

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Гоголинский К.В.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ТЕХНОЛОГИЯ ЛИКВИДАЦИИ ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ БУРОГО УГЛЯ.....	11
1.1 Особенности условий месторождений при ликвидации очагов горения бурого угля.....	11
1.1.1 Образование очага горения бурого угля.....	12
1.1.2 Основные месторождения бурого угля, подверженного самовозгоранию.....	13
1.2 Основные производственные процессы при ликвидации очагов горения бурого угля.....	14
1.3 Мероприятия по восстановлению ресурса рабочего оборудования экскаваторов	17
1.3.1 Виды стратегий технического обслуживания.....	17
1.3.2 Методы технического диагностирования	19
1.4 Разрушение и изнашивание рабочего оборудования экскаваторов при ликвидации очагов горения бурого угля	22
1.4.1 Основные виды и механизмы изнашивания рабочего оборудования экскаваторов.....	23
1.4.2 Особенности изнашивания рабочего оборудования при высокотемпературных условиях	26
1.5 Изменение и оценка свойств поверхностного слоя при высокотемпературном изнашивании.....	27
1.6 Оценка остаточного ресурса по изменению свойств поверхностного слоя	29
1.7 Выводы по главе 1	31
ГЛАВА 2 ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ	33
2.1 Методика теоретического расчета	33
2.2 Математические основы процесса изнашивания	34
2.2.1 Расчет уравнения теплового баланса и параметров теплообмена	34
2.2.2 Расчет поля нагрузок	35
2.2.3 Моделирование усталостных циклов	37
2.3 Расчет напряжения и деформации при различных термических и механических нагрузках на коронку зуба.....	39
2.3.1 Определение начальных условий модели и построение конечноэлементной сетки	40
2.3.2 Расчет контактного давления при взаимодействии коронки с массивом угля.....	42

2.3.3	Расчет напряжений и деформаций при механической нагрузке.....	45
2.3.4	Расчет уравнения теплового баланса и термической нагрузки.....	46
2.4	Расчет усталостного ресурса при циклических ударных и термических нагрузках как оценочного критерия остаточного ресурса	48
2.5	Выводы по главе 2	50
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОРОНОК ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ ЭКСКАВАТОРОВ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТА С ГОРЯЩИМ ГРУНТОМ.....		
3.1	Выбор методов и средств контроля твердости.....	51
3.1.1	Обзор методов проведения испытаний на твердость.....	52
3.1.2	Обоснование выбора портативного твердомера с преобразователем на основе динамического метода Либа для контроля твердости поверхностного слоя коронок.....	56
3.1.3	Выбор средства измерения твердости по методу Либа	59
3.2	Выбор методов и средств контроля физико-механических и геометрических параметров поверхностного слоя коронок	60
3.2.1	Анализ применимости методов НК параметров поверхностного слоя коронок.....	60
3.2.2	Обоснование применимости вихретокового вида (ВТ) НК для оценки физико-механических и геометрических параметров поверхностного слоя коронок.....	67
3.2.3	Выбор средств ВТ контроля параметров поверхностного слоя коронок.....	71
3.3	Методика проведения экспериментальных работ	72
3.4	Экспериментальные исследования показателя дефектности поверхностного слоя коронок.....	74
3.5	Экспериментальные исследования твердости поверхностного слоя коронок	76
3.6	Комплексный анализ результатов экспериментального исследования свойств поверхностного слоя коронок	78
3.7	Выводы по главе 3	80
ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОРОНОК В РАМКАХ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ		
4.1	Методика оценки текущего состояния и определения остаточного ресурса коронок	82
4.2	Процедура технического диагностирования по предложенной методике.....	85

4.3	Рекомендации по внедрению предложенной методики.....	89
4.4	Выводы по главе 4	93
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	94
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	96
	ПРИЛОЖЕНИЕ А БЛОК-СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	108
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б ТРЕХМЕРНЫЕ КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ НА КОРОНКУ	109
	ПРИЛОЖЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	110
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г МИКРОСНИМКИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗНОШЕННОЙ КОРОНКИ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ.....	111
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	117
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ ПАТЕНТА НА ИЗОБРЕТЕНИЕ ..	119

ВВЕДЕНИЕ

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 О.В., 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 (Приложение Д).

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 следующих мероприятиях:

Всероссийская (национальная) научная конференция «Фундаментальные и прикладные исследования. Актуальные проблемы и достижения», Санкт-Петербург, 11 декабря 2020 г.

Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение», Санкт-Петербург, 09-26 марта 2021 г.

XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург, 12-16 апреля 2021 г.

VIII Международная научно-практическая конференция «IPDME-2021», Санкт-Петербург, 13-15 апреля 2021 г.

79-ая Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования», Магнитогорск, 19-23 апреля 2021 г.

XXXIII Уральская конференция «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)», Екатеринбург, 19-20 апреля 2022 г.

Научная конференция 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 печатных работах (пункты списка литературы № 21, 22, 96, 100), 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, 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.

ГЛАВА 1 ТЕХНОЛОГИЯ ЛИКВИДАЦИИ ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ БУРОГО УГЛЯ

Для России характерно значительное участие угля в топливно-энергетическом балансе. Так, в 1990 году добыто около 385 млн. т угля, в 2000 году объем добычи составил 257 млн. т, а к 2019 – более 420 млн. т [39].

Запасы угля для открытой разработки в России велики, при этом большая часть их часть находится в восточной части России. Так, по состоянию на 2017 год, запасы угля составляют около 274 млрд тонн, при этом в отработке находится 111 млрд. тонн. На территории России расположены 5 из 7 крупнейших угольных бассейнов мира: Ленский, Тунгусский, Таймырский, Канско-Ачинский и Кузнецкий. Большая часть запаса углей составляется бурыми углями (53%), далее – каменные угли (43%) и все остальные категории. Около 40% каменных углей России пригодны для коксования и расположены в Кузнецком и Донецком бассейнах.

С целью промышленного пользования, угли обычно принято подразделять на марки и технологические группы, в основу классификации положена характеристика термических эффектов при сгорании углей. Так, бурые угли в данной классификации занимают низшую позицию, с минимальной теплотой сгорания в 6900-7500 ккал/кг и с наименьшим содержанием углерода, равным 76% и менее.

1.1 Особенности условий месторождений при ликвидации очагов горения бурого угля

Угольные месторождения, по сравнению с большинством месторождений других полезных ископаемых, имеют свои особенности, определяющие специфику ведения основных производственных процессов при их разработке. К основным таким особенностям относятся [50]:

- Относительная выдержанность элементов залегания угольных пластов, наличие четких контактов между углем и вмещающими породами.
- Малая прочность угля и вскрышных пород, в результате чего для их экскавации применяют драглайны и экскаваторы различных видов, с меньшим объемом буровзрывных работ.
- Большая площадь и протяженность большинства месторождений, что способствует увеличению фронта работ.
- На большинство угольных месторождений отмечаются сложные геологические и гидрогеологические условия, что также усложняет их разработку.
- Уголь, также, как и торф, относится к породам, склонным к самовозгоранию, при этом склонность к самовозгоранию чем выше, тем ниже степень метаморфизма угля. Таким образом, среди всех марок углей наиболее склонны к самовозгоранию именно бурые угли.

1.1.1 Образование очага горения бурого угля

Результатам многих исследований [31, 36, 63, 68] показывают, что существует множество факторов эндогенного горения бурого угля, которые принято разделять на природные и горнотехнические. Основным природным фактором является химическая активность угля к кислороду, а факторы, влияющие на данный параметр, в свою очередь делят на интенсивные (зольность, влажность, теплопроводность, содержание пирита и др.) и экстенсивные (толщина пласта, горное давление и др.). К горнотехническим факторам относят скорость отработки, способ управления кровлей и т.д. [63]. Однако для каждого конкретного месторождения число таких факторов, равно как и количественная оценка степени их влияния на эндогенную пожароопасность, различно.

Процесс самовозгорания разделяют на три стадии: низкотемпературное окисление, самонагревание и самовозгорание. Описание данного процесса на примере штабеля угля представлено на рисунке 1.1.

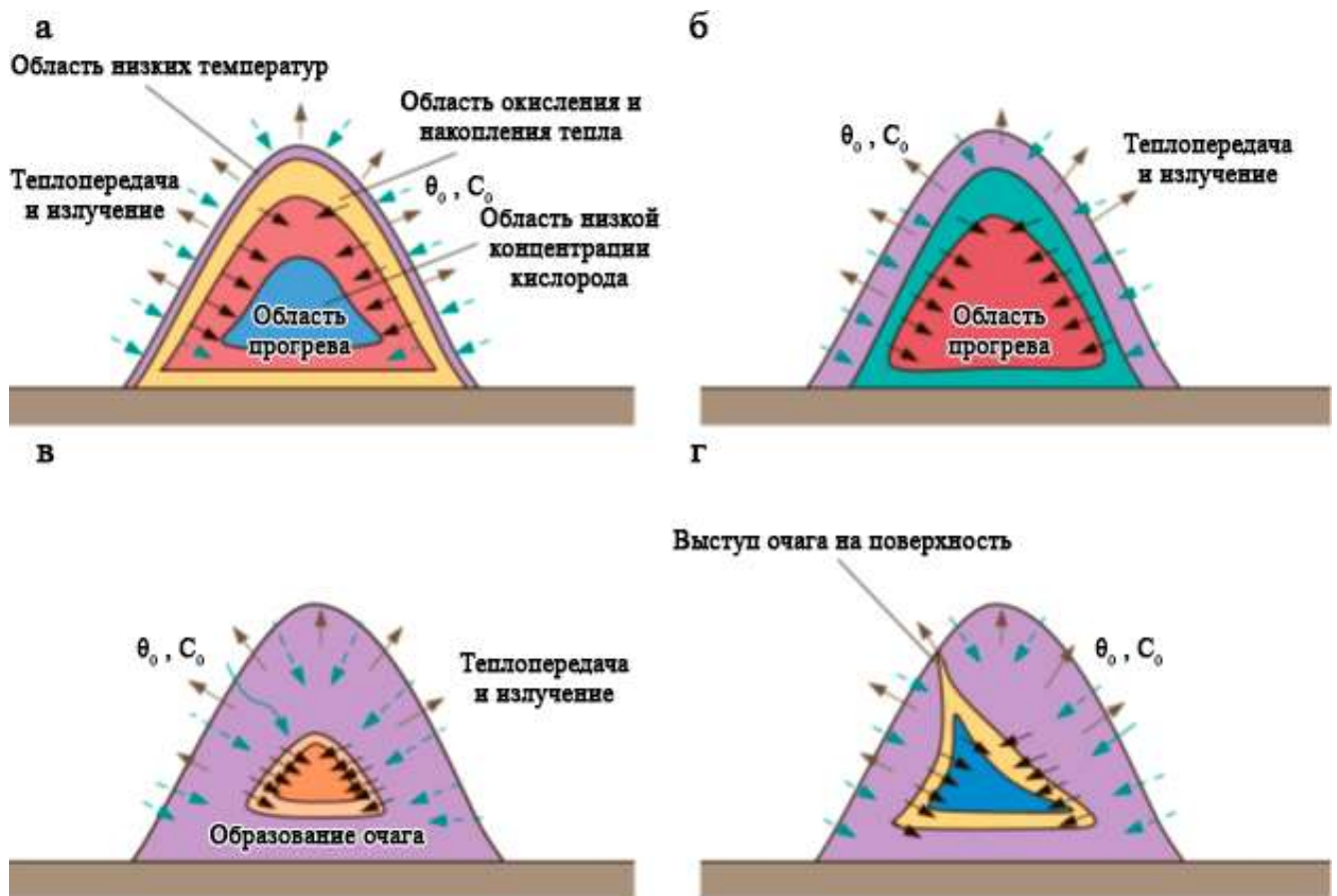


Рисунок 1.1 – Схематическое представление процессам самовозгорания на примере штабеля угля [120]

Движение кислорода и воздуха по поверхности штабеля вызывает окисление, которое нагревает уголь (рисунок 1.1а). Это тепло передается как внутрь, так и наружу (рисунок 1.1б), но тепло, которое распространяется внутрь, может накапливаться внутри штабеля и приводить

к образованию высокотемпературной горячей точки (рисунок 1.1в). Затем эта горячая точка будет продолжать распространяться до тех пор, пока не достигнет точки на поверхности. Здесь он будет взаимодействовать с кислородом воздуха, и это может привести к образованию тлеющих углей и фактическому возгоранию угля в штабеле (рисунок 1.1г). Продолжительность фазы самонагрева определяется отрезком времени, за который температура очага изменится с начальной до предельной (критической), при достижении которой процесс самонагрева приобретает необратимый характер и начинается фаза самовозгорания.

1.1.2 Основные месторождения бурого угля, подверженного самовозгоранию

На территории России функционирует множество крупных месторождений бурого угля, таких как Канско-Ачинский бассейн, Челябинский бассейн, а также месторождения Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока. На данных месторождениях ведется добыча угля открытым способом, многие из угольных разрезов месторождений относят к опасным по склонности к самовозгоранию, и на многих разрезах функционируют очаги самовозгорания. Так, все ныне функционирующие разрезы Канско-Ачинского бассейна – Назаровский, Березовский-1 и Бородинский – относятся к опасным по самовозгоранию [7], при этом на разрезе Березовский-1 имеются большие площади горелых пластов – около 2,6 км² [17]. На месторождениях Урала, Сибири и Дальнего Востока проблема самовозгорания возникает на разрезах Ахейский [78], Харанорский [18, 61], Холбольджинский [61], Кангаласский [74], Батурицкий [39]. Как можно отметить, случаи образования и обнаружения очагов зафиксированы на разрезах, расположенных в самых различных природных поясах: от криолитозоны, на примере Кангаласского разреза, до Европейской части России, как в случае с Батурицким разрезом. За пределами России также расположено множество разрезов опасных по самовозгоранию, таких как разрез Алмалык в Киргизии [70], разрезы Донецкого бассейна [52], разрезы Монголии, среди которых наиболее опасными являются угли Шарынгольского, Баганурского и Талбулагского месторождений [6]. Случаи самовозгорания бурого угля также часто встречаются при транспортировке и хранении в штабелях, зафиксировано множество случаев взрывов и возгораний при перевозке углей на ж/д путях [42]. Одним из самых опасных и известных разрезов по самовозгоранию является Коркинский разрез, на котором до 2018 года велась добыча бурого угля Челябинского бассейна, однако в связи со сложными горно-геологическими условиями в виде частых оползневых явлений, а также множества очагов эндогенного горения, некоторые из которых существуют уже на протяжении более 50 лет, было принято решение прекратить эксплуатацию объекта. На данный момент право пользования недрами было отдано компании ООО «Промрекультивация» для ведения работ по рекультивации объекта. В рамках проекта по рекультивации планировалось в срок до 2022 года

завершить первый этап рекультивации, включающий ликвидацию очагов эндогенного горения на разрезе, однако по ситуации на сегодняшний день, намечаются серьезные отставания в календарном плане проекта рекультивации, связанные с возникшими сложностями при ликвидации очагов. По проекту, ликвидация очагов производится путем вскрытия очага экскаваторами и последующей засыпкой очага инертной глинистой породой, однако ввиду сложного расположения очагов, многие из которых находятся в оползневой зоне, подход техники к очагам сильно затруднен. Так, по состоянию на 2022 год многие из очагов еще не ликвидированы. На данный момент на разрезе функционируют 3 очага самовозгорания, расположенных в оползневых районах южного и западного бортов разреза. Температура поверхности очагов горения угля достигает 100-150 °С [56] и увеличивается по мере разработки очага до 300-400 °С [130].

Таким образом, можно отметить, что процесс самовозгорания угля встречается на многих месторождениях, при этом особенно опасны по данному критерию месторождения бурого угля. На многих буроугольных разрезах, таких как Коркинский, Харанорский, разрезы Канско-Ачинского бассейна, самовозгорание угля и образование очагов горения является одной из главных проблем и серьезно затрудняет эксплуатацию данных объектов.

1.2 Основные производственные процессы при ликвидации очагов горения бурого угля

Методика тушения и ликвидации очагов горения природных отвалов, используемая также и при ликвидации очагов горения бурого угля, регламентирована Приказом Ростехнадзора № 738 от 23.12.2011. Основными мероприятиями для тушения очагов горения являются:

- обработка очагов горения антипирогенами (известковый раствор), что значительно снижает пожароопасность очага горения;
- изоляция очага горения путем засыпки инертной массой (глинистым материалом);
- снижение температуры очага горения путем охлаждения водой, проведения обводных каналов и их направление в очаг горения, отвод ливневых вод в очаг.

На примере многолетнего опыта тушения эндогенных пожаров на угольном разрезе «Коркинский», можно сделать вывод, что наиболее эффективным способом локализации очагов является их изолирование инертными породами, то есть прекращение доступа кислорода, играющего главную роль в окислительных процессах. В качестве инертных пород чаще всего применяются рыхлые вскрышные породы.

Ликвидации очагов горения бурого угля путем изолирования очагов осуществляется в три этапа. На этом этапе выполняется выемка инертных вскрышных пород с последующей

засыпкой очагов горения угля. Выемку инертных вскрышных пород и засыпку ими очагов выполняют чаще всего с применением комплекса оборудования, состоящим из экскаватора типа с рабочим оборудованием типа «обратная лопата» с ковшем вместимостью, бульдозеров и автосамосвалов.

На втором этапе ликвидации очагов осуществляется тщательный мониторинг состояния пожароопасных зон. Задача мониторинга состоит в своевременном выявлении признаков возникновения эндогенных пожаров, осуществляемого посредством термических съемок поверхностей пожароопасных зон. Результаты температурных съемок заносят в журнал регистрации температуры пожароопасной зоны. Участок относится к категории горящих, если на нем имеется, хотя бы один очаг горения с температурой пород на глубине до 2,5 м более 80°C.

Третий этап ликвидации предусматривается при обнаружении повторных признаков возникновения эндогенных пожаров, обнаруженных в результате мониторинга. В случае обнаружения очага на данном этапе предусматривается его тушение с применением специальных средств, например, применяемой на Коркинском разрезе глинистой суспензии, состоящей из глины и воды в соотношении 1:5.

В качестве средств механизации работ применяются различные классы горных машин, такие как:

- выемочно-погрузочные машины;
- транспортные машины;
- выемочно-транспортирующие машины;
- машины для подготовки горных пород к выемке;
- сортировочно-обоганительное оборудование;
- отвалообразующие машины;
- машины для вспомогательных работ;
- оборудование для механизации спускоподъемных операций и очистки скважин.

Для непосредственной выемки горящего угля при ликвидации очагов используется техника из класса выемочно-погрузочных машин, такая как одноковшовые экскаваторы.

Группа одноковшовых экскаваторов включает в себя драглайны и лопаты, разделяемые на вскрышные и карьерные, к последним относятся механические, гидравлические и карьерно-строительные. На угольных месторождениях, разрабатываемых открытым способом, для работ по ликвидации очагов эндогенного горения, применяют механические и гидравлические карьерные экскаваторы. Наиболее часто встречающимся видом рабочего оборудования карьерных экскаваторов является прямая или обратная лопаты.

Конструкция гидравлического экскаватора типа прямая лопата с поворотным ковшом представлена на рисунке 1.2.

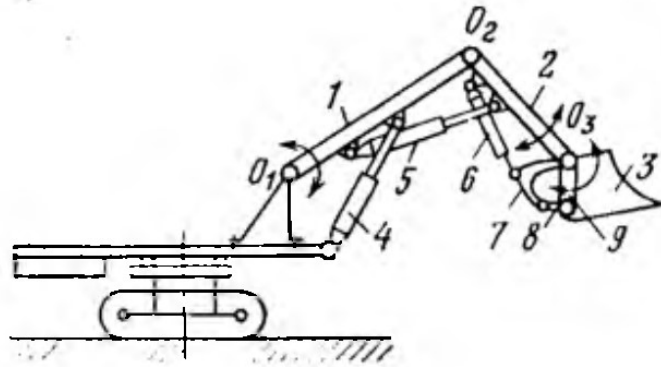


Рисунок 1.2 – Гидравлический экскаватор типа прямая лопата [50]

1 – стрела; 2 – рукоять; 3 – ковш, 4, 5, 6 – гидравлические цилиндры подъема-опускания стрелы, напора рукояти и поворота ковша соответственно; 7 – угловая тяга; 8 – тяга ковша; 9 – задняя стенка ковша; O_1 , O_2 , O_3 – шарниры.

Под исполнительным оборудованием понимается комплекс узлов экскаватора, обеспечивающий работоспособность в зоне контакта с объектом внешней среды. К такому оборудованию относятся сменные рабочие органы, стрела и система подвески стрелы.

Конструкция ковша прямой гидравлической лопаты представлена на рисунке 1.3б. Ковши, разгружающиеся опрокидыванием (рис. 1.3а), используют на обратных и некоторых прямых гидравлических лопатах, а также фронтальных погрузчиках.

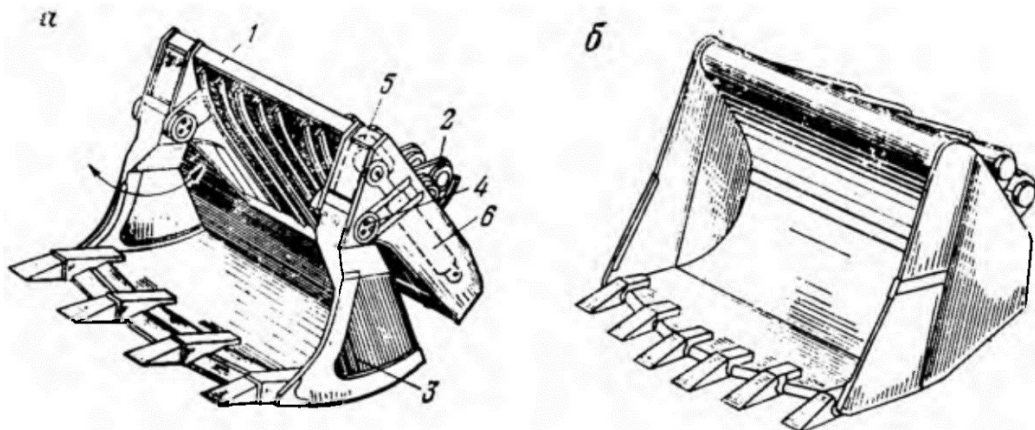


Рисунок 1.3 – Ковши прямой гидравлической лопаты (б) и с механизмом опрокидывания (а) [50]

1 – задняя стенка ковша; 2, 5 – шарниры; 3 – челюсть ковша; 4 – рычаги 6 – гидроцилиндры

Передняя стенка отливается из специальной высокомарганцовистой стали, задняя - из углеродистой стали. Обе стенки соединены стыковым сварным швом и образуют корпус ковша. Верхний и нижний пояса передней стенки наплавляются твердым сплавом, что позволяет значительно повысить срок их службы. Зубья ковшей делаются цельнолитыми или со сменными наконечниками (коронками). Большинство современных гидравлических

экскаваторов оборудованы ковшами с зубьями со сменными коронками. Большинство сменных зубьев или коронок советских экскаваторов изготавливались из высокомарганцевистой стали 100Г13Л, современные сменные коронки зачастую изготовлены из стали Hardox. В результате затупления, при максимальном износе, сопротивление резанию зубьев увеличивается на 25 %, соответственно при затуплении зуба на 1° сопротивление грунтов резанию увеличивается на 0,6 %, и, как следствие, возрастает нагрузка, действующая на рабочее оборудование ковша экскаватора [38].

1.3 Мероприятия по восстановлению ресурса рабочего оборудования экскаваторов

Для поддержания работоспособности экскаваторов необходимо проводить операции по восстановлению ресурса рабочего оборудования, для чего на предприятиях функционируют система технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Система ТОиР на предприятии включает совокупность положений и норм, определяющих основные мероприятия и организацию работ по поддержанию и восстановлению работоспособности оборудования для определенных условий эксплуатации с целью достижения предусмотренных нормативными документами показателей качества.

1.3.1 Виды стратегий технического обслуживания

В настоящее время система ТОиР регламентирована государственными стандартами (ГОСТы 18322-78, 20831-79, ГОСТ 18322-2016, 27.002-2015, 21623-76, 22952-78, 23660-79) не охватывающими, однако, всех областей и условий эксплуатации экскаваторов, поэтому зачастую те или иные мероприятия системы ТОиР различаются на разных предприятиях в зависимости от особенностей техники и условий эксплуатации [16]. Основными стратегиями технического обслуживания на большинстве зарубежных и отечественных предприятиях являются [81, 103]:

- обслуживание по факту отказа детали;
- предупредительное (плановое) обслуживание, также известное как система планово-предупредительных ремонтов (ППР);
- обслуживание по текущему состоянию.

На большинстве предприятий основным видом технического обслуживания является система ППР, предполагающая проведение через определенные промежутки времени текущих, средних и капитальных ремонтов [99].

Система ППР включает в себя ряд мероприятий, основные из которых – это межремонтное техническое обслуживание различных видов: ежесменное, ежесуточное, ежемесячное и сезонное. Помимо технического обслуживания ППР предусматривает

проведение планового ремонта - текущего и капитального. Ежемесянное техническое обслуживание обеспечивает работоспособность оборудования на протяжении всей рабочей смены, сезонное обслуживание выполняют для подготовки оборудования к осенне-зимнему и весенне-летнему сезонам. Все виды обслуживания проводятся по графикам, при этом периодичность и виды мероприятий техобслуживания и ремонта зависят, в первую очередь, от условий эксплуатации техники. Различают также различные автоматизированные системы планового технического обслуживания, однако, несмотря на возрастающую популярность данных систем в последнее время, они являются довольно ресурсоемкими, что снижает их эффективность. Она имеет существенные недостатки – ресурсоемкость и затратность [60].

Система ППР получила популярность ввиду небольших затрат относительно обслуживания по текущему состоянию, простоте планирования мероприятий ТОиР, а также значительному сокращению аварийных случаев относительно обслуживания по факту отказа [81]. Однако многими исследователями отмечается несостоятельность идеи, лежащей в основе данной системы, о выработывании ресурса экскаватором пропорционально времени его эксплуатации [29], что выражается крайне низкой эффективностью системы ППР на предприятиях со сложными условиями эксплуатации.

Основным недостатком системы ППР являются длительные простои во время выполнения плановых периодических ремонтов [46], так как в рамках данной системы не предполагается оценивать текущее состояние машины и мероприятия ТОиР проводятся со строгой периодичностью, даже если текущее состояние машины не требует ремонта и обслуживания. Отмечается также, что в большинстве случаев дефекты машин вызваны несоблюдением технологии ремонта, нежели процессами изнашивания [99]. Для эффективного применения мероприятий ТОиР необходима информация о текущем техническом состоянии объекта контроля, однако, ввиду недостаточного развития приборной и методической базы, техническое диагностирование не всегда включено в схемы ППР [14, 30].

По мнению многих исследователей, наиболее прогрессивной стратегией технического обслуживания является обслуживание по текущему состоянию (Condition-based maintenance), в которой решение о необходимости мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту детали или узла машины принимается на основе данных о текущем состоянии детали или узла, получаемых в результате заранее разработанной методики технического диагностирования текущего состояния. Особенно эффективно применение подобной стратегии на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями. Системы обслуживания по текущему состоянию зачастую применяются при эксплуатации сельскохозяйственных машин. Так, в работе [34] описывается методика диагностирования состояния гидросистемы машин, в работах [13, 73] приведены методики диагностирования состояния двигателя машины, автор

исследования [75] описывает методы и приборы контроля деталей разных систем машины, а в работах [59, 69] предлагается система мониторинга состояния машины по анализу и систематизации данных с датчиков энергетических систем. Описанные методики могут быть применены и в области горных машин. Недостатком стратегии обслуживания по текущему состоянию является высокая сложность и ресурсоемкость разработки методики диагностирования текущего состояния, а также высокие затраты, необходимые для создания приборной базы [3, 66].

Применимость той или иной стратегии техобслуживания зависит, в первую очередь, от условий эксплуатации машины, от ее текущего состояния, а также от возможностей использования техники и планируемого срока эксплуатации машины. Также важными факторами являются горно-геологические условия месторождения, уровень соответствия рабочей зоны оборудования нормальным условиям эксплуатации и природно-климатические условия месторождения [64].

1.3.2 Методы технического диагностирования

Для определения текущего состояния различных элементов горного оборудования и выявления дефектов прибегают к техническому диагностированию с целью установления вида, места и причины неисправности. Выделяют прямые и косвенные методы технического диагностирования. При применении прямых методов необходимая величина измеряется напрямую, а при применении косвенных методов – определяется через существующие зависимости, между величинами, которые возможно измерить прямыми методами. Полученные в результате технического диагностирования параметры, характеризующие ресурс детали, сравнивают с предельными значениями и, в результате, принимают решение о необходимости замены или ремонта детали. Предельные значения прямых диагностических параметров указывает разработчик оборудования в технологических картах по техническому обслуживанию и текущему ремонту [72].

Согласно ГОСТ 26980-95 «Экскаваторы одноковшовые. Общие технические условия» испытания, проводимые в рамках технического обслуживания, должны соответствовать правилам промышленной безопасности. В соответствии с РД-15-14-2008 «Методические рекомендации о порядке проведения экспертизы промышленной безопасности карьерных одноковшовых экскаваторов» техническое диагностирование металлоконструкций включает внешний осмотр, проверку качества соединений, измерение остаточных деформаций, проверку элементов методами неразрушающего контроля (НК). Методы НК, регламентированные данными рекомендациями, включают визуальный и измерительный контроль (ВИК),

магнитопорошковый контроль (МПК), контроль проникающими веществами (ПВК) и вибродиагностику.

При проведении экспертизы промышленной безопасности карьерных экскаваторов наиболее часто применяется метод визуально-инструментального контроля (ВИК), проводимого по инструкции, согласно РД 03-606-03, а также согласно РД-15-14-2008. Согласно данным документам, при ВИК определяется состояние основных металлоконструкций экскаватора (рукояти, стрелы, поворотной платформы, ковша, кузова и др.) с целью выявления изменений формы, появления дефектов и трещин, коррозионных и эрозионных повреждений. Данным методом также проводится выявление утечки масла из корпусов редукторов через уплотнения. При обнаружении признаков наличия трещин в металлических конструкциях или сварных швах данным видом контроля, места обнаружения подвергаются дополнительной проверке с помощью одного из вышеперечисленных методов НК.

Методом УЗК проводится дефектоскопия наиболее ответственных узлов экскаватора (валик ковша, обойма подвески, рукоять, секции стрелы, корпус редуктора и зубчатая передача напорного механизма и др.) при обнаружении поверхностных дефектов визуально-измерительным методом контроля. Основным требованием к поверхности деталей при проведении УЗК является отсутствие неровностей, окалин, ржавчин и других загрязнений. Размеры зачищенных участков должны обеспечивать возможность полного прозвучивания контролируемого объема детали. Шероховатость контролируемой поверхности при проведении УЗК должна быть не выше 40 мкм. Регламентированные методики проведения УЗК приведены в стандартах ГОСТ 12503-75 «Сталь. Методы ультразвукового контроля. Общие требования», ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые», ГОСТ Р ИСО 17640-2016 «Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковой контроль. Технология, уровни контроля и оценки», а также в руководствах по применению дефектоскопов».

ПВК предназначен для определения мест расположения поверхностных дефектов с открытой полостью, их направления, протяженности, характера развития, как в основном, так и в наплавленном металле сварных соединений [27]. Данный вид НК регламентирован стандартом ГОСТ Р ИСО 3452-1-2011 «Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 1. Основные требования». Согласно данному стандарту, перед проведением контроля поверхность очищается и высушивается, после на испытуемый участок наносится жидкость, проникающая в дефектные зоны. Далее, по истечению определенного временного диапазона, избыток жидкости удаляется с поверхности и наносится проявитель, поглощающий проникшую в дефектные зоны жидкость, что позволяет получить четкую картину наличия дефектов. Более

подробно методика ПВК раскрывается у автора [44], согласно которому процесс контроля включает операции (рисунок 1.4):

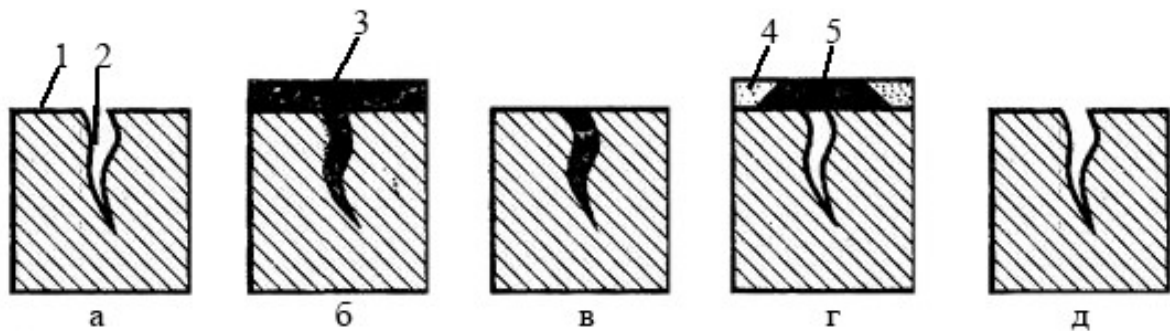


Рисунок 1.4 – Этапы контроля проникающими веществами [44]

- очистка поверхности (1) объекта контроля и полости дефекта (2) от загрязнений;
- пропитка дефектов индикаторным пенетрантом (3);
- удаление с поверхности изделия излишков пенетранта;
- применение проявителей 4 для визуальное обнаружения пенетранта в полости дефектов по следам 5, оставляемым проявителем;
- Удаление проявителя с объекта контроля.

МПК позволяет определять наличие трещин у поверхности, расслоений, различных включений, находящихся на небольшой глубине. Данный вид НК регламентирован стандартом ГОСТ Р 56512-2015 «Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод». Данный метод основан на притяжении магнитных частиц силами неоднородных магнитных полей, образующихся над дефектами в намагниченных объектах, с образованием в зонах дефектов индикаторных рисунков в виде скоплений магнитных частиц. Наличие и протяженность индикаторных рисунков регистрируют визуально, с помощью оптических приборов или автоматическими устройствами обнаружения и обработки изображений. МПК относится к индикаторным методам НК, то есть не позволяет определить геометрические параметры дефектов, определить глубину их залегание и пр. Согласно РД-15-14-2008 данным методом оценивается предельное состояния по критерию наличия трещин в днище ковша, в корпусе редуктора на напорном механизме, на подвеске стрелы и др.

Вибродиагностика проводится для получения информации о фактическом техническом состоянии механического оборудования экскаватора. При этом вибродиагностика, согласно РД 15-14-2008 проводится при работе под нагрузкой в стационарном (при отклонении параметров от номинальных значений не более чем на 10 %) режиме, а также в режиме холостого хода для каждого привода в отдельности. При оценке интенсивности вибрации в качестве нормируемого параметра вибрации устанавливается среднеквадратическое значение виброскорости в рабочей полосе частот 101000 Гц. Техническое состояние оборудования экскаватора оценивается по

наибольшему значению одной из измеренных компонент вибрации. Наиболее существенным преимуществом данного вида НК является его оперативность: информацию об изменении состояния объекта можно получать практически мгновенно [27].

1.4 Разрушение и изнашивание рабочего оборудования экскаваторов при ликвидации очагов горения бурого угля

В условиях ликвидации очагов горения бурых углей, рабочее оборудование экскаваторов подвергается существенным нагрузкам в ходе циклов экскавации и локальным повышениям температуры, что приводит к повреждениям, вид которых некоторые авторы [101, 123] разделяют на изнашивание и разрушение.

Согласно ГОСТ 27674-88 изнашивание определяется как процесс отделения материала с поверхности твердого тела, а также увеличение его остаточной деформации, проявляющееся в изменении формы [101]. Изнашивание поверхностей деталей, узлов и механизмов возникает при активации физико-механических процессов, преимущественно трения, в поверхностном слое на определенной площади, и следствием данного процесса является отделение, отслаивание или деформация материала на подверженном внешнему воздействию участке [35, 77].

Наблюдения показывают, что при эксплуатации коронки зубьев ковшей экскаваторов претерпевают значительные геометрические изменения от изнашивания, такие как:

- Укорочение коронок, при этом на разрезах зачастую используют коронки, у которых длина рабочей части составляет 50-60% от проектной.
- Изменение угла затупления кромки. В скальных грунтах и в грунтах со скальными включениями радиуса 0-15 мм величина затупления кромки коронки зуба возрастает. Первоначальная величина затупления сохраняется в песчано-глинистых грунтах с твердыми включениями в кусках с размером до 0,2-0,4 м.
- Образование площадки или поверхности износа по задней грани коронки.
- Увеличение углов заострения и резания, происходящее от изнашивания коронок зубьев по передней грани.

Долговечность коронок сильно варьируется в зависимости от условий работы: при разработке мерзлого грунта предельное состояние наступает через 34 суток, при работе в более легких условиях – 4 месяца и более. Как отмечает автор [53], производительность экскаватора падает почти на 30% при работе с изношенными коронками.

1.4.1 Основные виды и механизмы изнашивания рабочего оборудования экскаваторов

Многими исследователями различаются следующие механизмы изнашивания: абразивное, ударно-абразивное, адгезионное, усталостное, диффузионное, окисление [91, 101].

Согласно ГОСТ 27674-88, абразивное изнашивание возникает в результате трения твердых шероховатых поверхностей с образованием царапин и отслаиванием материала. Согласно результатам исследования [91], абразивное изнашивание является основной причиной выхода из строя бурильных и дробильных инструментов, при этом отмечается [54], что скорость абразивного изнашивания коронок может достигать 300 мкм/ч, а при длительной работе экскаватора вследствие процессов изнашивания коронка зуба ковша экскаватора теряет до 17 % от исходной массы металла [106].

Механизм адгезионного изнашивания описывается автором [91]: при адгезионном взаимодействии абразива и контактной поверхности происходит локальная пластическая деформация и образуются адгезионные «мостики схватывания», после, в результате движения абразива, происходит разрушение данных мостиков, что приводит к разрушению поверхности истираемого материала. Интенсивность развития данных процессов зависит от разности твердостей абразива и истираемого материала, а также от разности теплоустойчивости материалов [91].

При диффузионном изнашивании происходит проникновение частиц абразива и истираемой поверхности друг в друга в области их контакта. При этом механизм диффузионного изнашивания довольно похож на адгезионное: при движении абразива происходит разрушение истираемой поверхности за счет диффузионного переноса частиц. Интенсивность диффузионного изнашивания зависит от температуры контактной поверхности и от химического состава контактирующих поверхностей [90].

Усталостное изнашивание возникает при повторяющихся циклах напряжения [125], при этом различают также и термическую усталость, возникающую при циклических термических нагрузках. Вследствие данных процессов возникает упругая деформация кристаллической решетки металла, дислокация и другие дефекты, которые, постепенно накапливаясь, приводят к образованию микротрещин. При накоплении и разрастании микротрещин происходит откалывание и расслоение материала, что приводит к уменьшению производительности работы горных машин [85, 123].

Как отмечает автор [101], температура поверхности контактирующих поверхностей значительно влияет на возникновение различных механизмов изнашивания: при низких температурах характерно абразивное, адгезионное, усталостное изнашивания, а при высоких температурах – диффузионное изнашивание, окисления, термическая усталость. Влияние

температуры зоны контакта на срок эксплуатации рабочего оборудования представлено на рисунке 1.5.

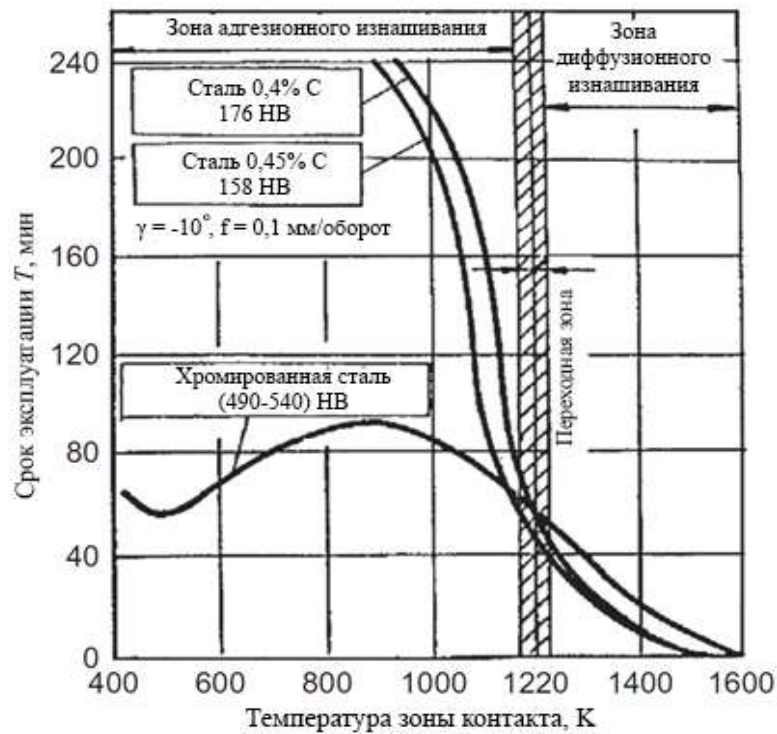


Рисунок 1.5 – Зависимость срока службы рабочего органа от температуры поверхности контактного взаимодействия [101]

По результатам расчета [2], получено, что при эффективном коэффициенте концентрации 1,5 предельный ресурс, оказывающий влияние на вероятность возникновения разрушения, составляет 7 лет. Этому ресурсу соответствует вероятность разрушения 57,5%. При эффективном коэффициенте концентрации 2 предельный ресурс составляет 6 лет, и ему соответствует вероятность разрушения 100%.

Изучение процесса изнашивания начинается с математического моделирования процесса, чему способствует применение метода конечных элементов и других видов компьютерного анализа. Построение полей напряжений (рисунок 1.6) по Мизесу для определения зон, наиболее подверженных деформациям встречается в работах [89, 105], анализ дефектов и усталостных характеристик можно встретить в источниках [86, 118]. Авторы [119] изучали движение гранулированной среды на компьютерной модели движущегося ковша, обнаружив зоны наибольшего давления у задних стенок ковша.

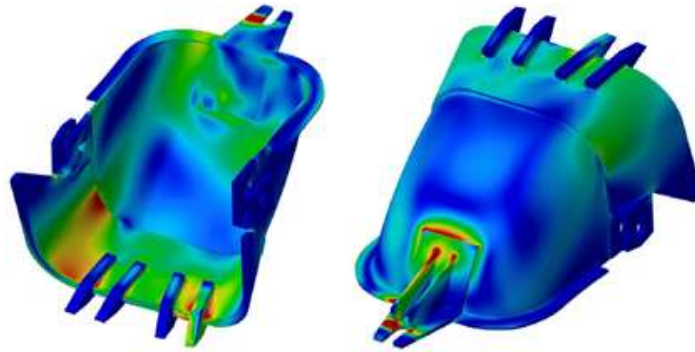


Рисунок 1.6 – Отображение поля напряжений по Мизесу на ковше экскаватора (красным обозначены значения выше 355 МПа) [105]

Так как статистически наиболее повторяющейся причиной отказов является абразивное изнашивание, большинство исследований посвящены оценке интенсивности данного механизма. Так, в исследованиях [108, 131] было проведено экспериментальное исследование зависимости интенсивности снятия стеллитового покрытия со стального полотна от параметров резания. В результате был сделан вывод, что основными факторами процесса изнашивания являются истирание при низких скоростях резания (<30 м/мин) и надломы, расслоения и скалывание при больших скоростях (>30 м/мин). Фактор влияния высоких температур также отмечается, например, в исследовании [112], результаты которого представлены на рисунке 1.7. По представленным результатам видно, что с ростом температуры значительно повышается интенсивность изнашивания серого литейного чугуна, при этом для других видов стали не отмечается значительного увеличения интенсивности изнашивания с ростом температуры.

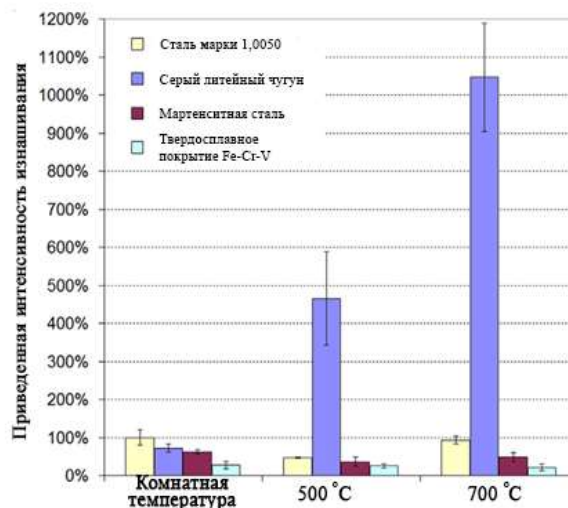


Рисунок 1.7 – Величины интенсивности абразивного износа при разных температурах у различных видов стали [112]

Как отмечается в обзоре [133], в зависимости от типа материала рабочего оборудования и вида породы, преобладающий механизм изнашивания может различаться. Так, в источниках

[101, 133] приведен ряд зависимостей для определения объема продуктов износа за счет определенного механизма изнашивания за заданный интервал времени.

1.4.2 Особенности изнашивания рабочего оборудования при высокотемпературных условиях

На операциях по ликвидации очагов горения бурого угля происходит постоянный контакт ковшей и зубьев ковшей экскаваторов с горячей массой угля [119], что значительно повышает интенсивность изнашивания ковшей и зубьев ковшей, и приводит к общему снижению эффективности горных работ.

Интенсивность процесса изнашивания с ростом температуры увеличивается, что подтверждается многими экспериментальными исследованиями в области материаловедения. Результаты подобных экспериментов [122, 127, 128] схожи: при повышении температуры контакта увеличиваются массопотери всех испытываемых сталей при повышении температуры во время износа. Хотя сам механизм изнашивания напрямую не зависит от температуры, ее повышение приводит к уменьшению твердости большинства видов стали, уменьшая таким образом величину нагрузки, необходимую для появления дефектов [85, 90, 112, 116]. Как отмечается в работе [119], при повышении контактной температуры активизируются процессы высокотемпературного усталостного износа, а также диффузионные и окислительные процессы, хотя многие из существующих испытаний на износ деталей при высоких контактных температурах не принимают во внимание комплекс данных механизмов.

Также, одним из факторов подобного явления являются фазовые преобразования в стали, приводящие к уменьшению сопротивляемости изнашиванию [82, 116]. Данные процессы усугубляются при многократном цикле нагрев-охлаждение [90, 93, 115]. Стали с аустенитной микроструктурой выдерживают большее число циклов усталостной нагрузки, чем стали, в которых произошла фазовая трансформация в перлит [82, 115]. Опыт, описанный в [115], наглядно показывает, что при многократном цикле термообработки и охлаждения происходят фазовые трансформации аустенита в перлит, в результате чего уменьшается сопротивляемость изнашиванию и происходит образование микротрещин и отслаиванию материала.

Похожие результаты встречаются и у других авторов. Так, [90] описывает, что даже однократный нагрев до 850 °С с последующим охлаждением приводит к уменьшению предела выносливости на усталость. Похожий результат можно найти в работе [93], в этом случае проводился многократный цикл нагрева до 950 °С с последующим охлаждением до комнатной температуры, при этом в стальной шестерне отмечался рост количества микротрещин. Данный вывод находит подтверждение и в работе [87], где подмечается, что совокупное воздействие термической усталости и абразивного изнашивания развивает напряжения, которые

аккумулируясь в металле, приводят к образованию напряженного состояния, возникновению трещин и микродефектов, и, в конечном итоге, приводят к разрушению металла. Так, при длительной эксплуатации экскаваторов, трещины появляются в наиболее нагруженных местах: поворотная платформа, стрела, а также исполнительное оборудование [62].

Таким образом, можно сделать вывод, что доминирующими механизмами изнашивания при условиях высоких температур будут абразивный вид изнашивания, а также термическая усталость [22, 101].

1.5 Изменение и оценка свойств поверхностного слоя при высокотемпературном изнашивании

Процессы изнашивания и разрушения рабочего оборудования экскаваторов сопровождаются изменением свойств поверхностного слоя, при этом величина этих изменений колеблется в зависимости от условий работы машины, и физико-механическими свойствами разрабатываемых грунтов. Установлено, что в процессе эксплуатации рабочих органов происходит деформирование поверхности трения, которое сопровождается глубинным наклепом. Данный вывод подтверждается в [9]: результатом действия внешних деформирующих сил, реже – фазовых превращений, является наклеп, физическая природа которого заключается в накоплении в металле части энергии деформации, расходуемой на искажение кристаллической решетки, образование преимущественно ориентированных кристаллов, изменение дислокационных структур, а также на увеличение удельного объема металла в слое.

Наклеп является результатом поверхностного пластического деформирования (ППД) поверхностного слоя металла в области деформирования. Различают следующие виды ППД по методу обработки поверхностного слоя [48]:

- Трением скольжения (выглаживание, дорнование, редуцирование);
- Трением качения (накатывание, обкатывание, раскатывание);
- Ударные методы (галтовка, ударно-барабанная обработка, дробеструйная обработка, чеканка, обработка механической щеткой и другие методы).

Как отмечает [11], при работе как со скальным, так и с песчаными породами коронка подвергается ударно-абразивному изнашиванию, сопровождающемуся образованием наклепанного слоя на поверхности контакта коронки с породой, имеющей повышенную твердость, при этом на площадке износа имеются дефекты в виде царапин. Данный вывод подтверждается и автором [55], которым было установлено, что при абразивном изнашивании степень поверхностного и глубинного наклепа коронки пропорциональна величине удельной нагрузки. Автором [12] отмечено, что степень упрочнения аустенитных сталей зависит от

величины нагрузки и свойства абразива, при этом максимальная степени упрочнения реализуется в том случае, когда удельные нагрузки, а также размер и степень закреплённости абразивных зерен таковы, что они способны создать высокие контактные напряжения и деформацию поверхности трения, необходимые для протекания γ - α превращения. При достаточной их полноте, микротвердость поверхности трения может достигать 12,5 ГПа, что обеспечивает высокую износостойкость этих материалов. Результаты исследования автора [23] показали, что твердость аустенитно мартенситной стали 110Г13Л увеличивается почти в 2,5 раза при действии ударных нагрузок, по сравнению с неупрочненной сталью, что вызывается за счет пластической деформации и накопления дефектов кристаллического строения. Подобное наблюдение отмечено автором [33], который сделал вывод об образовании наклепа и повышению твердости поверхности зубчатого колеса при воздействии ударных нагрузок, при этом величина данных нагрузок, что в том числе и подтверждает автора [55] пропорциональна увеличению твердости поверхностного слоя, а также глубинной твердости.

Условия изнашивания также оказывают сильное воздействие свойства поверхностного слоя изнашиваемого металла. Как отмечают авторы [12, 82], сопротивляемость абразивному изнашиванию сталей с большим количеством остаточного аустенита существенно зависит от температуры поверхности трения. С ростом температуры снижаются полнота γ - α превращения и степень упрочнения, а интенсивность изнашивания возрастает. Данный вывод находит подтверждение в результате исследования [40], где в результате нагрева стали 12X18H10T свыше 450 °С в упрочненном деформационном слое начинают происходить обратные превращения мартенсита, соответственное происходит снижение твердости поверхностного слоя. Автором [107] в результате исследования процессов обезуглероживания стали при термических нагрузках, сделан вывод об уменьшении содержания углерода при циклических термических нагрузках, что, учитывая зависимость твердости поверхности и содержания углерода в элементах микроструктуры стали, а также полноты фазовых превращений, дает вывод о прямом влиянии величины термических нагрузок и твердости поверхности: увеличение термических нагрузок приводит к уменьшению твердости поверхностного слоя. Данный вывод находит подтверждение в результатах исследований многих авторов. Так, автор [104] сообщает, что твердость поверхности изделия из стали 25 при нагреве до 400 °С линейно уменьшается, а при дальнейшем термическом воздействии происходит резкое уменьшение твердости. Твердость поверхностного слоя изделия из стали 35, по результатам исследования [37], при нагреве с 20 до 400 °С уменьшается с 179НВ до 150НВ, при этом также наблюдается близкая к прямой зависимость твердости от температуры.

Контактные и тепловых нагрузки, возникающие при эксплуатации машин, также приводят к разрушительным процессам в виде абразивного и усталостного износа с

образованием микротрещин с переходом в магистральную трещину [43]. В результате циклических термических нагрузок между поверхностным слоем рабочего оборудования и сердцевиной появляется термический градиент, приводящий к накоплению локальных пластических деформаций и образованию микротрещин усталости. Как отмечает автор [111] ключевым фактором, влияющим на образование микротрещин усталости, является шероховатость поверхности. Автором [25] также отмечено, что увеличение шероховатости поверхности приводит к значительному снижению пределов ограниченной выносливости, долговечности и поверхностного фактора на примере стали 4Х5МФС в диапазоне долговечностей $3 \cdot 10^2 \dots 10^5$ циклов в условиях комнатной и повышенной (450°C) температур. При этом повышенные температуры также приводят и к снижению усталостной долговечности стали [26]. Как отмечает автор [121] усталостные микротрещины на поверхности металла появляются после $5 \cdot 10^4$ циклов нагружения после контактно-усталостного испытания, однако, с учетом полученных выводов о снижении усталостной долговечности при влиянии высоких температур, а также сильном влиянии на сопротивление к усталости шероховатости поверхности, повышение которой происходит при изнашивании поверхностного слоя, можно сделать вывод о значительной снижении усталостной долговечности в условиях ударно-абразивного изнашивания, сопряженного с циклическими термическими нагрузками.

1.6 Оценка остаточного ресурса по изменению свойств поверхностного слоя

Многие авторы при оценке процесса износа подходят к вопросу с практической стороны, и делают прогнозы по сроку эксплуатации рабочих органов горных машин. Встречаются разнообразные методики, такие как: определение числа циклов загрузки экскаватора при контакте с взорванной породой [51]; прогноз срока эксплуатации коронок зубьев ковшей экскаваторов путем оценки их стачивания за период резания и оценки соответствующих зависимостей [1]; влияние величины износа на производительность и также стачивание коронок при длительном резании [79]; прогноз параметров износа и удельного сопротивления грунта резанию от геометрических параметров коронок зубьев [47]. Однако, подобные исследования показывают высокую точность только для конкретных видов коронок для определенных условий и не применимы для оценки остаточного ресурса других видов рабочих органов или при работе в других эксплуатационных условиях.

Оценку остаточного ресурса иногда оценивают путем расчета интенсивности различных механизмов изнашивания. Например, в работе [84] предложена методика расчета значения интенсивности адгезионно-усталостного износа рабочего оборудования, определенные на основе оценивания коэффициента термической диффузии, в [126] приводится метод расчета усталостного изнашивания путем расчета внутреннего рассеивания тепла и развития

микропластичности, результаты расчета при этом имеют хорошую корреляцию с экспериментальными данными, полученными этим же автором, в [114] приводится методика количественного расчета остаточного ресурса по размеру микротрещин на РЭМ-визуализации.

Применяются также и методы, основанные на оценке свойств поверхностного слоя, изменяющихся при изнашивании. Оценка остаточного ресурса, основанная на мониторинге изменения свойств поверхностного слоя регламентирован нормативной документацией для при эксплуатации металлических трубопроводов [76], газовых и гидравлических турбин (СТО ЦКТИ 10.027-2019), сварных соединений (РД 26-17-086-88), резервуаров для нефти и нефтепродуктов (РД 08-95-95). Данные методики основаны на техническом диагностировании изменения твердости поверхностного слоя, что, с учетом факта роста твердости поверхности коронок зубьев при их изнашивании, позволяет сделать вывод о возможности применения аналогичных методов контроля текущего состояния и остаточного ресурса для коронок зубьев ковшей экскаваторов. Как было отмечено авторами [11, 12, 23, 33, 55] при ударно-абразивном изнашивании формируется область наклепа, имеющая существенно более высокую твердость, чем остальные части коронки, однако, быстрый рост твердости в области контакта сохраняется до образования наклепанного слоя, после чего рост твердости незначителен. Также при ударно-абразивном изнашивании существенно растет шероховатость поверхности [11, 25], оказывающие существенное влияние на образование микротрещин усталости [111] и снижающие усталостную долговечность [26]. Влияние высоких температур на процесс изнашивания выражается в небольшом линейном уменьшении твердости при нагреве до температуры в 400-450 °С [37, 40, 82], образованию термического градиента, способствующему образованию микротрещин усталости [43], а также к снижению усталостной долговечности [26]. На основании данных результатов, можно сделать вывод о возможности контроля степени изнашивания по оценке твердости в области формирования наклепанного слоя, а также оценке геометрических параметров поверхностного слоя. Подобные методики уже было предложена некоторыми авторами, например, контроль остаточного ресурса зубьев шестерни [33] по изменению твердости поверхностного слоя, или контроль остаточного ресурса по критерию трещинообразования с применением вихретокового контроля [19, 83, 113]. Методы вихретоковой дефектоскопии применяются для индикации и оценки поверхностных и подповерхностных дефектов. Преимуществом данного метода является высокая скорость контроля, отсутствие контакта преобразователя и объекта контроля, а также наглядное представление результатов.

К тому же, в работе [83, 94] авторами удалось рассчитать зависимость между твердостью и параметрами циклических кривых напряжение-деформация, а авторами [102, 132] была получена корреляция экспериментальных и расчетных результатов анализа усталостного

ресурса, вкупе с использованием метода твердомерии для быстрого определения зон, находящихся в напряженно-деформированном состоянии, что говорит о возможности использования расчетного значения усталостного ресурса в качестве прогнозного значения остаточного ресурса.

Таким образом, величину нагрузок, вызывающих ударно-абразивное изнашивание деталей можно рассчитать в первом приближении по вызываемому нагрузками наклепу материала деталей, что может быть определено по изменению поверхностной твердости и степени дефектности поверхностного слоя в зоне наклепа коронок зубьев, а также по расчётному значению усталостного ресурса [102, 132]. Как отмечает автор [83] усталостные микротрещины на поверхности металла проявляются после $5 \cdot 10^4$ циклов нагружения после контактно-усталостного испытания. Контроль роста микротрещин возможен с применением вихретокового метода контроля на частотах возбуждения от 72 до 120 кГц, так как в этом случае степень влияния ферромагнитной стальной основы на показания прибора минимально.

1.7 Выводы по главе 1

В результате работы над первой главой диссертации были сделаны следующие выводы:

1. Большая часть угольных запасов России относится к бурым углям, при этом открытая разработка многих месторождений бурого угля сопряжена с процессами самовозгорания угля, что осложняет работу экскаваторов, задействованных на операциях по добыче, отвалообразованию и ликвидации месторождений.

2. Высокая температура внешней среды и зоны контакта с породой значительно снижает износостойкость контактирующих с горячей породой кромок исполнительных органов выемочно-погрузочного оборудования. В таких условиях доминирующими факторами процесса изнашивания является высокотемпературное абразивное изнашивание, а также процессы температурной усталости, в ходе которых происходит накопление усталостных дефектов, микротрещин и напряжений, приводящих к ускорению траты ресурса и скорой поломке оборудования.

3. На операциях по ликвидации месторождений, подверженных эндогенному горению, а также в местах добычи угля, весьма склонных к самовозгоранию, наиболее нагруженным узлом экскаватора является ковш и коронки зубьев ковша, при этом интенсивность их изнашивания в данных условиях выше, чем на аналогичных операциях в нормальных условиях.

4. Регламентированные системы технического обслуживания не включают оценку текущего состояния, что приводит к несвоевременному применению мероприятий по восстановлению ресурса на предприятиях со сложными горного-геологическими условиями, в том числе на местах открытой добычи бурого угля, подверженного самовозгоранию.

5. Процесс изнашивания коронок зубьев ковшей экскаваторов сопряжен с разрушением поверхностного слоя и изменением его свойств в виде проявления поверхностного пластического деформирования по ударному типу, а также посредством трения скольжения, сопровождающегося образованием наклепанного слоя, а также появления усталостных микротрещин на поверхности контакта коронки с массивом угля.

6. Для предотвращения поломки оборудования и повышения работоспособности необходимо корректировка мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту выемочно-погрузочного оборудования, включающей диагностирование коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях высоких температур, установление режимов, периодичности и состава мероприятий текущего ремонта.

7. Для создания методики технического диагностирования рабочего оборудования, работающего в условиях эндогенного горения угольных пластов, необходим контроль твердости и показателя дефектности поверхностного слоя в области формирования наклепа.

На основе приведенных выводов были поставлены следующие задачи исследования:

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.

ГЛАВА 2 Оценка напряженно-деформированного состояния рабочего оборудования при механических и термических нагрузках

При работе экскаваторов в условиях высокотемпературного горного массива основными механизмами изнашивания являются ударно-абразивное изнашивание и термическая усталость. Для моделирования одновременного действия термической усталости и ударных нагрузок можно прибегнуть к расчету напряжений, возникающих вследствие механических и термических нагрузок, воздействующих на поверхностный слой рабочего оборудования при экскавации горящего угля. Дальнейший расчет будет производиться для рабочего оборудования гидравлического экскаватора Komatsu PC400LC-7, так как именно эти экскаваторы в настоящее время используются на Коркинском разрезе на операциях по ликвидации очагов эндогенного горения бурого угля.

2.1 Методика теоретического расчета

Работа гидравлического экскаватора в забое на операции по экскавации грунта состоит из четырех последовательных операций: копание, поворот на выгрузку, выгрузка и поворот в забой. Продолжительность одного рабочего цикла экскавации можно рассчитать по формуле 2.1, как суммарную продолжительность данных операций:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{к}} + t_{\text{п}} + t_{\text{в}} + t_{\text{пз}}, \quad (2.1)$$

где $t_{\text{к}}$ – продолжительность копания (6-10 с);

$t_{\text{п}}$ – продолжительность поворота на выгрузку (7-11 с);

$t_{\text{в}}$ – продолжительность выгрузки (1-3 с);

$t_{\text{пз}}$ – продолжительность поворота в забой (7-10 с).

В ходе полного рабочего цикла работы экскаватора, ковш будет нагреваться в ходе первой операции до определенной максимальной температуры за счет теплопроводности, в ходе второй операции будет происходить одновременная отдача тепла и нагрев, а в ходе последних операций будет происходить охлаждение за счет конвекции. При этом за время одного рабочего цикла ковш получить энергии больше, чем рассеет, поэтому к концу цикла его температура в среднем будет больше, чем в начале цикла. Однако за счет растущего температурного градиента от цикла к циклу, в определенный момент максимальная температура за цикл перестанет расти, так как количество тепла, полученное в ходе нагрева, будет равно аналогичному количеству при охлаждении. С учетом этого, а также согласно паспорту гидравлического экскаватора Komatsu PC400LC-7 для дальнейших расчетов время цикла принимается равным 20 с, а время нагрева – 6 с.

2.2 Математические основы процесса изнашивания

2.2.1 Расчет уравнения теплового баланса и параметров теплообмена

Для расчета температурного поля, образуемого при контакте горячего угля и стали можно использовать энергетический подход, так как тепло является одним из видов внутренней энергии тела, которая в свою очередь является экстенсивной функцией состояния основных экстенсивных переменных: энтропии, объема и массы. При этом температура и давление являются частными производными первого рода от удельной внутренней энергии (формула 2.2):

$$T = \left(\frac{\partial E}{\partial S}\right)_v \text{ и } p = -\left(\frac{\partial E}{\partial v}\right)_S, \quad (2.2)$$

где E – удельная внутренняя энергия тела, Дж/кг;

T – температура, К;

S – удельная энтропия, Дж/кг;

p – давление, Па;

v – объем, м³.

По первому закону термодинамики данные переменные объединяются соотношением по формуле 2.3:

$$dE = TdS - pdv \quad (2.3)$$

Также можно выделить производные второго рода от удельной внутренней энергии, среди которых в расчетах чаще всего встречаются удельная теплоемкость при постоянном давлении и коэффициент термического расширения, которые могут быть рассчитаны по формуле 2.4:

$$C_p = \frac{T}{\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_v} \text{ и } \alpha_p = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_S \quad (2.4)$$

Удельная теплоемкость определяется количеством энергии, необходимым для повышения температуры тела, массой в единицу массы, на единицу температуры.

В общем случае, количество тепла, передаваемое за единицу времени, зависит от режима теплопередачи, при этом выделяют три механизма теплопередачи:

1. Теплопроводность – способность материальных тел переносить энергию от более нагретых тел к менее нагретым. При данном механизме, как гласит закон теплопроводности Фурье, плотность потока энергии (теплового потока) будет пропорциональна градиенту температуры (формула 2.5):

$$q = -k\nabla T, \quad (2.5)$$

где q – вектор плотности теплового потока, Вт/м²;

k – коэффициент пропорциональности или коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

2. Конвекция – вид теплообмена (теплопередачи), при котором внутренняя энергия передается струями и потоками самого вещества. Данный термин также применяется при диссипации тепла от твердой поверхности к жидкости (воздуху). Различают естественную конвекцию (нагревание или остывание тела при естественном массообмене) и вынужденную (при которой перемещение вещества усиливается действием внешних сил).

3. Тепловое излучение – электромагнитное излучение, испускаемое телами за счёт их внутренней энергии. Различные тела способны поглощать, излучать, а также отражать кванты электромагнитного излучения.

При теплообмене между телами должен соблюдаться закон теплового баланса (формула 2.6), вытекающий из первого начала термодинамики, по которому изменения макроскопической кинетической энергии (K_Ω) и внутренней энергии (E_Ω) области Ω могут быть вызваны либо механической энергией сил (P_{ext}), примененных к системе, либо при теплообмене (Q_{exch}):

$$\frac{dE_\Omega}{dt} + \frac{dK_\Omega}{dt} = P_{ext} + Q_{exch} \quad (2.6)$$

Данное уравнение с помощью ряда изменений в локальной форме записывается по формуле 2.7:

$$\rho C_p \left(\frac{\delta T}{\delta t} + u_{trans} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (q + q_r + q_c) = Q + Q_{ted}, \quad (2.7)$$

где ρ – плотность, кг/м³;

C_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

u_{trans} – вектор скорости системы, м/с;

q , q_r , q_c – тепловой поток, вызванный соответственно теплопроводностью, излучением или конвекцией, Вт/м²;

Q – тепло от дополнительных источников тепла, Вт/м³;

Q_{ted} – термоупругое демпфирование, Вт/м³.

2.2.2 Расчет поля нагрузок

Как уже было сказано, увеличение внутренней энергии приводит к росту температуры, который в свою очередь приводит к увеличению линейных размеров тела, что описывается соотношением. При этом у реальных тел, как в описываемом случае контакта угля и ковша, увеличения температуры происходят локально, то есть в зоне контакта, а значит значения линейного расширения в каждой точке тела будет отличаться. При этом возникает деформация тела, разделяемая на упругую и пластичную. Упругая деформация исчезает при удалении источника этой деформации, а пластичная – нет. Количественно деформация, вызванная

локальным ростом температуры, образованная за счет термического расширения, определяется соотношением по формуле 2.8:

$$\varepsilon_{th} = \alpha(T - T_{ref}), \quad (2.8)$$

По обобщенному закону Гука, соотношение между деформацией и напряжением имеет линейный характер и определяется соотношением по формуле 2.9:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}, \quad (2.9)$$

где σ_{ij} – двухкомпонентный тензор напряжения;

C_{ijkl} – четырехкомпонентный тензор упругих состояний, связывающий напряжение и деформацию, ε_{kl} – двухкомпонентный тензор деформации.

Данное уравнение можно переписать следующим образом (формула 2.10):

$$\sigma = \sigma_{ex} + C: (\varepsilon - \varepsilon_{inel}), \quad (2.10)$$

где σ_{ex} – дополнительное напряжение;

ε_{inel} – неэластичные деформации.

Тензор упругих состояний (C) или также матрица упругости (D), зависит от модуля упругости и коэффициента Пуассона и представляет собой матрицу в размере 6 на 6 элементов.

Матрица упругости математически записывается следующим образом (формула 2.11):

$$D = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Переменная ε_{inel} , включающая неэластичные деформации, при рассмотрении случая термической усталости, при котором на коронку воздействует только циклический нагрев и остывание, будет состояться, в основном, из температурной деформации ε_{th} . При расчете одновременного действия термической усталости и абразивного изнашивания к неэластичным деформациям добавятся также пластичные деформации, вызванные истиранием о поверхность угля.

Таким образом, для расчета напряжений, возникающих вследствие термической усталости, при рассмотрении коронки в виде изотропного твердого тела, необходимы следующие начальные параметры стали: модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент теплопроводности, коэффициент термического расширения, плотность и теплоемкость при постоянном давлении. Данная модель в дальнейшем может корректироваться поправочными коэффициентами, полученными в результате экспериментальных работ, таким

образом можно добиться точного значения поля напряжений, которое является отправной точкой для расчета остаточного ресурса и прогнозирования времени эксплуатации ковша и корректировки программы ремонта и технического обслуживания ковшей экскаваторов.

2.2.3 Моделирование усталостных циклов

Усталость материала – процесс деградации материала, вызванный накопления повреждений под действием циклических нагрузок и приводящий к изменению механических характеристик материала, в результате чего происходит образование дефектов в полости материала, а также трещин, при развитии которых скалывание и разрушение материала.

При действии циклических напряжений в результате накопления пластических деформаций происходит образование микротрещин, которые раскрываются на поверхности стального полотна, после расширяются и углубляются, и в конце начинают происходить процессы наклепа и откалывания частей материала, что свидетельствует о начале разрушения стального изделия, в частности коронки зуба ковша экскаватора. Циклические нагрузки можно отобразить графически, как показано на рисунке 2.1.

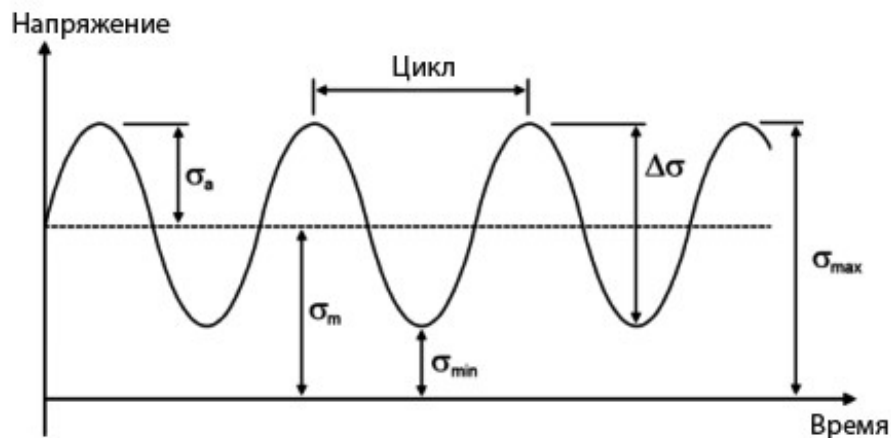


Рисунок 2.1 – Графическое отображение циклических нагрузок
 σ_{max} и σ_{min} – максимальная и минимальная нагрузки соответственно, σ_a – амплитуда нагрузок, σ_m – средняя нагрузка, $\Delta\sigma$ – диапазон нагрузок

При изучении усталости материала часто прибегают к изучению кривых зависимости амплитуды напряжения за цикл и числа циклов, имеющих вид, указанный на рисунке 2.2.

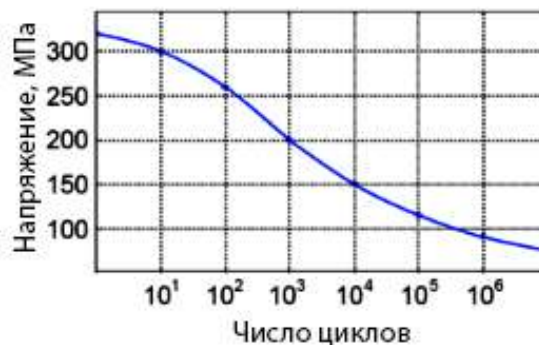


Рисунок 2.2 – Кривая, связывающая амплитуду напряжения за цикл и число циклов

По числу циклов до разрушения усталостный вид изнашивания принято делить на малоцикловую усталость (с числом циклов менее 10^4) и многоцикловую усталость (более 10^4), однако данное деление размыто и встречаются и другие виды классификаций. При малоцикловой усталости в ходе каждого цикла происходят значительные пластические деформации, в то время как многоцикловая усталость происходит в режиме упругих деформаций.

Для описания циклических деформаций в ходе термической усталости и абразивного истирания подходят модели малоцикловой усталости, так как в ходе работы экскаватора величина амплитуды напряжений довольно высока, а ковш и зубья с коронками, даже изготовленные из износостойкого сплава, подвергаются значительным пластическим деформациям.

Модели, описывающие малоцикловую усталость, опираются на величину амплитуды деформации, нежели на амплитуду напряжений. Наиболее часто используется модель Coffin-Manson-Basquin [110], использующее выражение, которое связывает амплитуду деформации и число усталостных циклов (формула 2.12):

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c, \quad (2.12)$$

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.

Данная модель использует эмпирические усталостные коэффициенты, определяемые либо из научных литературных источников, либо с помощью экспериментальных работ. Полученная величина N_f позволяет оценить ресурс стали при определенных амплитудах нагрузок или деформаций и, таким образом, с помощью нее возможно прогнозирование времени работы экскаватора на работах по добыче, рекультивации и отвалообразованию в условиях высокотемпературного горного массива.

2.3 Расчет напряжения и деформации при различных термических и механических нагрузках на коронку зуба

Для проведения расчётов в ПО SolidWorks была спроектирована CAD-сборка ковша гидравлического экскаватора Komatsu PC400LC-7, оборудованного зубьями с коронками для скальных работ 208-70 14152RC. Общий вид CAD-сборки ковша представлен на рисунок 2.3.

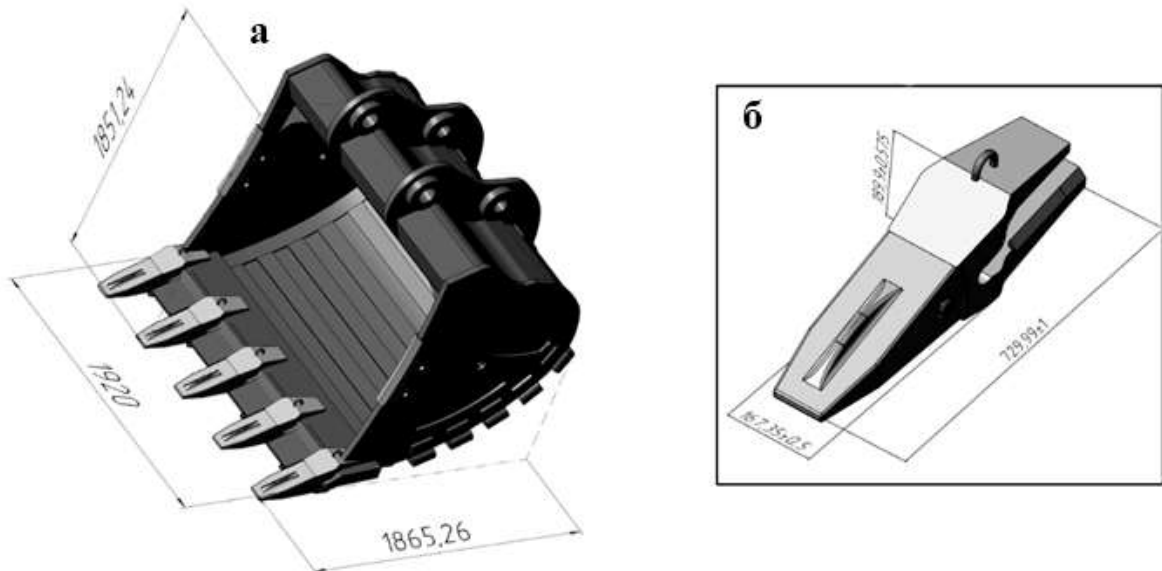


Рисунок 2.3 – CAD-сборка ковша (а) и зуба в сборе (б) экскаватора Komatsu PC400LC-7 [96]

Согласно исследованию [38], материал коронки изготовлен из стали, близкой по составу к легированной улучшаемой конструкционной стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-2016), начальный вес коронки составляет 16 кг, металл коронки имеет, как это свойственно кованным изделиям, зонально неоднородное строение, твердость коронки составляет 41-45 HRC. Химический состав стали 30ХГСА приведен в таблице 2.1. Усталостные параметры для стали 30ХГСА были взяты из работы [92], а механические характеристики стали взяты в работах [21, 88, 96].

Таблица 2.1 – Химический состав стали 30ХГСА (% от массы)

C	Mn	Si	Cr	P	S
1,14	12,81	0,26	0,12	0,05	0,05

Расчет напряжений и деформаций, возникающих при различных термических и механических нагрузках, проводился с помощью метода конечных элементов в ПО Ls-Dyna и Ansys Mechanical. Расчет состоял из следующих задач:

1. Расчет теплообмена между зубом и углем в течение одного цикла работы экскаватора;
2. Расчет напряжения и деформации поверхностного слоя при различных термических нагрузках;
3. Определение напряжений и деформаций поверхностного слоя при различных механических нагрузках;

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

5. Расчет числа усталостных циклов до наступления предельного состояния коронки зуба;

Блок-схема проведения расчетов, поставленных задач и требуемых результатов представлена на рисунке 1А в Приложении А.

2.3.1 Определение начальных условий модели и построение конечноэлементной сетки

Для проведения всех дальнейших расчетов в качестве материала стали была использована сталь 30ХГСА. Набор начальных условий включает механические и термические параметры стали и бурого угля, а также построение конечноэлементной сетки модели. Необходимые для расчета характеристики стали и бурого угля при различных температурах приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики бурого угля и стали 30ХГСА

Материал	30ХГСА			Бурый уголь		
	25	300	500	25	300	500
Температура, T (°C)						
Модуль Юнга, E (ГПа)	200,00	200,00	200,00	0,102	0,102	0,102
Модуль сдвига, G (ГПа)	77,52	77,52	77,52	0,037	0,037	0,037
Объемный модуль упругости, K (ГПа)	158,73	158,73	158,73	0,12	0,12	0,12
Коэффициент Пуассона, ν	0,29	0,29	0,29	0,36	0,36	0,36
Плотность, ρ (кг/м ³)	7900	7850	7550	910	880	840
Коэффициент теплопроводности, k (Вт/м·К)	13,400	17,900	20,500	0,088	0,110	0,620
Удельная теплоемкость, C_p (Дж/кг·К)	520	570	630	1347	1345	1501
Коэффициент термического расширения, α (1/К)	1,84E-05	1,94E-05	2,17E-05	5,26E-04	5,26E-04	5,26E-04

Для упрощения расчета, была построена только модель контакта коронки зуба, а не всего ковша. Конечноэлементная сетка коронки зуба была построена в ПО Ansys Mesher; сетка состоит из 700 000 элементов, при этом в качестве типа элементов сетки был выбран тетраэдр (рисунок 2.4).

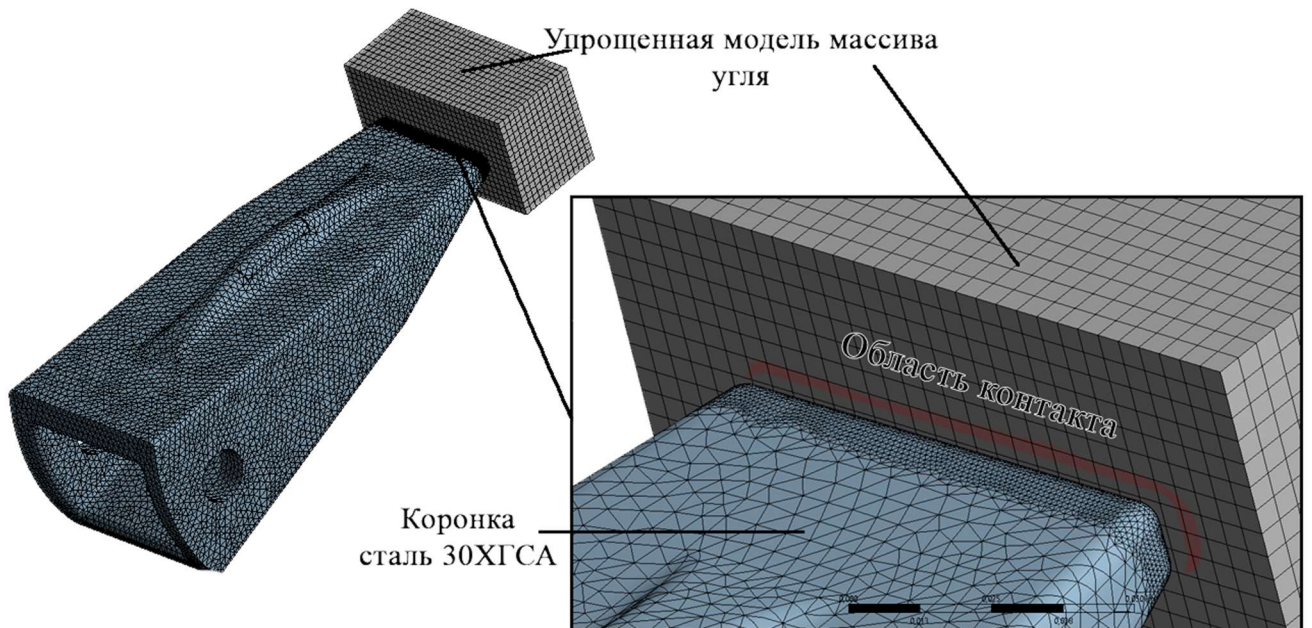


Рисунок 2.4 – Модель контакта коронки зуба и угля [96]

Для предварительного расчета усилия на коронку при копании угля, была использована формула 2.13 для расчета усилий на ковш (F_B) и формула 2.14 – на рукоять (F_S):

$$F_B = \frac{p \left(\frac{\pi}{4} \right) D_B^2 d_A d_C}{d_D d_B} \quad (2.13)$$

$$F_S = \frac{p \left(\frac{\pi}{4} \right) D_A^2 d_E}{d_F}, \quad (2.14)$$

где p – рабочее давление, МПа;

D_B – диаметр гидроцилиндра ковша, мм;

D_A – диаметр гидроцилиндра рукояти, мм;

d_A, d_E, d_F, d_D, d_C – расстояния, мм.

На основе спецификаций экскаватора Komatsu PC400LC-7, были определены величины: $d_A = 130,8$ мм, $d_E = 1197,6$ мм, $d_F = 4000,5$ мм, $d_D = 1394,4$ мм, $d_C = 450$ мм, $d_B = 620$ мм, $D_B = 160$ мм, $p = 36$ МПа, $D_A = 170$ мм. По ур. 2.13 и 2.14, $F_B = 52,5$ кН, $F_S = 235$ кН.

Сила сопротивления резанию грунта была рассчитана равной 235 кН. Данное усилие было выбрано в качестве предварительного граничного условия в модели для проведения расчетов сходимости сетки. В дальнейшем механическая нагрузка на коронку при копании грунта будет рассчитана в LS-Dyna и переведено в Ansys в качестве граничного условия для расчета напряжений и деформации.

Для определения зависимости результатов моделирования от качества конечноэлементной сетки, был проведен расчет сходимости. В данном расчете на коронку подавалось усилие в 235 кН, при этом проверялась зависимость величины возникающего

напряжений при изменении количества элементов в сетке. График сходимости сетки представлен на рисунке 2.5.

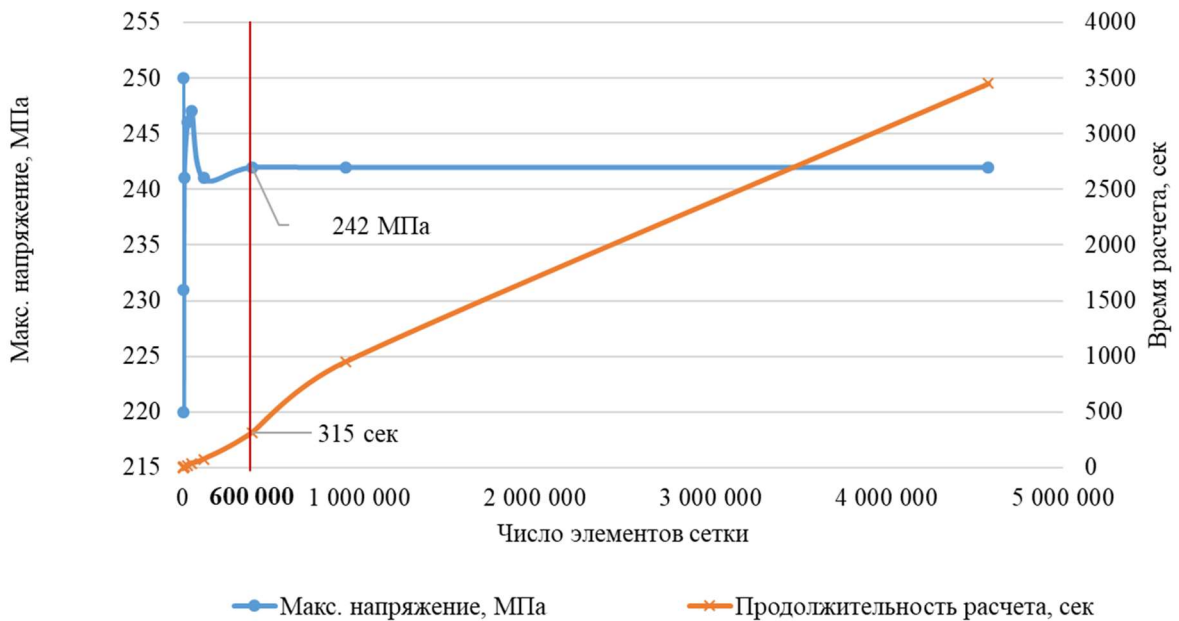


Рисунок 2.5 – График сходимости сетки

По рисунок 2.5 видно, что при сетке от 600 000 элементов величина напряжения остается неизменной и равна 394 МПа, при это продолжительность расчета возрастает, таким образом оптимальное число элементов сетки равно 600 000 элементов.

2.3.2 Расчет контактного давления при взаимодействии коронки с массивом угля

Для получения данных о механических напряжениях при контакте коронки зуба ковша экскаватора и массива угля была импортирована из Ansys сетка конечных элементов коронки, а массив угля построен в LS-Dyna виде сетки дискретных сферических (SPH) элементов (рисунок 2.6). Массив угля для расчета представлен в виде SPH-элементов, построенных в виде куба с числом элементов 6000 и плотностью 910 кг/м^3 , что равняется плотности бурого угля (см. таблица 2.2).

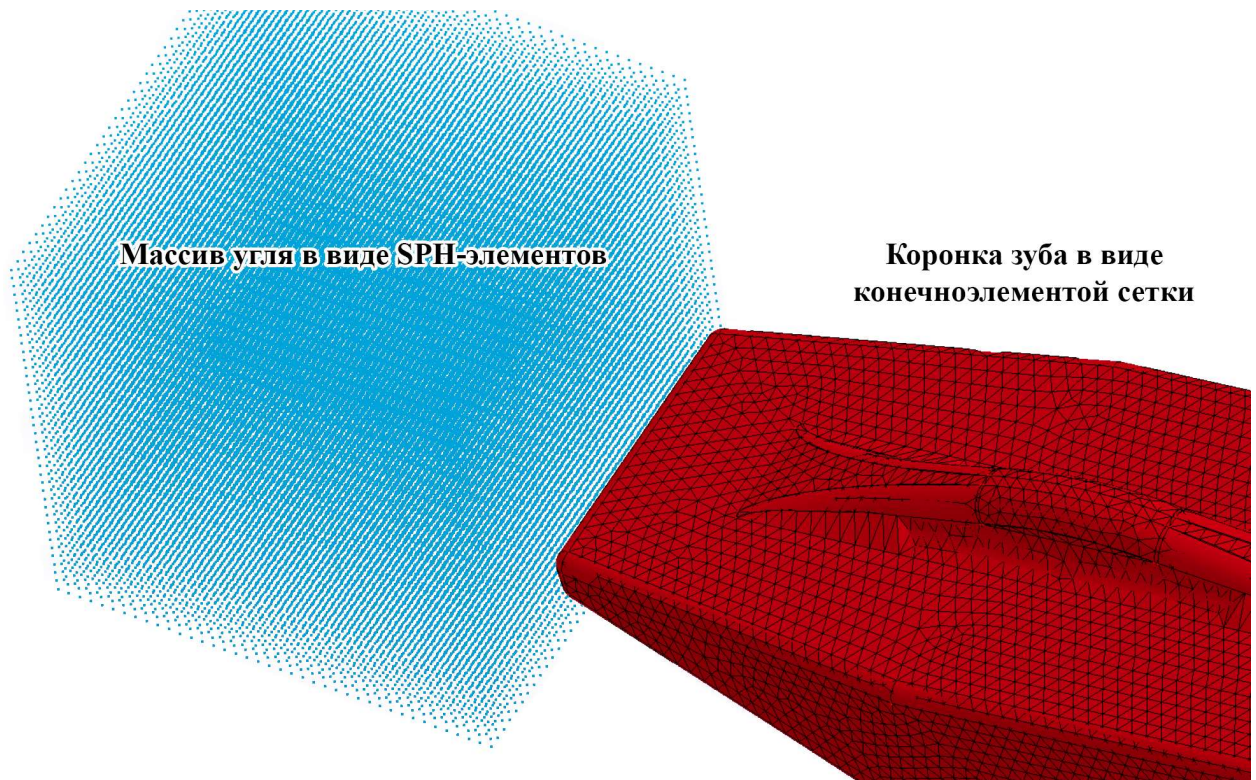


Рисунок 2.6 – Моделирование контактного взаимодействия коронки и массива угля

В качестве материальной модели массива угля и коронки была выбрана модель Johnson Cook. Данная модель является функцией напряжения текучести при растяжении по Мизесу в соответствии с деформационным упрочнением, деформационным упрочнением и термическим разупрочнением [109]. Данная модель рассчитывается по соотношению (формула 2.15):

$$\sigma_{eq} = \left(A + B \cdot (\varepsilon_{eq}^{pl})^n \right) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right), \quad (2.15)$$

где ε — эквивалентная пластическая деформация;

$\dot{\varepsilon}$ — скорость пластической деформации;

$\dot{\varepsilon}_0$ — референсная скорость деформации;

A - начальный предел текучести материала при квазистатической скорости деформации, МПа;

B – напряжение пластического течения при деформационном упрочнении при квазистатической скорости деформации, МПа;

n – эффект от пластического течения при деформационном упрочнении при квазистатической скорости деформации;

C - эффект скорости деформации;

m - эффект термического размягчения;

T_{melt}, T_0 - температура плавления и референсная температура соответственно, К.

В данном расчете температурные параметры не были учтены, так как расчет термических нагрузок будет проводиться в Ansys, поэтому T_{melt}, T_0, T и m не учитывались в

расчете. Параметры стали 30ХГСА и бурого угля для данной модели представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры для модели Johnson-Cook

30ХГСА		Бурый уголь	
<i>A</i>	390 МПа	<i>A</i>	0,4 МПа
<i>B</i>	880 МПа	<i>B</i>	1,86 МПа
<i>C</i>	0,098	<i>C</i>	0,005
<i>N</i>	0,175	<i>N</i>	0,75
<i>e₀</i>	1	<i>e₀</i>	60

Для ряда SPH элементов нижней границы массива угля были заданы граничные условия жесткой сцепки, таким образом при контакте всего массива угля с коронкой этот ряд остается неподвижным. Для коронки зуба было задано начальное усилие в 235 кН, рассчитанное на предыдущей стадии, для расчета контактного давления массива на поверхностный слой коронки (рисунок 2.7). Помимо рассчитанного усилия, на коронку также подавался диапазон усилий от 100 до 500 кН с шагом в 100 кН для отслеживания зависимости роста контактного давления на поверхности коронки от усилия, подаваемого на коронку.

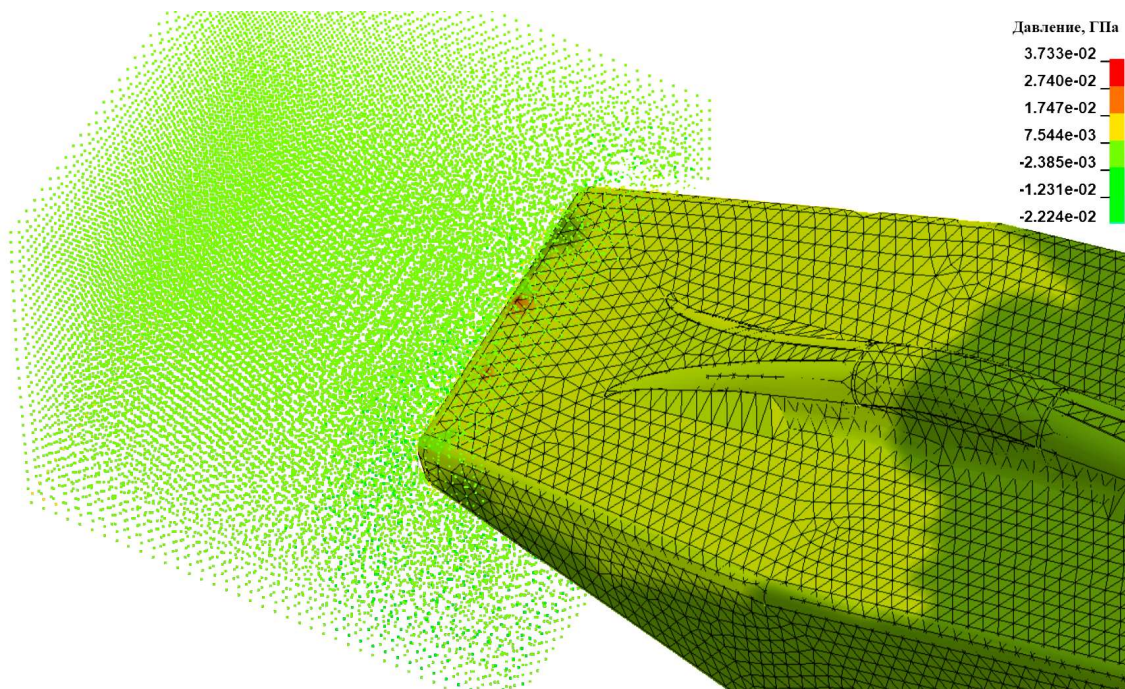


Рисунок 2.7 – Поле контактного давления массива угля на поверхность коронки при усилнии на коронку в 235 кН в момент контакта острия коронки с границей массива угля

Таким образом, в результате данного расчета были получены поля значений контактного давления при различных усилиях на коронку во время контакта коронки с массивом угля. Далее полученные поля были импортированы в Ansys Mechanical для дальнейших расчетов.

2.3.3 Расчет напряжений и деформаций при механической нагрузке

Расчет напряжений и деформаций коронки при контакте с углем проводился в Ansys Mechanical, при этом механические воздействия при контакте в виде полей контактного давления были импортированы из LS-Дупа в качестве граничного условия модели.

Расчет проводился для усилий на коронку от 100 до 500 кН с шагом в 100 кН, а также для рассчитанного усилия в 235 кН. Результат расчета для 100, 235 и 500 кН представлен на рисунке 2.8.

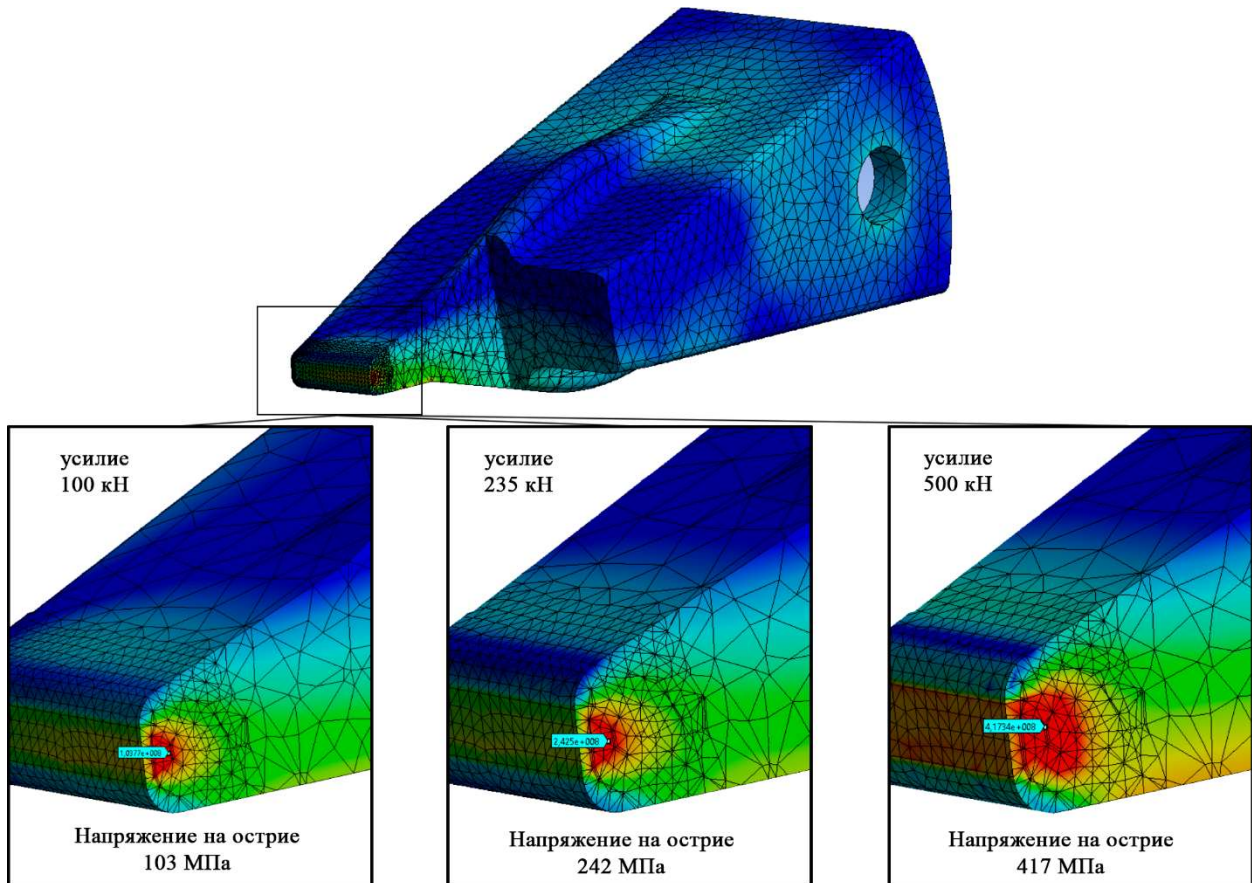


Рисунок 2.8 – Напряжение по Мизесу в коронке при различных усилиях

Как видно по рисунку 2.8, при контакте коронки с углем максимальные напряжения возникают у поверхности острия на небольшом углублении, при этом наблюдается логарифмическая зависимость максимального напряжения по Мизесу от величины усилия на коронку (рисунок 2.9).

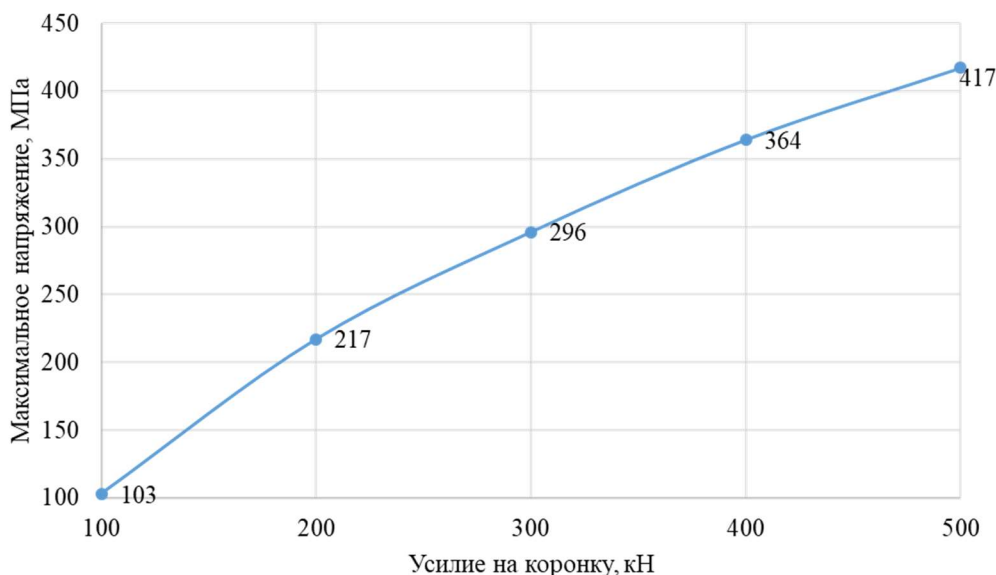


Рисунок 2.9 – Зависимость максимального напряжения по Мизесу, возникающего на некоторой глубине у поверхности острия коронки, от усилия на коронку

Далее для получения сведения о влиянии температурного градиента, возникающего при цикле нагрев-охлаждение коронки при работе с горящим углем, производится расчет термических нагрузок, а также совместного влияния термических и рассчитанных механических нагрузок.

2.3.4 Расчет уравнения теплового баланса и термической нагрузки

После определения величины механической нагрузки на коронку, был произведен расчет уравнения теплового баланса (ур. 2.7) для определения величины термической нагрузки. По исследованию [56] предельная величина поверхности массива нагретого угля может составлять до 400-500 °С, однако на Коркинском разрезе, по данным термических съёмок, проводимых при старте операций по ликвидации выемке, температура поверхности очагов достигает 200-250 °С. Параметры конвекции были рассчитаны исходя из средней скорости ветра в районе, равной 2 м/с. Для данной скорости ветра величина коэффициента конвективной теплопередачи равна 20 Вт/м²·К.

Основной задачей было определение величины теплового потока от угля к коронке, а также определение числа циклов нагрева и конвективного охлаждения до наступления периода, при котором величины теплопередачи и конвективного охлаждения находились в балансе и ковш не нагревался с каждым циклом выше определенной температуры. По таким циклам далее была определена величина термического градиента при работе ковша по горячему грунту. Расчет проводился для контакта коронки с массивом угля, нагретым до температур, в диапазоне от 100 до 500 °С. Результаты расчета термического градиента при контакте коронки с массивом угля, нагретым до 100 °С, представлены на рисунке 2.10.

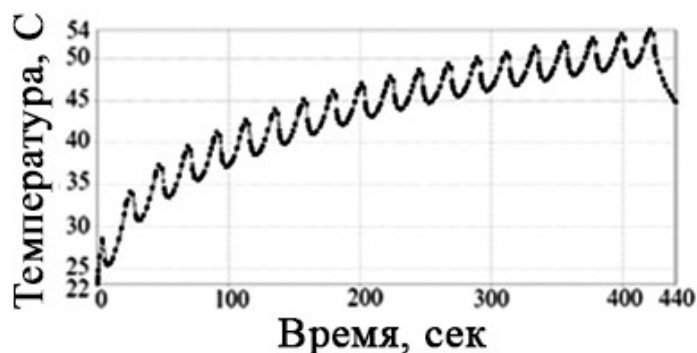


Рисунок 2.10 – График изменения температуры ковша за первые 20 циклов нагрева или за 440 с

Как видно по рисунку 2.10, ковш за первые 20 циклов нагревается до 54 °С, при этом по дополнительному расчету рост температуры прекращается на отметке 60 °С, притом величина термического градиента составляет около 15 °С.

При увеличении температуры поверхности массива, величина термического градиента растет экспоненциально, что видно по рисунку 2.11.

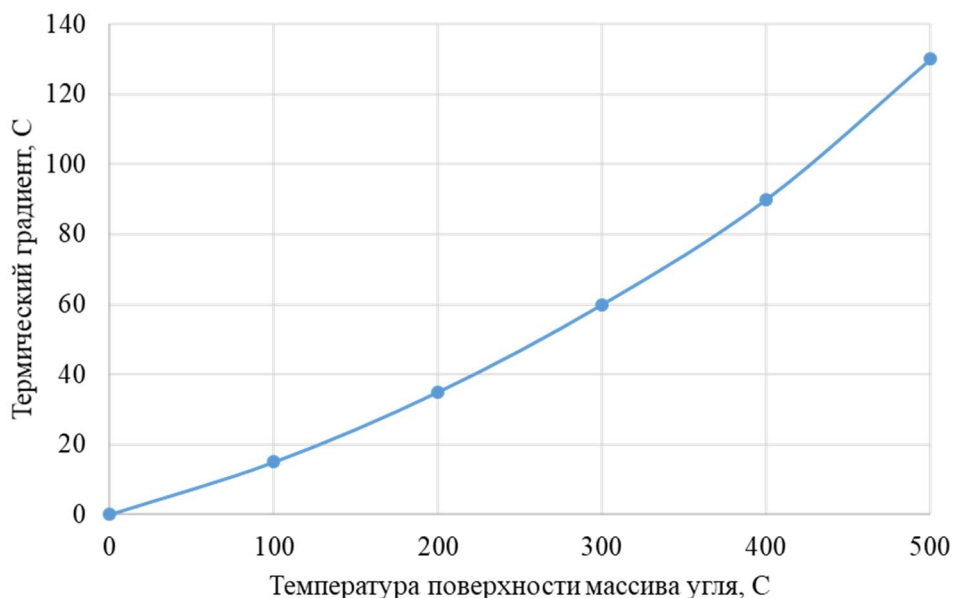


Рисунок 2.11 – Рост термического градиента на кромке коронки зуба при росте температуры поверхности массива угля

Повышение температуры за один цикл или температурный градиент может варьироваться для разных коэффициентов конвективной теплопередачи или параметров копания. Экскаваторы, работающие на тушении очагов пожаров, работают как с нагретым углем, так и с холодным углем или вмещающей породой, поэтому значение температурного градиента увеличивается. В связи с этим в качестве тепловой нагрузки были выбраны различные значения температурного градиента для оценки влияния тепловых нагрузок на возникающие напряжения.

В ходе расчета напряжений, возникающих при циклических нагрузках, проводилась оценка расходования ресурса как при рассчитанных параметрах (235 кН механического усилия

на коронку зуба и величины термического градиента в 40 °С), так и при 20 комбинациях различных термических нагрузок при величинах термического градиента в 0, 40, 80 и 160 К, и механических нагрузок при величинах усилий на коронку в 100, 200, 300, 400 и 500 кН. Результаты моделирования напряжений при представленных комбинаций нагрузок представлены на рисунке 2.12.

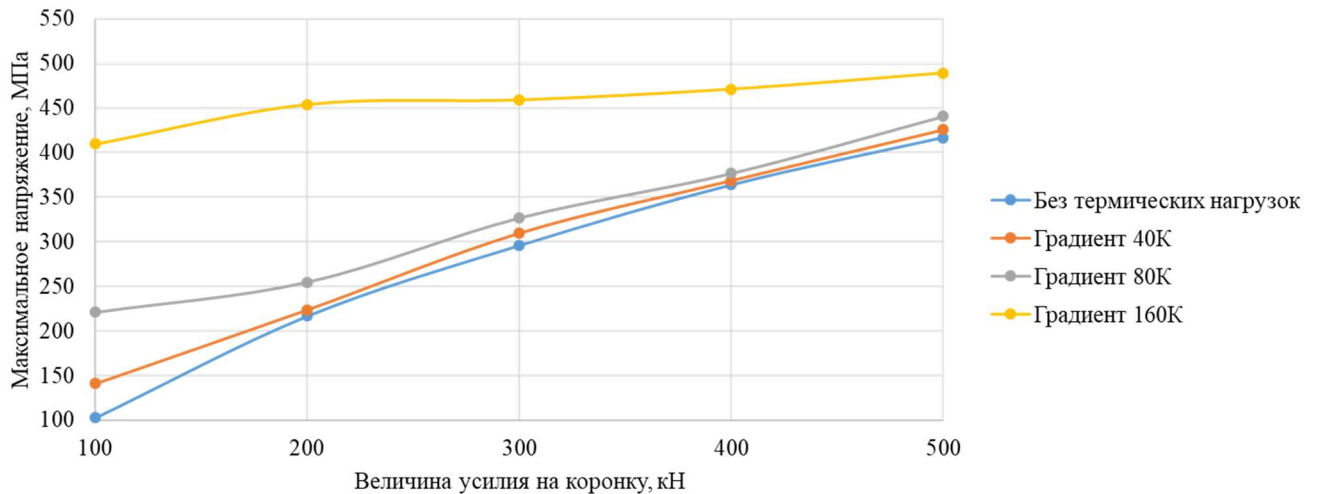


Рисунок. 2.12 – Напряжения на коронки, возникающие от совместного воздействия термических и механических нагрузок

По результатам моделирования можно сделать вывод, что термические нагрузки существенно повышают напряжения в коронке, особенно при малых усилиях на коронку.

2.4 Расчет усталостного ресурса при циклических ударных и термических нагрузках как оценочного критерия остаточного ресурса

Усталостная долговечность рассчитывается в программном обеспечении ANSYS на основе описанной модели по ур. (2.12). Полученные результаты представлены на рисунке 1Б в Приложении Б в виде трехмерных карт числа циклов до наступления предельного состояния, наложенного на поверхность коронки, для всех термических и механических нагрузок. Характеристики стали 30ХГСА для расчета усталостной долговечности по модели Coffin-Manson-Basquin представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Параметры модели Coffin-Manson-Basquin для стали 30ХГСА

Параметр	Размерность	Значение
c	-	-0,8103
b	-	-0,08716
ε_f'	-	2,139042
σ_f'	МПа	1660
E	ГПа	200

Кроме того, был составлен график, отображающий соотношение между усилием копания и усталостной долговечностью для различных значений градиента температуры (рисунок 2.13).

Можно заметить, что появление температурного градиента на кромках коронки зуба резко снижает усталостную долговечность коронки в зоне усилия копания 100-300 кН.

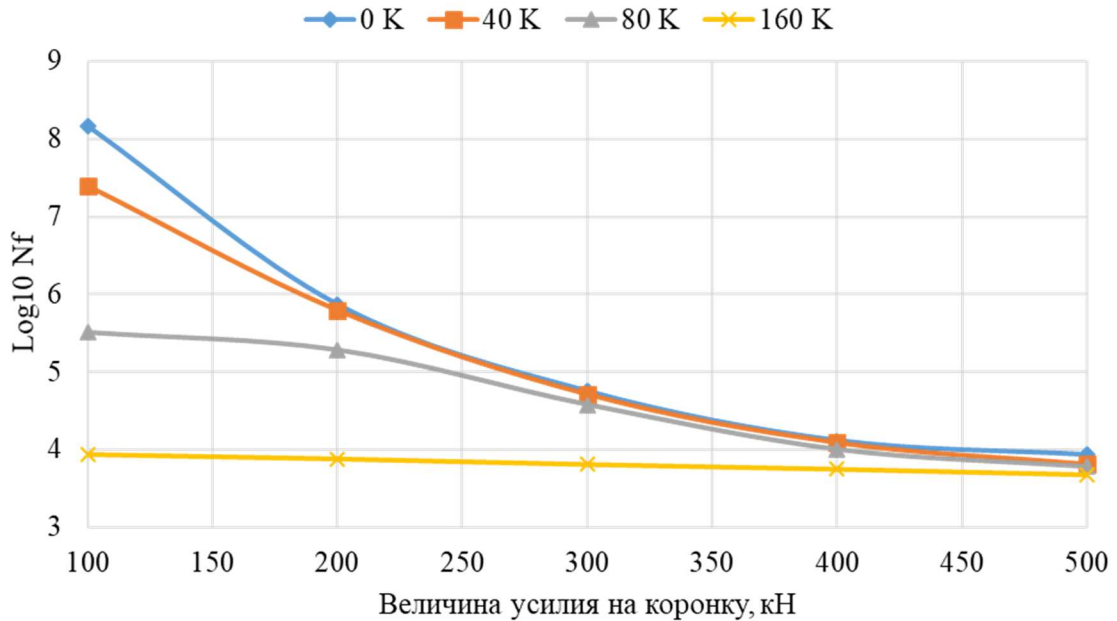


Рисунок 2.13 – График зависимости усталостной долговечности коронки зуба от различных значений механических и термических нагрузок

Для сравнения результатов была также рассчитана усталостная долговечность по Гудману. Кривая «стресс-ресурс» для стали 30ХГСА была взята из исследования [98]. Результаты усталостной долговечности для различных моделей усталости представлены на рисунке 2.14.

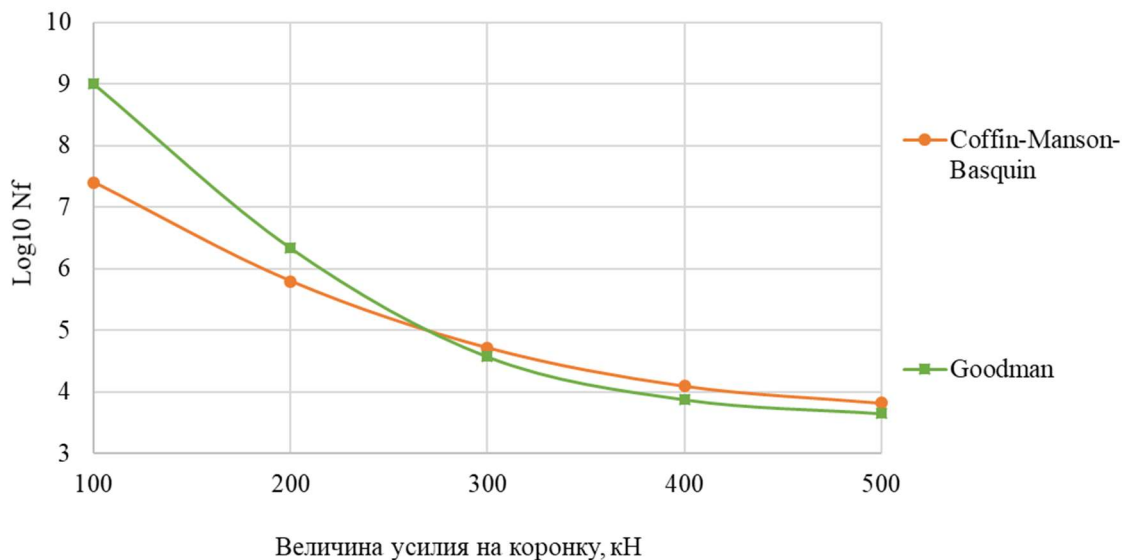


Рисунок 2.14 – Сравнение кривых «стресс-ресурс» по моделям усталости Гудмана и Coffin-Manson-Basquin

Результаты моделирования показали, что циклические термические нагрузки и нагрузки значительно снижают усталостную долговечность коронки зуба. При сопряженной механической нагрузке 235 кН и температурном градиенте 40 °С коронка зуба выйдет из строя после 520 000 циклов нагружения или 3170 часов рабочего времени.

Для продления срока службы экскаваторов, работающих в таких суровых условиях, необходимы современные методы ремонта и обслуживания. Предложенная модель может быть использована для разработки нового графика технического обслуживания, который продлит срок службы экскаваторов, а также снизит затраты на земляные работы.

На многих шахтах применяются методы технического диагностирования для оценки остаточного ресурса коронок, что позволяет отремонтировать коронки до выхода из строя. Однако горные машины, работающие в условиях высоких температур, иногда неправильно проверяются, что приводит к позднему техническому обслуживанию. Метод конечных элементов может быть полезным для прогнозирования скорости потребления ресурсов в таких условиях и повышения качества технического диагностирования в районах открытой добычи угля.

2.5 Выводы по главе 2

В результате работы над второй главой были сделаны следующие выводы:

1. Расчет методом конечных элементов позволяет определить закономерности расходования ресурса металлоконструкций коронок зубьев ковшей экскаваторов при работе в условиях высокотемпературного массива и может быть использована в качестве прогнозного значения верхней границы остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в аналогичных условиях при похожих нагрузках;

2. При контакте коронки и массива угля максимальные нагрузки возникают у поверхностного слоя острия коронки, на некотором заглублении, таким образом, разрушение коронки будет начинаться именно в этой области;

3. При работе экскаватора Komatsu PC400LC-7 по горячему углю, нагрузка на ковш будет составлять 235 кН, а величина создаваемого температурного градиента – 40 °С; при такой нагрузке коронки зубьев ковша достигнут предельного состояния в течение 520 000 циклов нагружения или 3170 часов рабочего времени.

4. Термические нагрузки значительно ускоряют расходование ресурса коронки зуба, особенно при низких значениях механической нагрузки;

5. При увеличении термического градиента на коронке в два раза при неизменной механической нагрузке, величина усталостной жизни коронки зуба ковша уменьшается почти в 10 раз;

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОРОНОК ЗУБЬЕВ КОВШЕЙ ЭКСКАВАТОРОВ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТА С ГОРЯЩИМ ГРУНТОМ

Работы по оценке изменения свойств поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, проводились на базе Коркинского разреза. Угольный разрез в период с 1931 по 2017 год разрабатывал центральную часть Коркинского месторождения бурых углей Челябинского бурогоугольного бассейна. После 2017 года, в связи с сильным ухудшением экологической обстановки, вызванной выбросами в атмосферный воздух продуктов эндогенного горения углей, Коркинский разрез был снят с эксплуатации, и лицензия на недропользование была передана ООО «Промрекультивация» для ведения работ по ликвидации разреза.

Анализ опубликованных ранее научных работ, проведенный в Главе 1, а также результаты численного моделирования, изложенные в Главе 2, показали, что максимальные напряжения при контакте коронки и массива угля наблюдаются у поверхности острия на некотором углублении. При этом при экскавации, вдоль поверхностного слоя коронки на контактной поверхности происходит абразивное изнашивание, а при ударном воздействии коронки с массивом – ударно-абразивное изнашивание. Также, в результате большого числа циклов нагрев-охлаждение на поверхности также будут образовываться последствия действия термической усталости – усталостные микротрещины. При ударно-абразивном изнашивании в ходе работы экскаватора твердость коронок зубьев повышается вследствие образования наклепа, влияние же высоких температур приводит к умягчению металла, более того, именно наличие температурного градиента и приводит к умягчению поверхностного слоя и возникновению трещин. С учетом этого, а также опираясь на результаты обзорных исследований, в качестве основных анализируемых параметров поверхностного слоя были выбраны твердость и геометрические и физико-механические параметры поверхностного слоя.

3.1 Выбор методов и средств контроля твердости

Твердость – свойство материала сопротивляться внедрению в него более твердого тела, при этом значения твердости зависят от метода, с помощью которого производят испытания на твердость [28], и выражаются в шкалах твердости, относящихся к выбранному методу измерения. Методы измерения твердости разделяют на статические и динамические. К статическим методам определения твердости относят метод Бринелля, Роквелла, Виккерса, а к динамическим – метод Шора, Либа, а также метод динамического индентирования [57].

3.1.1 Обзор методов проведения испытаний на твердость

Определение твердости статическим методом подразумевает прямое измерение геометрических размеров отпечатков, полученных в результате внедрения индентора в поверхность объекта контроля, при этом число твердости определяется по соотношению приложенной нагрузки и геометрических размеров полученного отпечатка [49]. Схемы определения твердости по основным статическим методам приведены на рисунке 3.1.

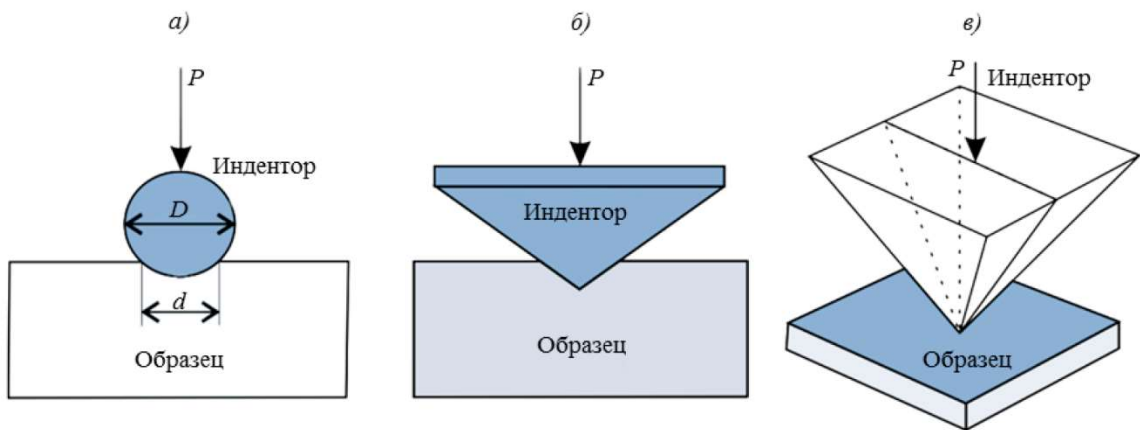


Рисунок 3.1 – Схема определения твердости: а – по Бринеллю; б – по Роквеллу, в – по Виккерсу [49]

Статические методы определения твердости различаются геометрической формой индентора и величиной нагрузки. Как отмечает [20], различные материалы по-разному деформируются в зависимости от формы индентора и прилагаемой нагрузки, что значительно усложняет процесс взаимного сопоставления шкал статической твердости. Приборы для измерения твердости по статическим методам зачастую представляют собой стационарные лабораторные установки [95], что значительно усложняет процесс диагностирования изменения твердости в полевых условиях. Более того, согласно нормативной документации, при измерении статической твердости по Бринеллю (ГОСТ 9012-59), Роквеллу (ГОСТ 9013-59) и Виккерсу (ГОСТ 2999-75) должна быть обеспечена перпендикулярность приложения действующего усилия к испытываемой поверхности, и образец должен быть установлен на столике или подставке устойчиво во избежание его смещения и прогиба во время измерения твердости.

Динамические методы измерения твердости, как отмечает автор [24], подразделяются на три основные группы: метод отпечатка, метод упругой отдачи и метод качания. Последний метод в настоящее время слабо распространен. При измерении по методу отпечатка в момент измерения происходит удар по поверхности измеряемого образца ударника с шариком, таким образом, данный метод весьма похож на статические методы измерения твердости. Твердость в этих методах пропорциональна величине пластической деформации, что может привести к

возникновению значительных погрешностей при определении твердости в случае даже незначительного изменения скорости удара. Измерение твердости по методу упругой отдачи предполагает измерения скорости (или высоты) отскока ударника с жестким сферическим индентором, при соударении индентора и образца. Средства измерения (СИ) твердости подразделяют на стационарные и портативные (рисунок 3.2).

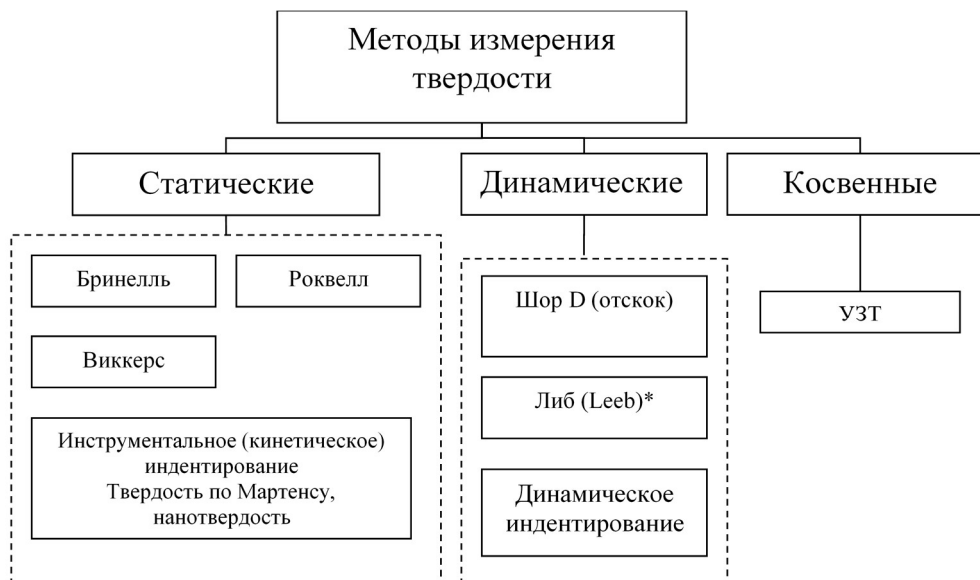


Рисунок 3.2 – Методы измерения твердости [57]

Стационарные твердомеры предназначены для контроля твердости поверхности металлов в лабораторных условиях. В таких приборах реализуются методы измерения статической твердости: метод Бринелля, Виккерса и Роквелла.

При измерении твердости методом Бринелля в поверхность объекта контроля на протяжении определенного времени под действием заданной нагрузки вдавливаются стальной шарик из закаленной стали. Результирующая величина твердости может быть рассчитана двумя методами: методом восстановленного отпечатка (формула 3.1), в случае расчета твердости как отношения нагрузки к площади поверхности отпечатка, и методом невосстановленного отпечатка (формула 3.2), когда твердость определяется как отношение нагрузки к площади части индентора, внедренного в объект контроля.

$$\frac{0,102F}{\frac{\pi D}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (3.1)$$

где F – величина нагрузки, Н;

D – диаметр индентора, мм;

d – диаметр отпечатка, мм

$$HB = \frac{0,102F}{\pi Dh}, \quad (3.2)$$

где h – глубина внедрения, мм

Методика проведения испытаний на твердость по методу Бринелля регламентирована и регламентируются ГОСТ 9012-59.

Твердость методом Роквелла измеряется путем внедрения алмазного конуса углом вершины 120 градусов или шарика из закаленной стали или карбида вольфрама с диаметром 1,58 мм, при этом усилие подается дважды: вначале происходит предварительное нагружение (в 10 кгс) с обнулением шкалы, а после – основная нагрузка до достижения максимального усилия (60-150 кгс). При этом твердость по данному методу рассчитывается по формуле 3.3:

$$HR = N - \frac{H - h}{s}, \quad (3.3)$$

где H – глубина погружения индентора после снятия основной нагрузки, мм;

h – глубина погружения индентора при предварительном нагружении, мм;

N, s – константы, определяемые в зависимости от выбранной шкалы Роквелла.

Различают множество шкал твердости Роквелла, различающиеся типом и материалом индентора, а также величиной максимальной нагрузки. Подробная методика испытания на твердость по Роквеллу приведена в ГОСТ 9013-59.

Твердость по методу Виккерса определяется путем вдавливания четырехгранной алмазной пирамиды, угол между гранями которой составляет 136°. Нагрузка поддерживается постоянно на протяжении заданного промежутка времени. Затем измеряются диагонали отпечатка, которые остались на поверхности образца. Методика проведения испытаний по данному методу регламентируется ГОСТ 2999-75.

Для проведения испытаний на твердость в полевых условиях, или в случаях, когда невозможно применить стационарные установки, применяют портативные твердомеры. Наиболее распространенными портативными приборами для измерения твердости являются твердомеры по методу Либа, твердомеры по методу ультразвукового контактного импеданса (UCI), а также портативные твердомеры Роквелла.

Измерение твердости по методу Либа заключается в измерении соотношения скоростей ударника до и после соударения с поверхностью объекта контроля, при этом твердость рассчитывается по формуле 3.4:

$$HL = 1000 \left(\frac{v_R}{v_A} \right), \quad (3.4)$$

где v_R – скорость отскока ударника;

v_A – скорость удара.

Принципиальная схема прибора измерения твердости по методу Либа приведена на рисунке 3.3.

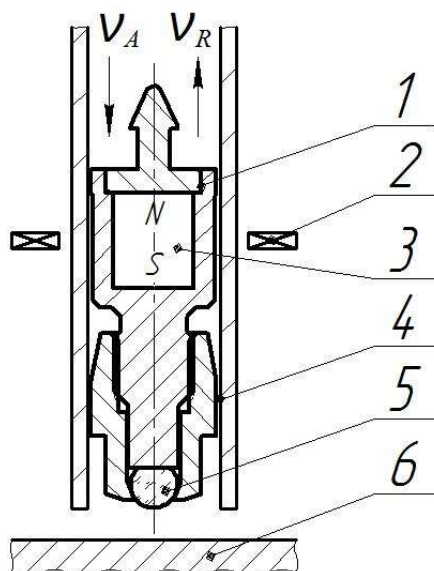


Рисунок 3.3 – Схема измерения твердости по Либу: 1 – корпус ударника, 2 – катушка индуктивности, 3 – постоянный магнит, 4 – направляющая трубка; 5 – индентор, 6 – испытываемый образец [95]

Скорость ударника определяется путем измерения электродвижущей силы (ЭДС), генерируемой магнитом, установленным внутри ударника, при прохождении сквозь катушку индуктивности, и, таким образом, наведенная ЭДС пропорциональна скорости падения магнита [95]. При измерении по методу Либя, в зависимости от типа ударника, а также других параметров самого прибора, шкалы Либя будут отличаться. В ГОСТ Р 8.969-2019 приведены основные параметры преобразователей (датчиков), а также шкал Либя. Основное преимущество метода Либя заключается в простоте проведения измерений. Согласно ГОСТ Р 8.969-2019 измерения могут проводиться на образцах различной формы, при условии, что вектор скорости удара направлен под прямым углом к испытываемой поверхности. К основным требованиям проведения измерений относится шероховатость поверхности (не более 2 мкм для датчиков D, DL, D+15, S, E, не более 7 мкм для датчика G и не более 0,4 для датчика C), а также минимальные масса и толщина образца.

Метод UCI основан на эффекте изменения резонансной частоты упругого элемента (стержня), в результате внедрения закрепленного на нем индентора (алмазная пирамида Виккерса) в поверхность испытываемого образца при приложении к нему нагрузки [95]. При индентировании частота колебаний стержня увеличивается при увеличении площади контакта с поверхностью образца, и по достижении максимальной нагрузки, величина которой зависит от преобразователя, измеряется величина сдвига частоты. При этом числа твердости по данному методу определяются по градуировочной зависимости сдвига частоты от твердости (рисунок 3.4).

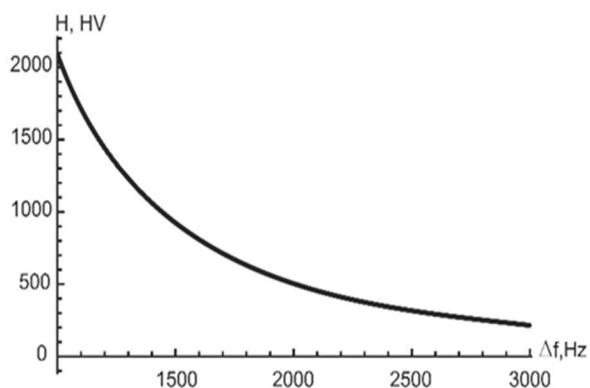


Рисунок 3.4 – Градуировочная зависимость твердости по методу UCI (HV_{UCI}) от сдвига частоты Δf [95]

Недостатком твердомеров, реализующих метод UCI является повышенные требования к подготовке поверхности и структуре материала (шероховатость не должна превышать 30% глубины индентирования) [95].

Твердомеры, реализующие портативный метод Роквелла (ПР) по своему действию аналогичны методу измерения твердости по шкалам Роквелла. При измерении твердости прикладывается вначале предварительная, а после – полная нагрузка, при этом производится измерение глубины проникновения индентора при предварительном и при полном нагружении. Разница глубин проникновения после пересчитывается в значения твердости. В качестве индентора в преобразователях ПР используется алмазный усеченный конус с углом при вершине 100° и диаметром плоской площадки 0,06 мм для мягких металлов и острый конусообразным индентором с углом при вершине 100° для твердых металлов [95]. Преобразователи ПР могут быть использованы для диагностики как тонкостенных, так и крупных, массивных объектов. Основными недостатками метода являются большая по времени протяженность измерительных операций, а также сложность контроля твердости труднодоступных поверхностей.

3.1.2 Обоснование выбора портативного твердомера с преобразователем на основе динамического метода Либя для контроля твердости поверхностного слоя коронок

Применение стационарных приборов для измерения поверхностной твердости коронки зуба ковша экскаватора требует остановки работы экскаватора на разрезе и демонтажа коронки, что недопустимо, особенно на работах по ликвидации очагов эндогенного горения. К тому же, основной задачей исследования является диагностирование изменения твердости наклепанного слоя коронки на месте эксплуатации экскаваторов. Решение данной задачи, как отмечается в [95], может быть достигнуто использованием портативных твердомеров.

Основным ограничением при измерениях твердости коронок зубьев ковшей экскаваторов является большая шероховатость поверхности. Для уменьшения влияния шероховатости на разброс и точность результатов измерений необходимо выбрать такой тип портативного твердомера, который обеспечивает измерение с наибольшими нагрузками и, соответственно, размерами отпечатков, что позволяет получать усредненные значения твердости по поверхности и объему материала исследуемого образца.

Анализируя существующие методы, а также приборную базу портативных СИ для контроля твердости поверхностей, можно прийти к выводу, что для измерения твердости поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, наиболее предпочтительны портативные твердомеры с преобразователями, реализующими динамический метод Либа. Данный метод имеет несколько ключевых преимуществ, по сравнению с другими методами. Во-первых, на результат измерений в меньшей степени влияет шероховатость поверхности [5], что является важным фактором в решении задачи контроля твердости поверхностного слоя коронки, на котором в результате эксплуатации в условиях эндогенного горения бурых углей, будут возникать различные дефекты. Во-вторых, метод Либа является простым и малозатратным по времени, что также важно, так как для сбора представительной выборки значений твердости поверхности коронки необходимы измерения по регулярной сетке с большим числом узлов, что, в случае контроля другими методами, потребует намного больше времени и увеличит время простоя техники.

Твердость по Либу, определяемая по соотношению 3.4, линейно связана с величиной, которая в литературе называется «коэффициент восстановления скорости при упругом ударе» e равной отношению скоростей отскока ударника и удара (формула 3.5):

$$e \equiv \frac{v_R}{v_A} \quad (3.5)$$

Энергия удара может быть рассчитана по формуле 3.6, полное упругое и пластическое сжатие – по формуле 3.7:

$$\frac{1}{2} m v_A^2 = \int_0^{\delta} P d\delta = \int_0^a \pi a^2 p_d \left(\frac{a}{R} \right) da = \frac{\pi a^4 p_d}{4R}, \quad (3.6)$$

$$\delta = \frac{a^2}{2R}, \quad (3.7)$$

где m – масса ударника, кг;

P – вдавливающая сила, Н;

a – радиус контакта, м;

R – радиус сферического наконечника, м;

δ – полное упругое и пластическое сжатие, м;

p_d – среднее контактное давление при динамическом нагружении, Па.

Энергия отскока рассчитывается по формулам 3.8 и 3.9:

$$\frac{1}{2}mv_R^2 = \int_0^\delta P'd\delta' = \frac{3P^2}{10aE^*} = \frac{3}{10} \cdot \frac{\pi^2 a^3 p_d^2}{E^*}, \quad (3.8)$$

$$E^* = \left(1 - \frac{v_1^2}{E_1}\right) + \left(1 - \frac{v_2^2}{E_2}\right), \quad (3.9)$$

где E^* – приведенный модуль упругости, Па;

v_1, v_2 и E_1, E_2 – коэффициенты Пуассона и модули упругости наконечника и испытуемого материала соответственно.

Тогда коэффициент восстановления может быть рассчитан по формулам 3.10 и 3.11:

$$e^2 \equiv \frac{v_R^2}{v_A^2} = \frac{3\pi^{5/4} \cdot 4^{3/4}}{10} \cdot \frac{p_d}{E^*} \cdot \left(\frac{1}{2} \frac{m_A^2}{p_d R^3}\right)^{-1/4} \quad (3.10)$$

$$e \approx 3,8 \left(\frac{\sigma_d}{E^*}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{2} \frac{m_A^2}{\sigma_d R^3}\right)^{-1/8}, \quad (3.11)$$

где σ_d – динамический предел текучести, Па.

Как сообщает автор [129] при деформационном упрочнении (наклепе) повышаются механические прочностные свойства стали, но снижается пластичность (рисунок 3.5).

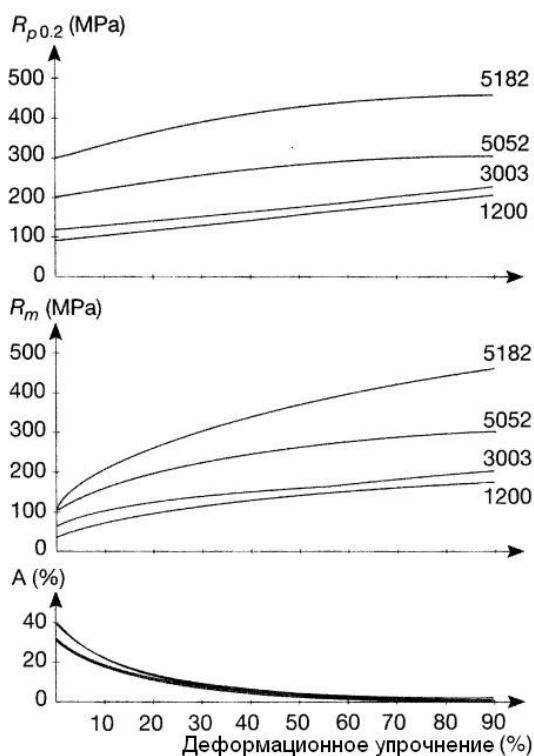


Рисунок 3.5 – Изменение механических свойств стали при упрочнении

$R_{p0.2}$ – условный предел текучести (0,2 %), МПа; R_m – предел прочности при растяжении, МПа; A – относительное удлинение, % [129]

Таким образом, при наклепе происходит возрастание предела текучести стали σ_T , что влечет также и рост динамического предела текучести σ_d , линейно зависящего от изменения статического предела текучести σ_T [117], в результате чего возрастает коэффициент восстановления e и, соответственно, твердость по Либу. Таким образом, при наклепе происходит возрастание твердости по Либу наклепанного участка поверхности исследуемого образца, что доказывает возможность применение портативных твердомеров с преобразователями, реализующими динамический метод Либа для контроля твердости поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов.

Таким образом, для решения задачи контроля твердости поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих на операциях по ликвидации очагов эндогенного горения, на основе проведенного анализа можно сделать вывод, что в наибольшей степени для решения поставленной задачи подходит портативный твердомер с преобразователем, реализующим динамический метод Либа.

3.1.3 Выбор средства измерения твердости по методу Либа

Согласно ФГИС «Аршин» [71] на территории РФ зарегистрировано несколько типов портативных динамических твердомеров, реализующих метод Либа. Данные СИ приведены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Зарегистрированные в госреестре портативные динамические твердомеры

№ в госреестре	Обозначения типа СИ	Производитель
48898-12	ТКМ-359	ООО "НПП "Машпроект", г. С.-Петербург
62323-15	Equotip 550	Фирма "PROCEQ SA", Швейцария
75948-19	Константа КТ	ООО "КОНСТАНТА", г. С.-Петербург
48997-12	МИНИКОН 960	ООО "АКТЕСТ", г. Москва
26182-03	МЕТ-Д2	ООО "Центр физико-механических измерений "МЕТ", г. Москва;

Метод измерения твердости по Либу был запатентован в 1975 году компанией Proceq и взят в основу портативных твердомеров компании. Несмотря на наличие национального стандарта РФ ГОСТ Р 8.969-2019 (ИСО 16859-1:2015) "ГСИ. Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа. Часть 1. Метод измерений", а также Государственного первичного эталона твердости металлов по шкале Шора D и шкалам Либа ГЭТ 161-2019 [4], динамические твердомеры до настоящего времени проходят испытания в целях утверждения типа и вносятся в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений как твердомеры по шкалам Бринелля, Роквелла, Виккерса и Шора. Для калибровки и поверки таких твердомеров используются меры твердости соответствующих шкал, что противоречит действующим стандартам и базовым метрологическим принципам [57]. В мировой практике для

сопоставления значений твердости по шкалам Либа с другими шкалами твердости используются соответствующие справочные таблицы пересчета (ASTM E140-12B(2019)e1), составленные для конкретных типов металлов и сплавов. Для корректного использования таких таблиц необходимо, чтобы измерительный преобразователь твердомера соответствовал требованиям стандартов на шкалы Либа [97]. В РФ такое соответствие обеспечено для портативных твердомеров Константа КТ, производимых ООО «Константа» [124], которые успешно проходят процедуру калибровки по стандарту ISO 16859-2:2015 [45]. Поэтому для решения задачи контроля твердости был выбран портативный твердомер Константа КТ с преобразователем, реализующим динамический метод Либа тип D (рисунок 3.6). Технические характеристики прибора и преобразователя представлены в таблице 1В в Приложении В.



Рисунок 3.6 – Портативный твердомер Константа-КТ с преобразователем по динамическому методу Либа тип D [65]

3.2 Выбор методов и средств контроля физико-механических и геометрических параметров поверхностного слоя коронок

3.2.1 Анализ применимости методов НК параметров поверхностного слоя коронок

Согласно классификации, приведенной в ГОСТ 56542-2019 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов», различают следующие виды неразрушающего контроля:

- магнитный;
- электрический;
- вихрековый;
- радиоволновый;
- тепловой;
- оптический;
- радиационный;

- акустический.

Также выделяют группу методов контроля проникающими веществами. Часть приведенных видов НК применяют при контроле в рамках экспертизы промышленной безопасности, описанной в Главе 1 диссертации.

С помощью магнитного контроля (МК) выявляют поверхностные и внутренние дефекты объектов из ферромагнитных материалов (железа, никеля и кобальта). В основе методов МК лежит явление искажения магнитного поля намагниченного объекта различными повреждениями, присутствующими в изделии. Магнитная проницаемость таких повреждений ниже, чем у исходного материала контролируемого объекта, что приводит к искривлению магнитных силовых линий. Образованные таким образом поля рассеивания фиксируются преобразователями. По форме или амплитуде магнитных линий можно судить о размерах дефекта.

Среди магнитных методов НК на практике для дефектоскопии применяются методы: магнитопорошковый, магнитографический, индукционный, феррозондовый [67]. Для оценки наклепанного слоя также можно применить метод коэрцитивной силы и метод эффекта Баркгаузена.

Магнитопорошковый метод регламентирован в ГОСТ Р 56512-2015. При контроле по данному методу на поверхность объекта контроля наносится сухой магнитный порошок, либо суспензия магнитного порошка. Далее, под действием электромагнитных полей рассеяния, частицы порошка равномерно перемещаются по поверхности объекта, однако в области дефектов поверхности порошок образует скопления, по форме и размерам которых можно судить о форме и размере дефекта. Среди основных недостатков данного метода является долгое время проведения контроля, а также необходимость большой площади объекта контроля.

Магнитографический метод описан в ГОСТ 25225-82 «Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод». С помощью данного метода выявляются дефекты в сварных швах стальных трубопроводов, а также производится локация инородных включений, отличающихся по магнитным свойствам от основного металла. Принцип магнитографического контроля состоит в записи поля рассеяния дефекта на магнитную ленту, плотно прижатую к поверхности объекта контроля и последующего считывания сигнала с магнитной ленты [67]. Недостатком данного метода является затруднение локации поверхностных дефектов с малым раскрытием.

Индукционный метод контроля основан на использовании рассеянных магнитных потоков с помощью индукционных катушек. При реализации метода, объект контроля намагничивается, после чего катушки перемещают вдоль объекта и, при пересечении катушкой

участка с дефектом, измеряется возникающая в результате изменения магнитного потока ЭДС индукции. Недостатком данного метода является его низкая чувствительность к поверхностным дефектам малого размера.

Феррозондовый метод контроля регламентирован в ГОСТ 55680-2013 «Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод». Данный метод основан на выявлении феррозондовым преобразователем магнитного поля рассеяния дефекта в намагниченных изделиях и преобразовании его в электрический сигнал. Метод позволяет контролировать любые объекты, если отношение длины к наибольшему размеру в поперечном направлении и магнитные свойства дают возможность намагничивания до степени, необходимой для создания магнитного поля рассеяния дефекта. При этом минимальная длина выявляемого дефекта при данном методе равна 2 мм. Недостатком метода также является его низкая чувствительность к мельчайшим дефектам поверхностного слоя.

Характеристики наклепанного слоя можно оценить магнитным коэрцитиметрическим методом, регламентированным ГОСТ Р 58599-2019 «Диагностика стальных конструкций. Магнитный коэрцитиметрический метод. Общие требования». Согласно данному ГОСТ, метод основан на существующей зависимости между уровнем эксплуатационной поврежденности структуры металла контролируемой конструкции и величиной изменения его коэрцитивной силы внутри диапазона от состояния поставки до состояния, соответствующего предразрушению. Для каждой марки стали существует характерный диапазон изменения коэрцитивной силы, зависящий от толщины металла, химического состава стали, вида термомеханической обработки и т.д. Для данного вида НК не требуется специальная подготовка поверхности образца, однако для проведения контроля требуется высокая квалификация оператора, а также наличие необходимых для диагностики сведений об объекте контроля (зависимость изменения коэрцитивной силы от наработки для конкретного вида стали).

Метод эффекта Баркгаузена состоит в том, что при намагничивании ферромагнетика происходит движение границ макроскопических магнитных областей (доменов) [80], при этом при плавном изменении внешнего магнитного поля намагниченность образца изменяется скачкообразно. Подобные скачкообразные смещения границ доменов и называют скачками Баркгаузена [67]. При этом параметры данных скачков определяются наличием внутренних напряжений, неоднородностей, дефектов, что и лежит в основе данного метода НК. Среди недостатков метода можно отметить низкую чувствительность при измерениях на материалах с высокой твердостью, малую приборную базу, а также необходимость высокой квалификации оператора прибора.

Методы электрического контроля приведены в ГОСТ 25315-82 «Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения». Согласно ГОСТ, Электрический контроль (ЭК), основан на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с объектом контроля или возникающего в объекте контроля в результате внешнего воздействия. Различают следующие методы ЭК: искровой, направленный на диагностирование состояния изоляционного покрытия; параметрический – количественная оценка состояния изоляционного покрытия; емкостный, применяемый для контроля полупроводников и диэлектриков; термический, контролирующий химический состав материалов; электронной эмиссии, направленной на изучение микрокристаллических поверхностей; электростатического порошка – действует аналогично магнитопорошковому методу. Для дефектоскопии металлических поверхностей применяют метод электропотенциальной дефектоскопии, суть которого заключается в резком падении напряжения, создаваемого при контроле внешнего электрического поля на участках поверхности с дефектом, при этом регистрируя полученную информацию можно сделать вывод о геометрических параметрах дефекта.

Основными минусами ЭК являются обязательность контакта с объектом контроля; тщательность очищения исследуемой поверхности; проблемы с автоматизацией процесса измерения; взаимосвязь результатов с состоянием окружающей среды.

Радиоволновой метод НК приведен в ГОСТ 25313-82 «Контроль неразрушающий радиоволновой. Термины и определения». Данный метод основан на взаимодействии электромагнитного поля в диапазоне длин волн от 1 до 100 мм с объектом контроля. В большинстве случаев данный вид контроля применяются для толщинометрии, например, метод СВЧ-толщинометрии. Радиоволновой вид НК применяется для дефектоскопии расслоений и других подобных дефектов, расположенных на некоторой глубине от поверхности. Однако существенным недостатком применения данного вида НК для дефектоскопии является довольно большой минимальный размер обнаруживаемых дефектов ($>0,1$ мм), существенно возрастающий при увеличении толщины контролируемого слоя или возрастания глубины залегания дефектов. Методы радиоволнового контроля чаще всего применяются для оценки качества изделий из материалов, хорошо проводящих радиоволновые излучения, таких как диэлектриков, магнетодиэлектриков, полупроводников, тонкостенных металлических изделий, в то время как для дефектоскопии массивного металлического изделия, такого как коронка зуба, данные методы не применяются.

Тепловой вид НК позволяет оценивать свойства поверхностного слоя объекта контроля, такие как шероховатость, наличие слоев покрытий, загрязнений путем измерения коэффициента теплового излучения. Тепловой контроль (ТК) регламентирован в ГОСТ Р 56511-2015 «Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования».

Различают пассивный вид контроля, при котором объект не подвергается внешним воздействиям, и активный – при котором подвергается. Для дефектоскопии, а также для обнаружения изменений в структуре и физико-химических свойствах объекта контроля, применяется активный вид теплового контроля. Данный вид НК базируется на принципе преобразования инфракрасных лучей в видимый спектр, возможном благодаря зависимости скорости химических реакций от температурных показателей. Чаще всего данным методом проводится контроль различных электроприборов, строительных конструкций, радиоэлектроники и энергетического оборудования. Наиболее эффективен данный вид НК для дефектоскопии многослойных изделий со слоями из композиционных материалов, так как многие другие виды НК (УЗК и радиационный контроль) в таких случаях оказываются неприменимы. При дефектоскопии объектов, выделяющих недостаточное для проведения контроля тепловое излучение, необходим принудительный нагрев от внешнего источника, что и является основным недостатком данного вида НК при анализе коронок зубьев.

Методы оптического контроля описаны в ГОСТ Р 58399-2019 «Контроль неразрушающий. Методы оптические. Общие требования». Данный вид контроля применяется при техническом диагностировании в рамках аудита промышленной безопасности по РД-15-14-2008 в виде визуально-измерительного контроля, подробно описанного в Главе 1 диссертации. Помимо ВИК также различают визуально-оптический контроль, фотометрические и интерференционные методы контроля. При визуально-оптическом контроле применяются различные оптические средства, такие как микроскоп и лупы, для более тщательного осмотра объекта контроля. Зачастую данный метод применяют совместно с ВИК для тщательного осмотра мелких дефектов. Фотометрические методы основаны на измерении величин, характеризующих световое излучение, путем преобразования их в электрический сигнал и последующей обработке. Данные методы применяются для контроля геометрических размеров объекта контроля, оценки качества рабочих жидкостей, толщинометрии, оценки шероховатости поверхностного слоя.

Радиационный вид НК широко применяется в дефектоскопии для выявления нарушений однородности и сплошности материала, при этом минимальный размер выявляемых дефектов – 0,1 мм. Также с помощью радиационных методов можно определить внутреннюю конфигурацию и взаимное расположение объектов контроля, недоступных для визуального осмотра в процессе производства, сборки, эксплуатации и ремонта. Радиационный вид НК подразделяется на два вида, в зависимости от источника излучения:

- Рентгеновское излучение. Для дефектоскопии применяется источник рентгеновского излучения, обладающий высокой чувствительностью и позволяющий получать отчетливые снимки после относительно краткой экспозиции. Данный метод также сравнительно безопасен,

так как в неактивном состоянии генерирующий источник излучения не представляет радиационной угрозы.

- Гамма-излучение. В этом случае для дефектоскопии применяется радиоактивный изотоп, излучающий гамма-лучи. Важным преимуществом является возможность применения искусственных изотопов, обладающих высокой долговечностью, а также равномерным действием лучей. Недостатком метода является высокая опасность радиоактивного объекта, при этом чувствительность метода уступает рентгеновскому, а необходимое время экспозиции в несколько раз выше.

Данный вид контроля имеет ряд технических ограничений: точность исследований сильно зависит от правильности расположения излучателя и детектора, низкая чувствительность, зависимость точность метода зависит от направления просвечивания. Также, в ряде случаев, при наложении многочисленных деталей объекта контроля друг на друга, дефекты могут маскироваться и быть неотличимыми от контуров деталей, расположенных ниже исследуемого объекта. Помимо перечисленных недостатков данный метод требует применение стационарных лабораторных установок и предварительную экспозицию объекта контроля, что невозможно при проведении технического диагностирования в условиях разреза.

Основные термины, относящиеся к акустическому виду контроля (АК) описаны в ГОСТ 23829-85 «Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения». Данный вид НК основан на применении упругих колебаний, возбуждаемых или возникающих в объекте контроля. Различают две группы методов АК: ультразвуковой, в котором задействуются волны ультразвукового диапазона, для возбуждения и приёма которых требуется наличие пьезопреобразователя, а также частотный, в котором волны звукового диапазона возбуждаются не только посредством пьезокристаллов, но и особых ударных устройств, а для их приёма требуются микрофоны.

Помимо этого, все методы акустического контроля классифицируются по характеру взаимодействия с исследуемым объектом. Таким образом, различают пассивные методы (шумовибрационный и метод акустической эмиссии), а также активные (эхолокационный, спектральный, резонансный, теневой, импедансный). Весомым плюсом данного вида НК является возможность находить как поверхностные, так и глубинные дефекты, возможность выявлять тонкие трещины, возможность автоматизации контроля. Ограничивают применение данных методов такие факторы, как наличие структурных неоднородностей материала объекта контроля, шероховатость поверхностного слоя.

Вихретоковый вид контроля (ВТ) описан в ГОСТ Р 55611-2013 «Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения». При применении данного метода внешнее переменное магнитное поле наводит ЭДС, создающую вихревые токи,

электромагнитное поле которых регистрируются измерительным преобразователем. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушку преобразователя, наводя в ней ЭДС или изменяя импеданс. Когда вихретоковый преобразователь пересекает трещину то, ввиду того что трещина является неэлектропроводящим участком, вихревые токи либо огибают ее, либо разрываются. Искажение контура вихревых токов приводит к тому, что магнитное поле, формируемое ими и накладываемое на магнитное поле возбуждающей катушки, также искажается, что фиксируется посредством изменения ЭДС на измерительной катушке преобразователя [10].

Согласно ГОСТ Р 55611-2013 по способу получения первичной информации различают довольно много методов ВТ, среди которых наибольшее распространение получили:

- амплитудный (измеряется амплитуда сигнала вихретокового преобразователя (ВТП));
- фазовый (измеряется фаза сигнала);
- амплитудно-фазовый (измеряется проекция вектора напряжения ВТП на направлении отстройки, то есть подавления мешающего фактора).

Требования к ВТП приведены в ГОСТ 23048-83. Согласно данному ГОСТ, ВТП классифицируются по способу измерения электромагнитных полей на параметрические и трансформаторные, а по способу соединения обмоток ВТП делятся на абсолютные и дифференциальные. В параметрических преобразователях используется одна обмотка, выполняющая одновременно функции возбуждения вихревых токов и измерения, а в трансформаторных не менее двух обмоток, одна из которых является генератором, а другая используется для измерения параметров. Абсолютные ВТП измеряют абсолютное выходное значение измеряемого параметра, в то время как в дифференциальных ВТП, имеющих две встречно включенные измерительные обмотки, измеряют разницу показаний обмоток.

Несомненным достоинством данного метода является высокая чувствительность метода к дефектам металлических поверхностей, малая чувствительность к шероховатости поверхности объекта контроля [32], а также возможность контроля состояния поверхностного слоя, например наклепа [10]. Приведенные доводы позволяют сделать вывод о применимости ВТ дефектоскопов для контроля физико-механических и геометрических параметров поверхностного слоя коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов.

Однако применение ВТ метода также сопряжено с определенными трудностями. Так, изменение сигнала измерительной обмотки ВТП связано с изменением условий контроля, что хоть и дает возможность контролировать большой спектр параметров, однако при контроле конкретного параметра необходимо отстраиваться от влияния мешающих параметров [10]. Параметры, влияющие на изменение сигнала ВТП, разделяют на геометрические (зазор между

ВТП и объектом контроля, расстояние до края объекта, шероховатость поверхности), а также структурные (электрическая и магнитная проницаемости материала объекта контроля, химический состав, тип термической обработки, наличие наплавленного металла или наклепа). К недостаткам метода также относится невозможность находить несплошности, проходящие почти параллельно (с углом менее 10 градусов) к поверхности объекта контроля. Однако, следует отметить, что приведенные недостатки ВТ метода несущественны при проведении контроля поверхности коронок, при этом чувствительность ВТП к изменению магнитных свойств металла при наклепе может быть полезна при техническом диагностировании.

3.2.2 Обоснование применимости вихретокового вида (ВТ) НК для оценки физико-механических и геометрических параметров поверхностного слоя коронок

Основные проявления ударно-абразивного изнашивания и термической усталости, возникающие при работе экскаваторов в условиях эндогенного горения угольных пластов, заключаются в образовании наклепанного слоя, а также в образовании поверхностных трещин. Образование наклепанного слоя также сопровождается изменением магнитных свойств стали [41]. Контроль изменения совокупности данных параметров возможен с использованием вихретокового и магнитного методов неразрушающего контроля.

Для выбора подходящего метода необходимо принять во внимание условия, в которых будет проводиться техническое диагностирование:

- Контроль необходимо проводить непосредственно на местах работы экскаваторов, что требует применение портативных приборов контроля, а также достаточно производительного контроля.
- Объект контроля (коронка) имеет большой размер, а также сложную геометрическую форму с большим радиусом кривизны контролируемой поверхности, что также накладывает ограничения на использование многих преобразователей.
- Ввиду необходимости обеспечения производительного контроля, осуществляемого без демонтажа коронки, тщательная зачистка и подготовка поверхностного слоя перед контролем не может быть произведена, что также значительно усложняет процесс контроля.
- Контроль текущего состояния в ходе технического диагностирования проводится на предприятии штатными сотрудниками, без привлечения специалистов по НК, таким образом, процесс проведения контроля и интерпретация его результатов не должны требовать высокой квалификации оператора средства измерения.

Приведенные условия накладывают значительные ограничения на выбор типов и методов НК. С учетом приведенных особенностей подходящим методом для контроля изменения ферромагнитных свойств при наклепе, а также геометрических параметров

поверхностного слоя коронок является вихретоковый метод НК. Магнитные методы обладают рядом ограничений: достаточно медленный контроль, требовательность к квалификации оператора.

При контроле состояния поверхности коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов, необходимо учесть, что на показания прибора при исследованиях оказывают влияние глубина поверхностных дефектов и их количество в зоне контроля, а также величина относительной магнитной проницаемости материала, которые изменяются в процессе эксплуатации, в том числе при образовании наклепа.

Глубина проникновения вихревых токов определяется комплексом параметров, таких как радиус обмотки возбуждения, частота тока возбуждения, электропроводность и магнитная проницаемость материала объекта контроля. Для расчета глубины проникновения ЭДС и тока, наводимого на измерительной обмотке, используют обобщенный параметр β , учитывающий влияние перечисленных выше влияющих параметров и рассчитываемый по формуле 3.12:

$$\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0\mu_r}, \quad (3.12)$$

где R – эквивалентный радиус обмотки возбуждения, м;

ω – круговая частота тока возбуждения, рад/с;

σ – удельная электропроводность основания объекта контроля, См/м;

μ_0 – магнитная постоянная (1,256 Гн/м);

μ_r – относительная магнитная проницаемость основания объекта контроля.

Рассмотрим структурную схему абсолютного трансформаторного четырехобмоточного скомпенсированного измерительного преобразователя (рисунок 3.7) [58].

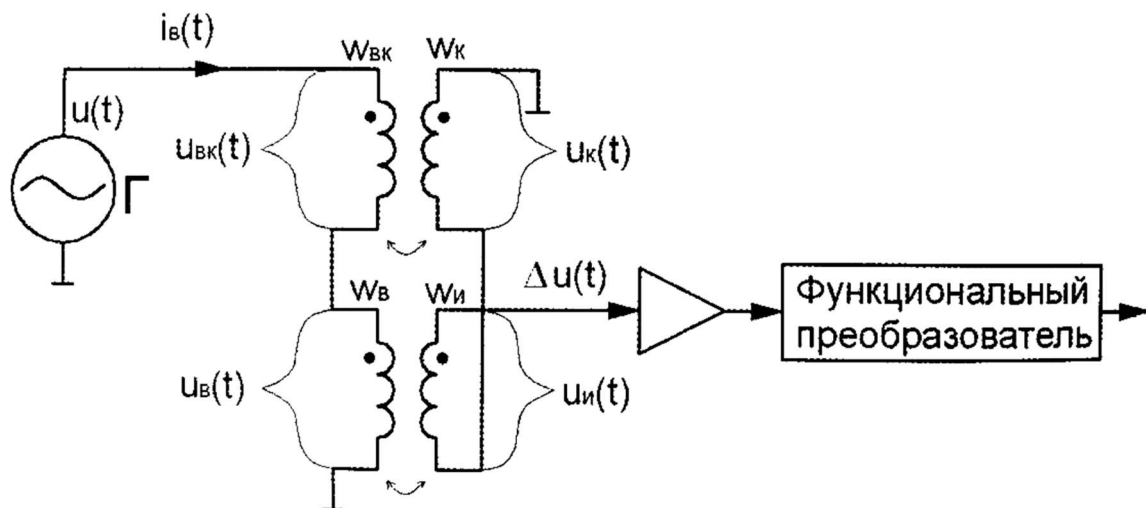


Рисунок 3.7 – Схема абсолютного трансформаторного четырехобмоточного скомпенсированного измерительного преобразователя [58]

Генератор Γ подключен к последовательно соединенным обмоткам возбуждения W_B и W_{BK} . Обмотка возбуждения W_B индуктивно связана с измерительной обмоткой $W_{и}$, а обмотка

возбуждения W_{BK} – с компенсационной обмоткой W_K . Измерительная и компенсационная обмотки идентичны и ключены противофазно.

Векторная диаграмма такого преобразователя представлена на рисунке 3.8, на реальной оси отложен вектор тока i_B в обмотках возбуждения.

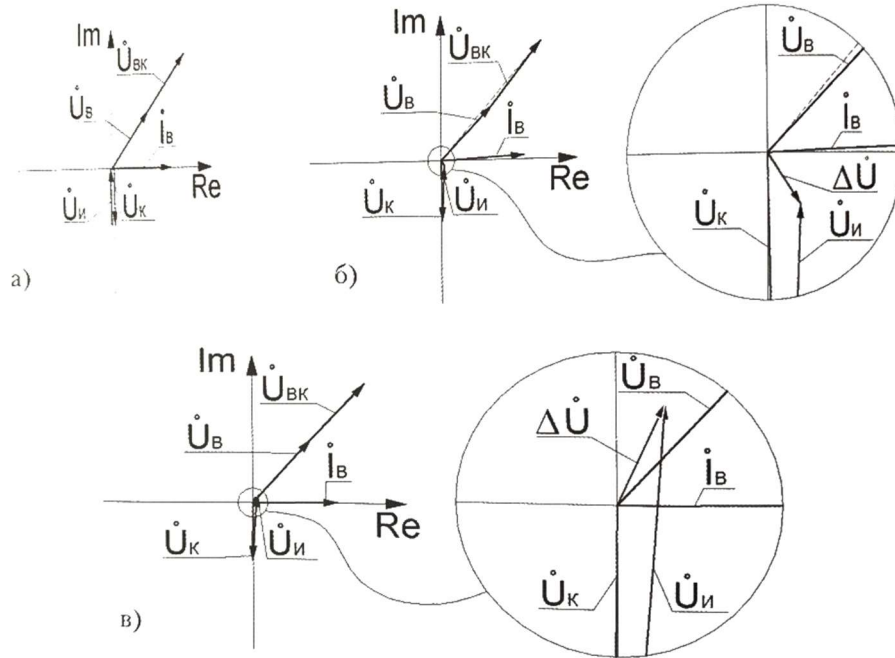


Рисунок 3.8 – Векторная диаграмма скомпенсированного четырехобмоточного трансформаторного преобразователя:

а – преобразователь не взаимодействует с объектом контроля ($h=\infty$),

б – преобразователь над ферромагнитным электропроводящем полупространством,

в - преобразователь над ферромагнитным электропроводящем полупространством [58]

При неизменных σ и f изменение зазора h^* приводит к изменению амплитуды вектора $\Delta\dot{U}$ при этом фаза $\Delta\phi$ вектора $\Delta\dot{U}$ относительно вектора \dot{U}_B изменяется незначительно. Изменение электропроводности σ основания будет приводить к изменению $\Delta\phi$. Данный вывод также справедлив и для изменения относительной магнитной проницаемости μ_r основания. Для оценки зависимости амплитуды и фазы $\Delta\dot{U}$ от параметров объекта (σ и μ_r), круговой частоты ω , зазора h^* , глубины трещин d и их количества n в зоне контроля ВТП, строятся кривые, называемые годографами. Изменение фазы или амплитуды выходного сигнала ВТП, связанные с изменением параметров вихретокового контроля, приводит к изменению положения вектора на комплексной плоскости. При этом траектория движения конца вектора может представлять собой кривую произвольной формы. Рассмотрим векторную диаграмму изменения $\Delta\dot{U}$ при контроле ферромагнитных электропроводящих объектов контроля (рисунок 3.9).

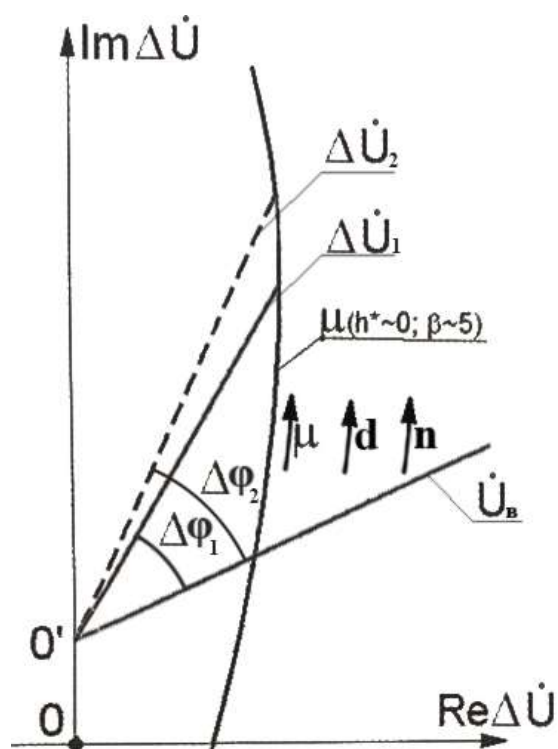


Рисунок 3.9 – Векторная диаграмма при использовании в качестве информативного параметра фазы $\Delta\dot{U}$ для ферромагнитных проводящих объектов контроля [58]

По приведенной векторной диаграмме видно, что при изменении магнитной проницаемости μ , а также глубины d и количества n трещин изменяется фаза $\Delta\varphi$. Анализируя изменение амплитуды и фазы сигнала можно проводить контроль данных параметров. Таким образом, можно подтвердить, что изменение $\Delta\varphi$ будет пропорционально изменению магнитной проницаемости коронки при наклепе. Образование трещин будет изменять картину вихревых токов и также приведет к аналогичному по знаку изменению $\Delta\varphi$. С учетом этого, в связи со сложность проведения вихретоковой дефектоскопии поверхности в полевых условиях и непосредственной оценки глубины трещин, в качестве интерпретации результатов вихретоковой дефектоскопии и диагностического критерия изнашивания поверхностного слоя коронки, показания вихретокового дефектоскопа (изменение $\Delta\varphi$) можно интерпретировать как показатель дефектности поверхности, являющиеся интегральными показателями глубины и количества дефектов, отнесенных к диаметру зоны контроля преобразователя, и изменения магнитных свойств стали на участке поверхности в результате наклепа. Таким образом, ВТ дефектоскопия может быть применена для оценки изменения показателя дефектности поверхностного слоя коронок при их изнашивании в ходе работы экскаваторов в условиях эндогенного горения угольных пластов.

3.2.3 Выбор средств ВТ контроля параметров поверхностного слоя коронок

Список утвержденных типов средств измерений (СИ) для вихретоковой дефектоскопии, согласно ФГИС «Аршин» [71], представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Список типов СИ для ВД согласно ФГИС «Аршин»

№ по госреестру	Обозначение типа СИ	Изготовитель
73642-18	Алтек ВД-100	ООО "Алтек-Наука", г. С.-Петербург
44493-10	Константа ВД-1	ООО "КОНСТАНТА", г. С.-Петербург
39541-13	PELENG ВД-100	ООО "Научно-промышленная группа "Алтек", г. С.-Петербург
29702-10	ВД-70	ООО "Научно-промышленная компания "ЛУЧ", г. Москва
15282-96	ВД-14НФ	ВНИИЖТ, г. Москва
14029-94	ВД-15НФ	ВНИИЖТ, г. Москва
13006-89	ВД-12НФ	Завод "Радиоприбор", г. Москва

Для решения задачи контроля параметров наклепанного слоя коронок в связи со значительной шероховатостью поверхности и глубиной деформированного слоя необходим преобразователь с низкой частотой, с достаточно большим размером преобразователя, подходящий для работы на необработанных поверхностях с высокой шероховатостью. Как отмечает автор [83] контроль роста микротрещин возможен с применением вихретокового метода контроля на частотах возбуждения от 72 до 120 кГц, так как в этом случае степень влияния ферромагнитной стальной основы на показания прибора минимально.

Под такие критерии подходит преобразователь ПФ-ОН-14-Fe для ферромагнитных сталей, производимый ООО «Константа», с диаметром ферритового сердечника преобразователя 2,2 мм, частотой тока возбуждения 100 кГц и диаметром зоны контроля 14 мм. Данный преобразователь предназначен для поверхностей с большой шероховатостью и подходит для работы в условиях угольного разреза для технического диагностирования поверхности коронок без дополнительной подготовки.

С учетом подходящих под условия задачи характеристик преобразователя, как самый удобный и подходящий для контроля физико-механических и геометрических параметров поверхностного слоя коронок, в качестве средства ВТ контроля был выбран вихретоковый дефектоскоп Константа ВД-1 с преобразователем ПФ-ОН-14-Fe для ферромагнитных сталей с диаметром зоны контроля 14 мм [15]. Технические характеристики дефектоскопа, а также преобразователя, представлены в таблице 2В в Приложении В. Общий вид дефектоскопа и преобразователя представлен на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Вихретоковый дефектоскоп Константа ВД-1 с преобразователем ПФ-ОН-14-Fe для ферромагнитных сталей [15]

В дефектоскопе применен фазовый метод вихретокового контроля с реализацией отстройки от зазора. Для заводской градуировки дефектоскопа используется контрольный образец с искусственными поверхностными дефектами типа прорези известной глубины. Показания прибора при контроле выводятся в мкм – единицах измерения глубины прорезей.

3.3 Методика проведения экспериментальных работ

Исследования поверхности коронок зубьев ковшей экскаваторов проводились на трех гидравлических экскаваторах Komatsu PC400LC-7 с разным сроком эксплуатации коронок [100]. Все экскаваторы работали на операции по тушению эндогенного пожара на западном борте карьера, для чего производилась выемка горячей породы и засыпка инертным материалом. В ходе таких работ коронки зубьев ковша попеременно контактируют с горячим и холодным грунтом, что приводит к образованию температурного градиента и развитию термической усталости.

Для измерения твердости был выбран портативный твердомер Константа КТ с ударный преобразователь по методу Либя тип D (рисунок 3.6) [65]. Для анализа показателя дефектности поверхностного слоя был выбран вихретоковый дефектоскоп Константа ВД-1 с преобразователем ПФ-ОН-14-Fe (рисунок 3.10) для ферромагнитных сталей с диаметром зоны контроля 14 мм для поверхностей с большой шероховатостью [15].

Измерение твердости проводилось по равномерной сетке в режиме трех точечных измерений в каждом узле сетки (рисунок 3.11). Замеры проводились на трех ковшах разных экскаваторов, при этом срок эксплуатации коронок зубьев на ковшах варьировался в диапазоне от двух недель до четырех месяцев. Также замеры проводились на полностью изношенной коронке, со сроком эксплуатации более 4 месяца. Данная коронка в момент проведения

полевых работ была демонтирована с зуба и снята с эксплуатации вследствие критического затупления острия, таким образом можно считать, что для подобных условий максимальный срок эксплуатации коронки составляет 4 месяца.

Вихретоковая дефектоскопия проводилась по аналогичной сетке. В ходе исследований преобразователь перемещался по поверхности коронки, в качестве измеряемой величины выводилась средняя глубина дефектов.

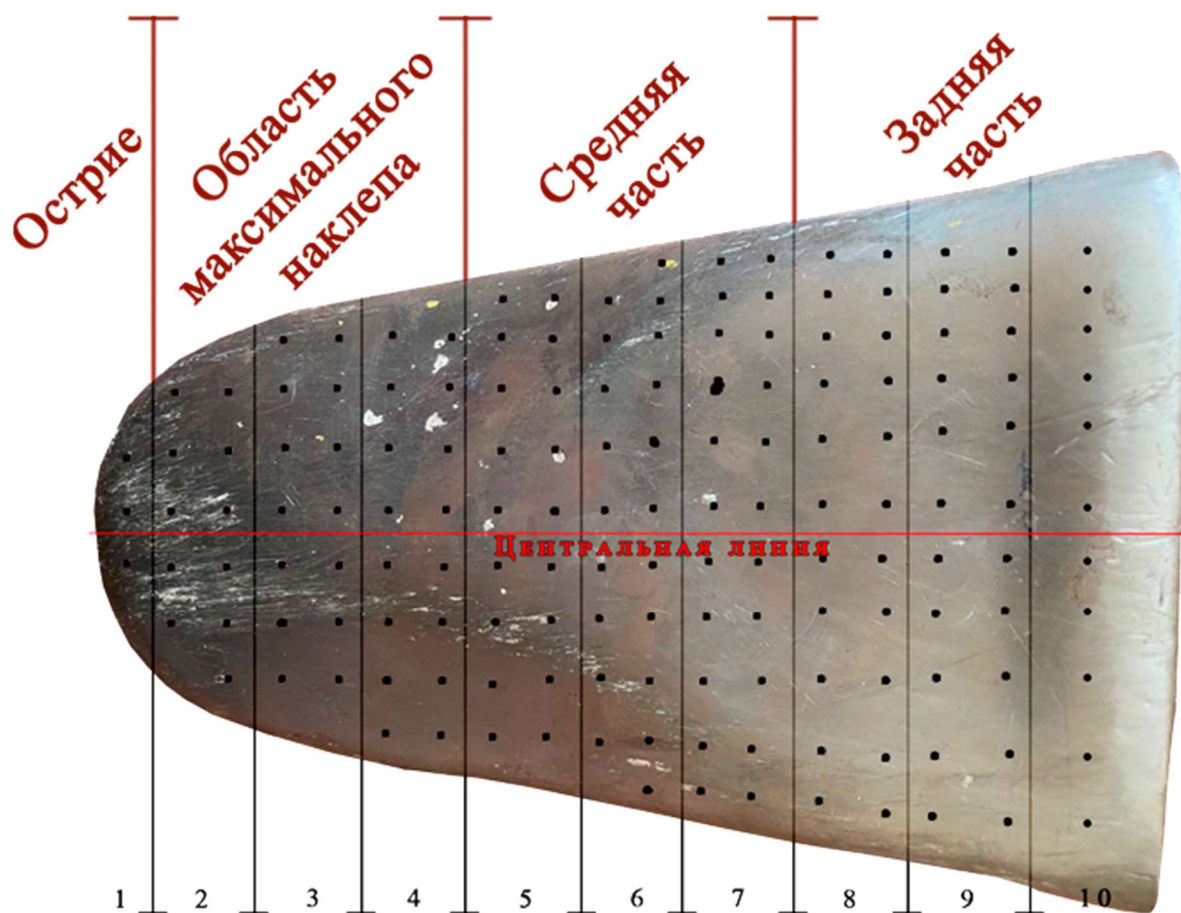


Рисунок 3.11 – Вид сверху изношенной коронки с размеченной сеткой измерений, а также указанием условных зон с 1 (острие) по 10 (задняя часть), по которым проводился расчет усредненных значений твердости поверхности [100]

Перед проведением контроля производится установка нуля дефектоскопа на обратной стороне коронки, так как магнитные характеристики материала в этой области практически совпадают с магнитными характеристиками неизношенной поверхности верхней стороны коронки и не изменяются на протяжении всего срока службы, поскольку коронка в этой зоне не подвержен значительным механическим нагрузкам.

На территории разреза также были проведены измерения температуры поверхности почвы, бортов разреза, металлоконструкций и узлов экскаваторов, работающих на операциях по ликвидации очагов горения, были проведены измерения температуры поверхности коронки и ковшей после контакта с горячей породой. Для измерения температур был использован

бесконтактный инфракрасный пирометр (рисунок 3.12). Измерения температур проводились днем, в летнее время.



Рисунок 3.12 – Бесконтактный инфракрасный пирометр

Результаты измерений показали, что температура поверхности самого разреза лежит в диапазоне от 34 до 60 °С, температура ковшей и коронок во время проведения измерений свойств поверхности составляла от 36 до 67 °С, температура бортов разреза варьируется от 40 до 75 °С, в месте действия очагов эндогенного горения угля температура поверхности бортов достигает 200–240 °С. Опираясь на результаты численного моделирования, можно сделать вывод, что с учетом непрерывной работы экскаваторов на операциях по ликвидации очагов, величина термического градиента составляет от 40 до 60 °С.

3.4 Экспериментальные исследования показателя дефектности поверхностного слоя коронок

Результаты вихретоковой дефектоскопии представлены в виде двумерной карты распределения показателя дефектности, наложенной на эскиз верхней поверхности изношенной коронки с оцифрованным изображением трещин и других дефектов (рисунок 3.13).

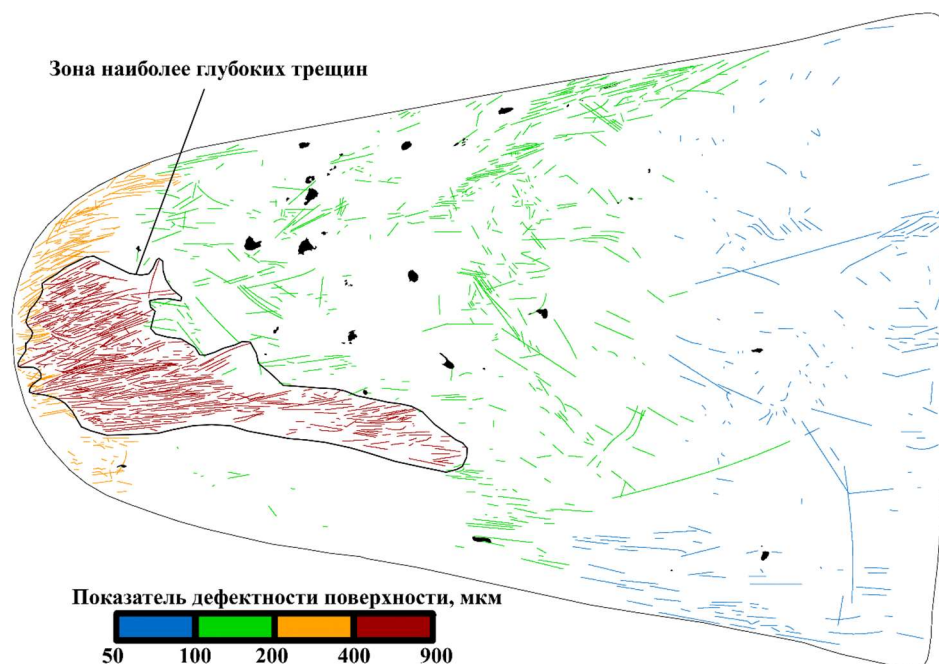


Рисунок 3.13 – Двумерная карта распределения показателя дефектности на поверхности изношенной коронки со сроком эксплуатации 4 месяца [100]

Наибольшие значения показателя дефектности наблюдаются вдоль поверхности изнашивания, в области максимального наклепа, тогда как в зоне острия коронки показатель дефектности не превышает 350-400 мкм. В области максимального наклепа и на острие трещины расположены густо, при этом наблюдается продольная направленность распространения трещин. В средней части коронки, а также у задней части, где металл более мягкий, трещины встречаются реже и величина показателя дефектности не превышает 200 мкм в средней зоне и 50 мкм в задней части коронки, однако встречается как продольная, так и поперечная пространственная ориентация трещин.

Для исследования зависимости показателя дефектности в разных зонах коронок при разных сроках их эксплуатации был построен график соответствующей зависимости (рисунок 3.14)

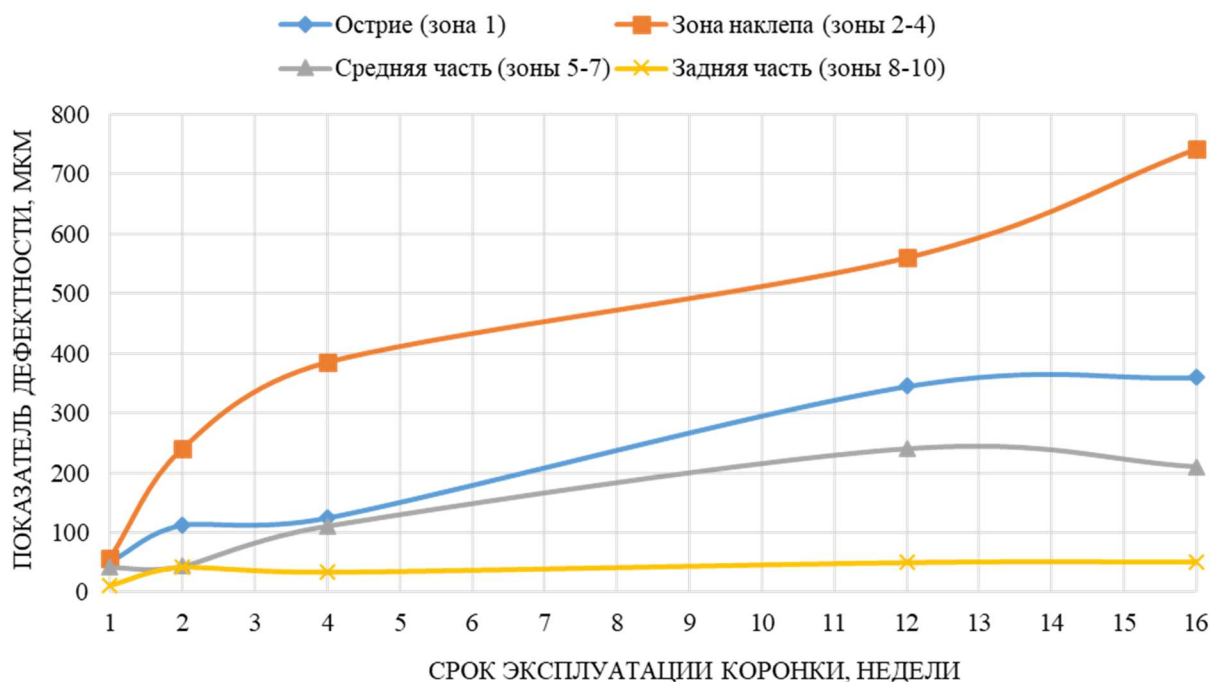


Рисунок 3.14 – Результаты замеров показателя дефектности поверхности коронки в зависимости от срока эксплуатации [100]

Как видно по графику, с увеличением срока службы, показатель дефектности увеличивается во всех зонах коронки, кроме ее задней части, где сохраняется в пределах 50-60 мкм. В области максимального наклепа, показатель дефектности резко увеличивается с 50 до 400 мкм за месяц эксплуатации коронки, после чего плавно увеличивается до 550 мкм в течение следующих двух месяцев. В дальнейшем наблюдается увеличение скорости роста показателя дефектности, и, к моменту замены коронки к концу четвертого месяца эксплуатации, его величина достигает 700-900 мкм. Показатель дефектности в зоне острия и в средней части коронки увеличиваются соответственно с 30-50 до 250-350 мкм к третьему месяцу эксплуатации, после чего рост его становится незначителен или прекращается вовсе.

3.5 Экспериментальные исследования твердости поверхностного слоя коронок

Результаты измерения твердости вдоль центральной линии поверхности коронок зубьев с разного оборудования представлены на рисунке 3.15. Величина среднеквадратического отклонения (СКО) для данных измерений составляет 10 НВ.

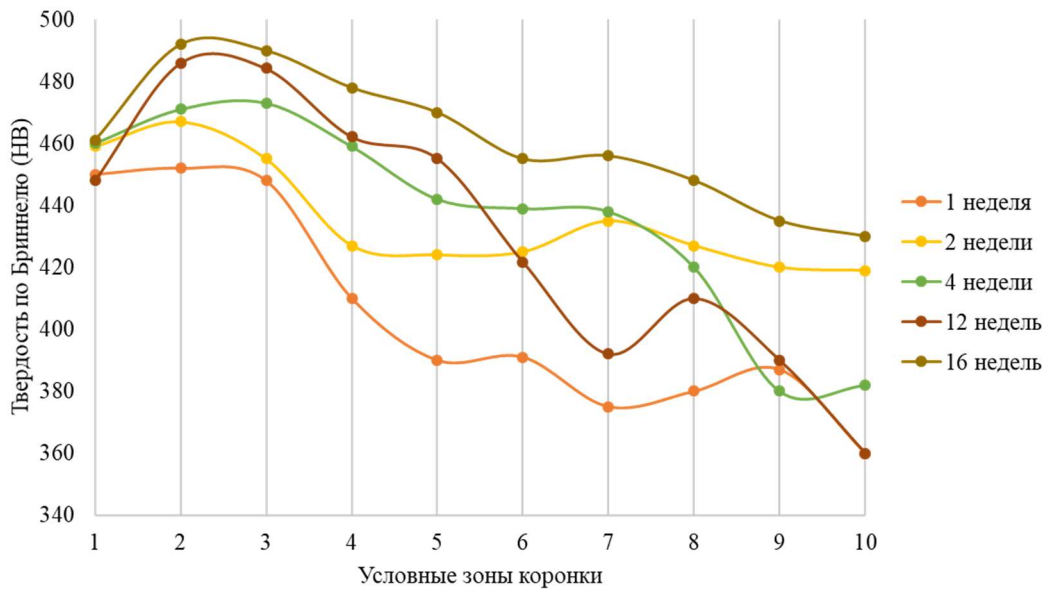


Рисунок 3.15 – Графики изменения твердости поверхности коронок зубьев от острия до задней части по центральной линии [100]

Дополнительные результаты анализа твердости поверхности изношенной коронки представлены в виде двумерных карт распределения значений твердости по Бринеллю (НВ) на рисунке 3.15а, а новой коронки – на рисунке 3.16б. На этих картах каждому цвету соответствуют определенный диапазон значений НВ. Из представленных результатов следует, что твердость повышается по всей поверхности коронки в процессе эксплуатации.

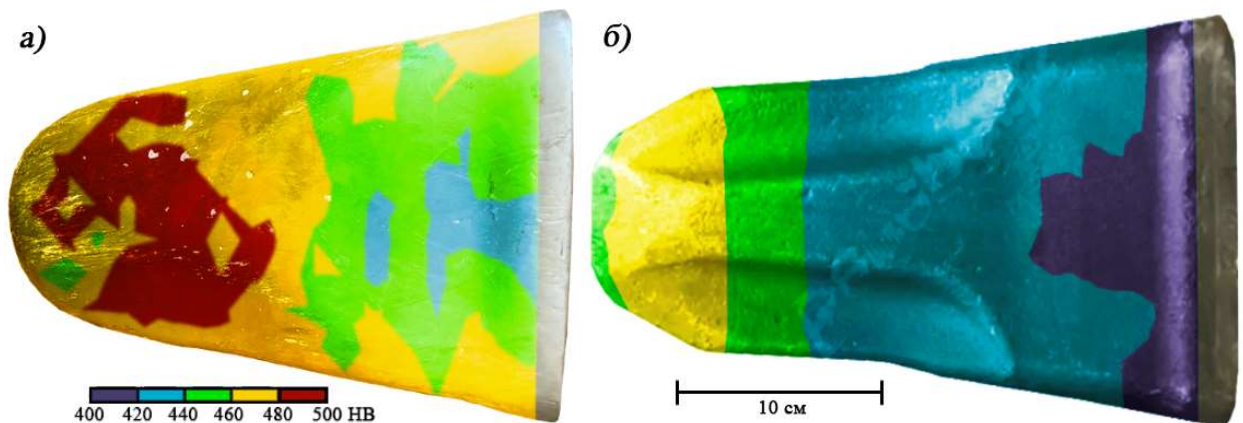


Рисунок 3.16 – Карта значений твердости по Бринеллю (НВ) поверхности изношенной коронки зуба ковша со сроком эксплуатации 4 месяца (а) и новой коронки (б). [100]

Для выявления зависимости изменения твердости от срока эксплуатации были проведены замеры твердости в разных зонах на коронках разного срока эксплуатации с одного типа экскаваторов. Результаты исследования приведены на рисунке 3.17.

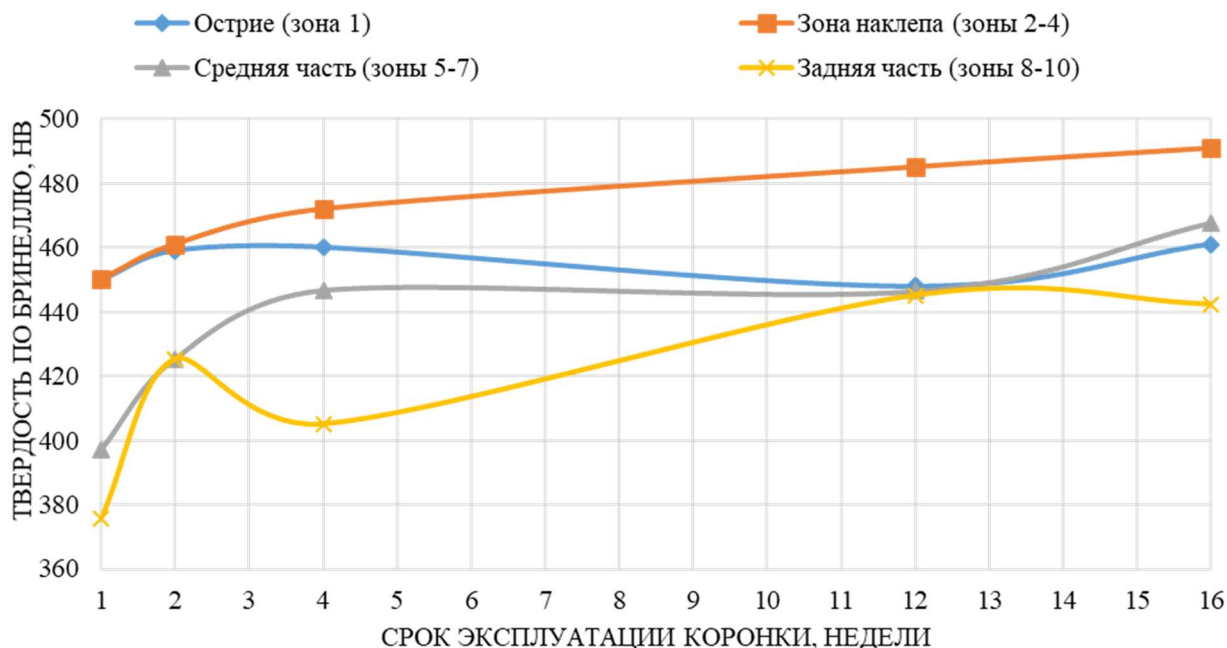


Рисунок 3.17 – Результаты измерения твердости различных частей коронки в зависимости от срока эксплуатации [100]

С увеличением срока эксплуатации, коронка (рисунок 3.17) подвергается абразивному изнашиванию, что приводит к образованию наклепа и к увеличению твердости поверхности во всех частях коронки. Максимальный рост твердости (с 450 НВ до 490 НВ) за время эксплуатации происходит в зонах 2-4 коронки, где наблюдается максимальный наклеп. Однако зона острия коронки сохраняет начальную твердость в течение 4 месяцев использования коронки, с незначительным увеличением твердости (с 450 НВ до 460 НВ), что может быть вызвано умягчением металла вследствие контакта коронки с нагретой горной массой.

3.6 Комплексный анализ результатов экспериментального исследования свойств поверхностного слоя коронок

Снимки поверхности в области максимального наклепа и средней части изношенной коронки представлены на рисунках 3.18 и 3.19 соответственно, снимки остальных частей поверхности представлены на рисунках 1Г–11Г в Приложении Г.

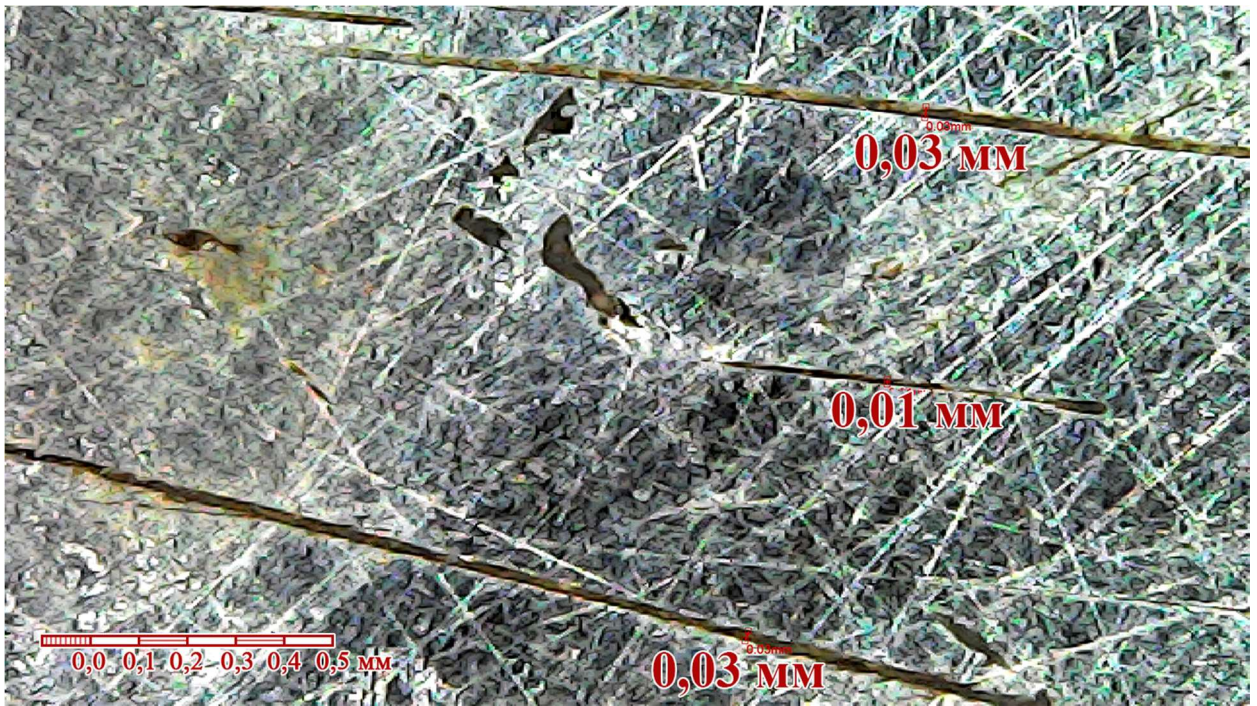


Рисунок 3.18 – Снимок поверхности изношенной коронки в области максимального наклепа (зоны 2-4)

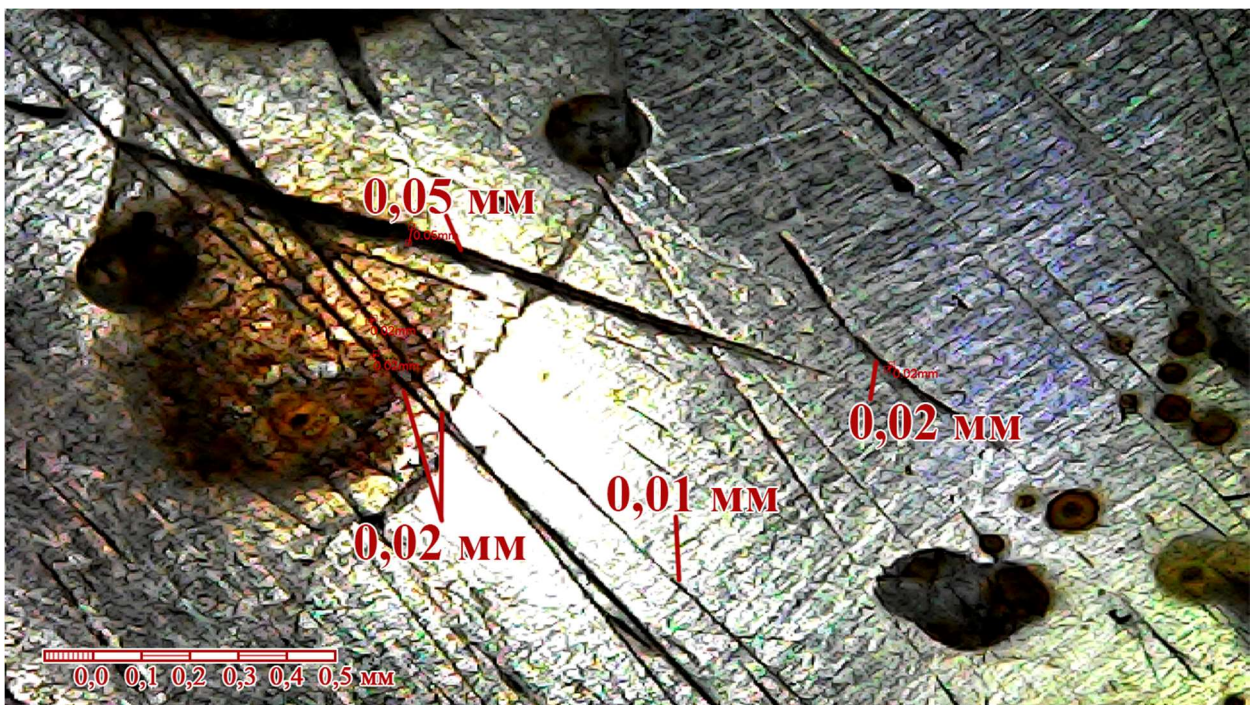


Рисунок 3.19 – Снимок поверхности изношенной коронки в средней части (зоны 5-7)

На всей поверхности коронки обнаружены трещины, имеющие ширину устья в диапазоне 0,01...0,1 мм, при глубине 0,1...0,9 мм. С учетом условий работы экскаваторов, можно утверждать, что трещины образуются в ходе многократного цикла нагрев-охлаждение, в результате действия термической усталости. При этом на острие глубина трещин небольшая и их количество заметно меньше, чем в области максимального наклепа, что может быть

обусловлено интенсивным абразивным удалением материала с острия коронки при работе экскаватора в разрезе.

В процессе эксплуатации новая коронка, имеющая равномерную твердость поверхности от острия к средней части (рисунок 3.16б), подвергается ударно-абразивному изнашиванию, что приводит к образованию участков наклепа и увеличению твердости всей поверхности коронки. Однако острие коронки сохраняет свою первоначальную твердость в течение 4 месяцев эксплуатации с небольшим увеличением в пределах случайной погрешности измерения (с 450 НВ до 460 НВ) (рисунок 3.16), что может быть вызвано размягчением металла в результате эксплуатации коронки в условиях высоких температур, а также ускоренным абразивным изнашиванием материала.

Наибольшие значения показателя дефектности наблюдаются на верхней стороне поверхности коронки зуба (красные трещины на рисунке 3.13), в области максимального наклепа, тогда как значения показаний в зоне острия коронки не превышают 350-400 мкм. Высокая плотность трещин и их продольная ориентация наблюдаются в передней части коронки зуба (зоны 1–4 на рисунке 3.11). В средней части коронки, а также у задней части, где металл более мягкий, трещины встречаются реже и значения показателя дефектности не превышают 200 мкм в средней части и 50 мкм в задней части коронки, однако встречается как продольная, так и поперечная пространственная ориентация трещин.

С увеличением срока эксплуатации коронки, значения показателя дефектности увеличиваются во всех зонах поверхности, кроме задней части, где сохраняются в пределах 50-60 мкм. В области максимального наклепа (зоны 2–4 на рисунке 3.11) показатель дефектности резко увеличивается с 50 до 400 мкм за первый месяц эксплуатации коронки, после чего плавно увеличиваются до 550 мкм в течение следующих двух месяцев. В дальнейшем наблюдается увеличение скорости роста показателя, и, к моменту замены коронки к концу четвертого месяца эксплуатации, его значение достигает 700–900 мкм. Значения показателя дефектности в зоне острия и в средней части коронки увеличиваются соответственно с 30–50 до 250–350 мкм к третьему месяцу эксплуатации, после чего их рост становится незначителен или прекращается вовсе.

3.7 Выводы по главе 3

В результате работы над третьей главой диссертации были сделаны следующие выводы:

1. Срок начала разрушения материала, рассчитанный по модели малоциклового усталости Coffin-Manson-Basquin, оценен в 25 недель, при этом фактическая замена коронок по причине их износа производится через 16 недель. Разница может быть объяснена существенно

более высокими нагрузками на поверхностный слой коронки зуба, из-за чего разрушение материала поверхности коронки начинается уже спустя 1–2 недели эксплуатации.

2. Измерение твердости поверхности коронок с разными сроками эксплуатации продемонстрировали увеличение твердости со временем по всей поверхности коронки зуба, которое объясняется образованием абразивного наклепа. Максимальное значение твердости наблюдается в зоне максимального наклепа, при этом увеличение значений твердости за 16 недель эксплуатации составляет порядка 40–50 НВ. Непосредственно на острие коронки наблюдается незначительное снижение твердости.

3. Вихретоковая дефектоскопия глубины и количества трещин на поверхности коронок продемонстрировала появление трещин по всей поверхности в процессе эксплуатации, при этом наибольшее количество и размер трещин наблюдается в зоне максимального наклепа, близкой к острию коронки. После 16 недель эксплуатации (срок замены), средняя глубина трещин в этой зоне составляет около 600 мкм.

4. Микросъемка поверхности изношенной коронки в разных частях поверхности показала, что наблюдаемые на поверхности дефекты являются трещинами, образуемыми в результате многократного нагрева-охлаждения материала коронки, в ходе работы экскаватора на операциях по выемки горячего угля.

5. В ходе эксплуатации коронок поверхностная твердость и показатель дефектности поверхностного слоя в наибольшей степени изменяются в зоне максимального наклепа коронок; в других же областях поверхности коронки изменение данных параметров не настолько показательно.

6. Для оценки остаточного ресурса коронок по результатам технического диагностирования, а также для определения критерия наступления состояния, близкого к предельному, необходимо проводить измерения в области формирования максимального наклепа коронок.

ГЛАВА 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОРОНОК В РАМКАХ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Одним из показателей эффективности работы экскаваторов в любых условиях удобно принять величину эксплуатационной надежности, являющийся показателем стабильной работы оборудования, обеспечивающий требуемые эксплуатационные показатели [60]. Высокий уровень показателей надежности обеспечивается системой ТОиР.

Стратегия ТОиР, основанная на техническом диагностировании текущего состояния, показывает свою состоятельность, для техники, работающей в сложных горно-геологических условиях, где устоявшаяся на территории России схема ППР показывает низкую эффективность ввиду сильного отличия нормативных и фактических сроков эксплуатации техники. Ключевое преимущество систем ТОиР, основанных на диагностировании текущего состояния в подобных условиях заключается в более гибком планировании мероприятий ТОиР, основанных на результатах мониторинга текущего состояния, что позволяет существенно снизить время простоя техники.

Разрабатываемое новое научно-техническое предложение по совершенствованию технического диагностирования, основанной на разработанной методике оценки остаточного ресурса, позволит повысить показатели эксплуатационной надежности экскаваторов, работающих в условиях эндогенного горения угольных пластов.

4.1 Методика оценки текущего состояния и определения остаточного ресурса коронок

По результатам экспериментальных работ, представленных в Главе 3 диссертации, была обнаружена зависимость (графики на рисунках 3.14 и 3.17) между сроком эксплуатации коронок и состоянием поверхностного слоя, критериями которого являются значения твердости и показателя дефектности. В ходе эксплуатации, твердость и показатель дефектности коронок в наибольшей степени изменяются в области максимального наклепа (зоны 2–4 на рисунок 3.11). Таким образом, для оценки остаточного ресурса, а также для определения критерия наступления состояния, близкого к предельному, целесообразно проводить контроль непосредственно области максимального наклепа коронок. Для определения критериев диагностирования и оценки ресурса были сопоставлены графики изменения твердости и показателя дефектности в области максимального наклепа (рисунок 4.1).

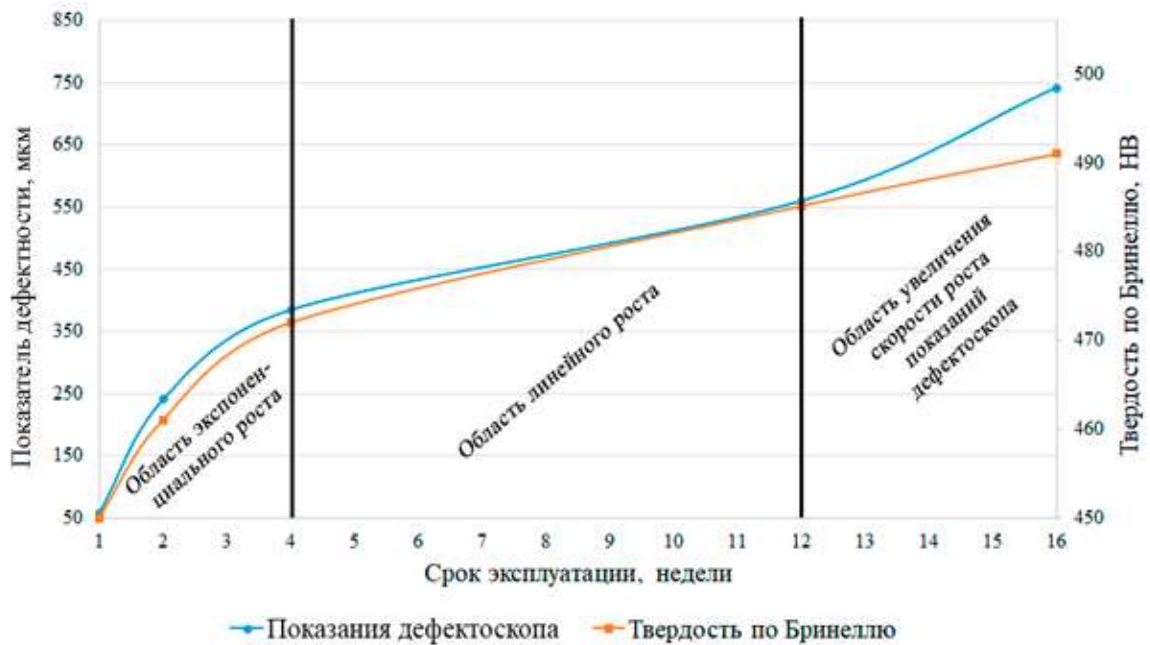


Рисунок 4.1 – Сравнение роста твердости и показателя дефектности в зоне максимального наклепа коронки с разным сроком эксплуатации [100]

Как видно из рисунка 4.1, зависимости роста твердости и показателя дефектности хорошо коррелируют друг с другом до 12 недель, и только затем наблюдается расхождение графиков, связанное с увеличением скорости роста показателя дефектности. Можно выделить три характерных области роста твердости и показателя дефектности: 1) область быстрого роста, продолжительностью в 4 недели; 2) область линейного роста с 4 по 12 неделю эксплуатации коронки; 3) область увеличения скорости роста показателя дефектности, которая начинается с 12 недель, при этом скорость роста значений твердости поверхности не меняется.

Область быстрого роста диагностических параметров характеризуется образованием наклепанного слоя. Полученная тенденция изменения твердости наклепанного слоя, отображенная графиком на рисунке 4.1, соответствует результатам исследований изменения твердости при наклепе, полученным в работах [11, 23, 33]. Рост твердости поверхностного слоя происходит с максимальной скоростью на начальной стадии эксплуатации коронки, однако спустя определенное число циклов ударного нагружения рост твердости значительно замедляется. При этом, как отмечает [11], рост твердости происходит по всей поверхности коронки, однако на площадке износа (зоны 2-4 на рисунке 3.11) наблюдается наибольший рост значений твердости. Можно сделать вывод, что в результате ударно-абразивных нагрузок происходит наклеп всей поверхности коронки, однако в областях поверхностного слоя, на которые в ходе экскавации приходится максимальная нагрузка, наблюдается большая степень деформации поверхности.

Область линейного роста начинается после четвертой недели эксплуатации коронки, при этом скорость линейного роста зависит от условий эксплуатации экскаватора; для условий

Коркинского разреза скорость роста твердости в области максимального наклепа можно оценить как $\approx 1,6$ НВ/нед.

Скорость изменения показателя дефектности в период с 1-ой по 12-ую недели эксплуатации коррелирует с изменением значений твердости. Однако после 12-ой недели эксплуатации коронки отмечается увеличение скорости роста показателя дефектности при неизменной скорости роста показаний твердости наклепанного слоя, что является следствием ускоренного роста числа поверхностных трещин и служит диагностическим критерием близости наступления предельного состояния.

Границами областей роста диагностических параметров являются сроки эксплуатации коронки, при которых происходит изменение скорости роста показателей. Для условий Коркинского разреза, по графику на рисунке 4.1 можно отметить срок эксплуатации коронки, при котором начинается линейный рост твердости и показателя дефектности (T_1), а также срок эксплуатации, при котором начинается быстрый рост показателя дефектности при неизменном росте твердости (T_2). Значения твердости и показателя дефектности, соответствующие сроку эксплуатации T_1 равны 470 НВ и 400 мкм соответственно, а сроку эксплуатации T_2 – 480 НВ и 550 мкм соответственно. Представленные значения твердости и показателя дефектности являются диагностическими критериями наступления срока эксплуатации, при котором происходит изменение роста диагностических параметров.

Исследования снятой с эксплуатации коронки зуба со сроком эксплуатации 16 недель позволили определить твердость и показатель дефектности, соответствующие предельному состоянию и равные 495 НВ и 750 мкм соответственно. Следовательно, можно отметить диагностический критерий наступления предельного состояния коронки зуба равный 495 НВ или 750 мкм. Предельный срок эксплуатации $T_{\text{п}}$ для условий Коркинского разреза можно установить равным 16 неделям, так как при таком сроке эксплуатации достигается предельный угол затупления коронки, при котором значительно возрастает сопротивление резанию, а следовательно, требуется увеличивать усилие на коронку для обеспечения необходимой производительности работы экскаватора. Если полученный предельный срок эксплуатации $T_{\text{п}}$ 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 %) рассчитывается по формуле 4.1:

$$N = \left(1 - \frac{T}{T_{\text{п}}}\right) \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

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

Тогда, по формуле 4.1, 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 4.1.

Таблица 4.1 – 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

На основе полученных диагностических критериев может быть определена величина остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в аналогичных условиях. Для этого, на коронках зубьев ковшей экскаваторов, в области максимального наклепа (зоны 2-4 рис. 3.11), проводятся измерения твердости и показателя дефектности поверхностного слоя коронок в области максимального наклепа, и полученные значения сравниваются со значениями диагностических критериев по таблице 4.1, на основе чего делается вывод о величине остаточного ресурса, а также близости наступления предельного состояния, поскольку тенденция роста диагностических параметров для конкретных условий эксплуатации известна и представлена на графике диагностической кривой (рисунок 4.1).

4.2 Процедура технического диагностирования по предложенной методике

Оценка остаточного ресурса по предложенной методике в общем виде состоит из предварительного исследования тенденций роста диагностических параметров для конкретных эксплуатационных условий, с получением в результате графика диагностической кривой, а также непосредственно техническое диагностирование остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в аналогичных условиях, на основе полученного графика.

Процедура предварительного исследования по предложенной методике включает следующие шаги:

1. Выбор средств неразрушающего контроля твердости и показателя дефектности поверхностного слоя. Средства неразрушающего контроля твердости и показателя дефектности поверхностного слоя должны соответствовать следующим требованиям:

- обеспечивать высокую производительность контроля;
- портативность;
- нетребовательны к квалификации оператора.

По результатам проведенного исследования рекомендуется использовать для измерения твердости портативные твердомеры с преобразователем, реализующем динамический метод Либа, а для измерения показателя дефектности – вихретоковый дефектоскоп с ВТП, обладающем достаточно большой зоной контроля (≥ 14 мм).

2. Проведение периодических измерений диагностических параметров на коронках зубьев ковшей экскаваторов на протяжении всего жизненного цикла коронок от момента начала эксплуатации до снятия с эксплуатации в момент демонтажа коронок. Процесс измерения включает следующие шаги:

- Подготовка и включение средств измерения, подключение преобразователей, установление необходимого рабочего режима средств измерения.
- Зачистка поверхности коронки от грязи и породы.
- Визуальное определение области максимального наклепа (зоны 24 на рисунке 3.11), расположенной на расстоянии 2–2,5 см от острия, протяженностью 10–12 см.
- Визуальное разбиение области максимального наклепа на равномерную сетку, включающую минимум 20 точек, с минимальным расстоянием между точками в 2–3 см.
- Проведение измерений твердости. Для этого преобразователь, реализующий метод Либа, прикладывается рабочей зоной к поверхности в окрестности узла стеки и проводится измерение. В окрестности каждого узла сетки необходимо провести три замера, проводимых в разных местах на небольшом отдалении от намеченного узла сетки. По трем измерениям рассчитывается арифметическое среднее и полученная величина вносится в рабочий журнал.
- Проведение измерения показателя дефектности. Для этого вначале производится отстройка нуля на обратной стороне коронки, после чего преобразователь перемещается зигзагообразно, проходя через каждый узел сетки со снятием показаний, записываемых также в рабочий журнал.

Схема проведения измерений представлена на рисунке 4.2.

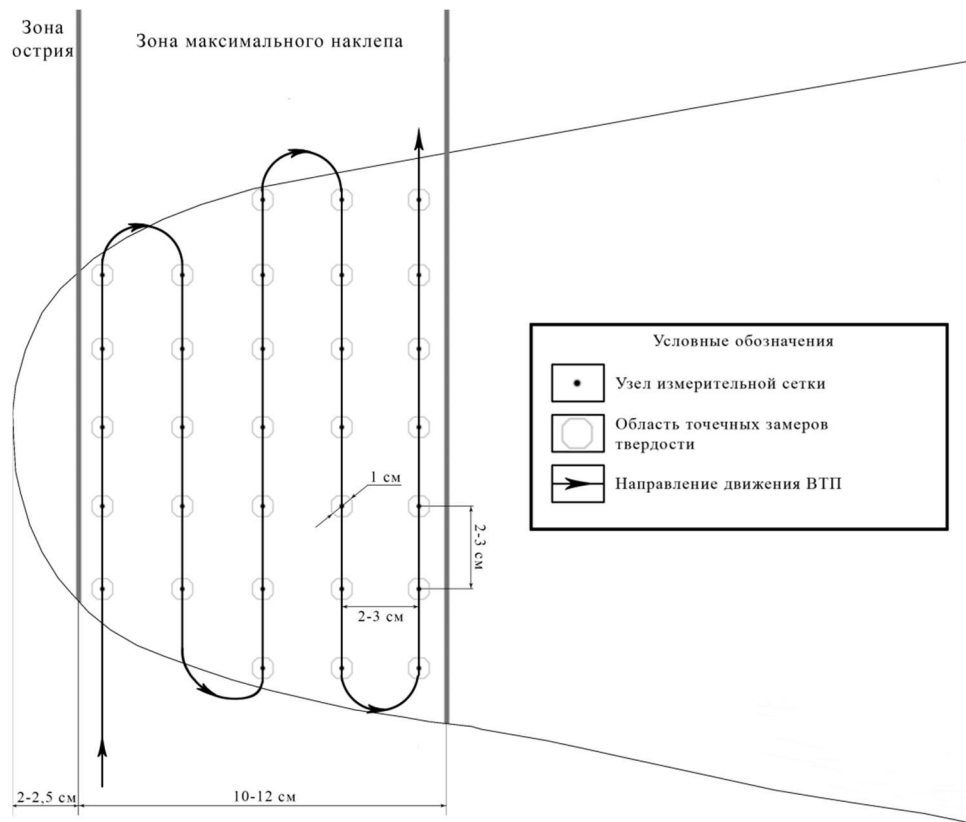


Рисунок 4.2 – Схема проведения измерений диагностических параметров

Измерения проводятся на всех коронках одного ковша, для получения репрезентативной выборке необходимо проводить измерения для построения диагностической кривой на 3-4 ковшах экскаваторов, работающих в одинаковых условиях на схожих операциях. Периодичность измерений выбирается исходя из выбранной на предприятии стратегии ТОиР, но не реже чем раз в неделю. Таким образом, формируется массив значений диагностических параметров для каждой коронки в определенный срок ее эксплуатации.

По истечению срока эксплуатации коронок необходимо отметить в рабочий журнал предельный срок их эксплуатации, а также провести аналогичные измерения диагностических параметров, для дальнейшего расчета диагностических критериев предельного состояния.

3. Статистическая обработка данных, создание сводной таблицы результатов мониторинга и построения графика диагностической кривой.

Статистическая обработка полученных данных включает усреднение значений твердости и показателя дефектности поверхностного слоя по узлам сетки каждой коронки для получения свободной таблицы, включающей средние значения диагностических параметров поверхностного слоя коронок в области максимального наклепа.

Полученная таким образом итоговая таблица содержит значения диагностических параметров, соотнесенных к сроку эксплуатации коронки, в момент которого были получены значения диагностических параметров. На этом этапе также необходимо рассчитать средний

предельный срок эксплуатации коронок $T_{п}$ путем расчета среднего арифметического между сроками снятия исследуемых коронок с эксплуатации.

Полученные для каждой исследуемой коронки значений диагностических параметров отмечаются в виде точек на графиках зависимости твердости и показателя дефектности от срока эксплуатации. По данным точкам методом наименьших квадратов проводится две диагностические кривые, которые необходимо совместить на едином графике. Пример такого графика для условий Коркинского разреза представлен на рисунке 4.1.

4. Анализ тенденций изменения диагностических параметров, выявление характерных областей, определение диагностических критериев остаточного ресурса N_0 , N_1 , N_2 и $N_{п}$.

На полученной кривой выделяются три характерные области: область образования наклепанного слоя (область I), область линейного роста значений диагностических параметров (область II) и область резкого ускорения роста показателя дефектности (область III), являющегося маркером скорого наступления предельного состояния. Перечисленные области характеризуются изменением скоростей роста диагностических параметров. Границы данных областей следует отметить на графике и определить значения сроков эксплуатации T_1 и T_2 , а также параметров N_0 , N_1 , N_2 и $N_{п}$. Значения диагностических критериев величин остаточного ресурса N_0 , N_1 , N_2 и $N_{п}$ записываются в таблицу (по аналогу таблицы 4.1).

По полученной в результате данной процедуры диагностической кривой и таблицы диагностических критериев величин остаточного ресурса определяется остаточный ресурс коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в аналогичных условиях. Определение остаточного ресурса по данной методике производится в рамках технического диагностирования коронок, входящего в стратегию техобслуживания по текущему состоянию. Процедура технического диагностирования по предложенной методике включает шаги:

- Подготовка средств измерения; для проведения измерений необходимо выбирать те же СИ, что и при предварительном исследовании.
- Зачистка поверхности коронки от грязи и породы.
- Визуальное определение области максимального наклепа, разбиение области на равномерную сетку, включающую минимум 20 точек, с минимальным расстоянием между точками в 2-3 см.
- Проведение точечных измерений твердости в узлах сетки с автоматическим вычислением среднего арифметического значения, которое и принимается за значение диагностического параметра.
- Проведение измерения показателя дефектности. Измерение проводится аналогично измерению при предварительном исследовании, вычисленное арифметическое среднее также принимается равным за диагностический параметр.

Вычисленные значения диагностических параметров сравниваются с диагностическими критериями по составленной таблице, на основе чего определяется значение остаточного ресурса коронок.

4.3 Рекомендации по внедрению предложенной методики

Построение диагностической кривой является наиболее продолжительной и трудоемкой частью методики, однако полученная кривая в дальнейшем используется для диагностики текущего состояния коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в аналогичных условиях, таким образом построение графика диагностической кривой необходимо выполнить лишь единожды, после чего возможно проводить техническое диагностирование текущего состояния.

Поскольку для получения массива данных для построения кривой необходимы периодические измерения диагностических параметров, то сам процесс измерения рекомендуется совмещать с процедурой технического обслуживания экскаватора.

Для экскаваторов предусмотрены следующие виды технического обслуживания:

- ежесменное техническое обслуживание, выполняемое перед началом, в течение или после рабочей смены;
- плановое техническое обслуживание, выполняемое в плановом порядке через определенные, установленные заводами-изготовителями величины наработки;
- сезонное техническое обслуживание, выполняемое два раза в год при подготовке машины к использованию в период последующего сезона (летнего или зимнего).

Ежесменное техническое обслуживание является обязательным и специально не планируется. Для проведения этого вида работ выделяют время в начале и конце смены. В перечень операций, проводимых в начале смены, рекомендуется включать [8]: очистка механизмов от грязи и пыли, проверка уровня масла в баках и редукторах, проведение внешнего осмотра креплений узлов и деталей экскаватора, проверка комплектности инструмента, проверка рулевого управления, проверка давления в гидросистеме по манометру, проверка работы гидросистемы, проверка состояния шин или гусеничного хода. В конце смены проводят операции [8]: установка рычагов управления в начальное положение, подтягивание соединения трубопроводов в местах подтекания масла, опускание ковша на грунт, выключение двигателя, а также другие операции в рамках ежесменного ТО двигателя, компрессоров, насосов и другого оборудования. Несмотря на довольно обширный список операций, ежесменное ТО зачастую проводится в течении 10-15 минут, следует также отметить, что далеко не всегда в состав данного ТО входит полный перечень операций.

Плановое ТО проводится через определенные величины наработки (в моточасах), чаще всего устанавливаемые производителем экскаваторов. Согласно фирменной инструкции по порядку ТО экскаваторов Komatsu серий PC400-7 и PC400LC-7, различают следующие виды планового ТО:

- Техобслуживание каждые 50 моточасов, в рамках которого проводится смазка соединительного пальца рукояти и ковша в нескольких точках, опорного пальца цилиндра стрелы и пальца пяты стрелы.
- Техобслуживание через каждые 100 моточасов, в рамках которого проводится смазка пальца штока цилиндра стрелы, опорного пальца цилиндра рукояти, соединительного пальца стрелы и рукояти, опорного и пальца штока цилиндра рукояти.
- Техобслуживание через каждые 250 моточасов, в рамках которого также проводятся смазочные операции (смазка поворотного круга), а также проверка уровня масла в корпусе редуктора поворота платформы, картере конечной передачи, и долив масла при необходимости. Также проводится проверка уровня электролита аккумуляторной батареи, проверка и регулировка натяжения ремней вентилятора и генератора.
- Техобслуживание через каждые 500 моточасов, в рамках которого проводится замена патрона топливного фильтра, проверка и промывка топливного фильтра, проверка уровня консистентной смазки в обгоняющей шестерне поворота платформы, добавление смазки при выявлении такой необходимости, замена масла в поддоне картера двигателя и патрона масляного фильтра двигателя, очистка и проверка ребер радиатора, маслоохладителя, охладителя радиатора, замена элемента сапуна в гидробаке.
- Техобслуживание каждые 1000 моточасов, в рамках которого проводится замена масляного фильтра гидросистемы, смена масла в корпусе редуктора поворота платформы, проверка уровня масла в картере демпфера, замена патрона предохранителя от коррозии.
- Также проводятся операции в ходе ТО через каждые 2000, 4000, 5000 и 8000 моточасов, перечень операций, проводимых в рамках данных ТО, можно найти в инструкции по ТО для экскаваторов Komatsu.

Необходимо также отметить, что при наложении графиков ТО необходимо проводить все операции, предусмотренные в рамках всех видов ТО, например, каждые 500 моточасов проводится не только соответствующее ТО, но и операции в рамках ТО каждые 250, 100 и 50 часов.

В рамках сезонного ТО проводятся операции по подготовке экскаватора к смене сезона. Основным критерием проведения сезонного ТО является смена температуры воздуха: при падении температуры ниже +5С экскаватор готовят к осенне-зимнему сезону, при повышении выше -5С – к весенне-летнему сезону. В рамках сезонного ТО проводят операции [8]: замена

топлива, моторного масла, гидравлического масла на соответствующий сезон, замена фильтров, проверка и очистка кондиционера, замена рабочей жидкости.

Для оценки возможности внедрения процесса измерения значений диагностических параметров, необходимо рассчитать примерную продолжительность данного процесса. Для сбора представительной выборки необходимо проведение измерений на коронках с ковшей нескольких экскаваторов, работающих в одинаковых условиях; измерения в рамках одного цикла технического диагностирования проводятся на всех коронках одного ковша обслуживаемого экскаватора.

Средняя продолжительность процедуры измерения диагностических параметров составляет 15-30 минут, что, с учетом средней продолжительности ежесменного ТО в 10-15 минут, не позволяет внедрить данной процедуру в состав мероприятия в рамках данного вида ТО. Продолжительность планового ТО сильно варьируется в зависимости от вида ТО. Так, во время ТО каждые 50 моточасов ($ТО_{50}$) проводится смазка пальцев рукояти, стрелы и ковша, в то время как во время ТО каждые 100 моточасов ($ТО_{100}$) количество мероприятия несколько больше, что увеличивает продолжительность данного вида ТО. Продолжительность $ТО_{50}$ можно оценить в 10-20 минут, с учетом того, что оно проводится одновременно с ежесменным ТО. Продолжительность совместных $ТО_{100}$ и $ТО_{50}$ составляет около 30-35 минут. Таким образом, целесообразно проводить операции по измерению диагностических параметров во время $ТО_{100}$. Данный вид ТО проводится каждые 100 моточасов; если приравнять продолжительность одного моточаса и реального часа, то, с учетом работы экскаватора на разрезе в двухсменном режиме по 16 часов в сутки, $ТО_{100}$ будет проводиться каждые 6-7 дней, что является приемлемой периодичностью для проведения измерений. Измерения также можно дополнительно проводить и во время $ТО_{250}$, так как продолжительность данного вида ТО достаточно высока, и совместное с ТО проведение диагностических операций не снизит производительность мероприятий в рамках ТО. Таким образом, измерения диагностических параметров рекомендуется проводить в рамках планового ТО во время $ТО_{100}$ и $ТО_{250}$. Схема проведения мероприятий по техническому диагностированию приведена на рисунке 4.3.

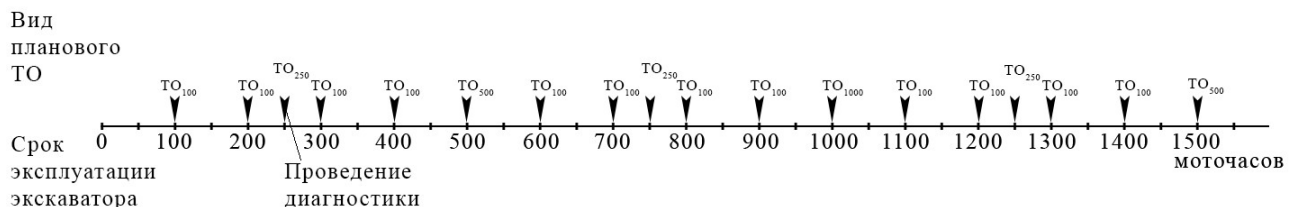


Рисунок 4.3 – Календарный план плановых ТО, черными стрелками обозначено проведение измерений в рамках технического диагностирования

Предложенный календарный план позволяет проводить с достаточной периодичностью диагностические операции совмещая проведение измерений диагностических параметров с

графиком ТО, не увеличивая таким образом время простоя техники. На основе предложенного календарного плана по вышеописанной методике составляется график диагностической кривой (рисунок 4.1), по которому определяются диагностические критерии степеней изнашивания N_0 , N_1 , N_2 и N_n , выносимые в таблицу (таблица 4.1), по которой для других коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в аналогичных условиях, возможно определение технического состояния и остаточного ресурса. Оценка технического состояния коронок проводится путем сопоставления результатов измерения диагностических параметров на контролируемом объекте с построенной ранее диагностической кривой. Контроль текущего состояния на начальной стадии эксплуатации не требует частой периодичности проведения замеров, поэтому его рекомендуется проводить во время ТО₂₅₀. По мере приближения к области ускоренного износа (степени изнашивания N_2) частота контроля должна быть увеличена и контроль технического состояния коронок необходимо проводить во время ТО₅₀. В зависимости от тенденций изменения диагностических параметров даются рекомендации по ТОиР. Например, быстрый рост значений показателя дефектности свидетельствует о скором наступлении предельного состояния, таким образом, при соответствии полученных значений диагностических критериев данной области графика, необходимо планировать замену коронок, а также мероприятия по ремонту ковша.

Эффективность данной методики заключается в уменьшении времени простоя техники, связанной с применением мероприятий по ремонту ковша и зубьев, а также замене коронок по схемам ППР, так как данные мероприятия теперь будут проводиться в зависимости от текущего состояния коронок.

Применение методов ТОиР, основанных на техническом диагностировании текущего состояния, показывает свою состоятельность, особенно для техники, работающей в сложных горно-геологических условиях, где устоявшаяся на территории России схема ППР показывает низкую эффективность ввиду сильного отличия нормативных и фактических сроков эксплуатации техники. Ключевое преимущество систем ТОиР, основанных на техническом диагностировании текущего состояния в подобных условиях заключается в более гибком планировании мероприятий ТОиР, основанных на результатах мониторинга текущего состояния, что позволяет существенно снизить время простоя техники. Успешным примером такой системы является система ФСО, принятая рядом производителей экскаваторов в качестве альтернативы ППР.

Предложенная методика оценки текущего состояния коронок зубьев ковшей экскаваторов была апробирована на базе разреза «Коркинский», работа на котором ведется в условиях активного эндогенного горения бурых углей. Применение данной методики позволяет с достаточной точностью оценить как текущее состояние коронок, так и спрогнозировать

тенденции расходования остаточного ресурса, что позволяет спланировать план-график замены коронок, а также мероприятий по ремонту зубьев и ковшей экскаваторов.

Предложенная методика была успешно внедрена в производственный процесс на предприятии по добыче и переработки торфо-сапропелевого сырья ООО «Эковит» с получением акта о внедрении результатов (Приложение Д). Также на разработанную методику был получен патент о регистрации изобретения (Приложение Е).

4.4 Выводы по главе 4

В результате работы над четвертой главой диссертации были сделаны следующие выводы:

1. Разработанная методика позволяет оценить остаточный ресурс коронок и определить сроки наступления состояния, близкого к предельному, по измерению твердости и показателя дефектности поверхностного слоя

2. Внедрение предложенной методики в систему технического обслуживания позволяет повысить работоспособность экскаваторов путем технического диагностирования текущего состояния, и своевременного применения мероприятий в рамках стратегии технического обслуживания, что позволяет повысить эффективность работы экскаватора.

3. Предложенная методика может быть реализована в рамках стратегии технического обслуживания по текущему состоянию для оценки остаточного ресурса и вынесения решений о необходимости применения мероприятий в рамках технического обслуживания и ремонта.

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, является усовершенствование разработанной методики для ее применения при оценке состояния ковшей экскаваторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева, Е.С. Исследование влияния абразивного изнашивания зуба ковша экскаватора на величину сопротивления копанью грунта / Е.С. Авдеева, В.Н. Кузнецова // Труды аспирантов и студентов ГОУ «Сибади»: сб. науч. ст. – Омск, 2011. – С. 3-7.
2. Ананин, В.Г. Опыт эксплуатации и результаты исследований карьерных гидравлических экскаваторов / В.Г. Ананин, А.Б. Эмилов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – №. 4. – С. 106-109.
3. Андреева, Л.И. Выбор стратегии ремонтного обслуживания горной техники / Л.И. Андреева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2021. – № 4. – С. 83-91.
4. Асланян, А.Э. Государственный первичный эталон твёрдости металлов по шкале Шора D и шкалам Либа ГЭТ 161-2019 / А. Э. Асланян [и др.] // Измерительная техника. – 2020. – № 2. – С. 6-10.
5. Аширова, А.Д. Возможности применения портативных твердомеров для неразрушающего контроля механических свойств покрытий / А.Д. Аширова, К.В. Гоголинский, А.А. Никазов // В сборнике трудов «XXII Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике», 3 – 5 марта 2020 г., Москва. – М.: Издательский дом «Спектр», 2020. – С. 181-184.
6. Белин, В.А. Добыча угля и влияние разных типов взрывчатых веществ на самовозгорание угольных масс / В.А. Белин, Н.Г. Валиев, В.В. Вернигор, Ж. Жамьян // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 4-10.
7. Беляк, А.Л. Исследование процесса самовозгорания бурых углей Канско-Ачинского бассейна, используемых для последующей активации / А.Л. Беляк, Ю.Э. Голодков // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2019. – № 2 (29). – С. 342-350.
8. Беркман, И.Л. Одноковшовые строительные экскаваторы / И.Л. Беркман, А.В. Раннев, А.К. Рейш; Учеб. для сред. ПТУ. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 272 с.
9. Бернштейн, М. Л. Структура и механические свойства металлов / М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. – М.: «Металлургия», 1970. – 472 с.
10. Бобров, А.Л. Основы вихретокового неразрушающего контроля: учебное пособие. / А.Л. Бобров, К.В. Власов, С.А. Бехер. – Новосибирск: СГУПС, 2019. – 98 с.
11. 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.

12. Брыков, М.Н. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: Научное издание / М.Н. Брыков, В.Г. Ефременко, А.В. Ефременко. – Херсон: Гринь Д.С., 2014. – 364 с.

13. Варнаков, Д.В. Теоретические основы концепции технического сервиса машин по фактическому состоянию на основе оценки их параметрической надежности / Д.В. Варнаков, О.Н. Дидманидзе // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2017. – № 2 (57). – С. 67-71.

14. Вержанский, А.П. Современные технологии технического обслуживания и ремонта горных машин и оборудования / А.П. Вержанский, М.С. Островский, В.У. Мнацаканян // Горный информационно-технический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №. S1. – С. 422-449.

15. Вихретоковый дефектоскоп [Электронный ресурс] // Константа. – URL: constanta.ru/catalog/vikhretokovye_defektoskopy_preobrazovateli_kontrolnye_obraztsy (дата обращения: 24.12.2021).

16. Герике Б.Л. Стратегия технического обслуживания горных машин по фактическому состоянию на основе методов вибродиагностики и неразрушающего контроля / Б.Л. Герике, И.Л. Абрамов, П.Б. Герике // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – № 1 (65). – С. 11-14.

17. Голынская, Ф.А. Прогноз самовозгораемости бурых углей Канско-Ачинского бассейна методом многомерной классификации по эталонным точкам на примере угольного пласта "Березовский" / Ф.А. Голынская, О.С. Сирнова // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 4. – С. 57-60.

18. Голынская, Ф.А. Особенности применения метода многомерной классификации по эталонным точкам для определения степени самовозгораемости бурых углей на примере Харанорского бурогоугольного месторождения (Забайкалье) / Ф.А. Голынская, О.С. Смирнова, Р.А. Никонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 9. – С. 5-11.

19. Гончар, А.В. Ультразвуковой и вихретоковый контроль процесса усталостного разрушения сварных соединений из аустенитной стали / А.В. Гончар, В.А. Ключников, В.В. Мишаков, М.С. Аносов // Дефектоскопия. – 2021. – № 7. – С. 28-36.

20. Григорович, В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович. – М.: Изд-во «Наука», 1976. – 230 с.

21. 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.

22. 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.
23. Гурьев, А.М. Влияние предварительного наклепа на поверхностную твердость стали 110Г13Л / А.М. Гурьев [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения/ – 2018. –Т 15, № 3. – С. 429-433.
24. Давиденков, Н.Н. Динамическая прочность и хрупкость металлов / Н.Н. Давиденков // Избранные труды: В 2-х т. – Киев: Наукова думка, 1981. – Т. 1. – 704 с.
25. Добровольский, В.И. Влияние шероховатости поверхности на циклическую прочность и долговечность штамповой стали при комнатной и повышенной температурах / В.И. Добровольский, С.В. Добровольский // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т 16, № 2. – С. 24-27.
26. Добровольский, В.И. Закономерности малоциклового деформирования и разрушения штамповых сталей при эксплуатационных температурах / В.И. Добровольский, В.В. Пряхин // Вестник ИжГТУ. – 2006. – № 1. – С. 43-45.
27. Досайкин, В.М. Выбор и обоснование методов диагностирования одноковшовых карьерных экскаваторов / В.М. Досайкин [и др.] // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 8-1. – С. 37-41.
28. Дрозд, М.С., Определение механических свойств металла без разрушения / М.С. Дрозд // М.: Металлургия, 1965. – 171 с.
29. Дрыгин, М.Ю. Оценка уровня организации и эффективности применения системы планово-предупредительных ремонтов для экскаваторного парка Кузбасса / М.Ю. Дрыгин, Н.П. Курышкин // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 4. – С. 16-25.
30. Дрыгин, М.Ю. Разработка алгоритма технического диагностирования основного горного оборудования /М.Ю. Дрыгин // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 2. – С. 44-50.
31. Ерастов, А.Ю. Влияние горного давления на возникновение очагов самовозгорания угля в выработанных пространствах выемочных участков /А.Ю. Ерастов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 1.1. – С. 5–8.
32. Ефимов, А.Г. Применение вихретоковой дефектоскопии и магнитной структуроскопии при комплексном контроле магистральных трубопроводов / А.Г. Ефимов, А.Е. Шубочкин // Экспозиция Нефть Газ. – 2015. – № 3 (42). – С. 61-64.
33. Звонарев, И.Е. Исследования поверхностной твердости металла в областях повышенного износа и разрушения деталей горных машин / И.Е. Звонарев, С.Л. Иванов, Д.И.

Шишляников, А.С. Фокин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 67-76.

34. Ильин, М.А. Обоснование математической модели зависимости между диагностическим и структурным параметром метода диагностирования технического состояния шестеренного / М.А. Ильин, П.А. Ильин, А.В. Жирный // Известия международной академии аграрного образования. – 2018. – № 41 (1). – С. 23-26.

35. Казакова, Ю.Д. Исследование износостойкости рабочих органов строительных и дорожных машин в различных условиях эксплуатации / Ю.Д. Казакова, С.И. Вахрушев // Научно-образовательный полиматический журнал «Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии». – 2016. – № 6. – С. 310-319.

36. Коровушкин В.В. Минеральные и валентные формы железа и их влияние на окисление и самовозгорание углей / В.В. Коровушкин [и др.] // Горный журнал. – 2015. – № 11. – С. 70-74.

37. Кочергин, В.С. Построение эмпирической зависимости твердости стали 35 от изменения температуры в зоне её красностойкости / В.С. Кочергин, В.В. Куц, М.С. Разумов, И.С. Аникутин // из материалов 4-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь и системная модернизация страны», Курск, 21-22 мая 2019 г. – Курск: ЮЗГУ, 2019. – С. 285-288.

38. Лебедев, Д.И. Натурные испытания служебных характеристик наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A / Д.И. Лебедев [и др.] // Наука и образование. – 2016. – № 2 (82). – С. 81-87.

39. Лиманский, А.В. Основные недостатки и направления совершенствования мониторинга экологических последствий ликвидации предприятий угольной промышленности России/ А.В. Лиманский // Уголь. – 2010. – № 9 (1013). – С. 68-71.

40. Макарова, А.В. Влияние нагрева на структуру, фазовый состав и микромеханические свойства метастабильной аустенитной стали, упрочненной наноструктурирующей фрикционной обработкой / А.В. Макарова, П.А. Скорынина, Е.Г. Волкова, А.Л. Осинцева // Физика металлов и металловедение. – 2018. – Т. 119, № 12. – С. 1257–1264.

41. Материаловедение: учебное пособие / Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев, А.Б. Кутын. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 339 с.

42. Москаленко, А.Д. Пожарные ситуации при перевозке каменных углей / А.Д. Москаленко, Т.В. Плют // Транспортное дело России. – 2015. – № 6. – С. 145–148.

43. Муминов, М.Р. Экспериментальное исследование деформационного упрочнения при дробеударной обработке деталей хлопковых машин / М.Р. Муминов, И.Г. Шин // из материалов XII-ой Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные

системы, информационные технологии и инновации», Курск, 19-20 марта 2015 г. – Курск: Университетская книга, 2015. – С. 167-169.

44. Неразрушающий контроль: [в 5 кн.] / под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высшая школа, 1992. – 20 см. Кн. 1: Общие вопросы. Контроль проникающими веществами / А.К. Гурвич, И.Н. Ермолов, С.Г. Сажин. – 1992. – 241 с.

45. Никазов, А.А. Разработка средств метрологического обеспечения измерений твердости металлов и сплавов по методу Либа: дис... канд. тех. наук: 05.11.13. – СПб, 2022. – 127 с.

46. Никитин, К.В. Мониторинг технического состояния экскаваторного парка на разрезах Кузбасса / К.В. Никитин, В.Н. Артамошкин, И.А. Стеблин // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 11 (1). – С. 188-192.

47. Обидов, Н. Выбор зубьев ковшей одноковшовых экскаваторов зависимости от условий эксплуатации / Н. Обидов, А. Рузибаев, М. Асадова, Ш. Ашуров // Материалы XXVIII международной научно-практической конференции «World Science: Problems and Innovations», Пенза, 30 января 2019 г. – Пенза: Наука и Просвещение, 2019. – С. 89-92.

48. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 329 с.

49. Орешко, Е.И. Методы измерения твердости материалов (обзор) / Е.И. Орешко, Д.А. Уткин, В.С. Ерасов, А.А. Ляхов // Труды ВИАМ. – 2020. – № 1 (85). – С. 101-117.

50. Открытая разработка угольных и рудных месторождений: учебное пособие. – 2-е изд. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2000.- 611 с.

51. Паначев, И.А. К разработке модели взаимодействия режущей кромки ковша шагающего экскаватора со взорванной горной породой / И.А. Паначев, М.Ю. Насосов, К.В. Антонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 2. – С. 37-40.

52. Пащенко, Л.В. Особенности структуры склонных к самовозгоранию углей Донбасса / Л.В. Пащенко, В.И. Потапенко // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 51. – С. 66-84.

53. Пилюшина, Г.А. Особенности изнашивания рабочих органов строительных и дорожных машин / Г.А. Пилюшина // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2009. – № 10. – С. 80-82.

54. Пилюшина, Г.А. Повышение работоспособности рабочих органов оборудования и режущих инструментов для обработки неметаллических материалов / Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков, А.С. Рухлядко // СТИН. – 2013. – № 2. – С. 9-13.

55. Попов, Д.А. Особенности условий эксплуатации рабочих органов строительно-дорожных машин и факторы, влияющие на их ресурс / Д.А. Попов, С.С. Патюков // Воронежский научно-технический вестник. – 2015. – № 1 (11). – С. 85-94.

56. Портола, В.А. Обнаружение очагов самовозгорания угля на ранней стадии развития / В.А. Портола, С.Н. Лабукин // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 34-37.

57. Потапов, А.И. Обеспечение единства измерений твердости динамическим методом в Российской Федерации / А.И. Потапов, В.А. Сясько, К.В. Гоголинский, А.А. Никазов // Научно-технический журнал «Контроль. Диагностика». – 2016. – № 12. – С. 44-50.

58. Потапов, А.И. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / А.И. Потапов, В.А. Сясько; научное, методическое и справочное пособие. – СПб, 2009. – 904 с.

59. Редреев, Г.В. Использование диагностической информации для повышения эффективности эксплуатации зерноуборочных комбайнов / Г.В. Редреев, С.Н. Болтовский // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2018. – № 4 (32). – С. 85-92.

60. Сафрончук, К.А. Организация технического обслуживания и текущего ремонта горных машин в полевых условиях при помощи мобильных самоходных мастерских / К.А. Сафрончук, В.И. Князькина, С.Л. Иванов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2019. – Т. 1. – С. 82 – 86.

61. Северина, В.А. Оценка экологической нагрузки при пожарах при добыче и транспортировке углей / В.А. Северина, С.С. Тимофеев // XXI век. Техносферная безопасность. – 2020. – № 2 (18). – С. 187-197.

62. Серебренников, А.В. Оценка методов и приборов для измерения механических напряжений в конструкционных материалах горных машин / А.В. Серебренников, И.И. Демченко, В.Л. Серебренников // Безопасность Труда в Промышленности. – 2013. – №. 11. – С. 56-62.

63. Сидоренко, А.А. Эндогенная пожароопасность шахт Кузбасса / А.А. Сидоренко // Записки Горного института. – 2014. – № 207. – С. 66–69.

64. Слесарев, Б.В. Исследование условий и параметров экскавации мощных карьерных гидравлических экскаваторов / Б.В. Слесарев, П. Булес // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №. 51-2. – С. 42-51.

65. Твердомер портативный многофункциональный [Электронный ресурс] // Константа. –URL: constanta.ru/catalog/tverdomery/konstanta_kt (дата обращения: 24.12.2021).

66. Техническое обслуживание и ремонт горного оборудования: Учебник для нач. проф. образования / Ю.Д. Глухарев, В.Ф. Замышляев, В.В. Кармазин [и др.]; под ред. В.Ф. Замышляева. – М.: Академия, 2003. – 400 с.
67. Толмачев И.И. Магнитные методы контроля и диагностики: учебное пособие / И.И. Толмачев. – Томск: ТПУ, 2008. – 216 с.
68. Торро, Т.В. Методика, ход и результаты исследования процесса самовозгорания угля / Т.В. Торро, А.В. Ремезов, Г.Н. Роут // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 4. – С. 18–26.
69. Трухачев, В.И. Оценка технического состояния машины по данным ее системы управления / В.И. Трухачев, О.Н. Дидманидзе, С.Н. Девянин, Н.Н. Пуляев // Сборник трудов конференции «Чтения академика В.Н. Болтинского», Москва, 20–21 января 2021 г. – М.: Сам Полиграфист, 2021. – С. 10-19.
70. Туркбаев, П.Б. Исследование георисков водного генезиса на примере бурогоугольного месторождения Алмалык / П.Б. Туркбаев, Н.Д. Омошов // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2018. – № 3 (47). – С. 232-240.
71. Утвержденные типы средств измерений [Электронный ресурс] // ФГИС «Аршин». – URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry> (дата обращения: 14.01.2023).
72. Федоренко, М.А. Технология машиностроения и ремонта горных машин / М.А. Федоренко, Ю.А. Бондаренко, Т.М. Санина. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – 221 с.
73. Хабардин, В.Н. Определение сроков технического обслуживания машины по результатам оценки и прогнозирования качества масла в двигателе // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2021. – № 39. – С. 25-32.
74. Чемезов, Е.Н. О снижении пожароопасности на угольных разрезах севера / Е.Н. Чемезов, С.Е. Федорова // Вестник Якутского государственного университета. – 2005. – № 4. – С. 103-106.
75. Черноиванов, В.И. Новая стратегия технического обслуживания и ремонта машин / В.И. Черноиванов, В.А. Денисов, Ю.В. Катаев, А.А. Соломашкин // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 9 (291). – С. 33-36.
76. Чистякова, А.В. Диагностика технического состояния металлических трубопроводов/ А.В. Чистякова, В.А. Орлов, В.А. Чухин // Природообустройство. – 2016. – №. 2. – С. 48-54.
77. Шарифов, З.З. Исследование влияния шероховатости поверхности на износ поверхностного слоя деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными

методами / З.З. Шарифов, Ч.М. Алиев, А.М. Кулиев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2018. – №. 6. – С. 1262-1272.

78. Шестакова, А.И. Геология бурогольных пожароопасных месторождений Восточной Сибири и Забайкалья // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2011. – № 2 (39). – С. 110-116.

79. Шкуров, Р.У. Влияние величины износа зубьев ковшей экскаваторов на эффективность их использования / Р.У. Шкуров, М.А. Рожина, М.Р. Таджиходжаева // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2011. – №. 10. – С. 37-38.

80. Щербаков, В.С. Практическое применение эффекта Баркгаузена / В.С. Щербаков // Естественные и технические науки. – 2017. – № 2 (104). – С. 124-125.

81. Юрченко, В.В. Системы обеспечения работоспособности карьерных экскаваторов / В.В. Юрченко, Д.Р. Абильдин, Н.Х. Сулейменов // Научно-практические исследования. – 2020. – № 5-2 (28). – С. 216-224.

82. Artem'ev, A.A. Test procedure of clad alloys for resistance against high temperature abrasive wear / A.A. Artem'ev, A.A. Antonov, G.N. Sokolov, V.I. Lysak // Journal of friction and wear. – 2017 – N 38 (5) – P. 225-230.

83. Bandara, C.S. Full range S-N curves for fatigue life evaluation of steels using hardness measurements / C.S. Bandara, S.C. Siriwardane, U.I. Dissanayake, R. Dissanayake // International Journal of Fatigue. – 2015. – Vol. 82, N 2. – P. 325-331.

84. Bibik, V. Calculation of the intensivity of adhesive-fatigue wear of cutting tools / V. Bibik, N. Ivushkina, D. Arhipova // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. – 2016. – N 142 (1). – P. 012055.

85. Bogdanovich, P.N. Fatigue wear of materials under dynamic contact loading / P.N. Bogdanovich // Journal of Friction and Wear. – 2013. – N 34 (5). – P. 349-357.

86. Bolobov, V.I. Service life extension for rock cutters by increasing wear resistance of holders by thermomechanical treatment / V.I. Bolobov, S.A. Chupin, V.S. Bochkov, I.I. Mishin // Gornyi Zhurnal. – 2019. – N 5. – P. 67-71.

87. Bombač, D. Thermal fatigue behaviour of Fe-1.7C-11.3Cr-1.9Ni-1.2Mo roller steel in temperature range 500 – 700 °C / D. Bombač, M. Gintalas, G. Kugler, M. Terčelj // International Journal of Fatigue. – 2018. – Vol. 121. – P. 98-111.

88. Boroński, D. The effect of the method of determination of young's modulus on the estimation of fatigue life of structural elements / D. Boroński // Journal of theoretical and applied mechanics. – 2004. – Vol. 42, N 2. – P. 269-283.

89. Bosnjak, S.M. Failure of the bucket wheel excavator buckets / S.M. Bosnjak [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2018. – N 84. – P. 247-261.

90. Bouzakis, K.-D. Repetitive impact test near uncoated and coated cutting edges for assessing their fatigue behavior / K.-D. Bouzakis [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2014. – N 8. – P. 63-69.
91. Chaus, A.S. Influence of cutting conditions of cast-metal cutting tools in their wear and durability: Analysis of cutting conditions of tools / A.S. Chaus, F.I. Rudnitskii // Journal of Friction and Wear. – 2007. – N 25 (5). – P. 416-421.
92. Dębski, D. Multiaxial Fatigue Behavior of 30HGSA Steel Under Cyclic Tension-Compression and Reversed Torsion / D. Dębski, K. Gołoś, M. Dębski, A. Misztela // In: Niepokolczycki A., Komorowski J. (eds) ICAF 2019. Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing. ICAF 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer. – 2020. – P. 452-460.
93. Farrivar, H. Core microstructure-depending bending fatigue behavior and crack growth of a case-hardened steel / H. Farrivar [et al.] // Material Science & Engineering A. – 2019 – N 762. – P. 138040.
94. Gerasimenko, A.A. Evaluation of steel vertical tank residual life by a metal low-cycle fatigue criterion under biaxial loading conditions / A.A. Gerasimenko, G.K. Samigullin // Chemical and petroleum engineering. – 2015. – Vol. 52, N 1. – P. 53-58.
95. Gogolinskii, K.V. Mechanical properties measurements with portable hardness testers: Advantages, limitations, prospects / K.V. Gogolinskii [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1384, N 1. – P. 012012.
96. 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, N 4. – P. 189-196.
97. Gogolinskiy, K. Impactor velocity measurement system for dynamic hardness testers and calibration machines on Leeb scales / K. Gogolinskii [et al.] // Measurement. – 2020. – Vol. 173. – P. 108632.
98. Goo, B.-C. Very-high-cycle fatigue and Charpy impact characteristics of manganese steel for railway axle at low temperatures / B.-C. Goo, H.-S. Mun, I.-S. Cho // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, N 15. – P. 5042.
99. Grabsky, A.A. Rationale for choosing a strategy for maintenance and repair of quarry excavators / A.A. Grabsky, V.Yu. Sergeev, E.P. Grabskaya // Ugol'. – 2021. – N 2. – P. 14-17.
100. **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, N 5. – P. 381-390.

101.Grzesik, W. Tool Wear and Damage / W. Grzesik; In: *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*. –2nd ed./ W. Grzesik. – Amsterdam: Elsevier. – 2017. – P. 215–239.

102.Guo, C. Fatigue failure mechanism and life prediction of a cast duplex stainless steel after thermal aging / C. Guo [et al.] // *International Journal of Fatigue*. – 2021. – Vol. 146. – P. 106161.

103.Hao, Q. A decision support system for integrating corrective maintenance, preventive maintenance and condition-based maintenance / Q. Hao [et al.] // *Proceedings of the 2010 construction research congress: innovation for reshaping construction practice*. – 2010. – P. 470-479.

104.Kornilova, A.V. The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in carbon hypoeutectoid steels / A.V. Kornilova, K. Zaya // *RUDN Journal of Engineering Research*. – 2022.– Vol. 23, N 2. – P. 140–145.

105.Kumar, B. Excavator bucket tooth wear analysis / B. Kumar, T. Alam // *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Chennai. India, 24 November 2016. – Chennai: IEEE. 2016. – P. 3364-3366.

106.Masloosh, K.M. Abrasive wear and its application to digger teeth / K.M. Masloosh, T.S. Eyre // *Tribology International*. – 1985. – Vol. 18, N 5. – P. 259-266.

107.Mercier, D. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing / D. Mercier, J. Lesage, X. Decoopman, D. Chicot // *NDT&E International*. – 2006. – N 39. – P. 652-660.

108.Munoz-Escalona, P. Prediction of tool wear mechanisms in face milling AISI 1045 steel /P. Munoz-Escalona [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2011. – Vol. 21, N 6. – P. 797-808.

109.Nam, H.S. Ductile fracture simulation for A106 Gr.B carbon steel under high strain rate loading condition / H.S. Dam [et al.]; Ed: Lin Ye // *Proceedings of the International Congress (APCF/SIF-2014) «Recent Advances in Structural Integrity Analysis»*, Sydney, Australia, December 9-12, 2014. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2014. – P. 37-41.

110.Niesłony, A. New method for evaluation of the Manson–Coffin–Basquin and Ramberg–Osgood equations with respect to compatibility / A. Niesłony,, C. el Dsoki, H. Kaufmann, P. Krug // *International Journal of Fatigue*. – 2008. – Vol. 30. – P. 1967-1977.

111.Osman, Z. *Lecture Notes in Mechanical Engineering* / Z. Osman [et al.] // *Proceedings of the 4th International Manufacturing Engineering Conference and The 5th Asia Pacific Conference on Manufacturing Systems «iMEC-APCOMS 2019»*, Malaysia, 2020. – Cham: Springer, 2020.

112.Pauschitz, A. Mechanisms of sliding wear of metals and alloys at elevated temperatures / A. Pauschitz, M. Roy, F. Franek // *Tribology International*. – 2008. – N 41. – P. 584-602.

113.Potapov, A.I. Non-destructive testing of multilayer medium by the method of velocity of elastic waves hodograph / A.I. Potapov, A.V. Kondratev // *Journal of Mining Institute*. – 2020. – Vol. 243. – P. 348-356.

114. Qi, Y. Improved quantitative analysis method for evaluating fatigue cracks in thermal fatigue testing / Y. Qi [et al.] // *Materials Letters*. – 2019. – N 242. – P. 115-118.
115. Roa, J.J. Phase transformation under thermal fatigue of high Mn-TWIP steel: Microstructure and mechanical properties / J.J. Roa [et al.] // *Material Science & Engineering A*. – 2016. – N 677. – P. 431-437.
116. Rojacz, H. High temperature abrasion resistance of differently welded structural steels / H. Rojacz, H. Pahr, S. Baumgartner, M. Varga // *Tribology International*. – 2017. – N 113. – P. 487–499.
117. Rudnitskiy, V.A. Determining yield strength of metals by microindentation with a spherical tip / V.A. Rudnitskiy, A.P. Kren, G.A. Lantsman // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2019. – Vol. 55, N 2. – P. 162-168.
118. Rusinski, E. Examination of the causes of a bucket wheel failure in a bucket wheel excavator / E. Rusinski, P. Hamartkiewicz, M. Kowalczyk, P. Moczko // *Engineering Failure Analysis*. – 2010. – N 17. – P. 1300-1312.
119. Sarychev, V.D. Wear model of an excavator bucket / V.D. Sarychev [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1909, N 1. – P. 020186.
120. Sasaki, K. Numerical modelling of low rank coal for spontaneous combustion. / K. Sasaki, Y. Wang, Y. Sugai, X. Zhang // *Proceedings of 14th Coal Operators' Conference «Underground coal mines»*, Wollongong, Australia, 13-14 February 2014. – Wollongong: University of Wollongong. – 2014. – P. 344-349.
121. Savrai, R.A. Features of eddy-current testing of the fatigue degradation of laser clad cobalt-nickel-chromium coating under contact loading / R.A. Savrai, L.Kh. Kogan, A.V. Makarov, N.N. Soboleva // *Letters on Materials*. – 2020. – Vol. 10, N 3. – P. 315-321.
122. Singh, G. Wear and friction behavior of NiCrBSi coatings at elevated temperatures / G. Singh, M. Kaur, R. Upadhyaya // *Therm Spray Tech*. – 2019. – N 28. – P. 1081-1102.
123. Starzhinskii, V.E. Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention / V.E. Starzhinskii, Yu. L. Soliterman, F.M. Goman, S.A. Osipenko // *Journal of Friction and Wear*. – 2008. – Vol. 29, N 5. – P. 340-353.
124. Syasko, V. Research and development of metrological assurance elements for leeb hardness measurements / V. Syasko, A. Nikazov // *Inventions*. – 2021. – Vol. 6, N 4. – P. 86.
125. Talerov, M.P. Life and failures of tangential-rotary picks / M.P. Talerov, V.I. Bolobov // *Gornyi Zhurnal*. – 2018. – N 4. – P. 77-81.
126. Teng, Z. A unified fatigue life calculation based on intrinsic thermal dissipation and microplasticity evolution / Z. Teng, H. Wu, C. Boller, P. Starke // *International Journal of Fatigue*. – 2020. – N 131. – P. 105370.

127. Torres, H. Experimental simulation of high temperature sliding contact of hot rolled steel / H. Torres [et al.] // Tribology International. – 2016. – N 93. – P. 745-754.
128. Varga, M. Temperature and load influence on in-situ formed layers during high temperature abrasion / M. Varga, E. Badisch // Wear. – 2017. – N 384. – P. 114-123.
129. Vargel, C. Corrosion of aluminium / C. Vargel. – 2nd edition. – Amsterdam: Elsevier, 2020. – 858 p.
130. Wang, H. Experimental Study on Greenhouse Gas Emissions Caused by Spontaneous Coal Combustion / H. Wang, C. Chen // Energy Fuels. – 2015. – Vol. 29, N 8. – P. 5213-5221.
131. Yingfrei, G. Influence of cutting parameters and tool wear on the surface integrity of cobalt-based Stellite 6 alloy when machined under a dry cutting environment / G. Yingfrei, P. Munoz, A. Galloway // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2016. – Vol. 26, N 1. – P. 312-326.
132. Zhang, P. Fatigue failure analysis and finite element assessment of the twins torsion spring / P. Zhang [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2021. – Vol. 122. – P. 105187.
133. Zhu, D. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys / D. Zhu, X. Zhang, H. Ding // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2013. – N 64. – P. 60-77.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

БЛОК-СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

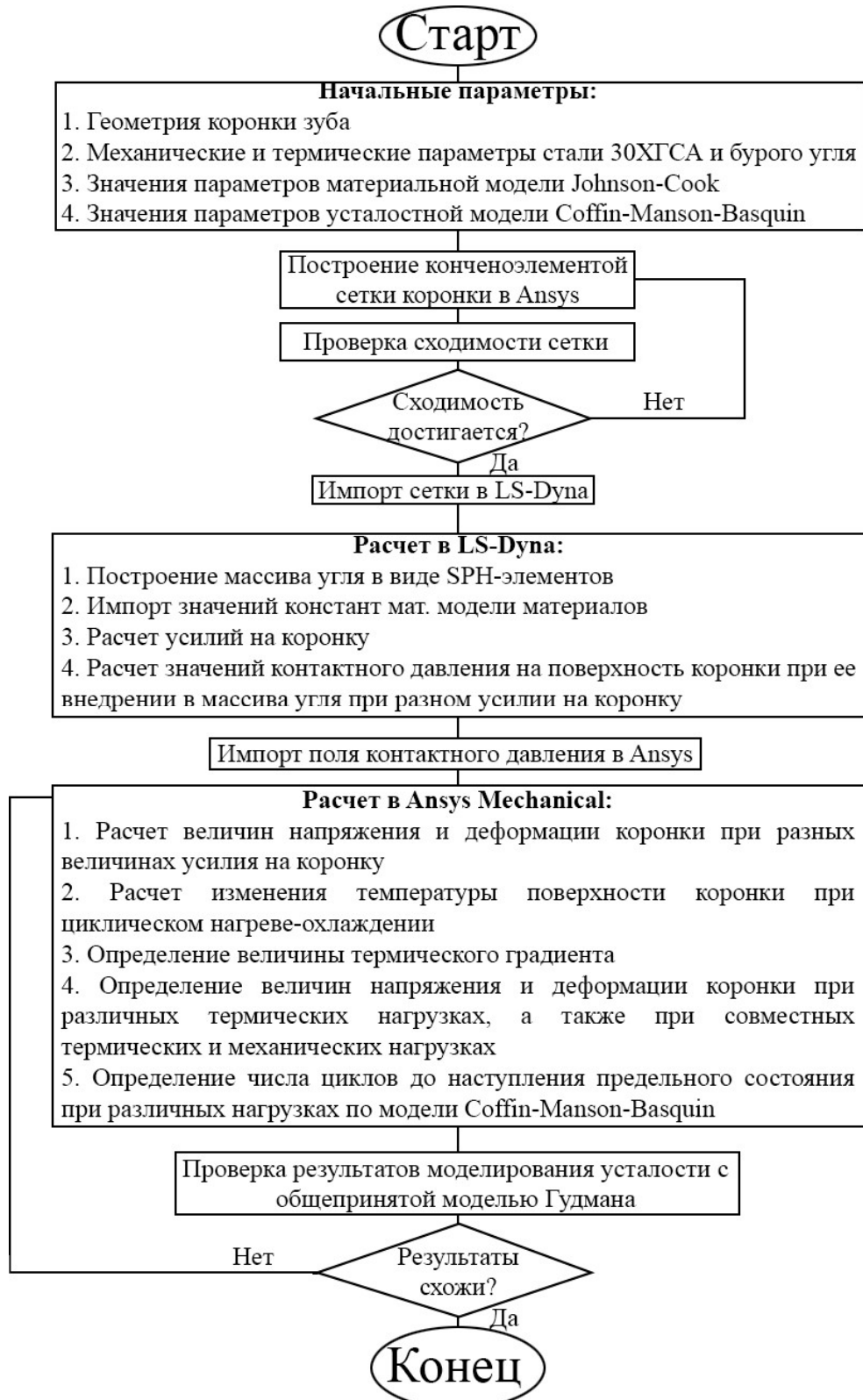


Рисунок А1 – Блок-схема численного моделирования

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ТРЕХМЕРНЫЕ КАРТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ НА КОРОНКУ

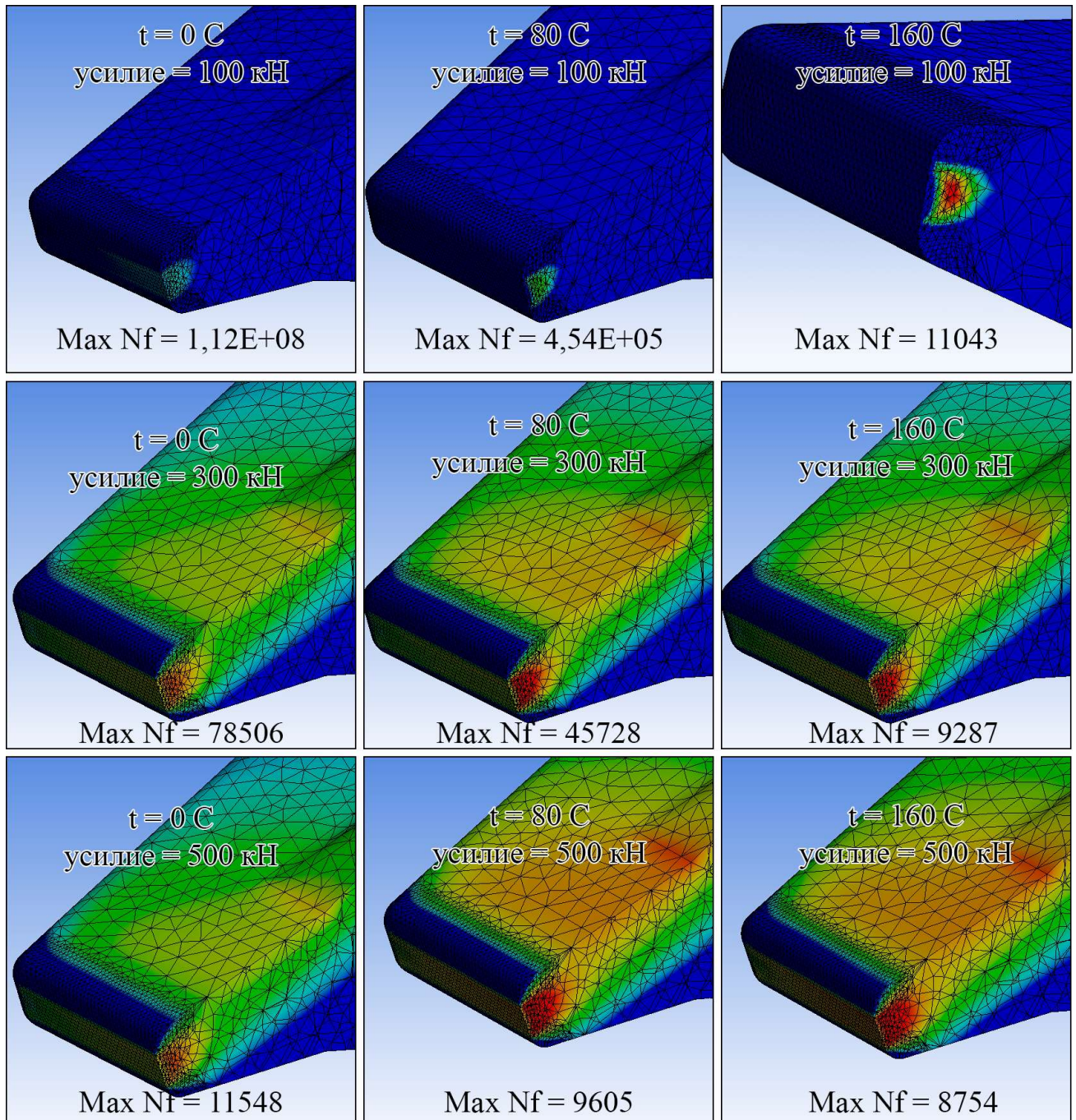


Рисунок Б1 – Карты распределения усталостной долговечности при различных нагрузках

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Таблица В1 – Технические характеристики твердомера Константа-КТ

Шкалы твердости	HRC, HB, HV, HRA, HRB, HSD, σ_b , HL
Основная погрешность измерений:	
по Бринеллю, HB	10
по Виккерсу, HV	12
по Шору, HSD	2
по Роквеллу, HRC	1,5
временного сопротивления σ_b (предел прочности), %, не более	5
Габаритные размеры, мм	125×55×20
Масса прибора, г	120

Таблица В2 – Технические характеристики вихретокового дефектоскопа Константа ВД и преобразователя ПФ-ОН-14-Fe

Глубина обнаруживаемых поверхностных и подповерхностных дефектов, мм	от 0,05 до 50
Минимальное раскрытие трещин, мкм	2
Диапазон частот тока возбуждения преобразователей, МГц	от 5 Гц до 30
Габаритные размеры электронного блока, мм	120x60x25
Масса, г	150
Характеристики преобразователя ПФ-ОН-14-Fe	
Тип преобразователя	Преобразователь фазовый абсолютный
Назначение	Общего Назначения
Диаметр зоны контроля, мм	14
Вариант исполнения	ферромагнитные стали и чугуны

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

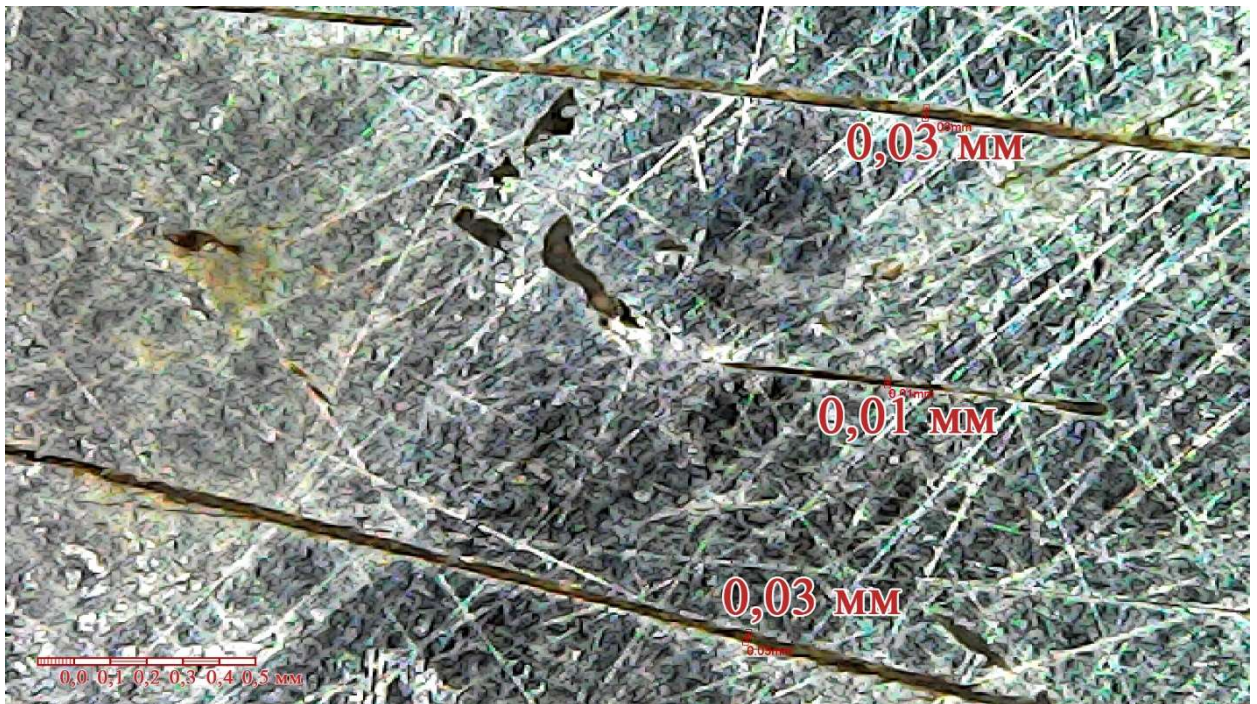
МИКРОСНИМКИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗНОШЕННОЙ КОРОНКИ В РАЗЛИЧНЫХ
ОБЛАСТЯХ

Рисунок Г1 – Микроснимок поверхности задней части изношенной коронки

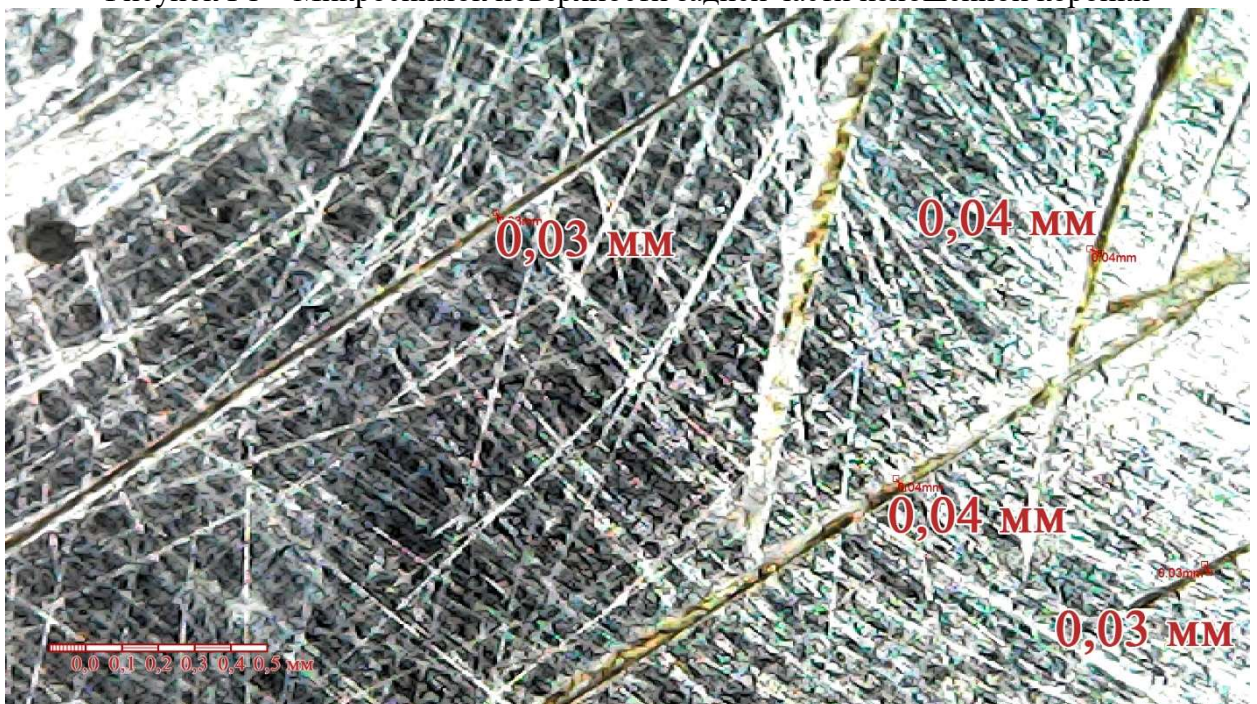


Рисунок Г2 – Микроснимок поверхности задней части изношенной коронки

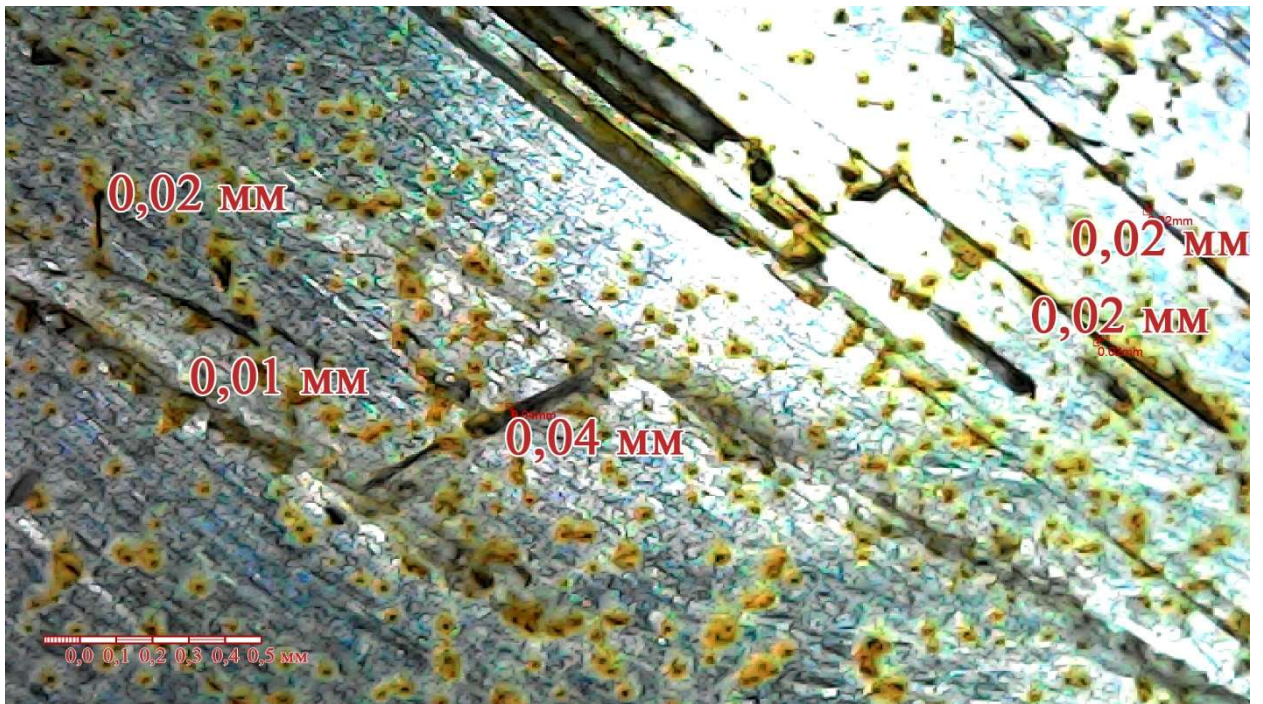


Рисунок Г3 – Микроснимок поверхности области максимального наклепа изношенной коронки

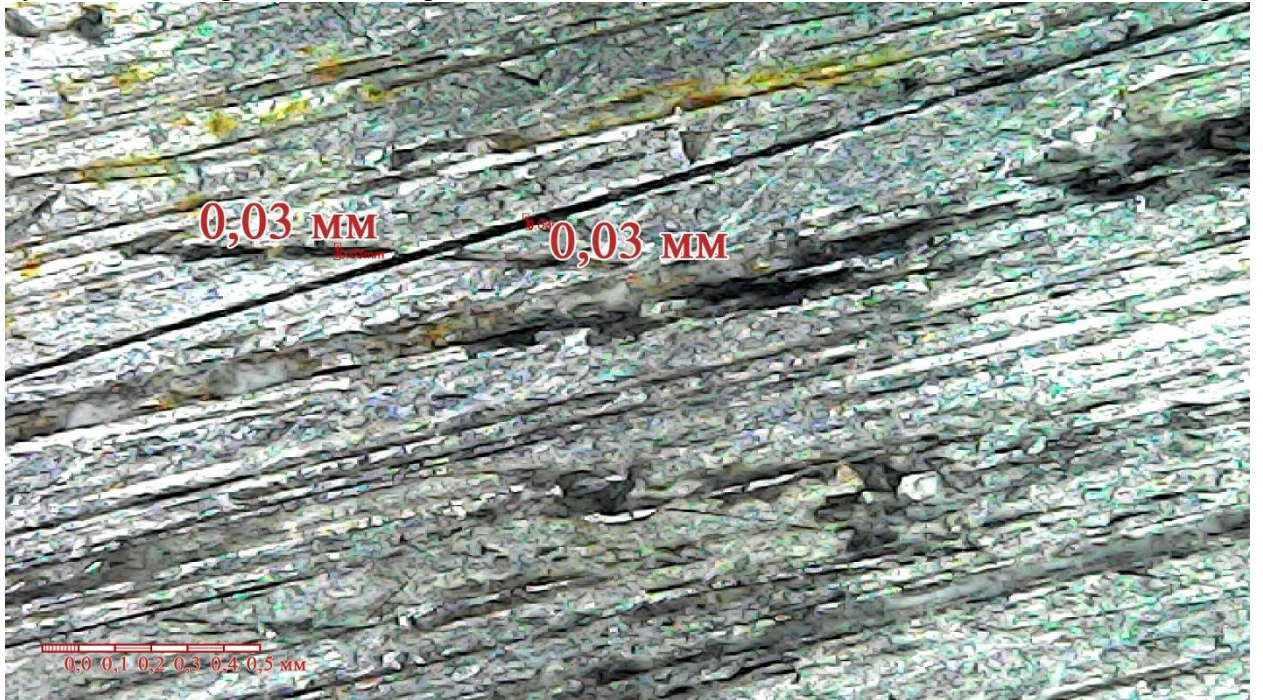


Рисунок Г4 – Микроснимок поверхности области максимального наклепа изношенной коронки

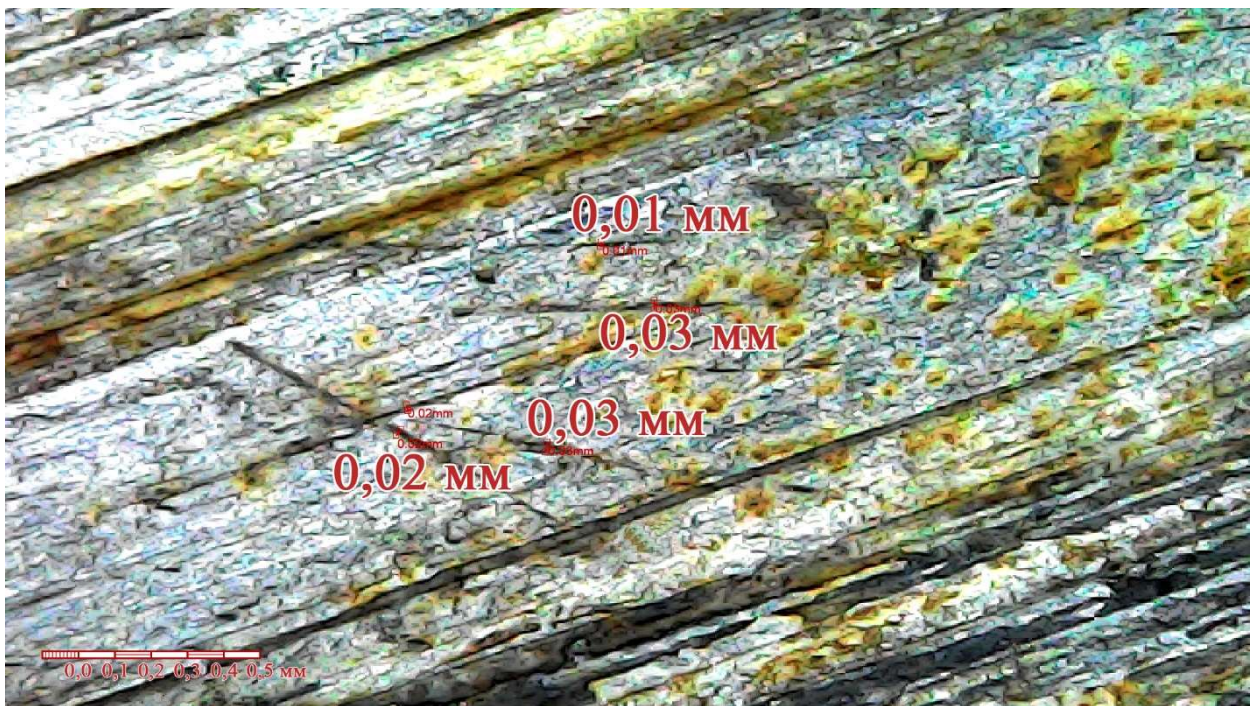


Рисунок Г5 – Микроснимок поверхности области максимального наклепа изношенной коронки



Рисунок Г6 – Микроснимок поверхности области максимального наклепа изношенной коронки

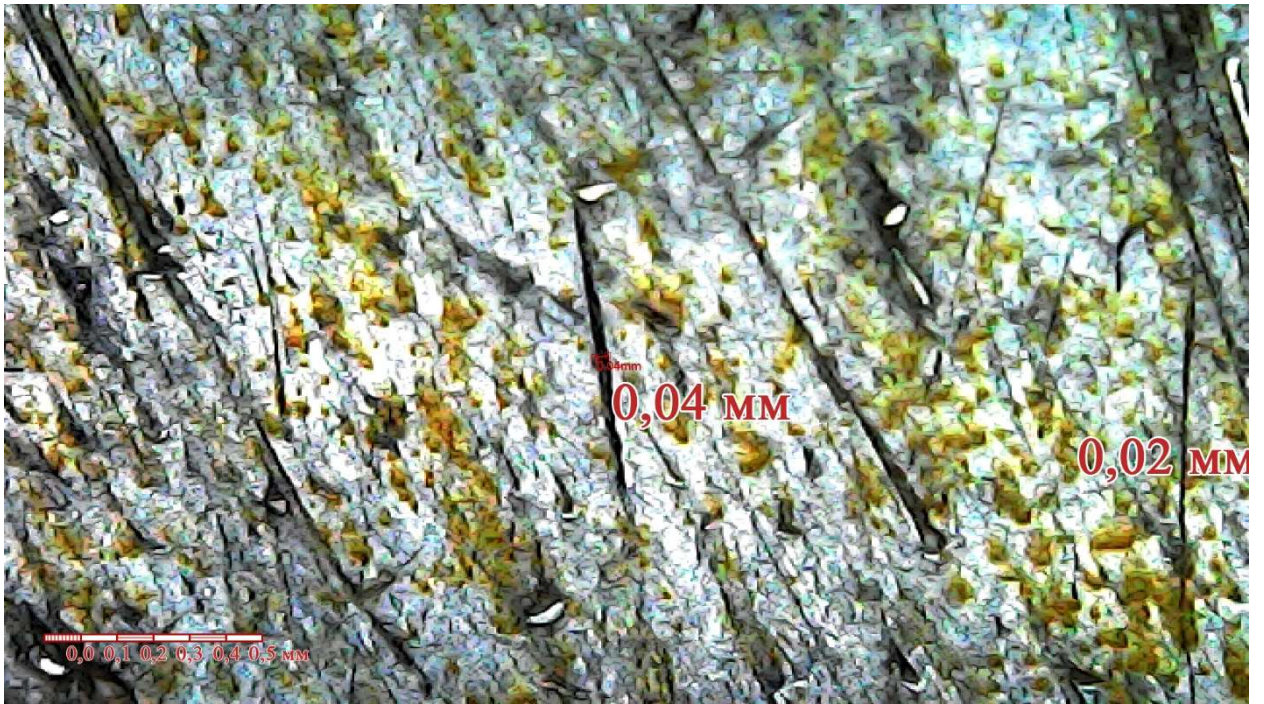


Рисунок Г7 – Микроснимок поверхности зоны острия изношенной коронки

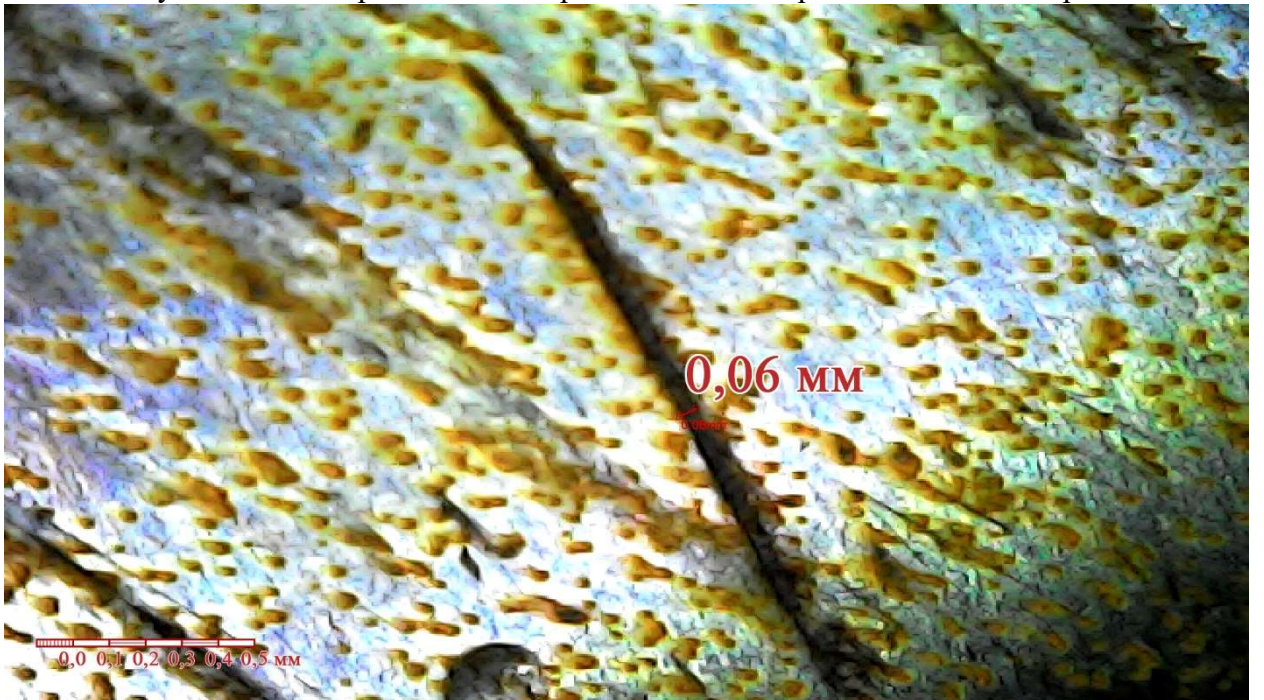


Рисунок Г8 – Микроснимок поверхности зоны острия изношенной коронки

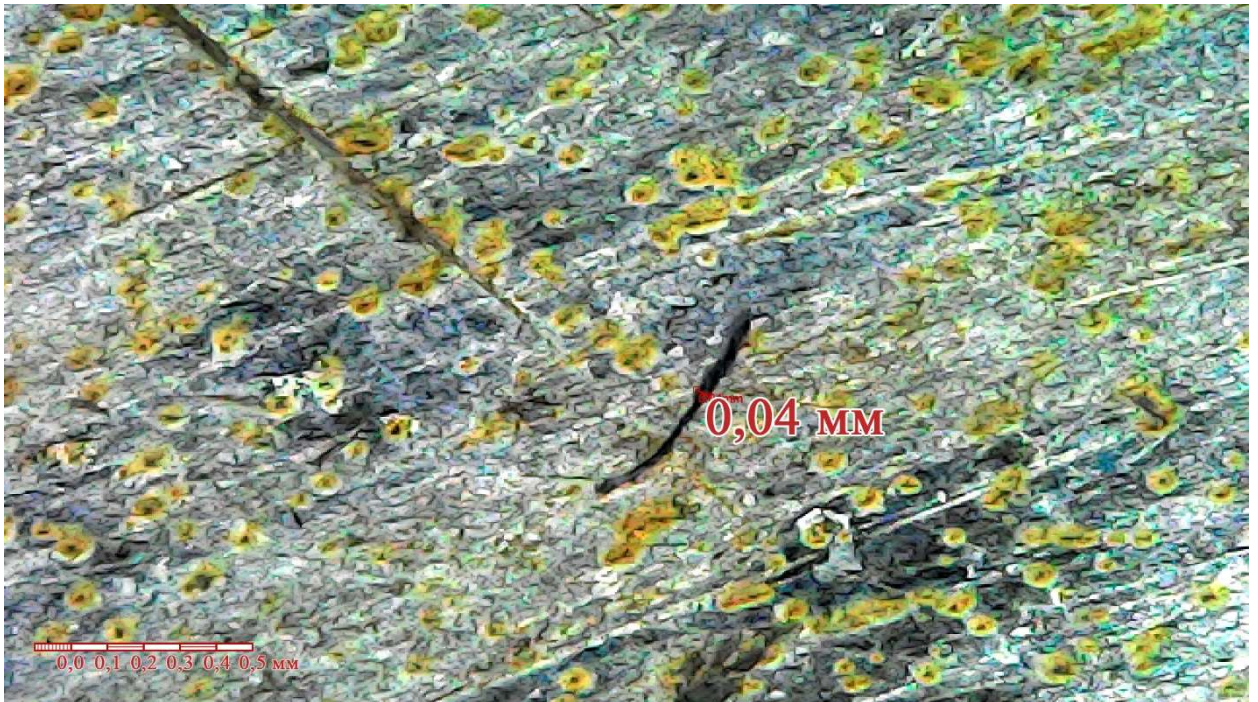


Рисунок Г9 – Микроснимок поверхности зоны острия изношенной коронки

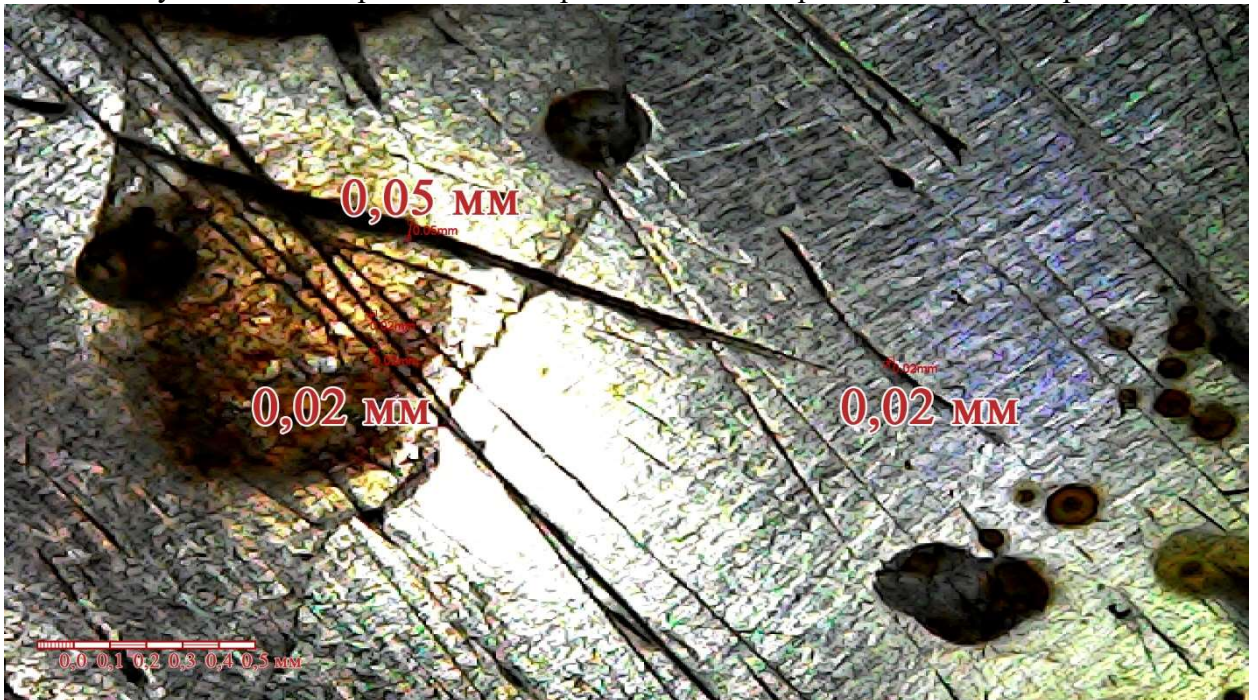


Рисунок Г10 – Микроснимок поверхности средней части изношенной коронки

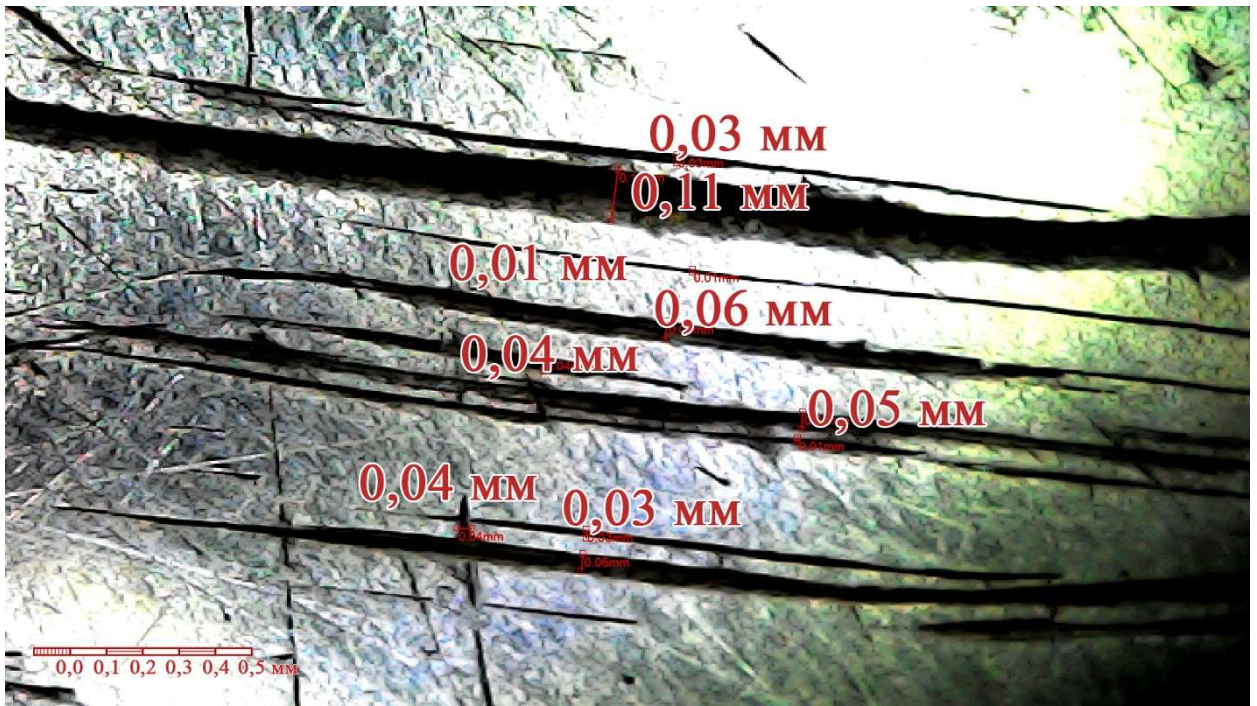


Рисунок Г11 – Микроснимок поверхности средней части изношенной коронки

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Утверждаю

Генеральный директор ООО «Эковит»

Большаков В.Ю. 

Дата « ____ » _____ 2022 г.



АКТ (СПРАВКА)

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Громыки Дмитрия Сергеевича

по научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Комиссия (специальная) в составе:

Председатель генеральный директор ООО «Эковит» Большаков В.Ю.;

Члены комиссии: заместитель генерального директора Черников А.Е., заместитель генерального директора по производству Денисов Л.В., ведущий специалист (эколог) Яковлева И.Д.

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Разработка регламента проведения технического обслуживания рабочего оборудования экскаваторов при ликвидации очагов горения бурого угля», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, рекомендованы и запланированы к использованию в производственном процессе деятельности ООО «Эковит» на операциях по добыче и отвалообразованию торфяного сырья. Перечень результатов, рекомендованных к внедрению на предприятии:

- Рекомендации по планированию мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту коронок зубьев ковшей экскаваторов.
- Методика оценки остаточного ресурса коронок зубьев ковшей экскаваторов, работающих в условиях высокотемпературного горного массива.
- Алгоритм внедрения технического диагностирования остаточного ресурса коронок по предложенной методике в систему технического обслуживания.

Использование разработанной методики и ее применение при разработке мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту экскаваторов

позволит увеличить эффективность их работы и уменьшить время простоя экскаваторов. Внедрение данной методики позволит увеличить производительность работ экскаваторов на операциях по экскавации и отвалообразованию горящего торфяного сырья, подверженного процессам самовозгорания.

Председатель комиссии

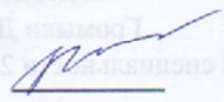
**Генеральный директор ООО
«Эковит»**



Большаков В.Ю.

Члены комиссии:

**Заместитель генерального
директора**



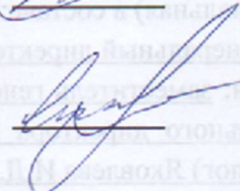
Черников А.Е.

**Заместитель генерального
директора по производству**



Денисов Л.В.

**Ведущий специалист (эко-
лог)**



Яковлева И.Д.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2795665

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Громька Дмитрий Сергеевич (RU), Гоголинский Кирилл Валерьевич (RU), Смирнов Юрий Дмитриевич (RU), Кремчеев Эльдар Абдоллович (RU)*

Заявка № 2022119549

Приоритет изобретения 18 июля 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 05 мая 2023 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 18 июля 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

