



Оригинальная статья

Проблема абразивного износа деталей бульдозеров в Арктике и методы ее решения

Н. И. Голиков^{✉1}, С. В. Семенов¹, Г. Н. Слепцов¹, Ю. Н. Сараев¹,
Р. П. Тихонов¹, С. В. Кузнецов²

¹Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²АО «Алмазы Анабара», г. Якутск, Российская Федерация

✉n.i.golikov@mail.ru

Аннотация

Горнодобывающая техника, эксплуатируемая в Арктике и на Крайнем Севере, функционирует в экстремальных условиях: под знакопеременными и ударными нагрузками, при сильной вибрации и резких температурных перепадах. Все это приводит к увеличению потока отказов узлов и деталей машин и потере того полезного эффекта, который должна обеспечить высокопроизводительная техника с большой единичной мощностью. Статья посвящена исследованию проблем ускоренного износа деталей карьерных бульдозеров при эксплуатации в экстремальных условиях Арктики, в частности, на примере предприятия АО «Алмазы Анабара», а также поиску рациональных путей ее решения. Установлено, что наиболее изнашиваемыми элементами бульдозера являются коронки и стойки рыхлителей, а также детали гусеничного движителя. Проведены комплексные лабораторные и натурные испытания образцов коронок от различных производителей (Италия, Китай, Австралия, Россия). Исследованы их механические свойства: твердость, ударная вязкость, прочность, относительное удлинение и химический состав. Выявлена прямая корреляция между твердостью материала и его износостойкостью. Наилучшие результаты показали кованые коронки с высокими значениями твердости, а также ударной вязкости при низких температурах. Предложены практические решения для снижения износа, включая разработку технических требований к материалам коронок для арктических условий и внедрение технологии сварки стойки рыхлителя для восстановления ее целостности. Реализация этих мер позволила предприятию АО «Алмазы Анабара» значительно сократить годовое потребление коронок и повысить эффективность работ. Кроме того, для восстановления изношенных деталей гусеничного движителя и пальцев узлов сопряжения предлагается применение перспективной технологии импульсно-дуговой наплавки.

Ключевые слова: износ, коронка рыхлителя, натурные испытания, механические свойства, импульсно-дуговая наплавка

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта госзадания № FWRS-2024-0034 «Развитие научных основ повышения надежности и хладостойкости технических систем ответственного назначения, работающих в экстремальных условиях эксплуатации на основе комплексных исследований, модифицированных литых высокопрочных сплавов, сварочных материалов нового поколения, перспективных сварочно-наплавочных технологий и ударно-механической обработки».

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность руководству и инженерно-техническому персоналу АО «Алмазы Анабара» в предоставлении материалов для проведения исследований. Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Голиков Н.И., Семенов С.В., Слепцов Г.Н., Сараев Ю.Н., Тихонов Р.П., Кузнецов С.В. Проблема абразивного износа деталей бульдозеров в Арктике и методы ее решения. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(1):176–186. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-176-186> EDN: ZJRQGC

Abrasive wear of bulldozer components in the Arctic: problems and solutions

Nikolay I. Golikov^{✉,1}, Sergey V. Semenov¹, Gavriil N. Sleptsov¹, Yuri N. Saraev¹,
Ruslan P. Tichonov¹, Sergey V. Kuznetsov²

¹*Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation*

²*JSC “Almazy Anabara”, Yakutsk, Russian Federation*

✉*n.i.golikov@mail.ru*

Abstract

Mining equipment operated in the Arctic and the Far North functions under extreme conditions, including alternating and shock loads, severe vibration, and sharp temperature fluctuations. These factors lead to an increased failure rate of machine components and diminish the useful effect that high-performance, high-capacity machinery is intended to provide. This article focuses on the problems of accelerated wear of quarry bulldozer parts operating in the extreme conditions of the Arctic, using JSC Almazy Anabara as a case study, and seeks to identify rational solutions.

It was established that the most wear-prone elements of the bulldozer are the ripper tips and shanks, as well as the undercarriage track components. Comprehensive laboratory and field tests were conducted on ripper tip samples from various manufacturers (Italy, China, Australia, and Russia). Their mechanical properties—hardness, impact toughness, strength, relative elongation, and chemical composition—were studied. A direct correlation was found between the material’s hardness and its wear resistance. Forged tips with high hardness values and high impact toughness at low temperatures demonstrated the best performance. Practical solutions to reduce wear are proposed, including the development of technical requirements for ripper tip materials intended for Arctic conditions and the implementation of a ripper shank welding technology to restore its integrity. The implementation of these measures allowed JSC Almazy Anabara to significantly reduce the annual consumption of ripper tips and increase operational efficiency. Additionally, a promising pulsed-arc surfacing technology is proposed for restoring worn undercarriage track components and articulation joint pins.

Keywords: wear, ripper crown, full-scale tests, mechanical properties, pulsed arc surfacing

Funding. This work was conducted within the framework of the state assignment under project “Development of scientific foundations for increasing the reliability and cold resistance of critical technical systems operating in extreme operating conditions based on comprehensive studies, modified cast high-strength alloys, new-generation welding materials, advanced welding and surfacing technologies and impact-mechanical processing” (No. FWRS-2024-0034).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the management and engineering staff of JSC “Almazy Anabara” for providing materials for the research. The work was carried out using the scientific equipment of the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”.

For citation: Golikov N.I., Semenov S.V., Sleptsov G.N., Saraev Y.N., Tichonov R.P., Kuznetsov S.V. Abrasive wear of bulldozer components in the Arctic: problems and solutions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(1):176–186. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-176-186> EDN: ZJRQGC

Введение

Проблема использования техники и конструкций, работающих в условиях низких температур окружающей среды, привлекает все большее внимание в связи с интенсивным освоением природных ресурсов Арктики и Северо-Востока страны. Как показала практика, истощение работоспособности машин и механизмов на Севере имеет ускоренный характер. Экстремальные природно-климатические условия значительно влияют на эксплуатацию техники и конструкций [1, 2]. В работе [3] отмечено, что при

эксплуатации в зимний период производительность труда снижается в 1,5–2 раза, наработка на отказ уменьшается в 2–3 раза, затраты на ремонтно-восстановительные работы повышаются в 5–8 раз, а фактический ресурс сокращается в 2–3 раза. При объемах разработки и транспортировки мерзлых грунтов в районах Сибири и Севера до 1 млрд м³ в год имеет место резкое возрастание коэффициентов отказа машин и оборудования: автомобилей – до 0,5, тракторов и бульдозеров – до 0,55–0,6, экскаваторов – до 0,8, кранов – до 0,45.

Добыча полезных ископаемых повсеместно сопряжена с использованием разнообразных горных машин для выемки, погрузки и транспортирования породы. Более 30 % россыпных месторождений Якутии разрабатываются с применением бульдозерной техники и экскаваторно-автомобильных комплексов. Вскрытие залежей и разработка песков производится по схеме бульдозер–экскаватор (погрузчик) –автосамосвал [4, 5]. Интенсивная эксплуатация карьерных машин при разработке месторождений в условиях многолетней мерзлоты и низких климатических температур часто приводит к преждевременному износу и разрушению деталей в огромных масштабах [1, 3, 6]. Вследствие изнашивания режущих деталей горной техники возрастают нагрузки почти в 2 раза на отдельные детали и машину в целом, снижается производительность труда, увеличиваются количество простоев и объем затрат на ремонт изношенных деталей [6, 7]. Потери металла из-за износа рабочих деталей горнодобывающей техники составляют несколько тысяч тонн в год [8].

Абразивный износ является наиболее распространенным типом износа, который встречается в горнодобывающей промышленности [9, 10]. К примеру, абразивное изнашивание является основным видом механического износа деталей карьерных экскаваторов, при этом разрушающими телами являются высокотвердые частицы [11]. В основном абразивное изнашивание поверхности материала твердыми частицами приводит к снижению сроков службы различных деталей (зубья экскаваторов, ножи бульдозеров, коронки рыхлителей и т. д.), контактирующих с грунтом, особенно мерзлым.

Исследование сложных аспектов износа сталей при контакте с мерзлыми грунтами представлено в монографии [12], подготовленной по результатам работ Красноярского отраслевого института «Промстрой-НИИпроект». Метод исследования и полученные результаты положили начало изучению сложных вопросов абразивного износа при низких температурах. В работе отмечено, что модели изнашивания материалов, справедливые при положительных температурах, не могут быть экстраполированы на область отрицательных температур. Выявлено ухудшение износостойкости углеродистых сталей при низких температурах, широко используемых при изготовлении деталей, контактирующих с абразивом. Но в статье [13] показано, что в интервале

температур от 293 до 240 К абразивная износостойкость углеродистых сталей возрастает, а ниже 240 К снижается. Таким образом, имеются противоречивые мнения по влиянию температуры на износостойкость сталей. Этот факт авторы [13] объясняют тем, что на закономерности абразивного низкотемпературного изнашивания углеродистых сталей помимо температуры оказывает влияние схема абразивного воздействия, а также ряд других факторов, например, скорость и характер приложения нагрузки. В целом условия, при которых в реальных случаях происходит абразивное низкотемпературное изнашивание, разнообразны. В связи с этим степень износа деталей техники существенно различается в зависимости от условий его эксплуатации. В то же время актуальной задачей является поиск наиболее рациональных путей решения проблем с износом.

В связи с вышесказанным цель данной работы состоит в выявлении основных деталей карьерных бульдозеров, подверженных абразивному изнашиванию при эксплуатации в условиях Арктики, на примере АО «Алмазы Анабара» и поиске наиболее рациональных путей решения проблем с износом.

Материалы и методы

В настоящее время в России около 70 % общего парка горнодобывающей и транспортной техники поставлены зарубежными производителями. Причем если говорить о высокопроизводительных бульдозерах, то на Komatsu приходится свыше 65 %, на Caterpillar – 18 и Liebherr – 12 %. Но в связи с мерами, направленными на поддержку отечественных производителей и ограничение закупок импортных товаров, ожидается увеличение доли отечественных бульдозеров. Отечественное производство бульдозеров представлено такими предприятиями, как «ЧЕТРА», «ДСТ-Урал», ЧТЗ «Уралтрак» [14].

В работе исследованы детали карьерных бульдозеров Komatsu и ЧЕТРА, в наибольшей степени подвергаемые изнашиванию в ходе эксплуатации. Данная техника используется при добыче россыпных алмазов открытым способом при выполнении тяжелых землеройных работ с разработкой мерзлых и скальных грунтов в условиях Арктики.

Одной из важнейших характеристик при изучении износа деталей является твердость: чем выше ее значение, тем выше износостойкость

материала [15]. Определение твердости проведено с помощью твердомеров AFFRI 206RTD, при нагрузке 150 кгс, а в полевых условиях для оперативного определения – динамического твердомера ТЭМП 2. Перед измерениями твердомеры были калиброваны на эталонах твердости по Виккерсу и Роквеллу. Химический состав легирующих элементов металлов получен по результатам трех измерений каждого исследуемого образца на оптико-эмиссионном спектрометре Foundry-master UVR в соответствии с ГОСТ 18895-97. Определение численных параметров химического состава произведено путем сравнения с поверенными эталонами. Испытания на статическое растяжение образцов для определения предела текучести, предела прочности, относительного удлинения материала коронок проводили на универсальной электромеханической испытательной машине Zwick Roell Z600 с экстензометром BTC-EXMA CRO.002 по ГОСТ 1497-84. Среднее значение характеристик определено усреднением по трем образцам. Испытания на ударный изгиб образцов с U-образным надрезом при температуре -50°C выполняли на инструментированном маятниковом копре Amsler RKP 450 в соответствии с ГОСТ 9454-78. Энергия удара маятника – 300 Дж. Надрез на образцах нанесен моторизованным станком Black Charpy. Температуру испытания задавали охлаждением образцов в климатической камере Lauda RP 890. Среднее значение ударной вязкости определено усреднением данных, полученных для трех образцов.

Для оценки износостойкости материалов определен массовый износ образцов на опытной установке, разработанной в ИФТПС СО РАН, имитирующей ударно-абразивный износ коронок зубьев ковшей экскаваторов и рыхлителей бульдозеров. Принцип действия установки заключается в многократных последовательных ударах образцов и последующем их скольжении по неподвижному монолитному абразиву (абразивному бруску). Образцы имеют квадратное сечение 5×5 мм и длину 70 мм. Относительную износостойкость материала оценивали путем сравнения массового износа испытуемых образцов, испытанных в идентичных условиях. Величину износа определяли по потере массы образца за цикл испытаний взвешиванием на аналитических весах с точностью до 0,0002 г. Длительность цикла – 30 мин.



Рис. 1. Новая и изношенная коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A

Fig. 1. New and worn ripper crowns of the Komatsu D375A bulldozer

Результаты и обсуждение

Установлено, что наиболее изнашиваемой деталью гусеничного бульдозера является коронка рыхлителя (рис. 1). В основном коронки изготавливаются методами литья иковки и предназначены для резания скальных и абразивных грунтов. При эксплуатации в условиях отрицательных температур (до -60°C) случаются и хрупкие разрушения рабочей части коронок. Обычно коронки изнашиваются достаточно сильно, до потери рабочей грани, т. е. практически теряют до 1/3 исходной массы. Начальный вес коронок рыхлителя составляет примерно 16...18 кг. Перемещение режущей кромки коронок рыхлителя в результате изнашивания достигает свыше 100 мм. Таким образом, восстановление изношенных коронок рыхлителя до первоначальных размеров ввиду большого износа требует больших затрат, сопряжено с технологическими трудностями и является экономически не целесообразным.

Значительные затраты на приобретение коронок на стойку рыхлителя бульдозера, а также существенное различие по их износостойкости в зависимости от изготовителя подвинули горнодобывающее предприятие АО «Алмазы Анабара» установить наиболее оптимальные коронки по стоимости и производительности. В связи с этим в течение ряда лет нами проводилась серия испытаний механических свойств и износостойкости материалов коронок на стойку бульдозера Komatsu D375 разных мировых производителей – Италии, КНР, Австралии, России и др. По результатам спектрального анализа установлено, что для изготовления коронок на стойку бульдозера производители применяют среднелегированные высокоуглеродистые стали, близкие по составу к отечественным маркам сталей типа 35ХГСА, 30ХГСА и 30ХГТ (ГОСТ 4543-71) [6, 16]. Содержание основных химических элементов указано в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав испытанных коронок

Table

Chemical composition of the tested crowns

Номер коронки	Производитель	Содержание химических элементов, %								
		C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Mo	Fe
1	ITALRICAMBI (Италия)	0,32	1,46	1,18	1,29	0,12	0,016	0,01	0,06	ост
2	ESTI S.R.L. (Италия)	0,27	1,14	1,13	1,08	0,03	0,02	0,02	0,04	ост
3	Ningbo Huizheng Special Steel Co., Ltd (KHP, кованная)	0,29	0,40	1,00	1,14	0,02	0,01	0,01	0,01	ост
4	Ningbo Turbo International Trading Company (KHP)	0,24	1,70	0,70	1,67	0,01	0,03	0,01	0,17	ост
5	Bradken (Австралия)	0,30	1,13	1,20	1,30	0,24	0,016	0,01	0,17	ост
6	ЗЛАТМАШ (Россия)	0,23	0,31	0,64	1,1	1,69	0,01	0,01	0,26	ост

Предел прочности сталей импортных коронок составляет 1417...1700 МПа, а предел текучести – 1340...1515 МПа. Полученные прочностные характеристики согласуются с нормативными значениями на соответствующие аналоги сталей отечественного производства при определенных режимах их термообработки [17]. Лучшие показатели относительного удлинения (δ) выявлены у коронок № 1 и 3 – до 10 %, что отвечает нормативным значениям аналогов. У остальных коронок δ существенно ниже нормативных значений вследствие наличия в них дефектов в виде пор.

Ударная вязкость (KCU) материала испытанных коронок № 1, 3 и 6 при -50°C соответствует нормативным значениям аналогичных сталей отечественного производства. Из испытанных образцов коронок наибольшей твердостью обладает коронка № 1 – 47 HRC. Наименьшее значе-

ние твердости показали коронки № 4 (32 HRC) и 6 (30 HRC). Сравнительный анализ массового износа коронок показывает, что характеристики износостойкости стали коронок № 1, 2, 3 и 5 лежат в одном диапазоне и превышают износостойкость сталей коронок № 4 и 6 (рис. 2).

Результаты испытаний на ударно-абразивный износ коррелируют с данными испытаний на твердость. Максимальный массовый износ обнаружен у коронок № 4 и 6, имеющих наименьшие значения твердости. Также следует отметить, что сталь коронки № 6 имеет самые низкие значения характеристик прочности из всех испытанных (табл. 2).

Кроме лабораторных испытаний эксплуатирующая организация провела натурные испытания коронок, с участием представителей изготовителей. Каждый производитель представил от

Таблица 2

Механические свойства металла коронок

Table 2

Mechanical properties of crown metal

Номер коронки	Производитель	Среднее значение механических характеристик				
		Предел прочности, σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость, KCU, Дж/см ²	Твердость, HRC
1	ITALRICAMBI (Италия)	1700	1515	10,56	63	47
2	ESTI S.R.L. (Италия)	1417	1340	1,52	16	40
3	Ningbo Lingfeng (KHP, кованная)	1606	1475	10,14	65	46
4	Ningbo Turbo International Trading Company (KHP)	1472	1440	0,43	28	32
5	Bradken (Австралия)	1540	1427	0,69	24	42
6	ЗЛАТМАШ (Россия)	992	926	5,42	32	30

9 до 18 коронок для натурных испытаний. При проведении испытаний температура воздуха опускалась до -47°C . К сожалению, коронки ITALRICAMBI не испытывались. Но полученные результаты во время натурных испытаний дали очень ценные сведения для эксплуатирующей организации.

Во-первых, возникли проблемы с креплением коронки на адаптер стойки рыхлителя, в основном все коронки устанавливались плотно, без люфта. При рыхлении это приводило к изгибу пальца крепления, соответственно – к проблемам их снятия для замены. Причина изгибания пальца – отсутствие необходимого зазора между пальцем фиксации с адаптером стойки рыхлителя и отверстием в коронке под крепеж. При плотной посадке коронка сильно нагружала палец крепления. Для продолжения испытаний во всех коронках пришлось расширять отверстия под крепеж. Впоследствии производители стали выпускать коронки с расширенным отверстием и необходимой конфигурации.

Во-вторых, износ коронок разных производителей существенно различался. К примеру, максимальный объем рыхления одной коронкой различался в 4 раза в зависимости от производителя. Это заставляет производителей заниматься улучшением служебных качеств своих изделий, а эксплуатирующей организации выбирать наиболее износостойкие. Причем достаточно высокие значения объемов рыхления показали коронки китайских производителей при их относительно невысокой стоимости.

В-третьих, во время испытаний коронка ESTI S.R.L. (Италия), имеющая наиболее низкие значения ударной вязкости материала (табл. 2), хрупко разрушилась. Это еще раз подтверждает необходимость применения в условиях Арктики хладостойких изделий, т. е. с высокой ударной вязкостью.

В-четвертых, данные лабораторных и натурных испытаний имели достаточную корреляцию между собой. Коронки с высокими характеристиками механических свойств и износостойкости показали лучшую производительность.

Впоследствии эксплуатирующей организацией совместно с нами по результатам проведенных лабораторных и натурных испытаний были разработаны технические требования к коронкам рыхлителя бульдозера для их использования в условиях холодного климата Арктики. Требо-

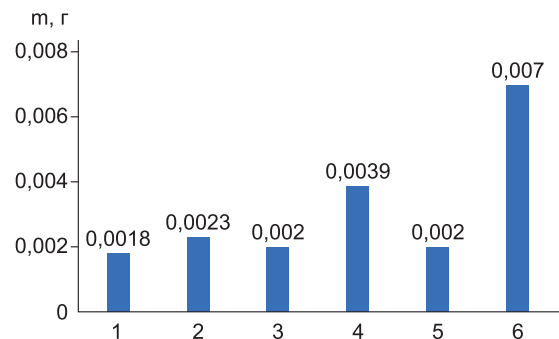


Рис. 2. Гистограмма массового износа испытанных коронок, различных производителей: 1 – ITALRICAMBI (Италия); 2 – ESTI S.R.L. (Италия); 3 – Ningbo Lingfeng (КНР, кованая); 4 – Ningbo Turbo International Trading Company (КНР); 5 – Bradken (Австралия); 6 – ЗЛАТМАШ (Россия)

Fig. 2. Histogram of mass wear of tested crowns from different manufacturers: 1 – ITALRICAMBI (Italy); 2 – ESTI S.R.L. (Italy); 3 – Ningbo Lingfeng (China, forged); 4 – Ningbo Turbo International Trading Company (China); 5 – Bradken (Australia); 6 – ZLATMASH (Russia)

вания включали значения таких свойств материала коронок, как твердость, ударная вязкость, прочность, относительное удлинение, а также химический состав. Это позволило существенно повысить производительность рыхления горных пород предприятием с параллельным ведением входного контроля при закупке коронок. Предприятию удалось существенно снизить количество закупаемых коронок, если ранее в год расходовалось до 26 тысяч штук, то теперь годовой расход снизился до 14...16 тысяч. Это позволило горнодобывающему предприятию найти наиболее рациональный путь решения проблем с износом и получить существенный экономический эффект.

Абразивному износу подвергается также стойка рыхлителя бульдозера (рис. 3). По данным статистики, проводимой в эксплуатирующей организации, наработка до отказа стоек рыхлителя бульдозера зависит от изготовителя, к примеру оригинальные стойки от Komatsu D375 имеют ресурс до 7000 моточасов; ITALRICAMBI – 6300–6400; ООО «Профессионал» – 900–1500; ЧЕТРА – 1200. Относительно низкий ресурс стоек ООО «Профессионал» часто связан с их преждевременным разрушением. Значительный износ и воздействие высоких изгибающих нагрузок может привести к разрушению стойки. Здесь одним из решений для продления ресурса разрушенной стойки является восстановление целостности путем сварки. В этом направле-



Рис. 3. Стойка рыхлителя бульдозера Komatsu D375 со значительным износом

Fig. 3. Komatsu D375 bulldozer ripper stand with significant wear

нии сотрудниками ИФТПС СО РАН разработана оптимальная технология сварки разрушенной стойки рыхлителя производства ООО «Профессионал» [18]. В настоящее время предприятие успешно использует данную технологию, что позволяет продлевать ресурс стоек рыхлителя ООО «Профессионал».

Эксплуатация бульдозеров в условиях Крайнего Севера и других регионов с суровым климатом сопряжена с повышенным износом деталей гусеничного движителя: траки (башмаки), звенья, пальцы и втулки (рис. 4). Наиболее изнашиваемым узлом ходовой части этих бульдозеров являются пары трения втулка–палец гусеницы [19]. На втулки и пальцы воздействуют значительные нагрузки, что способствует непосредственному абразивному изнашиванию. Одной из ключевых проблем является интенсивный износ этих деталей при работе с мерзлыми и обводненными породами, что приводит к частым отказам и снижению ресурса техники.

По данным статистики, проводимой в эксплуатирующей организации, в среднем оригиналь-

ные втулки гусеницы бульдозера (см. рис. 4, б) Komatsu D375 работают 3000–4000 моточасов. Затем изношенные втулки выпрессовываются и обратно впрессовываются с их поворотом примерно на 90°, чем добавляют еще 1500–2000 моточасов, в сумме втулка эксплуатируется около 5000 моточасов. Аналогичную наработку с оригинальными втулками имеют детали гусеничного хода производства BERCO. Нарботка втулок гусеницы бульдозера ЧЕТРА достигает в среднем 2300 моточасов, при этом нет возможности выпрессовки.

Кроме деталей гусеничного движителя, абразивному износу подвергаются пальцы узлов сопряжения, при этом наблюдается уменьшение их рабочих сечений, а также увеличение зазоров в сопряжениях. По результатам проведенного спектрального анализа деталей ходовой части бульдозера и пальцев сопряжения установлено, что в основном для их изготовления применяются углеродистые стали. При этом твердость пальцев и втулок составляет 55–60 HRC.

Для восстановления и упрочнения изношенных деталей широко применяется электродуговая наплавка, где перспективны технологии импульсно-дуговой сварки и наплавки. В этом направлении проведены исследования структуры, состава и физико-механических свойств получаемых покрытий, наносимых электродами УОНИ 13/55 и Т590 отечественного производства при вариации режимов импульсно-дуговой наплавки [16, 20–22]. По результатам исследований установлено, что при применении метода импульсно-дуговой наплавки формируется более однородная структура, имеющая меньшие размеры структурных составляющих, по сравнению со стационарными режимами наплавки на постоянном токе. При рациональных режимах импульсно-дуговой наплавки достигаются меньшее выгорание легирующих элементов, повышение твердости и износостойкости наплавленных покрытий.

В настоящее время начато изучение наплавленных слоев, полученных новыми сварочными материалами отечественного производства, наиболее подходящими по характеристикам для восстановления и упрочнения деталей горнодобывающей техники с использованием импульсных источников питания. Считаем, что технологии импульсно-дуговой наплавки за счет регулируем-

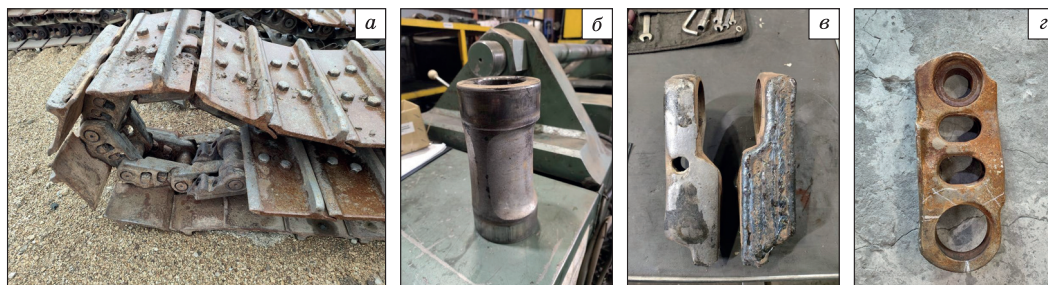


Рис. 4. Изношенные детали ходовой части бульдозера: а – гусеница в сборе; б – втулка; в, г – замок и звено гусеничной цепи D375

Fig. 4. Worn parts of the bulldozer undercarriage: а – track assembly; б – bushing; в, г – lock and link of the track chain D375

мого тепловложения могут улучшить эксплуатационные показатели формируемых покрытий, в том числе для пальцев узлов сопряжения, а также деталей гусеничного движителя бульдозеров.

Закключение

1. Эксплуатация карьерных бульдозеров в условиях Арктики приводит к ускоренному абразивному износу и хрупкому разрушению критически важных деталей, таких как коронки и стойки рыхлителей, а также элементов гусеничного движителя, что значительно снижает производительность техники и увеличивает затраты на ремонт и замену.

2. Комплексные лабораторные и натурные испытания коронок различных производителей выявили прямую зависимость износостойкости от механических свойств материала. Наилучшие результаты показали кованые коронки с высокими значениями твердости (45–47 HRC), ударной вязкости (более 60 Дж/см² при –50 °С), прочностных (σ_t – 1475...1515 МПа, σ_b – 1606...1700 МПа) и пластических свойств (~10 %), соответствующих маркам сталей типа 30ХГТ и 35ХГСА.

3. Для обеспечения надежной работы техники в условиях низких температур необходимо использовать хладостойкие материалы, устойчивые к абразивному износу и ударным нагрузкам. Были разработаны и успешно внедрены технические требования к коронкам, что позволило предприятию сократить их годовое потребление с 26 до 14–16 тысяч штук.

4. Для восстановления и упрочнения изношенных деталей (стоек рыхлителя, пальцев и втулок гусениц) рекомендуется применение технологии импульсно-дуговой наплавки, которая обеспечивает формирование однородной мелкозернистой структуры покрытия с повышенными твердостью и износостойкостью.

5. Реализация комплекса мер, включающего выбор оптимальных материалов на основе входного контроля, применение современных технологий восстановления и упрочнения, позволяет существенно повысить производительность бульдозеров в условиях Арктики и добиться значительного экономического эффекта.

Список литературы / References

1. Ларионов В.П., Слепцов О.И., Сараев Ю.Н. и др. Новые подходы к разработке современных технологий сварки и нанесения покрытий для обеспечения эксплуатационной надежности металлоконструкций и изделий, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера. *Вестник Академии военных наук*. 2008;(3):67–69.
2. Lariionov V.P., Sleptsov O.I., Saraev Y.N., et al. New approaches to the development of modern welding and coating technologies to ensure operational reliability of metal structures and products used in Siberia and the Far North. *Bulletin of the Academy of Military Sciences*. 2008;(3):67–69. (In Russ.)
3. Сараев Ю.Н. Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на основе применения адаптивных импульсных технологий сварки. *Тяжелое машиностроение*. 2010;(8):14–19. EDN: MUREAL
4. Saraev Yu.N. Substantiation of a concept to improve safety and durability of engineering systems operating in Siberia and the extreme North, based on the use of adaptive impulsive welding technologies. *Tyazheloye Mashinostroyeniye*. 2010;(8):14–19. (In Russ.) EDN: MUREAL
5. Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.М. Создание техники северного исполнения – проблема социально-экономического развития восточных регионов России. *Вестник Российской академии наук*. 2015;85(2):155–163. <https://doi.org/10.7868/S0869587315020097> EDN: RJEQBO
6. Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Fomin V.M. Designing machinery for the Arctic: A problem of socioeconomic development of Russia's eastern regions, *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2015;85(2):79–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S1019331615010104> EDN: UFLUUX
7. Громыка Д.С., Утенкова Т.Г., Короткова О.Ю. Обзор методов оценки механизмов изнашивания исполнительных органов горных машин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2):75–86. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-75-86> EDN: VKBDAL

- Gromika D.S., Utenkova T.G., Korotkova O.Yu. Estimation methods of wear mechanisms in cutting heads of mining machines: review. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2):75–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-75-86> EDN: VKBDAL
5. Бочкарев Ю.С., Зырянов И.В. Повышение эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов при разработке россыпных месторождений Севера. *Горный информационный бюллетень*. 2022;(5-2):80–90. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_80 EDN: GCMLFJ
- Bochkarev Yu.S., Zyryanov I.V. Improving the efficiency of quarry dump trucks on placer deposits in the North conditions. *Mining Informational Analytical Bulletin*. 2022;(5-2):80–90. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_80 EDN: GCMLFJ
6. Лебедев Д.И., Федоров М.В., Голиков Н.И. и др. Натурные испытания служебных характеристик наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A. *Наука и образование*. 2016;(2):81–87. EDN: WHAZAZ
- Lebedev D.I., Fedorov M.V., Golikov N.I., et al. Full-scale tests of service characteristics of the welded ripper crown of the Komatsu D375A bulldozer. *Nauka i Obrazovanie*. 2016;(2):81–87. (In Russ.) EDN: WHAZAZ
7. Побегайло П.А., Крицкий Д.Ю., Гильманшина Т.Р. Износ элементов карьерных экскаваторов: анализ современного состояния проблемы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2):64–74. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-64-74> EDN: QNMVSN
- Pobegaylo P.A., Kritsky D.Yu., Gilmanshina T.R. Wear of mining shovel components: current situation and analysis. *Mining Informational Analytical Bulletin*. 2021;(2):64–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-64-74> EDN: QNMVSN
8. Коротков В.А., Замотин В.А. Восстановление деталей горного оборудования. *Горный журнал*. 2001;(8):53–58.
- Korotkov V.A., Zamotin V.A. Restoration of mining equipment parts. *Mining Magazine*. 2001;(8):53–58. (In Russ.)
9. Petrica M., Katsich C., Badisch E., et al. Study of abrasive wear phenomena in dry and slurry 3-body conditions. *Tribology International*. 2013;(64):196–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2013.03.028>
10. Stolarski T.A. *Tribology in machine design*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2000. 298 p.
11. Андреева Л.И., Данилкин А.А. Оценка факторов, оказывающих влияние на работоспособность техники, работающей в условиях развития горнотехнических систем. *Горное оборудование и электромеханика*. 2023;168(4):20–27. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2023-4-20-27> EDN: SZWLGC
- Andreeva L.I., Danilkin A.A. Assessment of factors influencing the performance of equipment operating in the conditions of development of mining systems. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2023;168(4):20–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2023-4-20-27> EDN: SZWLGC
12. Ларионов В.П., Ковальчук В.А. *Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений*. Новосибирск: Наука; 1976. 206 с. EDN: HZTHZX
- Larionov V.P., Kovalchuk V.A. *Cold resistance and wear of machine parts and welded joints*. Novosibirsk: Nauka; 1976. 206 p. (In Russ.) EDN: HZTHZX
13. Ан И.К., Вольф Э.Л., Сараев Ю.Н. Физико-механические аспекты абразивного изнашивания сталей в условиях охлажденной воздушной среды. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019;21(1):108–121. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.1-108-121> EDN: YZTBSP
- An I.K., Wolf E.L., Saraev Yu.N. Physical and mechanical aspects of abrasive wear of steels in a cooled air environment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*. 2019;21(1):108–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.1-108-121> EDN: YZTBSP
14. Слепцов О.И., Слепцов Г.Н., Сивцев М.Н. и др. Обеспечение технологической прочности сварных соединений из высокопрочных сталей для горнодобывающей техники Севера. В кн.: *Надежность материалов, техники и конструкций в условиях экстремально холодного климата: Монография*. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»; 2025. С. 274–322. EDN: XLNTZL
- Sleptsov O.I., Sleptsov G.N., Sivtsev M.N., et al. Reliability of materials, equipment and structures in extremely cold climates. In: *Ensuring the technological strength of welded joints made of high-strength steels for mining equipment in the North*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, FRC YaSC SB RAS; 2025. 274–322. (In Russ.) EDN: XLNTZL
15. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольчиков М.Г. и др. *Абразивное изнашивание*. М.: Машиностроение; 1990. 224 с. EDN: YNTWFB
- Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokolchikov M.G., et al. *Abrasive wear*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1990. 224 p. (In Russ.) EDN: YNTWFB
16. Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Максимова Е.М., Семенов С.В. Повышение износостойкости деталей землеройной техники, эксплуатирующихся в условиях холодного климата. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2018;14(12):543–547. EDN: YPWFID
- Golikov N.I., Saraev Yu.N., Maksimova E.M., Semenov S.V. Increase in wear resistance of earth-moving parts operating in cold climate conditions. *Hardening Technologies and Coatings*. 2018;14(12):543–547. (In Russ.) EDN: YPWFID
17. Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В. и др. *Марочник сталей и сплавов. 5-е издание*. М.; 2016. 1216 с.
- Dragunov Yu.G., Zubchenko A.S., Kashirsky Yu.V., et al. *Brand book of steels and alloys. 5th edition*. Moscow; 2016. 1216 p. (In Russ.)
18. Слепцов Г.Н., Слепцов О.И., Степанова К.В. и др. Разработка оптимальной технологии сварки при реновации стойки рыхлителя высокопроизводительного бульдозера. *Сварка и диагностика*. 2022;(5):53–58. https://doi.org/10.52177/2071-5234_2022_05_53 EDN: JYZGWD
- Sleptsov G.N., Sleptsov O.I., Stepanova K.V., et al. Development of optimal welding technology during the renovation of the ripper-rack of a high-performance bulldozer. *Welding and Diagnostics*. 2022;(5):53–58. (In Russ.) https://doi.org/10.52177/2071-5234_2022_05_53 EDN: JYZGWD
19. Федоров С.К., Морозов А.В. Электромеханическая поверхностная закалка втулок трака бульдозера KOMATSU. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2013;101(3):103–107. EDN: PWPWWD
- Fedorov S.K., Morozov A.V. Electromechanical surface hardening of track bushings of KOMATSU bulldozer. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2013;101(3):103–107. (In Russ.) EDN: PWPWWD

20. Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Слепцов О.И. и др. Импульсно-дуговая наплавка для восстановления изношенных деталей. *Наука и образование*. 2015;(3):69–75. EDN: UNDFRB

Golikov N.I., Saraev Yu.N., Sleptsov O.I., et al. Pulsed-arc surfacing for restoration of worn parts. *Nauka i Obrazovanie*. 2015;(3):69–75. (In Russ.) EDN: UNDFRB

21. Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Тихонов Р.П. и др. Способ восстановления деталей горнодобывающей техники, эксплуатирующейся в условиях Севера. *Наука и образование*. 2017;(4):82–87. EDN: THQMDH

Golikov N.I., Saraev Yu.N., Tikhonov R.P., et al. Method for restoring parts of mining equipment operated in the North. *Nauka i Obrazovanie*. 2017;(4):82–87. (In Russ.) EDN: THQMDH

22. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Перовская М.В. и др. Влияние структуры покрытий, наплавленных электродами Т-590 низкоуглеродистой стали на абразивное изнашивание. *Сварочное производство*. 2022;(3):15–21. EDN: RAAEEY

Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Perovskaya M.V., et al. The influence of the structure of coatings deposited with T-590 electrodes on low-carbon steel on abrasive wear. *Welding Production*. 2022;(3):15–21. (In Russ.) EDN: RAAEEY

Об авторах

ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9209-1592>, ResearcherID: Q-4976-2017, Scopus Author ID: 14623831600, SPIN: 8799-5600, e-mail: n.i.golikov@mail.ru

СЕМЕНОВ Сергей Владимирович, аспирант, ведущий инженер, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-6639-9195>, ResearcherID: ADZ-1535-2022, Scopus Author ID: 57226794277, SPIN: 3322-4584, e-mail: s1789@mail.ru

СЛЕПЦОВ Гавриил Николаевич, заведующий отделом, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4535-3507>, ResearcherID: W-4705-2018, Scopus Author ID: 6506621931, SPIN: 2816-8343, e-mail: slepzoavn@mail.ru

САРАЕВ Юрий Николаевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9457-4309>, ResearcherID: P-8553-2015, Scopus Author ID: 6603354513, SPIN: 1711-3336, e-mail: saraev.73@yandex.ru

ТИХОНОВ Руслан Прокопьевич, ведущий электроник, Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, e-mail: tichonovrp@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Сергей Владимирович, инженер по наладке и испытаниям, Акционерное общество «Алмазы Анабара», Якутск, Российская Федерация, e-mail: kuznetsovsev@alanab.alrosa.ru

Вклад авторов

Голиков Н.И. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи, руководство исследованием; **Семенов С.В.** – верификация данных, проведение исследования, администрирование данных, визуализация; **Слепцов Г.Н.** – проведение исследования, редактирование рукописи, администрирование проекта; **Сараев Ю.Н.** – редактирование рукописи; **Тихонов Р.П.** – методология, проведение исследования; **Кузнецов С.В.** – ресурсное обеспечение исследования, проведение исследования, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

GOLIKOV, Nikolay Innokentievich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9209-1592>, ResearcherID: Q-4976-2017, Scopus Author ID: 14623831600, SPIN: 8799-5600, e-mail: n.i.golikov@mail.ru

SEME NOV, Sergey Vladimirovich, Postgraduate Student, Leading Engineer, Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6639-9195>, ResearcherID: ADZ-1535-2022, Scopus Author ID: 57226794277, SPIN: 3322-4584, e-mail: s1789@mail.ru

SLEPTSOV, Gavriil Nikolaevich, Head of the Department, Institute of Physical and Technical Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4535-3507>, ResearcherID: W-4705-2018, Scopus Author ID: 6506621931, SPIN: 2816-8343, e-mail: slepzoavn@mail.ru

SARAEV, Yuri Nikolaevich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9457-4309>, ResearcherID: P-8553-2015, Scopus Author ID: 6603354513, SPIN: 1711-3336, e-mail: saraev.73@yandex.ru

TICHONOV, Ruslan Prokopyevich, Leading Electronics Engineer, Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, e-mail: tichonovrp@mail.ru

KUZNETSOV, Sergey Vladimirovich, Commissioning and Testing Engineer, Joint-Stock Company “Almazy Anabara”, e-mail: kuznetsovsev@alanab.alrosa.ru

Authors' contribution

Golikov N.I. – conceptualization, methodology, validation, investigation, writing – original draft, supervision; **Semenov S.V.** – validation, investigation, data curation, visualization; **Sleptsov G.N.** – investigation, writing – review & editing, project administration; **Saraev Y.N.** – writing – review & editing; **Tichonov R.P.** – methodology, investigation; **Kuznetsov S.V.** – resources, investigation, writing –review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 18.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.12.2025

Принята к публикации / Accepted 29.01.2026