

УДК 621.878

АНАЛИЗ ПРИЧИН И РИСКОВ СНИЖЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОРОНОК ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСКАВАЦИИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

© 2025 Б.С. Ермаков, О.В. Швецов, С.Б. Ермаков, Ю.С. Клочков

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

Статья поступила в редакцию 12.08.2025

Постепенная миграция производств компаний, добывающих полезные ископаемые в зону многолетнемерзлых грунтов Арктического и Субарктического регионов РФ, выявила ряд проблем в эксплуатации и обслуживании горнодобывающей техники, в первую очередь экскаваторов и погрузчиков на долю которых приходится около половины объема работ на месторождениях твердых полезных ископаемых. К числу таких проблем относится резкое снижение сроков службы зубьев и коронок ковшей. Если в условиях средних широт средний срок службы этого инструмента может составлять несколько месяцев, то в северных условиях эти сроки могут сокращаться до нескольких дней. В работе был проведен анализ причин ускоренного выхода коронок зубьев ковшей экскаваторов, связанных с металлургическими дефектами и несовершенствами структуры металла. Анализ вышедших из строя коронок показал, что основной причиной, кроме износа изделия, является развитие усталостных трещин в рабочей части коронок. Было показано, что в отливках поврежденных коронок присутствует значительное число дефектов литья – горячие трещины, крупные поры, литейная ликвация основных легирующих и примесных элементов, а последующая термическая обработка не устраняет эти дефекты. Установлено, что магистральные трещины, приводящие к разрушению коронок, имеют два участка – очаг трещины – крупная литейная пора или горячая трещина, которые в ходе эксплуатации развиваются по усталостному механизму в плоскости перпендикулярной поверхности коронки. Выполнен металлографический анализ структурных неоднородностей металла коронок, анализ химического состава твердого раствора металла и включений избыточных фаз, присутствующих в стали. Показано, что для повышения работоспособности коронок в условиях экскавации мерзлых пород необходимо оптимизировать технологию литья и последующей термической обработки отливок.

Ключевые слова: экскавация мерзлых пород, коронки ковшей экскаваторов, микроструктура металла отливки, литейные дефекты, трещинообразование

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-146-156

EDN: GPIZKR

Работа выполнена в рамках гранта РНФ по Соглашению между Российским научным фондом, руководителем проекта и организацией о представлении гранта на проведение фундаментальных и научных исследований и поисковых научных исследований № 25-19-00898 от 27.05.2025.

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия XX начало XXI века отмечены целенаправленной миграцией основных добывающих производств в наиболее удалённые и труднодоступные – северные и северо-восточные регионы страны. Это связано как с постепенным исчерпанием месторождений в центральных областях, так и со стратегической задачей развития северных регионов, общая площадь которых составляет около половины территории страны. Стратегическая необходимость развития этих территорий определяется богатейшими запасами природных ресурсов, перераспределением транспортных потоков экспорта через интенсивно развивающийся Северный Морской Путь и установлена в «Стратегии развития арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», утвержденной президентом РФ [1].

Согласно статистике, грузовой трафик по Севморпути увеличился в пять раз по сравнению с советскими показателями, а с 2014-го по 2023 год объем грузоперевозок увеличился почти на порядок – с 4 до 36 миллионов тонн. Сейчас суммарная мощность портов Севморпути уже превысила 40 миллионов тонн [2].

Ермаков Борис Сергеевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник центра технологических инициатив. E-mail: ertakov55@bk.ru

Швецов Олег Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник центра технологических инициатив. E-mail: shvec_off@mail.ru

Ермаков Сергей Борисович, кандидат технических наук, директор центра технологических инициатив. E-mail: ertakovsb@tyuiu.ru

Клочков Юрий Сергеевич, доктор технических наук, и.о. ректора. E-mail: klochkovjs@tyuiu.ru

Основными проблемами северных территорий являются сложные природные и гео-климатические условия – экстремально низкие температуры, наличие в течение большей части года ледового покрова океана, морей и рек, затрудняющих доставку оборудования, материалов и продовольствия в эти регионы, недостаточно развитая автомобильная и железнодорожная сеть, малочисленное население, высокая агрессивность грунтов, высокий уровень влажности и засоленности земли и воздушной среды [3,4]. Тем не менее в северных регионах страны находятся основные из разрабатываемых в настоящее время месторождений природного газа, которые обеспечивают до 80% объема его добычи, апатитового концентрата, угля, никеля, меди, кобальта и других стратегически важных цветных и драгоценных металлов. В целом, Арктика обеспечивает до 5% ВВП Российской Федерации и 22% общероссийского экспорта [5]. Однако развитие региона по мнению [6] сдерживает несколько проблем. К их числу относятся отсутствие на территории российской Арктики современных технических средств для поиска, разведки и разработки месторождений, низкая эффективность горной добычи в условиях высокой энергоемкости производства, дефицит специалистов, способных к максимальному использованию технических средств и возможностей, применяемых для освоения северных территорий.

Не меньшие сложности оказал запрет на поставку инновационного промышленного оборудования в Россию в рамках введенных западными странами санкций. Под данный запрет попали поставки ряда устройств горнодобывающей техники, запасных и расходных частей для ее безаварийной эксплуатации. Единственным путем развития и совершенствования машин и механизмов для добычи полезных ископаемых в данных условиях является путь импортозамещения и увеличение внутреннего производства товаров с использованием внутреннего сырья [7].

К числу наиболее востребованных расходных материалов для горнодобывающей техники относятся коронки и зубья ковшей экскаваторов и погрузчиков. Зубья ковшей этой техники являются наиболее часто заменяемыми элементами, срок службы которых, в условиях северных широт и при разработке взрывной крупнокусковой горной породы, может составлять около 3–4 дней активной работы [8]. В работе [9] отмечено, что процесс изнашивания зубьев ковшей карьерных экскаваторов (ЭКГ-8И и ЭКГ-10), осуществляющих погрузку взорванной массы горных пород составлял от 2 до 3 суток, тогда как срок службы зубьев в относительно легких условиях может превышать 4 месяца [10].

Исследованиями ряда авторов, в том числе [9,11] было показано, что износ зубьев ковшей отрицательно сказывается на производительности экскаваторов, при тяжелых условиях работы по высокоабразивным или мерзлым грунтам и осуществляется путем абразивного и ударно-абразивного изнашивания материала зуба, связанного, в частности, с качественными и количественными параметрами микроструктуры. Еще одной причиной ускоренного выхода из строя зубьев оказываются дефекты литья достаточно сложных с различной толщиной стенки конструкций [12].

Особо остро встает проблема долговечности коронок и зубьев ковшей экскаваторов при их эксплуатации в условиях работы на многолетнемерзлых грунтах, где при добыче полезных ископаемых на долю экскавации породы приходится до 40 % общих затрат при открытой разработке [13-15] что требует повышения качества и снижения стоимости режущего инструмента. В настоящее время эта проблема приобрела важнейшее значение в решении которой принимают участие специалисты различных стран и специальностей и развивается по нескольким направлениям. Так, одним из путей повышения надежности режущего инструмента является корректировка химического состава и обработки материала из которых они изготовлены. Ряд работ анализирует возможность модификации и микролегирования стали Гатфильда — одной из наиболее популярных марок сталей для изготовления коронок и зубьев [16], еще одним из путей повышения надежности режущего инструмента является замена традиционной стали Гатфильда на среднеуглеродистые легированные износостойкие стали [12, 16], что объясняется необходимостью повышения трещиностойкости и хладостойкости материала при снижении его стоимостных показателей. Еще ряд исследований посвящен разработке технологии поверхностного упрочнения рабочей части коронок и зубьев – поверхностной закалке, химико-термической обработке, обкатке [17, 18, 20]; значительный объем исследований посвящен оптимизации геометрических параметров инструмента [19 –21].

К сожалению, из достаточно широкого спектра обсуждаемых проблем, практически исключен вопрос металлургического качества отливок будущих коронок и зубьев, стабильности микроструктуры литого металла и минимизации литейных дефектов при отливке заготовок; литейной ликвиции химических элементов, возникающей при кристаллизации и охлаждении сложной отливки с разнотолщиной стенок, а значит с различными скоростями ее охлаждения и диффузии элементов в объеме металла [22,23]. В то же время, как было показано в [24-25] ведущим фактором, определяющим работоспособность зубьев, является качество литья и стабильность микроструктуры литого материала. Поэтому совершенствование металлургического качества литых заготовок и готовых зубьев является важнейшим технологическим фактором повышения их работоспособности в северных условиях.

Так, для снижения интенсивности ликвации в металле зубьев рекомендуется проводить предварительную термическую обработку, состоящую из высокотемпературного диффузионного отжига заготовок с последующей нормализацией и последующей – окончательной процедурой – закалкой. Однако выполнение сложной высокотемпературной термической обработки достаточно затратно и трудоемко, поэтому, зачастую термическая обработка зубьев ограничивают нормализацией [26]. При такой термической обработке на границах первичных литых зерен могут возникать оксидные пленки, крупные глобулы сульфидов, окисульфидов и карбонитридов, облегчающие распространение хрупких интеркристаллитных трещин в ходе эксплуатации [27]. В работе [28] утверждается, что в металле литых заготовок зубьев может сохраняться повышенное число зон с локальными напряжениями, пограничных участков с искажениями кристаллической решетки, ликвациями и сегрегациями легирующих и примесных элементов после любых режимов термической обработки. Все это приводит к тому, что разрушение литого металла часто происходит по границам зерен и характеризуется малой энергоемкостью. Таким образом, следует предположить, что литая сталь коронок и зубьев ковшей экскаваторов обладает сильной исходной дефектностью в виде микропор, раковин и трещин, высоким уровнем химической неоднородности – ликвациями основных легирующих и примесных элементов, крупными неравноосными первичными зёрнами [27].

Согласно данным [29-31] основными причинами разрушений зубьев большинстве случаев, являются литейные дефекты - раковины, несплошности и макротрещины, загрязненные границы зерен, обогащенные примесными элементами с низким сопротивлением хрупким разрушениям. Физическая природа таких дефектов различна и обусловлена как неправильно подобранными режимами выплавки, литья и термообработки, так и неудовлетворительными свойствами применяемого материала. Было показано, что качество структуры материала определяет его свойства, следовательно, этот фактор влияет как на срок службы, так и на износ зубьев.

Целью настоящей работы явилось исследование фактического состояния и причин ускоренного разрушения коронок зубьев ковшей карьерных экскаваторов после их эксплуатации в условиях экскавации мерзлых пород в Арктической зоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В работе были исследованы образцы металла, вырезанные из рабочих частей зубьев ковшей карьерных экскаваторов Cat-391 после их демонтажа, связанного с повреждением режущего инструмента при экскавации мерзлых горных пород установленной крепостью пород по Протодьяконову -18-20 (По данным MiningWiki – свободной шахтёрской энциклопедии это – «в высшей степени крепкие породы. Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты и базальты. Исключительные по крепости другие породы»)

Фотографии ряда исследованных коронок приведены на рисунке 1.



Рисунок 1. Коронки зубьев после эксплуатации: а,б – нижняя грань; в – верхняя грань.

В ходе исследований был проведен анализ химического состава коронок на эмиссионном спектрометре «Искролайн-100», предназначенном для измерения аналитического сигнала, пропорционального интенсивности спектральных линий различных элементов, атомно-эмиссионный спектральный анализ проводился согласно стандарту ГОСТ 54153-2010, исследование твердости материала на твердомере TP 5006 согласно ГОСТ 9013–2022, исследование микротвердости структурных на приставке микроскопа MICRO-DUROMAT 4000E методом Виккерса с нагрузкой 180 г. (HV0,18) в соответствии с ГОСТ 9450–76, анализ отпечатков производился на оптическом микроскопе Reichert-Jung при увеличении $\times 500$. Микроструктуру металла исследовали методами оптической металлографии на микроскопе Reichert-Jung ($\times 500$). Исследования металла рабочих частей коронок были произведены на образцах, вырезанных из нижних граней, на растровом электронном микроскопе MIRA3 TESCAN с приставкой микрорентгеноспектрального анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе визуально-измерительного контроля коронок выполненного в соответствии с РД 03-606-03 [32] было показано, что в результате эксплуатации произошло изнашивание верхней и нижней граней, сопровождающееся укорочением рабочей части, притуплением передней – заостренной поверхности. Поверхность рабочей части зубьев - неровная и с глубокими царапинами, в основном параллельными направлению движения зуба, характерными для абразивного износа. Максимальное изнашивание зубьев происходило по нижней наиболее поврежденной грани (рисунок 2), также отмечено увеличение углов заострения ϵ и резания δ зуба, что полностью согласуется в данными ряда авторов, например [9]. У коронки В отсутствует передняя – заостренная часть – поверхность излома окислена, анализ очага трещины позволяет предположить, что разрушение произошло от крупного дефекта литья, наиболее вероятно – горячей литейной трещины.



Рисунок 2 – Фотографии нижней грани рабочих частей коронок

Результаты анализа химического состава металла коронок, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Фактический химический состав исследованных образцов

Эл-т	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	S	P
Коронка А	0,314	2,22	1,56	0,54	0,33	0,035	0,0028	0,024
Коронка Б	0,287	2,17	1,76	0,54	0,21	0,036	0,0027	0,020
Коронка В	0,288	2,19	1,64	0,61	0,25	0,039	0,0024	0,019

Как следует из данных таблицы – марка стали может быть идентифицирована как достаточно широко применяемая для изготовления коронок и зубьев сталь 27Х2С2ГМЛ.

На образцах, вырезанных из нижней грани коронок было проведено исследование микроструктуры металла, выполнен анализ обнаруженных дефектов, а также измерена микротвердость структурных составляющих.

Проведёнными исследованиями было установлено, что структура металла представляет собой структуру мартенсита с различным уровнем травимости, многочисленными литейными дефектами типа пор, горячих и усталостных трещин и неметаллических включений – рисунок 3.

На рабочей части коронок при визуально-измерительном контроле были обнаружены трещино-подобные дефекты, внешний вид которых позволил предположить, что очагом зарождения и развития трещин служат исходные литейные дефекты, в первую очередь – горячие литейные трещины,

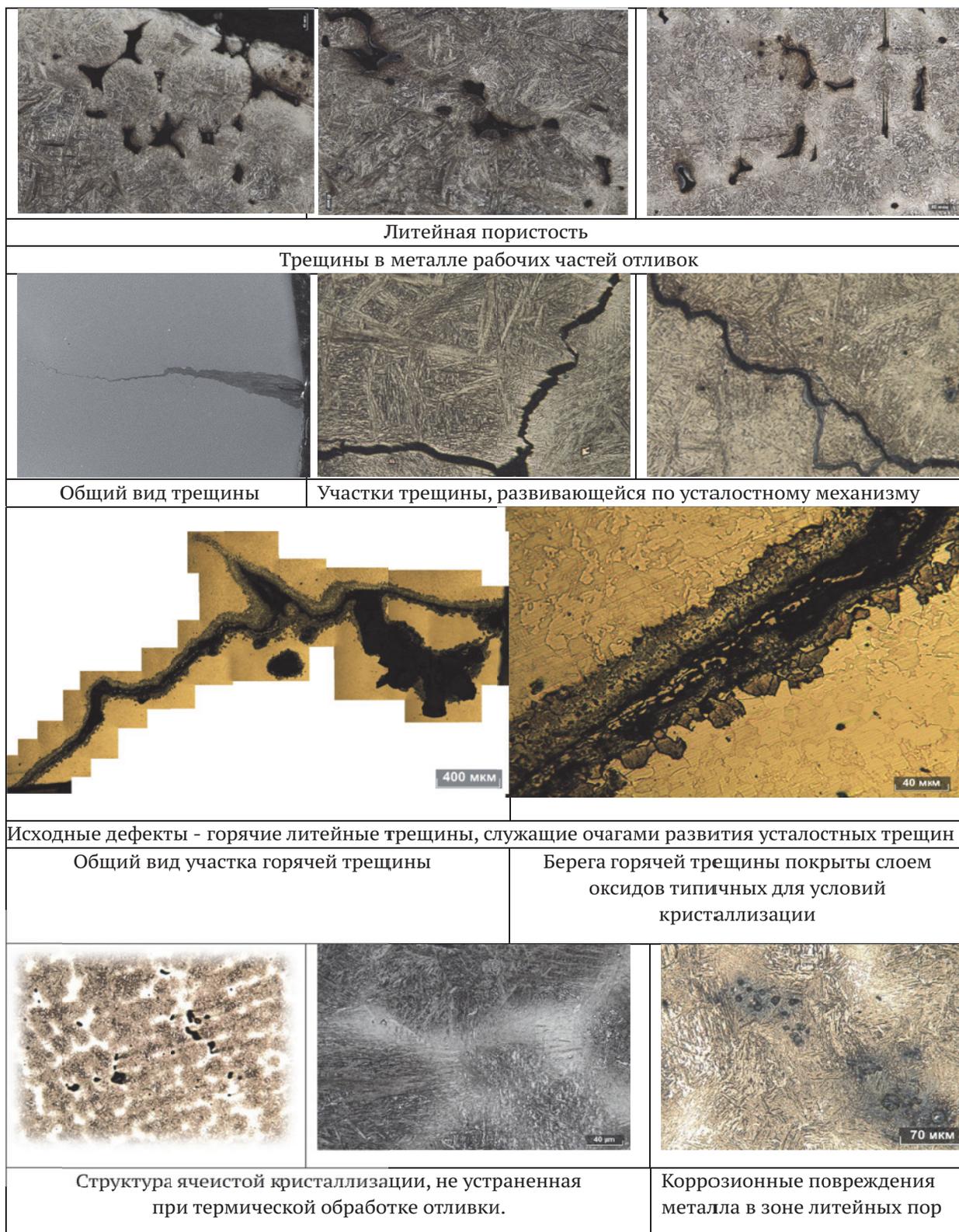


Рисунок 3. Микроструктура и дефекты в металле рабочих частей коронок

возникшие при кристаллизации материала отливки в зонах разнотолщинности ее стенок и связанные с возникновением напряжений при неравномерной кристаллизации металла в ее более тонкой и толстой частях. Механизм образования таких трещин, возникающих в ходе кристаллизации отливки, может быть описан следующим образом – при температурах отливки ниже температуры нулевой жидкотекучести, то есть в момент образования кристаллического скелета в более тонкой части отливки, сплав начинает давать усадку, теряя способность течь как жидкость и приобретая некоторую прочность. Возникающие при этом напряжения могут достигать и даже превышать временное сопротивление металла при растяжении, что приводит к образованию горячих трещин [23].

Это предположение подтверждается фотографиями, представленными на рисунке 3. В «первой» - горячей части трещины – ее берега покрыты толстым слоем оксидов и оксисульфидов – отложений типичных для высокотемпературных процессов, в то время как в «холодной» – усталостной части магистральной трещины – следов интенсивного окисления ее берегов – не обнаружено.

Микроанализ трещин подтвердил, что трещиноподобные дефекты, способствующие ускоренному выходу из строя коронок состоят из двух участков с различным механизмом образования: начальная часть дефекта представляет собой горячую трещину, образующуюся при разливке и кристаллизации заготовки коронки, которая в ходе эксплуатации получает развитие по механизму холодной усталостной трещины, движение которой протекает в плоскости перпендикулярной поверхности зуба по границам зерен (рисунок 3).

Механизм ускоренного разрушения коронок может быть описан следующим образом. Причиной ускоренного разрушения коронки являются магистральные макротрещины, развивающиеся по границам зерен по усталостному механизму в плоскости перпендикулярной поверхности нижней грани коронки; зарождение и развитие макротрещины происходит из «горячего» очага – горячей кристаллизационной трещины или крупной литейной поры, выходящей на поверхность отливки.

Для подтверждения двухступенчатого механизма развития макродефекта был проведен химико-спектральный анализ берегов магистральной трещины. Было показано – рисунок 4а – берега горячего участка трещины покрыты слоем толстым слоем первичных оксидов и оксисульфидов кремния, алюминия и магния, в то время как химические составы берегов усталостного участка дефекта практически не отличаются от состава металла отливки – рисунок 4.б.

При анализе микроструктуры металла рабочих частей коронок было показано, что структура металла – мартенсит с различной твердостью и уровнем травимости – рисунок 3 – на обще фоне металла видны более светлые – плохо травимые участки, а сама структура типична для литого металла с кристаллизацией по ячеистому механизму [33,34].

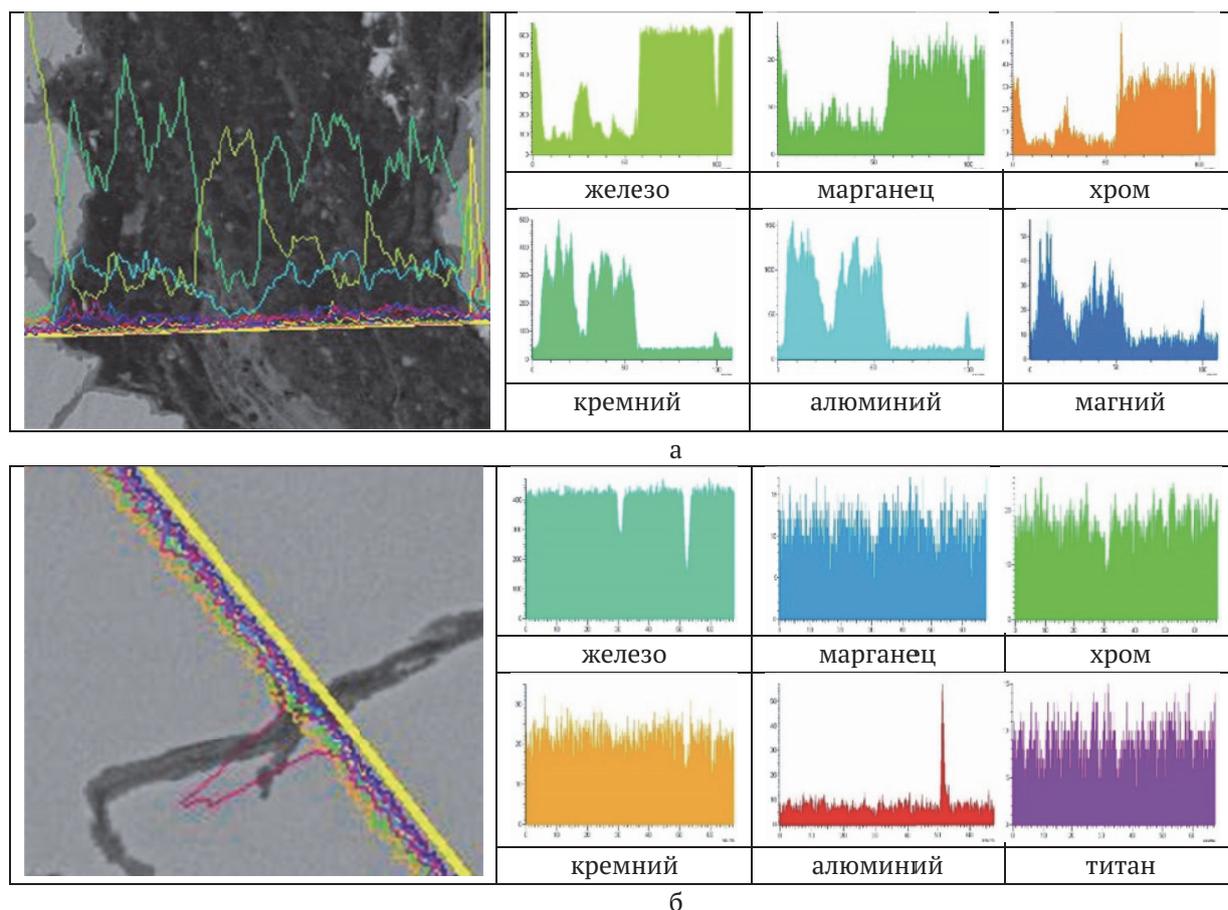


Рисунок 4. Результаты химико-спектрального анализа берегов трещины в горячей и холодной частях

Образование ячеистой структуры кристаллизации обычно связывают с нарушениями плоского фронта кристаллизации отливки, образованием вытянутых ячеек, между которыми расположены плоские участки, обогащенные примесными растворенными компонентами. Нарушение плоского фронта кристаллизации принято объяснять малой величиной концентрационного переохлажде-

ния, при которой фронт кристаллизации, первоначально слегка волнистый, постепенно развивается в оgranенный – ячеистый, а сама форма ячеек зависит от кристаллографической ориентации [34]. Исследования были выполнены в четырех различных точках микрошлифа коронки Б и затрагивали близлежащие участки повышенной и ухудшенной травимости - условно - темной и светлой составляющих. Были исследованы микротвердость и химические составы этих участков – таблицы 2 и 3, а также выполнен анализ химического состава включений.

Таблица 2 - Значения микротвердости образцов (HRC) – коронка Б



Таблица 3 - Фактический химический состав твердого раствора в светлой и темной составляющих микроструктуры (коронка Б)

Структурная составляющая	Участок	Элемент, мас.%							
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	S	P
Темная	1	0,206	1,78	1,92	0,52	0,07	0,016	0,0017	0,015
	2	0,211	1,95	1,71	0,49	0,12	0,011	0,0018	0,017
	3	0,199	1,89	1,98	0,59	0,11	0,012	0,0023	0,015
	4	0,201	2,06	2,09	0,48	0,12	0,016	0,0019	0,016
Среднее содержание		0,204	1,92	1,93	0,52	0,11	0,014	0,0019	0,016
Светлая	1	0,207	2,59	1,56	0,41	0,06	0,009	0,0031	0,023
	2	0,196	2,47	1,63	0,39	0,04	0,006	0,0029	0,024
	3	0,204	2,21	1,67	0,43	0,06	0,004	0,0041	0,028
	4	0,202	2,25	1,59	0,51	0,07	0,008	0,0036	0,023
Среднее содержание		0,202	2,38	1,61	0,49	0,06	0,007	0,0034	0,025
Химический состав стали		0,287	2,17	1,76	0,54	0,21	0,036	0,0027	0,020

Как следует из данных таблицы 3 твердый раствор стали обеднен элементами, которые вводятся в металл отливки для предотвращения зарождения и развития горячих трещин при ее кристаллизации - в первую очередь молибденом и титаном, причем в светлых участках содержание этих элементов более чем в два – три раза ниже, чем в среднем составе стали.

Анализ результатов таблиц 2 и 3 показал, что светлые участки имеют более низкую концентрацию углерода, хрома, молибдена, титана – то есть практически всех основных легирующих элементов, более низкую твердость мартенсита – 54 HRC, против 60 HRC у темных участков микроструктуры, что снижает равномерность износа поверхности коронки и, в целом снижает ее износостойкость – рисунок 5.

Таким образом, согласно выводам Флемингса [34]. светлые участки могут трактоваться как плоские участки структуры, расположенными между ячеистыми кристаллитами. Это подтверждается и повышенным содержанием в них таких примесных элементов как сера и фосфор. В светлых участках их концентрация превышает среднее содержание в стали – 0,0034 и 0,025 масс. % соответственно, в то время как в зоне, где шла ускоренная кристаллизация – в ячейках - содержание этих элементов в полтора раза ниже - 0,0019 и 0,016 масс. % (при среднем содержании в стали 0,0027 и 0,020 масс %).

По результатам микрорентгеноспектрального анализа неметаллических включений в твердом растворе и границах зерен стали было установлено, что они представляют собой статистически распределённые по объёму, оксиды, окисульфиды, карбонитриды (нитриды) молибдена и титана, сложные карбиды типа M_3C , в основном (Fe, Cr, Mn)₃C.

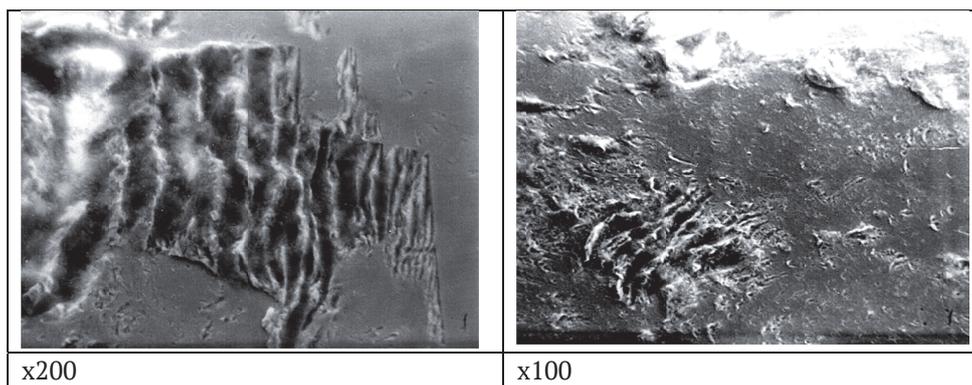


Рисунок 5. Многорядные продолговатые ориентированные вмятины - частичное внедрение частиц минерала – так называемое перекатывание частиц на участках светлой составляющей [35]

На рисунке 6 приведены фотографии типичных оксисульфидных неметаллических включений, обнаруженных в стали и состав одного из таких включений. Как следует из приведенных данных исследованная частица представляет собой сложное включение на основе сульфида кальция. В состав включения также входят Al_2O_3 , SiO_2 , MgO . Исследованное включение типично для первичной – плавочной структуры стали, следует обратить внимание на большую концентрацию титана, молибдена и хрома во включении.

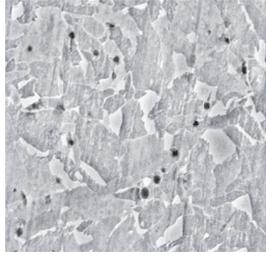
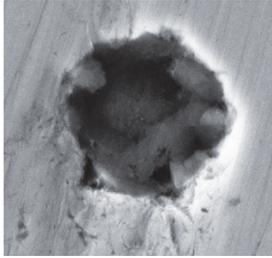
		Химический состав включения, масс. %					
		O	Mg	Al	Si	S	Ca
Включения в твердом растворе x900	Анализируемой включение x9100	8,11	1,05	8,29	6,14	5,27	9,73
		Ti	Mo	Cr	Mn	Fe ¹⁾	
		1,98	2,14	4,19	1,26	51,84	
1) Высокая концентрация железа объясняется «захватом» окружающего фона при проведении анализа окружающего включения твердого раствора							

Рисунок 6. Типичные оксисульфидные включения в твердом растворе стали

Следует обратить внимание на еще одну проблему высокой пористости и трещиноватости отливок. На рисунке 3 приведена фотография литейных пор со следами коррозионного разъедания металла в ходе эксплуатации, когда коррозионно-агрессивная жидкость проникает вглубь металла коронки, приводит к окислению и разрушению металла и дополнительно снижает износостойкость инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований было установлено, что одной из важнейших причин, приводящих к снижению сроков службы коронок ковшей карьерных экскаваторов в зоне многолетнемерзлых грунтов являются металлургические дефекты, в том числе крупные поры, горячие трещины, ликвационные неоднородности структуры, связанные с недостаточно проработанной технологией кристаллизации отливок. Показано, что вводимые в состав элементы, которые должны препятствовать развитию горячих трещин, образованию ликваций примесных элементов и росту зерна в стали (молибден и титан) в основном находятся в крупных некогерентных с матрицей оксидных, оксисульфидных, карбидных и карбонитридных включениях, а их содержание в твердом растворе стали в темной – ячеистой части структуры – менее 50% от объема введения, а в светлой – менее 30%. Такое распределение молибдена и титана между твердым раствором и избыточными фазами позволяет сделать вывод о том, что технология разлива стали и ее последующей термической обработки требует дополнительного анализа и усовершенствования. Различная твердость составляющих микроструктуры (около 60 HRC у темной составляющей и 54 HRC дополнительно приводит к неравномерному изнашиванию поверхностей коронок и снижает срок их эксплуатации. Таким образом, для повышения срока службы коронок необходимо оптимизировать режимы разлива и охлаждения отливок стали и совершенствовать процесс их термической обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ президента РФ от 26.10.2020 №645 «О стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Дата обращения: 10.02.2023
2. Абрамов, Р.А. Особенности развития северных регионов России / Р.А. Абрамов // Приоритеты России. – 2008. – № 11(68). – С.15-21.
3. Filippova, N., Vlasov, V., Spirin, I., Grishaeva, Yu., Melnikova, T. Features of sustainable development of the Arctic region: transport and personnel training // Transportation Research Procedia. –2021. 179- 183.
4. Литвиненко, В.С. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами / В.С. Литвиненко, Е.И. Петров, Д.В. Василевская, А.В. Яковенко, И.А. Наумов, М.А. Ратников // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 95-111.
5. Селин, В.С. Тенденции и особенности инновационной индустриализации в северных регионах России / В.С. Селин, В.А. Цукерман // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С.162-167.
6. Гоголинская, Е.А. Горная промышленность Арктической зоны. Проблемы управления и тенденции развития / Е.А. Гоголинская, В.С. Кудряшов // Ученые записки тамбовского отделения РОСМУ, – 2020. – № 18. – С. 24-33.
7. Яновский, В.В. Современное положение и роль арктического региона в системе экономических интересов России / В.В. Яновский, В.С. Кудряшов // Научные труды Северо-Западного института управления РАНХиГС. – 2019. – Т. 10. – № 4 (41). – С. 109-116.
8. Зорин В.А. Надежность машин / В.А. Зорин, В.С. Бочаров. – Орел: ОрелГТУ, 2003. – 548 с.
9. Болобов, В.И. Влияние вида горной породы на закономерности изнашивания коронки зуба ковша экскаватора / В.И. Болобов, Э.В. Ахмеров, И.В. Ракитин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022, – № 6-2. – С. 189-204.
10. Побегайло, П.А. Износ элементов карьерных экскаваторов: анализ современного состояния проблемы / П.А. Побегайло, Д.Ю. Крицкий, Т.Р. Гильманшина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 64–74.
11. Колокольцев, В.М. Исследование механизмов абразивного и ударно-абразивного изнашивания высокомарганцевой стали / В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин, В.П. Чернов, Н.А. Феоктистов, Д.А. Горленко, В.К. Дубровин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2017. – Т. 15. – № 2. – С. 54–62.
12. Ермаков, Б.С. Причины ускоренного выхода из строя коронок ковшей экскаваторов при эксплуатации в условиях Арктических регионов / Б.С. Ермаков, С.А. Вологжанина, С.Б. Ермаков, О.В. Швецов // Черные металлы. – 2024. – № 9. – С. 37-43.
13. Авдеев, А.Н. Распределение напряжений в базовых узлах карьерных экскаваторов и хрупкие разрушения конструкций / А.Н. Авдеев, А.Ю. Болотнев, Е.И. Унагаев // Вестник ИрГТУ. – 2009. – № 2 (38). – С.17-19.
14. Панищев, С.В. Особенности разработки смерзающихся вскрышных пород драглайном в условиях пластового месторождения криолитозоны / С.В. Панищев, С.А. Ермаков, Е.Л. Алькова, М.С. Максимов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – №. 3. – С. 31–36.
15. Соколов, И.С. Методика определения прочностных свойств мерзлых грунтов статическим зондированием: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / И.С. Соколов. – М.: МГУ, 2020. – 23 с.
16. Болобов, В.И. Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах / В.И. Болобов, А.П. Баталов, В.С. Бочков, С.А. Чупин // Записки Горного института. – 2014. – Т. 209. – С.18-22.
17. Ларионов, В.П. Хладостойкость материалов и элементов конструкций. Результаты и перспективы / В.П. Ларионов, В.Р. Кузьмин, О.И. Слепцов, А.М. Ишков, А.В. Лыглаев. – Новосибирск: Наука, 2005. – 290 с.
18. Sathishkumar K., Kalaivanan P., Karthick R., Kersone C. Design and analysis of hardness improvement on excavator Bucket Teeth. International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education. 2017. Vol. 3. Iss. 2. 4572.
19. Mukherjee A., Biswas Ch., Majumder A., Barik M. Comparative study of wear characteristics of selected structural materials. Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 67. P. 4. pp. 536–542.
20. Pobegaylo P. A., Kritsky D. Yu., Gilmashina T. R. Wear of elements of quarry excavators: analysis of the current state of the problem. Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten. 2021. No. 2. pp. 64–74.
20. Widder L., Rojacz H., Adam K., Kuttner A. et al. Abrasive wear protection in material handling: Mechanism-based combination of lab-experiments for optimal material selection. Wear. 2023.p.. 530–531.
21. Насонов, М.Ю. Исследование ресурса и долговечности металлических конструкций экскаваторов после истечения срока эксплуатации / М.Ю., Насонов Ю.В. Лыков, До Дык Чонг. // Уголь. – 2020. – № 2. – С.13–17.
22. Ruzibaev A. N., Zhuraev D. D., Khasanova Sh. I., Abdiev B. K. et al. Study of wear of bucket teeth of quarry excavators. International scientific review of problems and prospects of modern science and education. LVI International correspondence scientific and practical conference: collection of scientific articles. Boston, USA, 2019. pp. 13–16.
23. Galata L. A., Ermakov B. S., Kancev R. G., Karzina J. S. The influence of microstructure quality on the efficiency of bucket teeth of career excavators. Key Engineering Materials. 2023. Vol. 941. pp. 107–112.
24. Солнцев, Ю.П. Материалы для низких и криогенных температур. Энциклопедический справочник / Ю.П. Солнцев, Б.С. Ермаков, О.И. Слепцов. – СПб.: Химиздат, 2008. – 768 с.
25. Солнцев, Ю.П. Ресурс материалов низкотемпературных конструкций / Ю.П. Солнцев, Б.С. Ермаков. – СПб.: Химиздат, 2024. – 512 с.
26. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов: Учебник для вузов. 4-е изд. / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
27. Солнцев, Ю.П. Хладостойкие стали и сплавы / Ю.П. Солнцев. – СПб.: Химиздат, 2005. – 480 с.

28. *Korchynsky M.* Advanced Metallic Structural Materials and a New Role for Microalloyed-Steels //Material Science Forum, Nov. 2005, V.500-501. P.471-480.
29. *Солнцев, Ю.П.* Материаловедение. Учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. Изд. 7-е. – СПб.: Химиздат, 2020. – 784 с.
30. *Шамоня, В.П.* Долговечность зубьев ковшей экскаваторов ЭКГ-8 в условиях Норильска / В.П. Шамоня, А.И. Михайловский, В.А. Ковальчук, Б.М. Благих // Горный журнал. – 1966. – № 7. – С. 53–56.
31. *Чебулаев, В.И.* Разрушение зубьев мощных карьерных экскаваторов и методы оценки их хладостойкости / В.И. Чебулаев // Прочность сталей, работающих в условиях низких температур: Сб. науч. тр. – СПб.: ЛТИХП, 1989. – С. 21-26.
32. РД 03-606-03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю./ М., Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности промышленности Госгортехнадзора России», 2004, 100 с.
33. *Няшина, Н.Д.* Анализ устойчивости ячеистого фронта кристаллизации и формирование структуры затвердевающего расплава / Н.Д. Няшина, П.В. Трусов // Математическое моделирование систем и процессов. – 1998. – № 6. – С. 66-74.
34. *Флемингс, М.* Процессы затвердевания [пер. с англ.] / М. Флемингс. – М.: Мир, 1977. – 424 с.
35. *Андреев, А.К.* Пути повышения ресурса и работоспособности литых сталей в условиях низких температур: дисс. ... докт. техн. наук / А.К. Андреев. – СПб.: 2010. 276 с.

**ANALYSIS OF THE REASONS AND RISKS OF REDUCING THE PERFORMANCE
OF THE TEETH OF THE BUCKETS OF QUARRY EXCAVATORS IN THE CONDITIONS
OF EXCAVATION OF FROZEN SOILS IN THE ARCTIC REGION**

© 2025 B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov, S.B. Ermakov, Yu.S. Klochkov

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

The gradual migration of production facilities of companies that extract minerals to the permafrost zone of the Arctic and Subarctic regions of the Russian Federation has revealed a number of problems in the operation and maintenance of mining equipment, primarily excavators and loaders, which account for about half of the volume of work in solid mineral deposits. One of these problems is a sharp decrease in the service life of the teeth and crowns of the buckets. While the average service life of this tool can be several months in middle latitudes, it can be reduced to a few days in northern conditions. The paper analyzes the causes of accelerated wear of the teeth of excavator buckets due to metallurgical defects and imperfections in the metal structure. Analysis of the failed crowns showed that the main reason, in addition to product wear, is the development of fatigue cracks in the working part of the crowns. It was shown that the castings of damaged crowns contain a significant number of casting defects, such as hot cracks, large pores, and casting liquation of the main alloying and impurity elements, and subsequent heat treatment does not eliminate these defects. It has been established that the main cracks that lead to the destruction of crowns have two sections: the crack focus is a large casting pore or a hot crack, which develops according to the fatigue mechanism in a plane perpendicular to the surface of the crown during operation. A metallographic analysis of the structural inhomogeneities of the crowns' metal, an analysis of the chemical composition of the metal solid solution, and the inclusion of excess phases present in the steel, has been performed. It has been shown that in order to improve the performance of the crowns during excavation of frozen rocks, it is necessary to optimize the casting technology and subsequent heat treatment of the castings.

Keywords: excavation of frozen rocks, crowns of buckets

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-146-156

EDN: GPIZKR

REFERENCES

1. Ukaz prezidenta RF ot 26.10.2020 №645 «O strategii razvitiya Arkticheskoy zony RF i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2035 goda. Data obrashcheniya: 10.02.2023
2. *Abramov, R.A.* Osobennosti razvitiya severnyh regionov Rossii / R.A. Abramov // Prioritety Rossii. – 2008. – № 11(68). – С.15-21.
3. *Filippova, N., Vlasov, V., Spirin, I., Grishaeva, Yu., Melnikova, T.* Features of sustainable development of the Arctic region: transport and personnel training // Transportation Research Procedia. – 2021. 179-183.
4. *Litvinenko, V.S.* Ocenka roli gosudarstva v upravlenii mineral'nymi resursami / V.S. Litvinenko, E.I. Petrov, D.V. Vasilevskaya, A.V. Yakovenko, I.A. Naumov, M.A. Ratnikov // Zapiski Gornogo instituta. – 2023. – Т. 259. – С. 95-111.
5. *Selin, V.S.* Tendencii i osobennosti innovacionnoj industrializacii v severnyh regionah Rossii / V.S. Selin, V.A. Cukerman // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. – 2015. – № 2. – С.162-167.
6. *Gogolinskaya, E.A.* Gornaya promyshlennost' Arkticheskoy zony. Problemy upravleniya i tendencii razvitiya / E.A. Gogolinskaya, V.S. Kudryashov // Uchenye zapiski tambovskogo otdeleniya ROSMU, – 2020. – № 18. – С.24-33.
7. *Yanovskij, V.V.* Sovremennoe polozhenie i rol' arkticheskogo regiona v sisteme ekonomicheskikh interesov Rossii /

- V.V. Yanovskij, V.S. Kudryashov // Nauchnye trudy Severo-Zapadnogo instituta upravleniya RANHiGS. – 2019. – Т. 10. – № 4 (41). – С. 109-116.
8. Zorin V. A. Nadezhnost' mashin / V. A. Zorin, V. S. Bocharov. – Orel: OrelGTU, 2003. – 548 s.
 9. Bolobov, V.I. Vliyaniya vida gornoj porodoy na zakonmernosti iznashivaniya koronki zuba kovsha ekskavatora / V.I. Bolobov, E.V. Ahmerov, I.V. Rakitin // Gornyj informacionno-analiticheskiy byulleten'. – 2022, – № 6-2. – С. 189-204.
 10. Pobegajlo, P.A. Iznos elementov karbonyh ekskavatorov: analiz sovremennogo sostoyaniya problemy / P.A. Pobegajlo, D Yu. Krickij, T.R. Gil'manshina // Gornyj informacionno-analiticheskiy byulleten'. – 2021. – № 2. – С. 64–74.
 11. Kolokol'cev, V.M. Issledovanie mekhanizmov abrazivnogo i udarno-abrazivnogo iznashivaniya vysokomargancevoj stali / V.M. Kolokol'cev, K.N. Vdovin, V.P. Chernov, N.A. Feoktistov, D.A. Gorlenko, V.K. Dubrovin // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova. – 2017. – Т. 15. – № 2. – С. 54–62.
 12. Ermakov, B.S. Prichiny uskorennoy vyhoda iz stroya koronok kovshej ekskavatorov pri ekspluatatsii v usloviyah Arkticheskikh regionov / B.S. Ermakov, S.A. Vologzhanina, S.B. Ermakov, O.V. Shvecov // Chernye metally. – 2024. – № 9. – С. 37-43.
 13. Avdeev, A.N. Raspredelenie napryazhenij v bazovykh uzlah karbonyh ekskavatorov i hrupkie razrusheniya konstrukcij / A.N. Avdeev, A.Yu. Bolotnev, E.I. Unagaev // Vestnik IrGTU. – 2009. – № 2 (38). – С.17-19.
 14. Panishev, S.V. Osobennosti razrabotki smerzayushchihsya vskryshnykh porod draglajnom v usloviyah plastovogo mestorozhdeniya kriolitozony / S.V. Panishev, S.A. Ermakov, E.L. Al'kova, M.S. Maksimov // Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh. – 2019. – № 3. – С. 31–36.
 15. Sokolov, I.S. Metodika opredeleniya prochnostnykh svoystv merzlykh gruntov staticheskim zondirovaniem: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk / I.S. Sokolov. – М.: MGU, 2020. – 23 s.
 16. Bolobov, V.I. Iznosostojkost' stali 110G13L v razlichnykh abrazivnykh sredah / V.I. Bolobov, A.P. Batalov, V.S. Bochkov, S.A. Chupin // Zapiski Gornogo instituta. – 2014. – Т. 209. – С.18-22.
 17. Larionov, V.P. Hladostojkost' materialov i elementov konstrukcij. Rezul'taty i perspektivy / V.P. Larionov, V.R. Kuz'min, O.I. Slepcev, A.M. Ishkov, A.V. Lyglaev. – Novosibirsk: Nauka, 2005. – 290 s.
 18. Sathishkumar K., Kalaivanan P., Karthick R., Kerson C. Design and analysis of hardness improvement on excavator Bucket Teeth. International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education. 2017. Vol. 3. Iss. 2. 4572.
 19. Mukherjee A., Biswas Ch., Majumder A., Barik M. Comparative study of wear characteristics of selected structural materials. Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 67. P. 4. pp. 536–542.
 20. Pobegaylo P. A., Kritsky D. Yu., Gilmashina T. R. Wear of elements of quarry excavators: analysis of the current state of the problem. Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten. 2021. No. 2. pp. 64–74.
 20. Widder L., Rojacz H., Adam K., Kuttner A. et al. Abrasive wear protection in material handling: Mechanism-based combination of lab-experiments for optimal material selection. Wear. 2023.r. 530–531.
 21. Nasonov, M.Yu. Issledovanie resursa i dolgovechnosti metallicheskih konstrukcij ekskavatorov posle istecheniya sroka ekspluatatsii / M.Yu. Nasonov, Yu.V. Lykov, Do Dyk Chong. // Ugol'. – 2020. – № 2. – С.13–17.
 22. Ruzibaev A. N., Zhuraev D. D., Khasanova Sh. I., Abdiev B. K. et al. Study of wear of bucket teeth of quarry excavators. International scientific review of problems and prospects of modern science and education. LVI International correspondence scientific and practical conference: collection of scientific articles. Boston, USA, 2019. pp. 13–16.
 23. Galata L. A., Ermakov B. S., Kancev R. G., Karzina J. S. The influence of microstructure quality on the efficiency of bucket teeth of career excavators. Key Engineering Materials. 2023. Vol. 941. pp. 107–112.
 24. Solncev, Yu.P. Materialy dlya nizkikh i kriogennykh temperatur. Enciklopedicheskij spravochnik / Yu.P. Solncev, B.S. Ermakov, O.I. Slepcev. – SPb.: Himizdat, 2008. – 768 s.
 25. Solncev, Yu.P. Resurs materialov nizkotemperaturnykh konstrukcij / Yu.P. Solncev, B.S. Ermakov. – SPb.: Himizdat, 2024. – 512 s.
 26. Novikov, I.I. Teoriya termicheskoy obrabotki metallov: Uchebnik dlya vuzov. 4-e izd. / I.I. Novikov. – М.: Metallurgiya, 1986. – 480 s.
 27. Solncev, Yu.P. Hladostojkie stali i splavy / Yu.P. Solncev. – SPb.: Himizdat, 2005. – 480 s.
 28. Korchynsky M. Advanced Metallic Structural Materials and a New Role for Microalloyed-Steels //Material Science Forum, Nov. 2005, V.500-501. P.471-480.
 29. Solncev, Yu.P. Materialovedenie. Uchebnik dlya vuzov / Yu.P. Solncev, E.I. Pryahin. Izd. 7-e. – SPb.: Himizdat, 2020. – 784 s.
 30. Shamonya, V.P. Dolgovechnost' zub'ev kovshej ekskavatorov EKG-8 v usloviyah Noril'ska / V.P. Shamonya, A.I. Mihajlovskij, V.A. Koval'chuk, B.M. Blagih // Gornyj zhurnal. – 1966. – № 7. – С. 53–56.
 31. Chebulaev, V.I. Razrushenie zub'ev moshchnykh karbonyh ekskavatorov i metody ocenki ih hladostojkosti / V.I. Chebulaev // Prochnost' stalej, rabotayushchih v usloviyah nizkikh temperatur: Sb. nauch. tr. – SPb.: LTIHP, 1989. – С. 21-26.
 32. RD 03-606-03. Instrukciya po vizual'nomu i izmeritel'nomu kontrolyu./ М., Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie «Nauchno-tekhnicheskij centr po bezopasnosti promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii», 2004, 100 s.
 33. Nyashina, N.D. Analiz ustojchivosti yacheistogo fronta kristallizatsii i formirovanie struktury zatverdevayushchego rasplava / N.D. Nyashina, P.V. Trusov // Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov. – 1998. – № 6. – С. 66-74.
 34. Flemings, M. Processy zatverdevaniya [per. s angl.] / M. Flemings. – М.: Mir, 1977. – 424 s.
 35. Andreev, A.K. Puti povysheniya resursa i rabotosposobnosti litykh stalej v usloviyah nizkikh temperatur: diss. ... dokt. tekhn. nauk / A.K. Andreev. – SPb.: 2010. 276 s.

Boris Ermakov, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Center for Technological Initiatives. E-mail: ermakov55@bk.ru
Oleg Shvetsov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Center for Technological Initiatives.

E-mail: shvec_off@mail.ru

Sergey Ermakov, Candidate of Technical Sciences, Director of the Center for Technological Initiatives. E-mail: ermakovsb@tyuiu.ru
Yuri Klochkov, Doctor of Technical Sciences, Acting Rector. E-mail: klochkovs@tyuiu.ru