.т.н., зав. лабораторией физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН  
*E-mail*: druh@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0002-7863-9045  
*SPIN-код*: 2781-4995

**Information about the authors:**

**Stepan A. Lysykh**, Junior Research Fellow physical materials science laboratories, Institute of Physical Materials Science SO RAN  
*E-mail*: lysyh.stepa@yandex.ru

**Vasilii N. Kornopol'tsev**, Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Laboratory of Polymer Chemistry, Buryat Institute of Nature Management SO RAN  
*E-mail*: kompo@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0003-1970-2945

**Sergei V. Kalashnikov**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science SO RAN  
*E-mail*: betch\_kail@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0003-3272-0072  
*SPIN-код*: 3164-6450

**Undrakh L. Mishigdorzhiiin**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science SO RAN  
*E-mail*: druh@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0002-7863-9045  
*SPIN-код*: 2781-4995

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

Поступила в редакцию 25.11.2024  
После доработки 23.12.2024  
Принята к публикации 25.12.2024

Received 25.11.2024  
Revised 23.12.2024  
Accepted 25.12.2024