

# КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.878

## Причины ускоренного выхода из строя коронок ковшей экскаваторов при эксплуатации в условиях Арктических регионов



**Б. С. Ермаков,**  
зав. лабораторией ресурса материалов<sup>1</sup>,  
докт. техн. наук, эл. почта:  
ermakov\_bs@spbstu.ru



**С. А. Вологжанина,**  
профессор кафедры материаловедения и технологии художественных изделий<sup>2</sup>,  
докт. техн. наук, эл. почта:  
volozhanina\_sa@pers.spmi.ru



**С. Б. Ермаков,**  
ведущий инженер НТК «Новые материалы и технологии»<sup>1</sup>



**О. В. Швецов,**  
зам. зав. лабораторией ресурса материалов<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук

Горнодобывающая промышленность постепенно перемещается в Арктический регион, характеризующийся вечно- и многолетнемерзлыми грунтами. Эكскавация пород в этих регионах затруднена повышенной прочностью пород за счет ледового смерзания кусков породы после вскрышных работ и требует нового подхода к производству быстросменного инструмента ковшей экскаваторов и погрузчиков. Проведен анализ причин ускоренного выхода из строя коронок ковшей экскаваторов после эксплуатации в зимний период в северных регионах страны. Показано, что основными причинами их ускоренного выхода из строя являются литейные дефекты и недостаточная хладостойкость материала коронок. Горячие литейные трещины и крупные неметаллические включения, являются инициаторами ускоренного разрушения, так как в ходе эксплуатации приводят к развитию усталостных и холодных хрупких трещин. Подтверждена недостаточная для этих регионов хладостойкость применяемых марок сталей и режимов их термической обработки, что приводит к развитию трещин хрупкого разрушения. Установлено, что для повышения работоспособности металла коронок экскаваторов, эксплуатируемых в условиях холодного климата необходимо модифицировать химический состав стали для повышения ее хладостойкости при сохранении уровня прочности и твердости. Определены основные направления модификации состава стали.

**Ключевые слова:** экскавация крепких пород, Арктический регион, коронка ковша экскаватора, литейные дефекты заготовок, механизмы износа рабочих поверхностей, пути модификации химического состава материала.  
**DOI:** 10.17580/chm.2024.09.06

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

### Введение

Горнодобывающая промышленность является одной из наиболее эффективных и экономически рентабельных отраслей Российской Федерации, однако постепенное усложнение условий добычи и переход к менее богатым источникам сырья требуют постоянного внедрения новых

технологий, повышения рентабельности, а следовательно, надежности и долговечности используемого при добыче полезных ископаемых оборудования [1]. Основной тенденцией развития добывающих производств и сопутствующих им строительным работам по обустройству месторождений является интенсивное освоение северных и северо-восточных территорий, расположенных в холодной климатической

зоне — зоне многолетнемерзлых грунтов, под которыми принято понимать грунты, которые находятся в мерзлом состоянии в течение трех и более лет [2]. Согласно работам [3–5], многолетнемерзлые породы и породы в зимний период времени обладают особыми свойствами из-за наличия в них влаги, что при воздействии отрицательных температур приводит к смерзанию грунта и повышению его прочности. Это накладывает особые требования к обеспечению работоспособности и долговечности оборудования, в частности экскаваторов, на долю которых приходится до 40 % общих затрат при открытой разработке [6–8]. Проблема обеспечения надежности основных узлов экскаваторов в условиях их эксплуатации в зоне многолетней мерзлоты была и остается актуальной, так как объем экскавации мерзлых грунтов и пород ежегодно увеличивается на несколько процентов [9, 10]. Работы в этом направлении одновременно ведут по нескольким путям: оценка влияния смерзания пород после буровзрывных работ; анализ эффективности покрытия уступов и бортов карьеров теплоизоляционными материалами, препятствующими смерзанию пород; разработка новых, более эффективных методов экскавации; оптимизация и усовершенствование рабочего органа выемочного оборудования — ковша и его наиболее изнашиваемых элементов — коронок зубьев [11, 12]. Желательно, кроме всего прочего, иметь полную информацию о жизненном цикле изделия, что может быть обеспечено нанесением лазерной маркировки с применением матричных штрихкодов [13].

В настоящее время потребление изготовленных из высоколегированных износостойких сталей коронок зубьев ковша экскаваторов непрерывно растет [14, 15], что объясняется несколькими основными факторами. Во-первых, ростом объема добычи полезных ископаемых в смерзшихся породах труднодоступных регионов Крайнего Севера, отличающихся низкими температурами, достигающими в зимний период –50...–60 °С, что приводит к экстремально жестким условиям эксплуатации выемочно-погрузочной техники, зачастую предназначенной для эксплуатации в умеренно-холодном климате [16–18]. Исследованиями показано, что в условиях экскавации смерзшихся горных пород в зоне многолетней мерзлоты срок

эксплуатации наиболее активно изнашивающихся расходных частей экскаваторов (коронок и зубьев ковшей) снижается до 3–4 сут при среднем сроке их эксплуатации в умеренных широтах до шести и более месяцев [19]. На **рис. 1** приведен внешний вид ковшей карьерных экскаваторов. Во-вторых, нерациональное использование традиционных, широко применяемых в условиях умеренных широт материалов, из которых изготавливают эти элементы [18]. В-третьих, низким качеством изготовления литых коронок и зубьев, в металле которых часто обнаруживают крупные неметаллические включения, горячие и холодные трещины и другие дефекты производства [16, 19, 20]. В-четвертых, несоответствие размеров и геометрических форм коронок и зубьев проектным размерам [21, 22]. Такое неэффективное использование расходных элементов ковша экскаваторов приводит к резкому увеличению расхода металла на их воспроизводство [23–25], технологических и финансовых затрат на изготовление коронок и зубьев, их транспортировку в отдаленные районы Крайнего Севера, монтажно-ремонтные работы и простой техники [26, 27].

Известно несколько путей решения проблемы повышения надежности коронок и зубьев ковша экскаваторов, эксплуатируемых на территориях Крайнего Севера и Арктического региона. Например, некоторые работы посвящены модификации и микролегированию стали Гадфильда — одной из наиболее популярных марок сталей для изготовления коронок и зубьев [15–17]. Кроме того, проводят исследования по разработке и внедрению в промышленность новых износостойких сталей с меньшей концентрацией углерода [9, 10], а также работы по созданию новых технологий литейного производства, позволяющих уменьшить число дефектов литья и снизить уровень остаточных напряжений в отливках. Не менее важны работы по разработке технологий поверхностного упрочнения рабочей части коронки и зуба методами поверхностного упрочнения, например поверхностной закалки, методов обкатки или ультразвуковой обработки, химико-термической обработки [17, 23, 28].

Проводят работы по моделированию геометрической формы и поведения коронки и зуба ковша при экскавации пород различной твердости, моделированию процессов износа и разработке моделей оптимизации конструкции коронок и зубьев [25–27]. Однако основным фактором, определяющим работоспособность коронок и зубьев экскаваторов, является качество металла, из которого они изготовлены. В первую очередь это относится к стабильности микроструктуры литого металла и минимизации литейных дефектов при отливке заготовок [29, 30]. Для обеспечения работоспособности коронок и зубьев в условиях экскавации мерзлых пород необходимо повышение качества литых заготовок, что особо актуально для весьма неравновесных структур отливок зубьев ковша карьерных экскаваторов. Литая сталь зубьев ковша экскаваторов



**Рис. 1.** Внешний вид ковшей карьерных экскаваторов до начала работы (а) и изношенные зубья ковша после эксплуатации (б)

обладает сильной исходной дефектностью в виде микропор, раковин и трещин, высоким уровнем химической неоднородности — ликвициями основных легирующих и примесных элементов, крупными неравноосными первичными зёрнами [31, 32].

Снижение уровня ликвации металла отливок может быть достигнуто путем диффузионного отжига с последующей нормализацией, однако проведение таких операций с массивными литыми деталями весьма затратно и требует значительных временных промежутков и задействования крупногабаритных термических печей, что резко снижает производительность и повышает стоимость единичного изделия. Поэтому в некоторых случаях полноценную термическую обработку отливок заменяют нормализацией. Однако использование нормализации далеко не всегда позволяет устранить такие наследственные литейные дефекты, как наличие зон с повышенным уровнем остаточных напряжений, пограничные участки с искажениями кристаллической решетки, ликвициями и сегрегациями основных легирующих и примесных элементов. Все это приводит к тому, что разрушение литого металла часто происходит по границам первичных литых зёрен и характеризуется малой энергоёмкостью. В работах [29, 32], посвященных ускоренному разрушению коронок и зубьев, показано, что основными очагами разрушений с низким сопротивлением хрупким разрушениям в основном являются такие дефекты литья, как раковины, поры, несплошности и макротрещины, загрязненные примесными элементами и неметаллическими включениями границы зёрен. Образование подобных дефектов связано с неправильно выбранными режимами выплавки стали, некорректно выполненными расчетами литейных форм, не учитывающими геометрические особенности отливки, неверно выбранной или недостаточной термической обработкой, что приводит к неудовлетворительным структурным состояниям металла, не обеспечивая требуемого уровня его механических свойств и износостойкости.

Большая часть современных публикаций, описывающих проблему работоспособности и надежности коронок и зубьев ковшей экскаваторов, в основном посвящена проблемам процесса резания мерзлых грунтов, расчетам формы и размеров режущих частей, проблемам экскавации различных типов грунтов. Работ, посвященных решению проблемы металлургического качества металла коронок и зубьев значительно меньше, и проблемы их металлургического качества освещены недостаточно. Особенно это касается проблем надежности и долговечности коронок и зубьев, изготовленных из среднеуглеродистых (~0,3 %) Si – Mn – Cr – Mo-сталей.

Целью данной работы является определение причин ускоренного разрушения коронок зубьев ковшей экскаваторов в зимний

период в Арктическом регионе, а также анализ влияния химического состава на износостойкость металла коронок и зубьев ковша экскаватора в условиях низких климатических температур.

### Материал и методика исследования

Для анализа причин ускоренного разрушения коронок зубьев ковша экскаватора использовали коронки экскаваторов Cat-390 с ковшом объемом 6 м<sup>3</sup> после длительной эксплуатации на горнодобывающих предприятиях для добычи горных пород установленной крепости III–IV категорий прочности пород по Протодьяконову. Наиболее типичными причинами замены коронок являются отрыв рабочей части зуба коронки и его износ с потерей геометрических размеров рабочей части [29, 33]. При выборе материала для исследования отобрали коронки после эксплуатации в наиболее холодный период с типичными видами преждевременного выхода из строя. Исследованы коронки с видимыми невооруженным взглядом макротрещинами в зоне перехода от массивной рабочей части к зоне крепления коронки на ковше экскаватора и коронки с потерей геометрических размеров рабочей части (рис. 2). По данным, полученным от предприятий, средняя наработка на зуб составляла: при среднемесячной температуре в зимний период –18 °С ~350 моточасов, при среднемесячной температуре –26 °С ~300 моточасов. Для сравнения и анализа механизма износа металла коронки в теплый и холодный периоды года дополнительно отобрали коронку после ее эксплуатации в летний период.

Анализ металла коронок выполнили металлографическими методами на микроскопе Reichert-Jung. Поверхности рабочей части коронок оценивали с помощью растрового электронного микроскопа MIRA3 TESCAN с приставкой микрорентгеноспектрального анализа. Твердость измерили



Рис. 2. Места вырезки образцов зубьев ковшей экскаваторов: а — вид сбоку; б — вид спереди

на твердомере TP5006 № 85, микротвердость — с помощью приставки для микроскопа MICRO-DUROMAT 4000E.

Также рассмотрен вопрос о возможных путях повышения надежности эксплуатации коронок путем модификации состава используемой стали для обеспечения ее работоспособности с учетом хладо- и трещиностойкости в условиях низких температур [28, 34, 35]. Опытные плавки исследуемой стали 25С2Г2ХМТ получили в открытой высокочастотной индукционной печи с основной футеровкой. Температура стали при выпуске из печи составила 1600–1610 °С, температура разливки — около 1550 °С. Химический состав коронок зубьев и опытных плавок определили на эмиссионном спектрометре «Искролайн-100». Отливки подвергали гомогенизационному отжигу при температуре 1100 °С, закалке с температуры 900 °С с охлаждением в масле и последующим отпуском при температуре от 200 до 700 °С с целью получения в опытных плавках значений временного сопротивления в диапазоне от 700 до 1500 МПа. Испытания на износ провели по методике, описанной в работе [34].

### Результаты исследования и их обсуждение

Визуально-измерительный анализ поверхности разрушенной коронки показал, что поверхность макротрещины, по которой происходит отрыв рабочей части, представляет собой суперпозицию трех видов трещин: горячая трещина, возникшая в процессе кристаллизации отливки (от 5 до 8 % от общей длины трещины); усталостная трещина, развившаяся на базе дефекта литья, и хрупкий долом. Длина усталостной части трещины небольшая и не превышает 10–15 % общей протяженности макродефекта, а 75–80 % длины трещины приходится на зону хрупкого долома, что может указывать на недостаточный уровень хладостойкости стали.

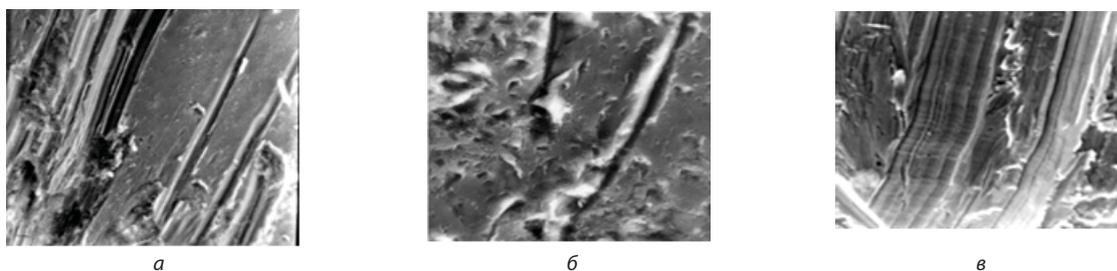
Оценка геометрических размеров коронок, выведенных из эксплуатации по причине значительного уменьшения длины рабочей части, позволила утверждать, что изменение форморазмеров коронки связано с процессом абразивного изнашивания. Поэтому на первом этапе исследований определен механизм износа коронок, который характеризуется изменением вида поверхности рабочей части коронки. Это приводит к снижению их производительности на 20–30 % из-за увеличения усилия резания пород почти в 2 раза, а ежегодные расходы, связанные с заменой изношенных рабочих органов, составляют от 1 до 5 % стоимости всей машины [21–23]. Известно [27, 29, 32], что наиболее опасным механизмом

износа является микрорезание, которое представляет собой отделение материала путем образования микростружки, формирующейся в результате однократного воздействия абразивной частицы. Кроме микрорезания, существует еще два часто встречающихся механизма износа: царапание — образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при взаимодействии твердых частиц и пластическое оттеснение.

Фрактографический анализ поверхностей коронок позволил определить, что в данном случае присутствуют все три механизма износа (рис. 3), причем в процессе изнашивания рабочих поверхностей коронок наблюдалось хрупкое выкрашивание микрообъемов металла. Следы скола хрупких микрочастиц «лунок скола» отчетливо видны на всех трех фотографиях. Показано, что при понижении температуры эксплуатации и повышении твердости металла коронки доля скола микрочастиц увеличивается, а пластического оттеснения снижается. Так, если после эксплуатации в летние месяцы были обнаружены только единичные следы хрупкого скола микрочастиц, в основном около крупных неметаллических включений и у берегов трещин, то в зимние месяцы следы хрупкого скола микрочастиц с поверхностей коронок выявляются повсеместно, что указывает на низкотемпературное охрупчивание материала и его недостаточную хладостойкость.

Металлографическим анализом вырезов из коронок зубьев карьерных экскаваторов установлено наличие в металле многочисленных дефектов. В основном они представлены окисленными порами, трещинами различных механизмов образования и размеров и крупными неметаллическими включениями. Показано, что макротрещины, приведшие к ускоренному разрушению коронок, представляют собой сложное образование, состоящее из исходной горячей трещины, образовавшейся при кристаллизации отливки и развившейся на ее основе усталостной трещины. Анализ химического состава [30] берегов горячей и холодной части трещины (рис. 4) и сопоставление полученного результата с составом основного металла (таблица) позволил установить, что в металле за пределами трещины основными химическими элементами являются железо, кремний, хром и марганец, полностью соответствуя химическому составу стали; в берегах горячей трещины обнаружены значительно повышенные концентрации алюминия, магния, кремния, серы и кальция.

Определенные в берегах трещины в ходе микроспектрального анализа стехиометрические соотношения этих элементов и кислорода позволяют утверждать, что поверхности горячей



**Рис. 3.** Механизмы износа коронок: а — микрорезание: на исследуемой поверхности отчетливо видны стружки металла; б — оттеснение (видны гребни металла) и царапание; в — совместное воздействие механизмов микрорезания и царапания

**Средний химический состав исследованных зон металла коронки, % (мас.)**

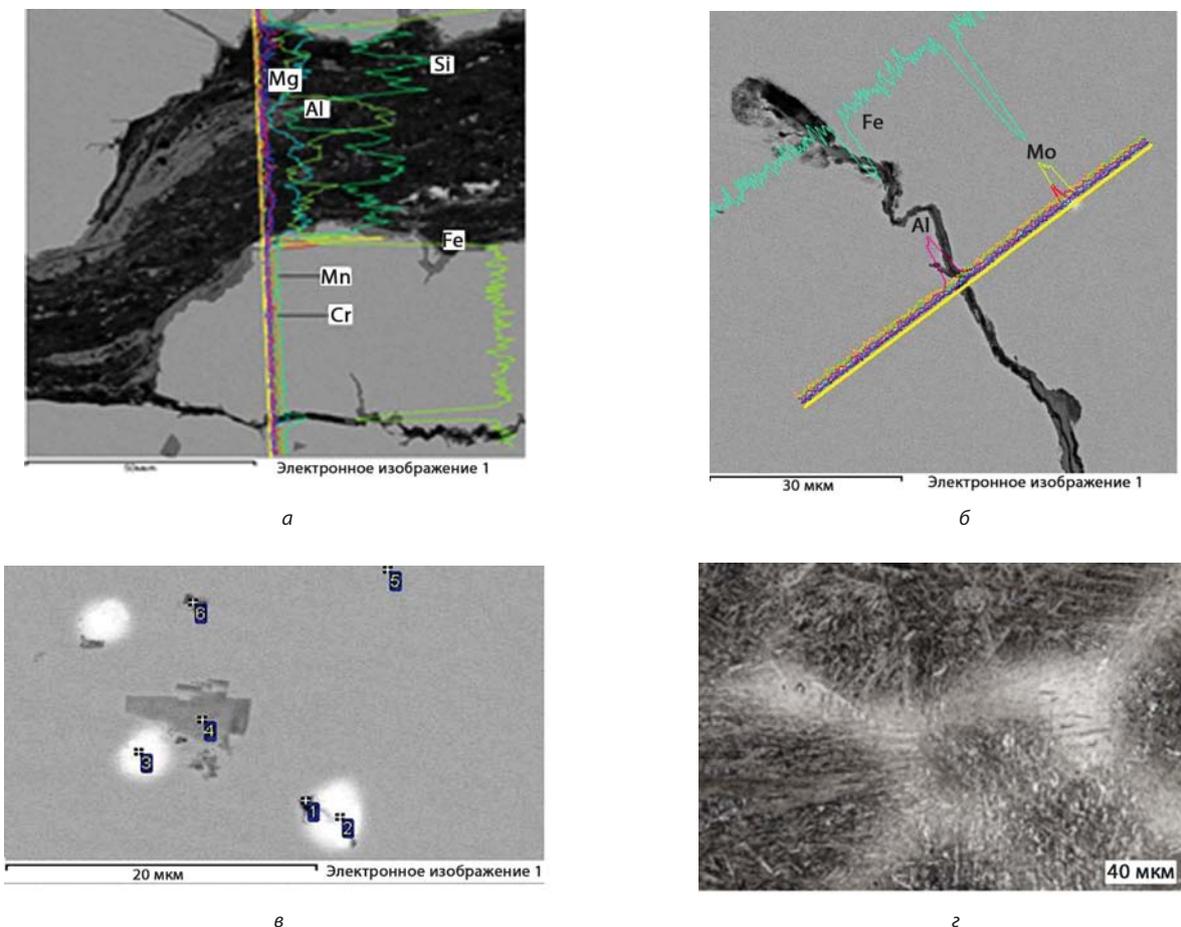
Зона исследования	Элемент											
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	Al	Mg	S	O	P	Fe
Металл коронок*	0,314	2,31	1,56	0,54	0,33	0,035	0,019	0,031	0,0028	–	0,024	Ост.
Боковая поверхность трещины**	0,272	2,27	1,52	0,43	0,04	–	0,011	0,006	0,0093	–	0,024	Ост.
Неметаллическое включение***	0,008	11,54	0,03	0,09	7,96	8,33	12,17	4,17	7,53	48,17	0,024	Ост.

\* Состав определен на эмиссионном спектрометре; \*\* химический состав твердого раствора на боковой поверхности (берегу) трещины в зоне усталостного механизма развития, определен методом микрорентгеноспектрального анализа; \*\*\* химический состав неметаллического включения на примере включения № 4 (см. рис. 1, в)

трещины представляют собой оксидные и оксисульфидные пленки, характерные для первичных плавоочных неметаллических включений. Таким образом, подтвердили, что исходные трещины в металле коронок возникают в процессе кристаллизации отливки [28, 31]. Химический состав берегов холодной трещины (усталостной зоны) практически полностью соответствует химическому составу стали (см. таблицу), что подтверждает процессы развития этой трещины в холодном состоянии. Особое внимание привлекает тот факт, что в твердом растворе стали практически полностью отсутствуют молибден (0,04 % при среднем содержании в стали 0,33 %) и титан, которые призваны повышать стойкость металла против горячих трещин,

препятствовать образованию ликваций и сегрегаций примесных атомов, в первую очередь атомов фосфора. Как показали результаты исследований крупных неметаллических включений (см. рис. 4, в), эти элементы практически полностью находятся в связанном виде, оседая на частицах оксисульфидов Ca – Mg – Al.

Микроструктура металла коронки представлена структурой отпущенного мартенсита с отчетливо видимыми следами литой дендритной структуры (см. рис. 4, з), которые, в зависимости от концентрации в них примесных элементов, отличаются по степени травимости, условно можно выделить светлые и темные зоны. Определено, что твердость металла



**Рис. 4.** Трещины и микроструктура металла коронки: а — область горячей трещины; б — область холодной трещины; в — типичное неметаллическое включение в твердом растворе стали; з — структура металла рабочей части коронки у передней поверхности

светлых и темных зон отличается и составляет 53–57 и 58–62 HRC соответственно. При этом твердость в разных зонах рабочей части коронки может отличаться на 3–6 ед., что было отмечено ранее авторами работ [21, 29]. Однако, согласно данным других исследователей, значения этих величин отмечаются чрезмерно высоким уровнем твердости. Например, в работе [28] показано, что чрезмерное увеличение твердости оборудования, эксплуатируемого в зимние месяцы в условиях северных широт, не может обеспечить рост износостойкости. Вероятно, это связано с тем, что чрезмерное повышение твердости может приводить к охрупчиванию материала и выкрашиванию из поверхностей отдельных микрообъемов металла. Исследование механических свойств металла коронок при комнатной температуре показало следующие результаты: временное сопротивление металла рабочей части коронок находилось в пределах 1500–1650 МПа, предел текучести — 1450–1490 МПа, относительное удлинение не превышало 4–6 %. Ударная вязкость при температуре 20 °С составляла 19–22 Дж/см<sup>2</sup>, а при –40 °С резко падала до значений 2–6 Дж/см<sup>2</sup>.

Таким образом, основными причинами преждевременного выхода из строя инструмента чаще всего являются литейные дефекты, связанные с невысоким качеством отливок, что требует уточнения технологии разлива стали с учетом параметров кристаллизации и охлаждения отливки в литейной форме. Показано, что существующая марка стали не полностью соответствует требованиям к материалу коронок в исполнении ХЛ 1 (ГОСТ 15150–69 [36]) по показателям хладостойкости и трещиностойкости. Поэтому в рамках данной работы предпринята попытка определенной модификации стали с целью повышения уровня ее хладостойкости.

Выполненный в ходе исследований анализ нормативно-технической документации не позволяет однозначно ответить на вопрос об оптимальном соотношении твердости, прочности, пластичности и ударной вязкости металла коронок, эксплуатируемых в Арктическом регионе. Поэтому при выборе условий модификации в основном использовали информацию из научно-практических исследований отечественных и зарубежных авторов и опыта эксплуатации коронок ковшей экскаваторов. Проведенный анализ позволил выбрать общее направление предполагаемой модификации. Для ее исполнения в опытных плавках дополнительно ввели никель в концентрации 0,6–1,5 % и до 0,33–0,35 % повысили концентрацию углерода. Уточнение режима термической обработки опытных плавок, позволяющего обеспечить удовлетворительный уровень хладо- и трещиностойкости, выполнили путем изменения температуры отпуска полученных заготовок и оценки их ударной вязкости и износостойкости.

Установлено, что с повышением температуры отпуска с 200 °С (временное сопротивление  $\sigma_b = 1350 \div 1500$  МПа) до 700 °С ( $\sigma_b = 700 \div 850$  МПа) происходит постепенное смещение механизма износа металла опытных плавок от хрупкого скалывания микрочастиц с поверхности испытуемого образца к его пластическому деформированию. Увеличение концентрации никеля до 1,5 % позволяет замедлить процесс хрупкого разрушения, а повышение концентрации углерода до 0,35 % несколько повышает твердость и прочностные свойства стали, практически не сказываясь на ее хладостойкости.

В результате предварительных исследований получили опытные образцы стали, которые показали удовлетворительное сочетание износо- и хладостойкости. Так, ударная вязкость металла при температуре –40 °С составила от 15 до 20 Дж/см<sup>2</sup>, а унос массы (износ) опытного образца после испытаний в среде охлажденных до –40 °С горных пород III–IV категорий прочности по шкале Протоdjяконова снизился за счет уменьшения скорости скалывания микрочастиц при микрорезании и царапании, по отношению к образцам, вырезанным из исследуемых коронок, на 7–11 %.

Показано, что уменьшение температуры отпуска опытных образцов с 700 до 200 °С не приводит к выявлению линейной зависимости между твердостью и износостойкостью материала, а имеет более сложный характер из-за изменения механизма изнашивания и разрушения образца. Так, если в диапазоне значений твердости от 35 до 48–50 HRC рост твердости и повышение износостойкости действительно растут линейно, то при превышении этой твердости рост износостойкости постепенно затухает из-за появления эффекта хрупкого выкрашивания микрочастиц с поверхности образца при испытаниях.

## Заключение

В ходе проведенных исследований установлено следующее.

1. Основными причинами ускоренного выхода из строя коронок ковшей экскаваторов, эксплуатируемых в условиях Арктических и северных регионов РФ в зоне холодного климата, являются литейные дефекты — горячие литейные трещины и крупные неметаллические включения, на базе которых в ходе эксплуатации развиваются как усталостные, так и хрупкие трещины, и неполное соответствие применяемых для этих регионов марок сталей и режимов их термической обработки.

2. Анализ поверхностей рабочих частей коронок вышедших из строя после низкотемпературной эксплуатации, выявил наличие в них всех основных механизмов износа — микрорезания, царапания и пластического оттеснения, причем с повышением твердости металла коронок и понижением температуры их эксплуатации на рабочих поверхностях изношенных коронок увеличивается доля «лунок» — следов хрупкого скола микрочастиц и уменьшается объем следов пластического оттеснения.

3. Показано, что для повышения работоспособности металла коронок экскаваторов, эксплуатируемых в условиях холодного климата, необходимо провести модификацию химического состава стали, направленную на повышение ее хладостойкости при сохранении уровня прочности и твердости, что может быть реализовано совместным введением в состав стали никеля и дополнительного количества углерода. ЧМ

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00713, <https://rscf.ru/project/24-29-00713/>.**

Библиографический список

См. англ. блок

"Chernye metally", 2024, No. 9, pp. 37–43  
DOI: 10.17580/chm.2024.09.06

Causes of accelerated failure of excavator bucket teeth crowns when operating in Arctic regions

Information about authors

**B. S. Ermakov**, Dr. Eng., Head of the Materials Resource Laboratory<sup>1</sup>,  
e-mail: ermakov\_bs@spbstu.ru;

**S. A. Vologzhanina**, Dr. Eng., Prof., Dept. of Materials Science and Technology of Art Products<sup>2</sup>,  
e-mail: vologzhanina\_sa@pers.spmi.ru;

**S. B. Ermakov**, Leading Engineer of the Scientific and Technical Complex "New Materials and Technologies"<sup>1</sup>

**O. V. Shvetsov**, Cand. Eng., Deputy Head of the Materials Resource Laboratory<sup>1</sup>  
1 Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.

2 Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

**Abstract:** The mining industry is gradually moving to the Arctic region characterized by permafrost and permafrost soils. Excavation of rocks in these regions is hampered by increased rock strength due to ice freezing of rock pieces after stripping works and requires a new approach to the production of quick-change tools for excavator and loader buckets. The paper analyzes the causes of accelerated failure of excavator bucket crowns after operation in winter in the northern regions of the country; it is shown that the main causes of their accelerated failure are casting defects and insufficient cold resistance of crown material. Hot foundry cracks and large non-metallic inclusions are the initiators of accelerated failure, fatigue cracks and cold brittle cracks develop on their basis during operation. Insufficient cold resistance of steel grades used for these regions and their heat treatment modes have been confirmed, which leads to the development of brittle fracture cracks. It is established that in order to increase the serviceability of excavator crown metal operating in cold climate conditions it is necessary to modify the chemical composition of steel aimed at increasing its cold resistance while maintaining the level of strength and hardness, the main directions of steel composition modification are determined.

**Key words:** excavation of hard rocks in cold climates, excavator bucket crown, structural defects of workpieces, mechanisms of wear of working surfaces, ways of modification of the chemical composition of the material.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00713, <https://rscf.ru/project/24-29-00713/>.

References

1. Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Naumov I. A. et al. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. pp. 95–111.
2. Litvinenko V. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development. *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. Iss. 3. 125652. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125652.
3. Vakulin A. A. Fundamentals of Geocryology. Tyumen : TomGU, 2011. 220 p.
4. Alkova E. L., Panishev S. V., Maksimov M. S. Evaluation of the relative excavation difficulty index of blasted massif in permafrost zone conditions. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2020. No. 11. pp. 32–38.
5. Meshkov A. A., Kazanin O. I., Sidorenko A. A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the Kuzbass mines. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 249, Iss. 5. pp. 342–350. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3.
6. Avdeev A. N., Bolotnev A. Yu., Unagaev E. I. Distribution of stresses in the basic units of quarry excavators and brittle failures of structures. *Vestnik IrGTU*. 2009. No. 2 (38).
7. Panishev S. V., Alkova E. L., Maksimov M. S. On the assessment of the excavation difficulty index for a freezing blasted rock mass. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019. No. 3. pp. 31–36. DOI: 10.15372/FTPRP120190304.
8. Sokolov I. S. Methodology for determining the strength properties of frozen soils by static probing: thesis of inauguration of Dissertation ... of Doctor of Engineering Sciences. Moscow, 2020. 23 p.
9. Zubov V. P., Phuc L. Q. Development of resource-saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the quang ninh coal basin mines). *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 795–806. DOI: 10.31897/PMI.2022.72.
10. Efimov V. M., Kravtsova O. N., Stepanov A. V., Timofeev A. V. et al. Study of the influence of surfactants on the strength of frozen soils in the permafrost zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Arktika i Antarktika*. 2017. No. 4. pp. 80–85.
11. 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. Vol. 253, Iss. 1. pp. 41–48. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.
12. Yue Zhao, Abbas Taheri, Murat Karakus, Zhongwei Chen et al. Effects of water content, water type and temperature on the rheological behaviour of slag-cement and flyash-cement paste backfill. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020. Vol. 30, Iss. 3. pp. 271–278.

13. Petkova A. P., Ganzulenko O. Yu. Laser marking of non-ferrous metal and alloy products using ultradense barcodes: process features. *Tsvetnye metally*. 2022. No. 7. pp. 92–97.
14. Bolobov V. I., Batalov A. P., Lykov Yu. V., Bochkov V. S. On the feasibility of manufacturing excavator bucket teeth from 110G13L steel. *Development of mineral resources of the North: challenges and solutions: Transactions*, 2012. pp. 319–322.
15. Kolokoltsev V. M., Vdovin K. N., Chernov V. P., Feoktistov N. A. et al. Study of the mechanisms of abrasive and impact-abrasive wear of high-manganese steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2017. Vol. 15. No. 2. pp. 54–62.
16. Jie Li, Lijue Xu, Yu Feng, Shubo Wu et al. Hardening mechanism of high manganese steel during impact abrasive wear. *Engineering Failure Analysis*. 2023. Vol. 154. 107716. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107716.
17. Slepsov O. I., Kuzmin V. R., Larionov V. P. et al. Cold resistance of materials and structural elements: Results and prospects. Novosibirsk : Nauka, 2005. 290 p.
18. Miladinov M., Sedmak S., Djordjevic B., Sedmak A. et al. Repairing of cracks on tooth gear ring of a bucket-wheel excavator. *Procedia Structural Integrity*. 2023. Vol. 48. pp. 27–32. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.106.
19. Bolobov V. I., Akhmerov E. V., Rakitin I. V. Influence of the type of rock on the patterns of wear of the tooth crown of an excavator bucket *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2022. No. 6–2. pp. 189–204.
20. Petrović A., Momčilović N., Sedmak S. Reliability-based structural analysis of a bucket wheel excavator's load-bearing steel structure. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 42. pp. 236–243. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.029.
21. Prysazhnyuk P., Ivanov O., Matvienkiv O., Marynenko S. et al. Impact and abrasion wear resistance of the hardfacings based on high-manganese steel reinforced with multicomponent carbides of Ti-Nb-Mo-V-C system. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. pp. 130–136. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.014.
22. Olt J., Maksarov V., Efimov A. Improving the quality of critical tractor parts through the dynamic stabilisation of the manufacturing process in regard to CNC machines. *Agronomy Research*. 2019. Vol. 17. pp. 1146–1154. DOI: 10.15159/AR.19.060.
23. 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.
24. Rusiński E., Cegiel L., Michalczyk A., Moczko P. et al. Investigation and modernization of buckets of surface mining machines. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 90. pp. 29–37. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.02.009.
25. 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.
26. Nasonov M. Yu., Lykov Yu. V., Chong D. D. Research of resource and durability of metal structures of excavators after service life expiration. *Ugol*. 2020. No. 2. pp. 13–17.
27. 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. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.07.257.
28. 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. Vol. 530–531. 204979. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204979.
29. 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. XVI International correspondence scientific and practical conference: collection of scientific articles. Boston, USA, 2019*. pp. 13–16.
30. Kazakov A. A., Lyubochko D. A., Ryaboshuk S. V., Chigintsev L. S. Study of the nature of non-metallic inclusions in steel using an automatic particle analyzer. *Chernye Metally*. 2014. No. 4. pp. 37–41.
31. 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.
32. Fernández J. E., Vijande R., Tucho R., Rodríguez J. et al. Materials selection to excavator teeth in mining industry. *Wear*. 2001. Vol. 250. Iss. 1–12. pp. 11–18. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00624-X.
33. Barret Ch. S. Massalsky T. Structure of Metals: translated from English. Moscow : Metallurgiya, 1984. 685 p.
34. Kolokoltsev V. M., Vdovin K. N., Sinitsky E. V., Feoktistov N. A. Assessment of operational durability and modeling of manufacturing technology of the casting "excavator bucket tooth". *Vestnik MGU imeni G. I. Nosova*. 2015. No. 4. pp. 61–64.
35. Zuev B. Y., Zubov V. P., Fedorov A. S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Mining*. 2019. Vol. 1. pp. 8–12.
36. GOST 15150–69. Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic aspects influence. Introduced: 01.01.1971.