

На правах рукописи

Громыка Дмитрий Сергеевич



**РАЗРАБОТКА РЕГЛАМЕНТА ПРОВЕДЕНИЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РАБОЧЕГО
ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРОВ ПРИ
ЛИКВИДАЦИИ ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ БУРОГО УГЛЯ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Гоголинский Кирилл Валерьевич

Официальные оппоненты:

Лагунова Юлия Андреевна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра горных машин и комплексов, заведующий кафедрой.

Иов Иван Алексеевич

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра горных машин и электромеханических систем, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **18 сентября 2023 г. в 10:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 18 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Открытая добыча бурого угля на таких разрезах, как Коркинский, Харанорский, осложнена процессами самовозгорания угля. Для ведения работ по добыче, отвалообразованию и ликвидации очагов эндогенного горения угля применяются гидравлические экскаваторы. В подобных условиях наблюдается интенсивное изнашивание ковша и коронок зубьев ковшей экскаваторов, при этом срок эксплуатации коронок значительно меньше, чем на других буроугольных разрезах. Особенностью работы в условиях горения бурых углей является дополнительное циклическое воздействие высоких температур, возникающее при экскавации горящего угля, что приводит к образованию трещин в поверхностном слое деталей рабочего оборудования при циклических механических и температурных нагрузках, при этом наиболее нагруженным узлом экскаватора являются коронки зубьев ковша.

Техническое обслуживание элементов рабочего оборудования на большинстве предприятий в настоящее время осуществляется по простой схеме планового обслуживания, предполагающей применение мероприятий по техническому обслуживанию через заранее определенные промежутки времени, без технического диагностирования. Такой подход ведет к увеличению продолжительности простоя экскаваторов и их технического обслуживания и, как следствие, росту эксплуатационных затрат. Для повышения эффективности технического обслуживания необходимо проводить периодический контроль технического состояния рабочего оборудования экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, и на его основе переходить к стратегии технического обслуживания по текущему состоянию.

В настоящее время в горнопромышленной отрасли развивается тенденция пересмотра общепринятой стратегии технического обслуживания с планового на обслуживание по текущему состоянию техники. Многие производители горной техники внедряют техническую диагностику и оценку остаточного ресурса деталей машин в число мероприятий при сервисном обслуживании техники и составляют план обслуживания и ремонта на основе результатов диагностирования.

Однако, на сегодняшний день не решены вопросы оценки текущего состояния и остаточного ресурса деталей рабочего оборудования горных машин, работающих в условиях повышенных эксплуатационных температур. Существующие методы технического диагностирования не в состоянии в полной мере оценить остаточный ресурс деталей и закономерность его расходования при раннем диагностировании дефектов.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросами изучения изменения свойств поверхностного слоя в результате процессов циклического термического и механического воздействия, а также оценки остаточного ресурса исполнительного оборудования занимались такие ученые, как Авдеева Е.С., Кузнецова В.Н., Болобов В.И., Исагулов А.З., Квон С.С., Куликов В.Ю. и другие. Изучением закономерности влияния высоких температур на интенсивность изнашивания в настоящее время занимаются такие ученые как Артемьев А.А., Богданович П.Н., Chaus A.S., Grzesik W. и другие. Описание явления термической усталости для различных конструкционных сталей встречается у Ясния П.В., Chang L. и Konat L. Практика использования метода конечных элементов для оценки напряжений, возникающих на поверхностном слое коронок при циклических механических и термических нагрузках,

описана у Тургунбаева М.С., Yuan Z. и Regassa Y. Описание математических моделей для расчета механики деформации твердого тела встречается у Dhar S., Jafarian H.R., Bhattacharyya S., Hasan Md. S. и Rittel Z.,

Однако не в полной мере решены вопросы оценки состояния коронок зубьев ковшей экскаваторов, в частности, по величине твердости и показателя дефектности поверхностного слоя, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности** по пункту 16 «Техническое обслуживание и ремонт горных машин и оборудования с учетом специфики горно-геологических и горнотехнических условий их эксплуатации» направления исследований специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины.

Объектом исследования является процесс изнашивания поверхностного слоя коронки зуба экскаватора, работающего в условиях эндогенного горения угольных пластов.

Предмет исследования – взаимосвязь результатов, получаемых методами неразрушающего контроля, с состоянием и остаточным ресурсом коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов.

Целью исследования является повышение эффективности эксплуатации экскаваторов при ликвидации очагов горения бурого угля путем разработки регламента проведения технического обслуживания, основанного на диагностировании изменения твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов.

Идея исследования заключается в определении предельного состояния поверхностного слоя коронок зубьев

ковшей экскаваторов по величине интенсивности изнашивания поверхностного слоя, обусловленного критическим накоплением поверхностных дефектов при их работе в абразивной перегретой среде очага горения бурого угля.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести теоретические исследования процесса высокотемпературного изнашивания и изменения физико-механических и геометрических параметров поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов при их эксплуатации в условиях эндогенного горения угольных пластов.

2. Разработать численную модель контакта коронки зуба ковша экскаватора и массива угля для определения величины напряжений, возникающих в поверхностном слое коронки при различных циклических термических и механических нагрузках.

3. Предложить и обосновать виды и методы неразрушающего контроля физико-механических и геометрических свойств поверхностного слоя коронок, позволяющие оценить техническое состояние и остаточный ресурс коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов.

4. Провести экспериментальные исследования по выявлению закономерности изменения твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов от величины их наработки при эксплуатации в условиях эндогенного горения угольных пластов.

5. Разработать методику определения остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов по результатам диагностирования твердости и показателя дефектности поверхностного слоя.

6. Разработать регламент технического обслуживания рабочего оборудования экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, с помощью внедрения разработанной методики оценки текущего состояния.

Научная новизна работы:

1. Разработана численная модель взаимодействия коронки зуба ковша гидравлического экскаватора Komatsu PC400LC-7 с угольным пластом, подверженным эндогенному горению, позволяющая оценить величину напряжений и деформаций коронки при различных циклических механических и термических нагрузках, а также оценить число циклов экскавации до наступления предельного состояния коронки.

2. Экспериментально установлено, что твердость и показатель дефектности поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов возрастают в области формирования наклепанного слоя по мере эксплуатации коронок в условиях высокотемпературного угольного массива с 440 до 490 НВ и с 50 до 750 мкм соответственно, и их совместное определение может быть использовано в качестве комплексного диагностического критерия остаточного ресурса коронок.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обоснована возможность повышения эффективности технического обслуживания рабочего оборудования экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, путем оценки остаточного ресурса и диагностированию срока наступления предельного состояния по результатам мониторинга твердости и показателя дефектности поверхностного слоя рабочего оборудования.

2. Разработаны рекомендации по совершенствованию системы технического обслуживания экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, на основании внедрения методики оценки

остаточного ресурса коронок зубьев ковшей, за основу которой взят комплексный параметр, включающий значения твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок.

3. Результаты исследования внедрены в производственный процесс на предприятии ООО «Эковит» с получением акта внедрения от 05.08.2022.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач был применен комплексный метод исследований, включающий анализ и обобщение научно-технической информации, теоретические и экспериментальные методы исследования, методы численного моделирования, а также методы математической статистики для обработки результатов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Изменение технического состояния коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, характеризуется текущими значениями и динамикой изменения твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок в области формирования наклепанного слоя, расположенной в средней части поверхности коронки, в диапазоне от 440 до 490 НВ и от 50 до 750 мкм соответственно.

2. Разработанная методика оценки технического состояния коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, использующая в качестве диагностических параметров изменение твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок, позволяет определять текущее состояние коронок зубьев ковшей экскаваторов, а также оценивать их остаточный ресурс с целью коррекции плана-графика замены коронок в рамках мероприятий по техническому обслуживанию.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность научных положений, выводов и заключений подтверждается применением стандартизованных методов неразрушающего контроля, получением статистически значимых экспериментальных результатов, удовлетворительным совпадением экспериментальных результатов с теоретическими исследованиями и результатами численного моделирования.

Апробация результатов. Основные положения, выводы и заключения работы докладывались на Всероссийской (национальной) научной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования. актуальные проблемы и достижения», Санкт-Петербург, 11 декабря 2020 г.; Научной конференции студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение», Санкт-Петербург, 09-26 марта 2021 г.; XIX Всероссийском конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург, 12-16 апреля 2021 г.; VIII Международной научно-практической конференции «IPDME-2021», Санкт-Петербург, 13-15 апреля 2021 г.; 79-ой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Магнитогорск, 19-23 апреля 2021 г.; XXXIII Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», Екатеринбург, 19-20 апреля 2022 г.; Научной конференции студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение», Санкт-Петербург, 21 апреля 2022 г.

Личный вклад автора: проведены обзорные исследования методик оценки остаточного ресурса элементов рабочего оборудования экскаваторов; построена численная модель на основе метода конечных элементов для оценки усталостного ресурса коронок зубьев экскаваторов при

циклических термических и механических нагрузках; проведены работы по измерению твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в Коркинском разрезе; разработана методика оценки остаточного ресурса исполнительного оборудования экскаваторов по изменению твердости и показателя дефектности поверхности; сформулированы рекомендации по повышению эффективности технического обслуживания рабочего оборудования экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов; участие в подготовке публикаций по теме исследования.

Публикации результатов диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 4-х печатных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в том числе в 2-х статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее - Перечень ВАК), в 2-х статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 133 наименования и 6 приложений. Диссертация изложена на 119 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 9 таблиц и 28 формул.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости

исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлено описание геотехнологии ликвидации очагов горения бурого угля. Приведен обзор видов рабочего оборудования экскаваторов и основных стратегий технического обслуживания. Приведены результаты обзора механизмов изнашивания металлических поверхностей, а также рассмотрена физика процессов ударно-абразивного изнашивания и термической усталости и их влияние на изменение свойств поверхностного слоя рабочего оборудования.

Во второй главе разработана численная модель, служащая для оценки напряженно-деформированного состояния рабочего оборудования при различных термических и механических нагрузках, а также для оценки ресурса при многократных циклах нагружения.

В третьей главе диссертации приведен обзор видов и методов неразрушающего контроля твердости, геометрических и физико-механических свойств поверхностного слоя коронок. В главе описана методика и результаты экспериментальных диагностических исследований твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в Коркинском разрезе на операциях по ликвидации очагов эндогенного горения бурого угля.

В четвертой главе диссертации приведен проект методики оценки остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов по изменению диагностических параметров в виде твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок в области формирования наклепа, и на основе методики разработан регламент технического обслуживания рабочего оборудования экскаваторов при ликвидации очагов горения бурого угля.

Основные результаты работы отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Изменение технического состояния коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, характеризуется текущими значениями и динамикой изменения твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок в области формирования наклепанного слоя, расположенной в средней части поверхности коронки, в диапазоне от 440 до 490 НВ и от 50 до 750 мкм соответственно.

Проведенные обзорные исследования показали, что в результате ударно-абразивного изнашивания и термической усталости происходит поверхностное пластическое деформирование коронки, сопровождающееся образованием наклепанного слоя и образованием трещин усталости.

Оценка напряженно-деформированного состояния коронки проводилась методом численного моделирования в ПО LS-Dyna и Ansys Mechanical. При моделировании решались следующие задачи:

1. Расчет теплообмена между зубом и углем в течение одного рабочего цикла работы экскаватора;

2. Определение напряжений и деформаций поверхностного слоя при совместных термических и механических нагрузках;

3. Расчет числа усталостных циклов до наступления предельного состояния зуба;

Расчет числа усталостных циклов проводился на основе модели малоциклового усталости Coffin-Manson-Basquin, использующее выражение, которое связывает амплитуду деформации и число усталостных циклов (1):

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{a,e}$ – амплитуда упругой деформации; $\varepsilon_{a,p}$ – амплитуда пластичной деформации; σ_f' – коэффициент предела выносливости, Па; E – модуль упругости, Па; N_f – число циклов до разрушения; b – экспонента предела выносливости; ε_f' – коэффициент предела текучести; c – экспонента предела текучести.

По результатам численного моделирования была построена зависимость между усилием копания и усталостной долговечностью для различных значений градиента температуры, приведенная на рисунке 1.

Показано, что циклические термические нагрузки значительно снижают усталостную долговечность коронки.

Для оценки изменения свойств поверхности коронок при изнашивании были проведены экспериментальные работы на базе Коркинского разреза. На основе обзора видов и методов неразрушающего контроля свойств поверхностного слоя коронок было обосновано, что оценка изменения геометрических и физико-механических свойств может производиться путем контроля твердости и показателя дефектности – комплексного показателя, характеризующего количество и глубину поверхностных трещин на участке поверхности, учитывающего изменение относительной магнитной проницаемости металла поверхностного слоя коронки при наклепе. Сделан вывод, что контроль твердости необходимо проводить портативными твердомерами с преобразователем, реализующим динамический метод Либа, а для контроля показателя дефектности – портативными вихретоковыми дефектоскопами.

Экспериментальные исследования проводились на трех гидравлических экскаваторах Komatsu PC400LC-7 с разным сроком эксплуатации коронок.

Измерение твердости поверхностного слоя коронок зубьев проводилось по равномерной сетке (рисунок 2).

Вихретоковая дефектоскопия проводилась по аналогичной сетке. В ходе исследований преобразователь перемещался по поверхности коронки, отстройка нуля дефектоскопа проводилась на обратной стороне коронки.

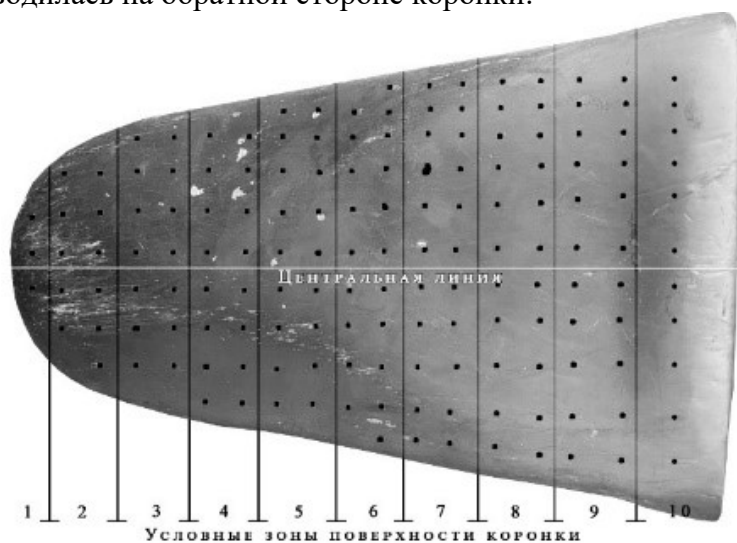


Рисунок 2 – Вид сверху изношенной коронки с размеченной сеткой измерений, а также указанием условных зон с 1 (острие) по 10 (задняя часть), по которым проводился расчет усредненных значений твердости поверхности

Результаты исследования твердости приведены на рисунке 3, результаты вихретоковой дефектоскопии – на рисунке 4.

Результаты диагностических исследований показали, что в процессе эксплуатации коронка зуба подвергается ударно-абразивному изнашиванию и тепловому воздействию, что приводит к образованию наклепа и к увеличению твердости поверхности во всех частях коронки. В ходе эксплуатации коронок поверхностная твердость и показатель дефектности поверхностного слоя в наибольшей степени

изменяются в зоне максимального наклепа (зоны 2-4 на рисунке 2) коронок; в других же областях поверхности коронки изменение твердости и показателя дефектности не настолько показательны.

Сделан вывод, что изменение технического состояния коронок характеризуется изменением твердости и показателя дефектности поверхностного слоя, измеренных в области максимального наклепа, в диапазоне от 440 до 490 НВ и от 50 до 750 мкм соответственно.

2. Разработанная методика оценки технического состояния коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, использующая в качестве диагностических параметров изменение твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок, позволяет определять текущее состояние коронок зубьев ковшей экскаваторов, а также оценивать их остаточный ресурс с целью коррекции плана-графика замены коронок в рамках мероприятий по техническому обслуживанию.

По результатам экспериментального исследования была обнаружена зависимость между сроком эксплуатации коронок и показателями состояния поверхностного слоя в виде твердости и показателя дефектности. Для определения критериев диагностирования состояния и оценки ресурса были сопоставлены графики изменения твердости и показателя дефектности в зоне максимального наклепа (рисунок 5).

Было обнаружено, что в качестве диагностических параметров состояния коронки зуба можно установить твердость и показатель дефектности поверхности в зоне максимального наклепа. Диагностическими критериями остаточного ресурса являются значения твердости и показателя дефектности, соответствующих границе областей роста диагностических параметров (по рисунку 5).

Если полученный предельный срок эксплуатации T_n принять за величину предельной наработки коронки, тогда величину остаточного ресурса можно выразить как остаточный срок эксплуатации (остаточную наработку до предела). Количественно величина остаточного ресурса коронки N (в %) определяется соотношением (2):

$$N = \left(1 - \frac{T}{T_n}\right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где T – срок эксплуатации коронки, соответствующий границам изменения роста диагностических параметров

Тогда, по формуле 2, можно выделить четыре показателя остаточного ресурса: N_0 – начало эксплуатации коронки (100% ресурс), N_1 – образование наклепанного слоя (75% ресурс), N_2 – повышение скорости роста показателя дефектности при неизменном росте твердости (25% ресурс) и N_n – предельное состояние (0% ресурс).

Для условий Коркинского разреза диагностические критерии в виде значений твердости и показателя дефектности наступления определенной степени изнашивания приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Диагностические критерии для определения остаточного ресурса коронок в условиях Коркинского разреза

Остаточный ресурс, %	Диагностический критерий	
	Значение твердости по Бринеллю, НВ	Значение показателя дефектности, мкм
N_0 (100 %)	450	50
N_1 (75 %)	470	400
N_2 (25 %)	480	550
N_n (0 %)	495	750

Оценка остаточного ресурса по предложенной методике включает предварительное исследование тенденций роста диагностических параметров для конкретных условий

эксплуатации коронок, а также техническое диагностирование остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в аналогичных условиях, на основе полученного графика диагностической кривой.

На этапе предварительного исследования проводятся периодические измерения диагностических параметров на нескольких коронках на протяжении всего жизненного цикла от начала эксплуатации до достижения предельного состояния. Периодические измерения рекомендуется проводить во время планового техобслуживания через каждые 100 и 250 моточасов. Далее, на основе полученного массива данных, строятся графики изменения диагностических параметров от времени эксплуатации коронок, производится анализ тенденций изменения диагностических параметров с выявлением характерных областей, а также определяются значения диагностических критериев, выносимые в таблицу, по которой для других коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в аналогичных условиях, возможно определение технического состояния и остаточного ресурса.

Техническое диагностирование остаточного ресурса коронок зубьев экскаваторов, проводится путем измерения диагностических параметров в области максимального наклепа, сравнения полученных средних значений твердости и показателя дефектности со значениями на построенном ранее графике диагностической кривой, и оценки остаточного ресурса. На основе полученных значений остаточного ресурса коронок выносятся рекомендации о необходимости технического обслуживания ковшей экскаваторов.

Таким образом, периодичность технического обслуживания ковшей, а также замена коронок, определяется на основе текущего состояния коронок.

Результатом успешного внедрения данной методики в схемы технического обслуживания является повышение

эффективности работы экскаваторов в подобных условиях за счет увеличения их работоспособности, достигаемого путем своевременной замены коронок ковшей экскаваторов, и, таким образом, уменьшения продолжительности периода работы ковшей экскаваторов, коронки которых достигли предельного состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Проведенный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований выявил, что на поверхности коронок зубьев экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, происходит поверхностное пластическое деформирование коронки, сопровождающееся образованием наклепанного слоя, а также образование поверхностных усталостных трещин в результате циклических термических воздействий.

2. Разработанная численная модель контакта коронки зуба с массивом угля позволила оценить, что при рассчитанном усилии на коронку в 240 кН величина механического напряжения возрастает с 245 МПа до 445 МПа при увеличении термического градиента с 0 до 160 К, при этом усталостная долговечность коронки падает в 10 раз.

3. По результатам теоретических исследований обнаружено, что техническое состояние коронок зубьев ковшей экскаваторов может быть охарактеризовано по изменению твердости методами твердомерии с использованием динамического твердомера Либа по типу D и показателю дефектности с использованием вихретокового дефектоскопа, работающего на частотах возбуждения около 100 кГц с размером рабочей зоны преобразователя более 10 мм.

4. На основании результатов измерений твердости и показателя дефектности в процессе технического диагностирования поверхностного слоя коронок в области формирования наклепа были определены зависимости значений этих диагностических параметров от срока эксплуатации и установлено их соответствие остаточному ресурсу коронки, при этом твердость изменяется в диапазоне от 450 НВ до 490 НВ, а показатель дефектности возрастает с 50 мкм до 750 мкм.

5. На основании результатов экспериментального исследования разработана методика определения остаточного ресурса, заключающаяся в проведении периодических измерений твердости и показателя дефектности в области формирования максимального наклепа, составления графика диагностической кривой, определения участков с разной скоростью роста диагностических параметров, выявления величин диагностических критериев остаточного ресурса.

6. Внедрение разработанной методики в систему технического обслуживания позволяет повысить эффективность работы экскаваторов путем своевременного применения мероприятий по техническому обслуживанию.

7. Предложена процедура внедрения системы технического обслуживания экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, по текущему состоянию на основе технического диагностирования остаточного ресурса по разработанной методике.

8. К перспективным направлениям дальнейших исследований в области развития системы технического обслуживания по текущему состоянию рабочего оборудования экскаваторов, работающих в условиях горения бурых углей, относится усовершенствование разработанной методики для ее применения при оценке состояния ковшей экскаваторов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Громыка, Д.С.** Моделирование термической усталости зуба экскаватора при циклическом тепловом воздействии / **Д.С. Громыка**, К.В. Гоголинский, Э.А. Кремчеев // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 2 (154). – С. 23-29.
2. **Громыка, Д.С.** Обзор методов оценки механизмов изнашивания исполнительных органов горных машин / **Д.С. Громыка**, Т.Г. Утенкова, О.Ю. Короткова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 2. – С. 75-86.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Gogolinskiy, K.V. A modelling of cyclic thermal and impact loads on excavator bucket / K.V. Gogolinskiy, **D.S. Gromyka**, E.A. Kremcheev // International review of mechanical engineering. – 2021. – Vol. 15. – No 4. – P. 189-196.
4. **Gromyka, D.S.** Method of state and residual resource assessment of excavator bucket tooth caps / **D.S. Gromyka**, K.V. Gogolinskiy // Russian Journal of Nondestructive Testing – 2022. – Vol. 58. – No 5. – P. 381-390.

Патент:

5. Патент № 2795665 Российская Федерация, МПК G01M 13/00 (2006.01), G01M 15/05 (2006.01). Способ определения остаточного ресурса деталей машин. Заявка № 2022119549. Дата приоритета: 18.07.2022. Дата регистрации: 05.05.2023. Авторы: **Д.С. Громыка**, К.В. Гоголинский, Ю.Д. Смирнов, Э.А. Кремчеев. Заявитель: СПГУ. – 9 с.

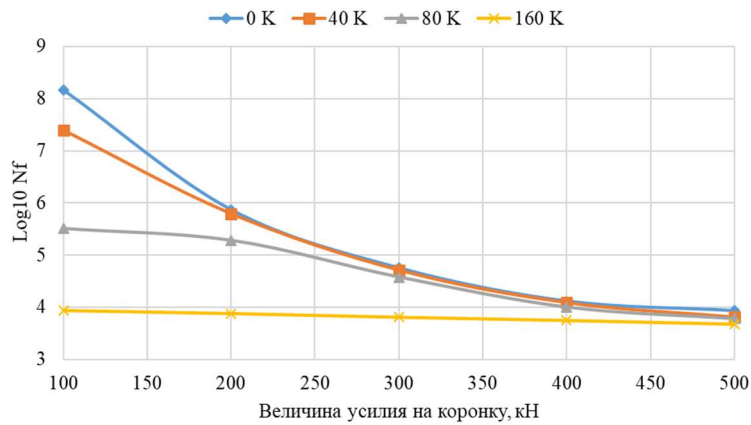


Рисунок 1 – График зависимости усталостной долговечности ($\log_{10} N_f$) зуба от разных значений механических и термических нагрузок

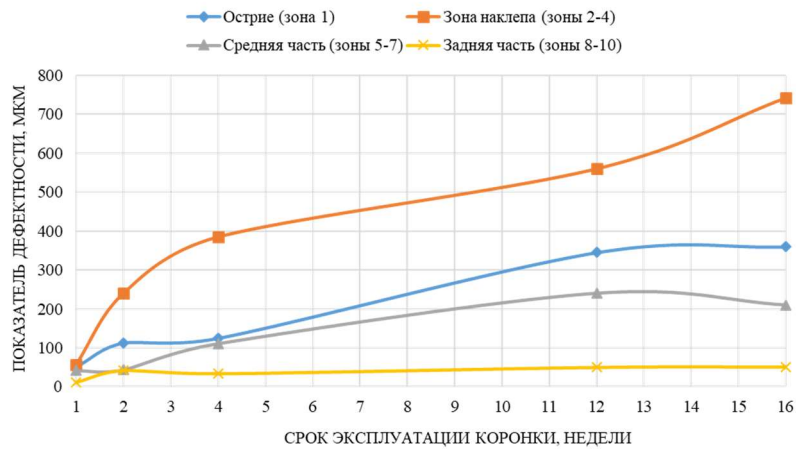


Рисунок 4 – Результаты замеров средней глубины дефектов поверхности коронки в зависимости от срока эксплуатации

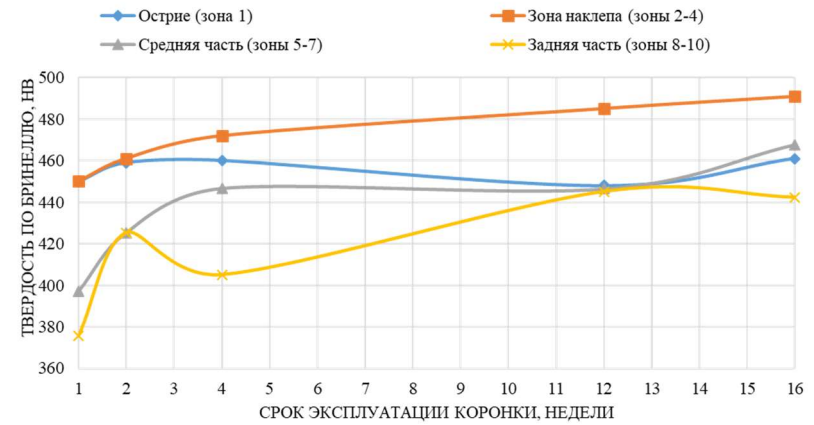


Рисунок 3 – Результаты замеров изменения твердости различных частей коронки в зависимости от срока эксплуатации

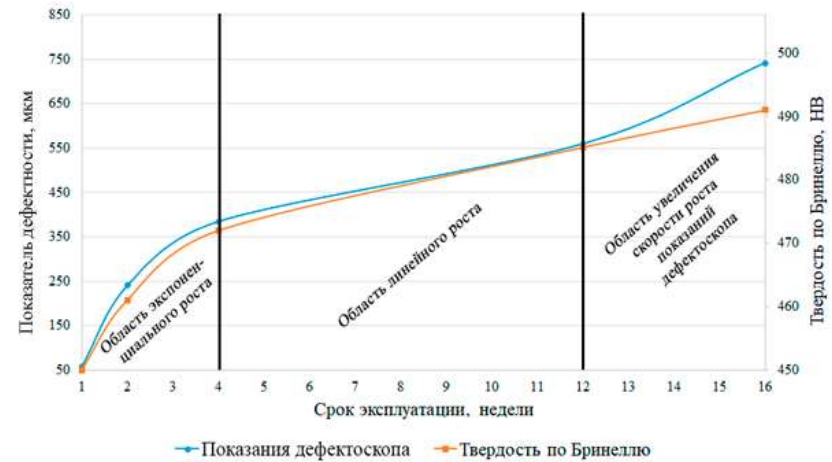


Рисунок 5 – Сравнение роста твердости и показателя дефектности в зоне наклепа коронки с разным сроком эксплуатации