



Сравнительная оценка абразивной износостойкости сталей для футеровки рабочих органов выемочно-транспортирующих машин

С.Ю. Кувшинкин ✉, Д.С. Москвина, С.А. Самусевич

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ kuvshinkin_syu@pers.spmi.ru

Резюме: Статья посвящена исследованию абразивной износостойкости сталей и обоснованию выбора материала для изготовления и футеровки рабочих органов выемочно-транспортирующих машин, работающих в условиях преимущественно абразивного воздействия. Актуальность исследования заключается в потребности горнодобывающих и машиностроительных предприятий в научно обоснованных рекомендациях по импортозамещению широко применяющейся в настоящее время шведской износостойкой стали Hardox, а также в отсутствии в открытой литературе достаточных количественных данных, позволяющих обосновать выбор альтернативного материала.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном круге истирания ЛКИ-3 по схеме трения с закрепленным абразивом. Испытывались образцы сталей Hardox, 110Г13Л (Гадфильда), Magstrong, NM и У8. Особое внимание было уделено установлению и анализу зависимости истираемости от времени, а также расчету линейной скорости изнашивания и удельной работы трения.

На основе полученных результатов установлено, что наибольшую износостойкость показала сталь У8, однако её хрупкость исключает применение в деталях, воспринимающих в том числе и ударные нагрузки. В то же время сталь Гадфильда в отсутствие наклепа показала наихудший результат. Стали Hardox, Magstrong и NM продемонстрировали близкие друг к другу результаты, что позволяет рекомендовать российскую сталь Magstrong и китайскую сталь NM как материал для футеровки рабочих органов выемочно-транспортирующих машин, эксплуатируемых преимущественно в условиях абразивного изнашивания.

Ключевые слова: выемочно-транспортирующие машины, рабочие органы, сталь, абразивное изнашивание, износостойкость стали, истираемость стали, скорость истирания

Благодарности: Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием FSRW-2026-0003 «Исследование процессов комплексного освоения недр Земли и глубокой переработки георесурсов».

Для цитирования: Кувшинкин С.Ю., Москвина Д.С., Самусевич С.А. Сравнительная оценка абразивной износостойкости сталей для футеровки рабочих органов выемочно-транспортирующих машин. *Горная промышленность*. 2026;(4S):48–53. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-48-53>

Comparative evaluation of abrasive wear resistance of steels for linings of working attachments of mining and hauling machines

S.Yu. Kuvshinkin ✉, D.S. Moskvina, S.A. Samusevich

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ kuvshinkin_syu@pers.spmi.ru

Abstract: This paper investigates the abrasive wear resistance of various steels and provides a rationale for material selection in fabrication and lining of the working attachments for the mining and hauling machines operating in predominantly abrasive conditions. The relevance of this study lies in a demand from the mining and machine-building companies for evidence-based recommendations on import substitution of Hardox, a widely used Swedish wear-resistant steel, as well as the lack of sufficient quantitative data in the published literature to justify the selection of alternative materials.

Experimental investigations were conducted using the LKI-3 laboratory abrasion tester operating on a fixed-abrasive friction configuration. Specimens of the Hardox, 110G13L (Hadfield), Magstrong, NM, and U8 steels were tested. Particular attention was



paid to establishing and analyzing the time-dependent wear behavior, as well as to calculating the linear wear rate and the specific work of friction.

Based on the obtained results, U8 steel exhibited the highest wear resistance; however, its brittleness makes its use impossible in components subjected to impact stresses. On the other hand, Hadfield steel exhibited the poorest wear resistance in the absence of work hardening. The Hardox, Magstrong, and NM steels demonstrated comparable performance, which supports the recommendation of the Russian Magstrong and Chinese NM steels as lining materials for the working attachments for the mining and hauling machines operating predominantly in abrasive wear conditions.

Keywords: mining and hauling machines, working attachments, steel, abrasive wear, steel wear resistance, steel abrasion resistance, abrasion wear rate

Acknowledgements: This research was executed in compliance with Government Assignment FSRW-2026-0003, “Study of the processes of integrated development of the Earth’s interior and deep processing of geological resources”.

For citation: Kuvshinkin S.Yu., Moskvina D.S., Samusevich S.A. Comparative evaluation of abrasive wear resistance of steels for linings of working attachments of mining and hauling machines. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):48–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-48-53>

Введение

Выемочно-транспортирующие машины (ВТМ) предназначены для выемки породы и ее перемещения к месту разгрузки [1–3]. Эффективность работы ВТМ в значительной степени определяется долговечностью их рабочих органов, которая, в свою очередь, зависит от материала [4–6]. Во время работы на рабочие органы ВТМ одновременно или в различных сочетаниях действуют абразивный износ, вызванный трением о твердые частицы породы, и ударные нагрузки, возникающие при взаимодействии с крупными кусками породы [7–9]. Именно эти процессы – абразивный износ и ударные нагрузки – приводят к изнашиванию рабочих органов, снижению производительности машины и необходимости частой замены деталей [10–12]. Следовательно, выбор материала для изготовления или футеровки этих узлов является ключевой задачей при проектировании и эксплуатации выемочно-транспортирующих машин [13; 14].

До недавнего времени в России для рабочих органов выемочно-транспортирующих машин широко применялась шведская износостойкая сталь Hardox [15; 16]. Этот материал обладает уникальным сочетанием высокой твердости, ударной вязкости и технологичности, что делало его практически безальтернативным выбором для большинства предприятий, занимающихся производством и ремонтом рабочих органов горных машин [17–19]. Однако после введения санкций прямые поставки Hardox в Россию фактически прекратились. Покупка её через параллельный импорт приводит к значительному удорожанию стали и логистическому риску, следовательно, ориентироваться на импортный материал нецелесообразно. В данной ситуации возникает вопрос об импортозамещении.

Сравнительных данных об износостойкости альтернативных материалов в условиях эксплуатации выемочно-транспортирующих машин в открытой литературе недостаточно. Для обоснованной замены импортного материала требуется количественная оценка износостойкости.

Целью данного исследования является обоснование выбора материала для изготовления рабочих органов выемочно-транспортирующих машин в заданных условиях эксплуатации. Задачи исследования: выбор материалов, схожих по химиче-

скому составу и назначению, традиционно применяемых или потенциально пригодных для изготовления рабочих органов выемочно-транспортирующих машин, проведение сравнительных испытаний выбранных материалов на установке ЛКИ-3 с закрепленным абразивом, обработка результатов и разработка рекомендаций по выбору материала для рабочих органов ВТМ в заданных условиях эксплуатации.

Материалы и методы

Для проведения сравнительного анализа были отобраны материалы, которые либо уже широко применяются при изготовлении рабочих органов ВТМ, либо рассматриваются в качестве потенциально применимых [20]. Сталь Hardox выбрана как наиболее распространенная до 2022 г. [21; 22]. Сталь Гадфильда (110Г13Л) – традиционный материал горного машиностроения, хорошо себя зарекомендовавший в условиях ударно-абразивного изнашивания [23]. Сталь Magstrong (Магнитогорский металлургический комбинат) – российский материал, который уже начали внедрять на предприятиях [24; 25]. Китайская износостойкая сталь NM была специально разработана для эксплуатации в абразивных средах. Данный материал активно поставляется на российский рынок и рассматривается как экономически доступная альтернатива Hardox [26–28]. Дополнительно в исследование в качестве базы сравнения включена высокоуглеродистая инструментальная сталь У8 в состоянии наибольшего упрочнения. Механические свойства и химический состав исследуемых марок сталей представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Механические свойства
исследуемых марок сталей

Table 1
Mechanical properties of the
tested steel grades

Марка стали	Твердость	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
У8	425–475 HBW	1250	1250–1400
NM	200 HB (исходная) 600 HB (наклеп)	350 (исходная) 850 (наклеп)	800–900
Hardox	420–470 HBW	1100	1400
Magstrong	420–480 HB	1250	1250
Сталь Гадфильда	58–63 HRC	> 1500	> 2000

Таблица 2
Химический состав исследуемых марок сталей

Марка стали	C (углерод)	Si (кремний)	Mn (марганец)	Ni (никель)	P (фосфор)	S (сера)	Cr (хром)
Hardox 450	0,26	0,7	1,6	1,5	0,025	< 0,01	1,4
Сталь Гадфильда	0,9–1,5	0,3–1,0	11,5–15,0	< 1	< 0,12	< 0,05	< 1
Magsrong 450	0,26	0,8	1,7	1,8	0,015	0,008	1,5
NM 450	0,24	0,7	1,6	< 1	< 0,02	< 0,01	< 1,2
У8	0,8	0,17–0,33	0,17–0,33	< 0,25	< 0,03	< 0,028	< 0,2

Table 2
Chemical composition of the tested steel grades

Испытания проводились по схеме трения скольжения с закреплённым абразивом без ударного нагружения [29–31]. Данная схема моделирует абразивное воздействие горной породы на футеровочные и режущие детали ВТМ в тех случаях, когда ударные нагрузки отсутствуют или пренебрежимо малы (например, при воздействии горной массы на футеровку днища и боковых стенок ковша, транспортировке сыпучих материалов, работе на связных грунтах). Соответственно, полученные результаты характеризуют износостойкость материалов исключительно в условиях чистого абразивного воздействия [32–34]. Исследование истираемости образцов материалов проводилось на лабораторном круге истирания ЛКИ-3. Данная установка представляет собой вращающийся в горизонтальной плоскости чугунный диск, оснащенный приспособлениями для свободной (в вертикальной плоскости) установки образцов и их загрузки вертикальной нагрузкой, а также счетчиком оборотов [35].

Круг истирания (рис. 1) состоит из корпуса 1, на передней части которого расположен пульт управления 2, служащий для запуска и остановки вращения. На выходном валу мотор-редуктора закреплен чугунный диск 3, на который устанавливается сменный стальной диск с закреплённым на нем абразивным материалом 5. В качестве абразива используется наждачная бумага П214А50-НМ ГОСТ 6456-82 зернистостью Р50. К корпусу жестко крепятся кронштейн 6, к которому, в свою очередь, шарнирно крепится штанга 7 с установленным на ней грузом 8, и оправка 9,

в которую устанавливается каретка 10 с испытываемым образцом.

Взвешенный и измеренный образец помещается в каретку и прижимается сверху штангой с грузом к шлифовальному диску с усилием 94 Н. Установка включается на 30–60 с, после чего выключается, образец извлекается, тщательно очищается и взвешивается. Затем испытываемый образец снова закрепляется в каретке. Цикл испытания повторяется пять раз для каждого образца.

На основе экспериментальных данных строится график зависимости истираемости $R_{ист}$, кг/м², от продолжительности истирания t , с. Отношение тангенса угла наклона аппроксимирующей прямой к плотности материала образца принимается равным линейной скорости истирания v_h , м/с, а величина, ей обратная, является износостойкостью материала U_h , с/м. Далее рассчитывается удельная работа силы трения W_m , МДж/м.

Истираемость:

$$R_{ист} = \frac{m_1 - m_2}{A} = \frac{\Delta m}{A},$$

где m_1 – масса образца до истирания, кг; m_2 – масса образца после истирания, кг; A – площадь истирания, м².

Линейная скорость истирания:

$$v_h = \frac{R_{ист}}{t \cdot \rho},$$

где t – продолжительность истирания, с; ρ – плотность материала, кг/м³.

Износостойкость:

$$U_h = \frac{1}{v_h}.$$

Удельная работа силы трения:

$$W_m = P \frac{\rho \cdot t}{R_{ист}} = \frac{\pi n}{30} \cdot \mu \cdot N \cdot R \cdot \frac{\rho \cdot t}{R_{ист}},$$

где P – мощность силы трения, кВт; n – частота вращения диска с абразивом, об/мин; μ – коэффициент трения между материалами образца и абразива; N – сила нормального давления, кН; R – радиус трения, м.

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных в результате экспериментальных испытаний графиков зависимости истираемости разных марок стали от времени истирания (рис. 2) подтверждает линейный характер связи истираемости и продолжительности истирания. Уравнение регрессии имеет вид:

$$R_{ист} = a + bt,$$

где a – свободный член (так как все прямые пересекают ось U в начале координат, то $a = 0$); b – коэффициент накло-



Рис. 1
Установка ЛКИ-3:
1 – пульт управления;
2 – кнопка запуска и остановки вращения; 3 – выходной вал мотор-редуктора; 4 – чугунный диск; 5 – сменный стальной диск с закреплённым на нем абразивным материалом; 6 – кронштейн; 7 – штанга; 8 – груз; 9 – оправка; 10 – каретка с испытываемым образцом
(фото авторов)

Fig. 1
The LKI-3 laboratory unit:
1 – control panel; 2 – rotation start and stop button;
3 – output shaft of the gear motor; 4 – cast iron disc;
5 – replaceable steel disc with abrasive material fixed to it;
6 – bracket; 7 – rod;
8 – weight; 9 – mandrel;
10 – bracket with the test specimen (photo by the authors)

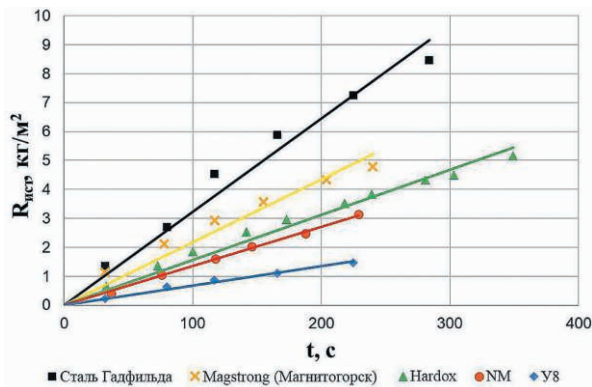


Рис. 2
Графики зависимости
истираемости от времени
исследуемых образцов марок
стали

Fig. 2
Graphs showing the
dependence of the wear rate
on time for the tested steel
grades

Таблица 3
Коэффициенты уравнения
регрессии исследуемых марок
стали

Марка стали	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
У8	0	0,0322	0,9923
NM	0	0,0217	0,989
Hardox	0	0,0156	0,9957
Magstrong	0	0,0135	0,9991
Сталь Гадфильда	0	0,0068	0,9965

Table 3
Coefficients of the regression
equation for the tested steel
grades

на, большее значение которого характеризует большую истираемость. Полученные значения коэффициентов, а также величины достоверности аппроксимации для исследуемых сталей представлены в табл. 3.

В табл. 4 представлены расчетные значения удельной работы трения W_m , линейной скорости истирания v_h , износостойкости U_h исследуемых образцов сталей в порядке убывания износостойкости материала.

Полученные результаты исследования выявили различия износостойкости сталей при одинаковых условиях абразивного воздействия, что полностью согласуется с фундаментальными свойствами исследованных сталей.

Вклад авторов

С.Ю. Кувшинкин – постановка задачи, общее методическое руководство, наладка экспериментального стенда.

Д.С. Москвина – анализ первичной информации, проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных.

С.А. Самусевич – анализ первичной информации, проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных.

Author's Contribution

Sergey Yu. Kuvshinkin – formulation of the problem, general methodological guidance, set-up of the experimental test bench

Dayana S. Moskvina – analysis of the initial data, execution of the tests, processing experimental data

Sofia A. Samusevich – analysis of the initial data, execution of the tests, processing experimental data

Список литературы / References

1. Fernández J.E., Vijande R., Tucho R., Rodríguez J., Martín A. Materials selection to excavator teeth in mining industry. *Wear*. 2001;250(1-12):11–18. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00624-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00624-X)
2. Набиев Э.С., Каххаров С.К. Однослойная наплавка зубьев ковшей экскаватора. *Черные металлы*. 2023;(4):34–38. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.04.06>
Nabiev E.S., Kakhkharov S.K. Single-layer hardfacing of excavator bucket teeth. *Chernye Metally*. 2023;(4):34–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2023.04.06>

Таблица 4
Расчетные параметры
процесса изнашивания
исследуемых образцов марок
стали

Материал	<i>W</i> , МДж/м	<i>h</i> , мм/мин	<i>U_h</i> , мин/мм
У8	44,3	0,0544	18,37
NM	20,1	0,1	10
Hardox	16,7	0,129	7,75
Magstrong	13,2	0,179	5,59
Сталь Гадфильда	7,9	0,272	3,68

Table 4
Calculated parameters of the
wear process for the tested
steel grade specimens

Наименьшую сопротивляемость к абразивному износу ожидаемо показала сталь 110Г13Л (Гадфильда), исходная низкая твердость которой в отсутствие интенсивного ударного воздействия не позволяет сопротивляться внедрению зерен абразива. В свою очередь, высокоуглеродистая инструментальная сталь У8 демонстрирует высокую стойкость к абразивному износу. Однако из-за высокой хрупкости и непригодности к сварке мартенситной структуры данной стали ее применение в контексте производства горных машин строго ограничено. Стали Hardox, Magstrong и NM представляют собой компромисс между высокой твердостью для сопротивления абразивному износу и значительной ударной вязкостью, что позволяет рекомендовать российскую Magstrong и китайскую NM как экономически эффективную замену шведской Hardox и использовать их в производстве рабочего оборудования выемочно-транспортных машин. Окончательный выбор материала следует основывать на технико-экономическом анализе для конкретного производства.

Заключение

В результате проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных выявлено, что абразивная износостойкость сталей Magstrong (Россия) и NM (Китай) не уступает стали Hardox (Швеция). Следовательно, данные стали можно рекомендовать в качестве альтернативы стали Hardox для изготовления и футеровки рабочих органов выемочно-транспортных машин, работающих в условиях безударного абразивного воздействия при разрабатке вязных и сыпучих горных пород.



3. Ермаков Б.С., Вологжанина С.А., Ермаков С.Б., Швецов О.В. Причины ускоренного выхода из строя коронок ковшей экскаваторов при эксплуатации в условиях Арктических регионов. *Черные металлы*. 2024;(9):37–43. <https://doi.org/10.17580/chm.2024.09.06>
Ermakov B.S., Vologzhanina S.A., Ermakov S.B., Shvetsov O.V. Causes of accelerated failure of excavator bucket teeth crowns when operating in Arctic regions. *Chernye Metally*. 2024;(9):37–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2024.09.06>
4. Шешукова Е.И., Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Салимов А.Э. Оценка нагрузок приводов рабочего оборудования карьерного экскаватора (часть 3). *Горная промышленность*. 2025;(2):132–138. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-132-138>
Sheshukova E.I., Shibyanov D.A., Ivanov S.L., Salimov A.E. Assessment of loads at the working attachment of a mine shovel (part 3). *Russian Mining Industry*. 2025;(2):132–138. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-132-138>
5. Казаков Ю.А., Козачков Г.С. Технологические требования к процессу измельчения экскавированного органогенного сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):85–99. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_85
Kazakov Yu.A., Kozachkov G.S. Technological requirements for the processing of excavated organic raw material. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):85–99. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_85
6. Chen X., Zhang L., Li W., Wang Z., Zhang Z., Gao T., Liu W. Analysis of dynamic wear characteristics of joint contact friction pair of excavators working device. *Lubricants*. 2024;12(4):113. <https://doi.org/10.3390/lubricants12040113>
7. Bolobov V.I., Chupin S.A., Le-Thanh B. Influence of pick blunting on hydraulic breaker capacity in fracture of granite blocks. *Eurasian Mining*. 2023;(2):100–103. <https://doi.org/10.17580/em.2023.02.22>
8. Kuvshinkin S., Ivanova P. Impact analysis of bucket capacity and boom length of mining excavators on hoisting mechanism life. *E3S Web of Conferences*. 2021;326:00032. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132600032>
9. Wang Z., Sun L., Wang D., Song B., Liu C., Su Z. et al. Abrasive wear properties of wear-resistant coating on bucket teeth assessed using a dry sand rubber wheel tester. *Materials*. 2024;17(7):1495. <https://doi.org/10.3390/ma17071495>
10. Атрощенко В.А., Авксентьев С.Ю., Махараткин П.Н., Труфанова И.С. Экспериментальная гидротранспортная установка для определения стойкости материалов трубопроводов и деталей грунтовых насосов к гидроабразивному износу. *Обогащение руд*. 2021;(3):39–45. <https://doi.org/10.17580/or.2021.03.07>
Atroshchenko V.A., Avksentiey S.Yu., Makharatkin P.N., Trufanova I.S. Experimental hydrotransportation unit for testing material resistance of pipelines and parts of dredging pumps to hydroabrasive wear. *Obogashchenie Rud*. 2021;(3):39–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2021.03.07>
11. Klevtsov V.A., Timofeev D.Yu., Khalimonenko A.D. Improved design of manufacturing processes for mining machines: basing concepts. *Russian Engineering Research*. 2023;43(11):1367–1375. <https://doi.org/10.3103/S1068798X23110151>
12. Казанин О.И., Ильинец А.А. Обеспечение устойчивости выемочных выработок при подготовке выемочных участков пологих угольных пластов тремя выработками. *Записки Горного института*. 2022;253:41–48. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.1>
Kazanin O.I., Ilinets A.A. Ensuring the excavation workings stability when developing excavation sites of flat-lying coal seams by three workings. *Journal of Mining Institute*. 2022;253:41–48. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.1>
13. Koptev V.Yu., Kopteva A.V., Ivanova T.S. Directions for the development of transport machines for open-pit mining. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021;19(1):137–141. <https://doi.org/10.5937/jaes0-28708>
14. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Qin R.S., Peregudov O.A., Aksenova K.V., Semina O.A. Degradation of structure and properties of rail surface layer at long-term operation. *Materials Science and Technology*. 2017;33(12):1473–1478. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1287983>
15. Reshetnyak S.N., Zotov V.V., Kuziev D.A., Kozlova O.Yu. Enhancing performance efficiency of electric consumers within surface infrastructure of coal mines. *Eurasian Mining*. 2025;(1):100–104. <https://doi.org/10.17580/em.2025.01.20>
16. Voronov Yu., Voronov A. Functional quality criterion of rock handling mechanization at open-pit mines. *E3S Web of Conferences*. 2017;21:03003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172103003>
17. Ivanov Y., Gromov V., Konovalov S., Kormyshev V., Aksenova K., Teresov A. Structure and properties of strengthening layer on Hardox 450 steel. *Materials Science and Technology*. 2017;33(17):2040–2045. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1343231>
18. Singla S., Kang A.S., Grewal J.S., Cheema G.S. Wear behavior of weld overlays on excavator bucket teeth. *Procedia Materials Science*. 2014;5:256–266. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.265>
19. Воронов А.Ю., Хорешок А.А., Воронов Ю.Е., Дубинкин Д.М., Воронов А.Ю. Оптимизация параметров экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов. *Горная промышленность*. 2022;(5):92–98. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-92-98>
Voronov A.Y., Khoreshok A.A., Voronov Y.Y., Dubinkin D.M., Voronov A.Y. Optimization of parameters of shovel-truck systems at open-pit coal mines. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):92–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-92-98>
20. Pei Y.C., Xia D.X., Cong L., Wang X.L., Wang S.R., Wang D.Y. Comparison of sliding wear properties of 400 grade low alloy wear-resistant steels with different microstructure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;727:012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/727/1/012002>
21. Zemlik M., Konat Ł., Leśny K., Jamroziak K. Comparison of Abrasive wear resistance of Hardox steel and Hadfield cast steel. *Applied Sciences*. 2024;14(23):11141. <https://doi.org/10.3390/app142311141>
22. Babyr N.V., Kuziev D.A., Sazankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 17.04.2026).



23. Болобов В.И., Бочков В.С., Ахмеров Э.В., Плащинский В.А., Кривокрисенко Е.А. О влиянии поверхностного упрочнения на ударно-абразивную износостойкость стали Гадфильда. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2020;16(6):252–255.
Bolobov V.I., Bochkov V.S., Akhmerov E.V., Plashchinsky V.A., Krivokrisenko E.A. On effect of surface hardening on impact and abrasive wear resistance of Hadfield steel. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2020;(6):252–255. (In Russ.)
24. Мотовилина Г.Д., Садкин К.Е., Хлусова Е.И., Исследование износостойкости листового проката из стали Magstrong H500 и материала наплавки на детали из низкоуглеродистой стали, предназначенные для рыбопромыслового флота. В кн.: *Скотникова М.А., Попович А.А. (ред.) Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2025: сб. ст. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, г. Санкт-Петербург, 19–20 июня 2025 г.* СПб.: Политех-Пресс; 2025. С. 97–105. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id25-52>
25. Shilyaev P.V., Bogach D.I., Krasnov M.L., Kornilov V.L., Stekanov P.A., Schastlivtsev V.M. et al. Mechanical properties and structural state of rolled sheets from high-strength wear-resistant weldable steel H500 Magstrong. *Metal Science and Heat Treatment*. 2021;62(11-12):664–668. <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00620-w>
26. Liu J., Liu D., Zuo X., Liu L., Yan Q. Influence of TiN inclusions and segregation on the delayed cracking in NM450 wear-resistant steel. *Metals*. 2022;12(1):21. <https://doi.org/10.3390/met12010021>
27. Li G., Lu S., Ren J., Zhou Z. Through-thickness inhomogeneity of microstructures and mechanical properties in an as-quenched thin specification high strength NM450TP steel plate. *Applied Sciences*. 2023;13(12):7017. <https://doi.org/10.3390/app13127017>
28. Huang X.-X., Shen Y.-H., Jin S.-Y., Shi B.-Q. High-temperature wear performance and mechanism of NM400/NM500 mining machinery steels. *Gongcheng Kexue Xuebao / Chinese Journal of Engineering*. 2019;41(6):797–808. (In Chinese). <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.06.012>
29. Rajput A.S., Das S. A machine learning approach to predict the wear behaviour of steels. *Tribology International*. 2023;185:108500. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108500>
30. Kuskildin R.B., Vatlina A.M. Method of accelerated industrial testing of hydroabrasive wear of polymer coatings of steel pipes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1728:012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1728/1/012029>
31. Machado P.C., Pereira J.I., Sinatora A. Subsurface microstructural dynamic recrystallization in multiscale abrasive wear. *Wear*. 2021;486-487:204111. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204111>
32. Chintia A.R. Metallurgical aspects of steels designed to resist abrasion, and impact-abrasion wear. *Materials Science and Technology*. 2019;35(10):1133–1148. <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1615669>
33. Lukšić H., Rodinger T., Rede V., Švagelj Z., Čorić D. Comparative analysis of microstructure and properties of wear-resistant structural steels. *Materials*. 2025;18(17):4002. <https://doi.org/10.3390/ma18174002>
34. Tressia G., Penagos J.J., Sinatora A. Effect of abrasive particle size on slurry abrasion resistance of austenitic and martensitic steels. *Wear*. 2017;(376-377):63–69. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.073>
35. Киянец А.В. Исследование истираемости сталефибробетона. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2018;(4):53–57. <https://doi.org/10.14529/build180408>
Kiyanev A.V. Researching abrasion of steel fiber concrete. *Bulletin of South Ural State University. Series Construction and Architecture*. 2018;(4):53–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/build180408>

Информация об авторах

Кувшинкин Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-2037-5753>; e-mail: kuvshinkin_sy@pers.spmi.ru
Москвина Даяна Сергеевна – студент группы ИТО-22, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Самусевич Софья Алексеевна – студент группы ИТО-22, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Information about the authors

Sergey Yu. Kuvshinkin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-2037-5753>; e-mail: kuvshinkin_sy@pers.spmi.ru
Dayana S. Moskvina – Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.
Sofia A. Samusevich – Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.06.2026
Поступила после рецензирования: 29.07.2026
Принята к публикации: 10.08.2026

Article info

Received: 05.06.2026
Revised: 29.07.2026
Accepted: 10.08.2026