

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

На правах рукописи

Ефимов Денис Александрович



ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ
КАРЬЕРНОГО ДРОБИЛЬНО-СОРТИРОВОЧНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЕТОМ
ПРОЦЕССОВ ИХ АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Господариков А.П.

Санкт-Петербург - 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ФУТЕРОВОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВЫХ ДРОБЯЩИХ АГРЕГАТОВ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Стратегия развития добычи угля	10
1.2 Горные машины и оборудование для открытых горных работ	11
1.3 Геолого-технологическая характеристика Экибастузского угольного бассейна	14
1.4 Геотехнология разработки на примере разреза «Восточный».....	17
1.5 Применение валковых дробильных агрегатов в составе мобильных и полумобильных установок на борту карьера	19
1.6 Актуальность повышения долговечности цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов.....	20
1.7 Анализ конструкционных решений валковых дробилок и их рабочих элементов	22
1.8 Факторы, влияющие на износ футеровочных бандажей.....	30
1.9 Анализ конструктивно-технологических методов повышения долговечности рабочих органов валковых дробящих агрегатов	33
1.10 Постановка цели и задач исследования	34
1.11 Выводы по главе 1	37
ГЛАВА 2 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВАЛКОВЫХ ДРОБЯЩИХ АГРЕГАТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗНАШИВАНИЯ ФУТЕРОВОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ	39
2.1 Эксплуатационные показатели валковых дробилок и факторы, определяющие эффективность их работы.....	39
2.2 Процессы и механизмы изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок	46
2.2.1 Классификация видов изнашивания.....	47
2.2.2 Условия работы футеровочных бандажей в валковых дробилках	49
2.3 Теоретические модели и законы изнашивания, применяемые к узлам горных машин	50
2.3.1 Закон Арчарда и гипотеза Рэя (энергетический подход)	50
2.3.2 Методика И.В. Крагельского	51
2.3.3 Правило Минера для накопления повреждений при изнашивании	54
2.3.4 Энергетические и контактно-механические подходы в теории износа.....	55
2.3.5 Ограничения существующих моделей применительно к валковым дробилкам	56
2.4 Взаимосвязь процессов изнашивания с эксплуатационными показателями валковой дробилки.....	58

2.5 Выводы по главе 2.....	59
ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ...	61
3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований	61
3.2 Методики проведения экспериментальных исследований	62
3.2.1 Подготовка образцов к испытаниям.....	63
3.2.2 Методика нанесения упрочняющих покрытий	67
3.2.3 Методика абразивных испытаний	70
3.2.4 Измерение микротвёрдости и твёрдости	72
3.2.5 Микроскопические исследования.....	74
3.2.6 Исследование параметров опорной поверхности	81
3.2.7 Методика 3D-сканирования	85
3.3 Методика обработки результатов	89
3.4 Выводы по главе 3.....	91
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФУТЕРОВОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ	93
4.1 Исследование упрочнения и деградации поверхностного слоя футеровочных бандажей	93
4.2 Анализ параметров кривых Эбботта-Файрстоуна	98
4.3 Результаты натуральных измерений износа футеровочных бандажей	103
4.4 Построение математической модели процесса изнашивания бандажей валковых дробящих агрегатов.....	105
4.5 Разработка технических решений по модернизации конструкции футеровочных бандажей... 108	
4.5.1 Техническое решение по применению сегментированной конструкции футеровочных бандажей	108
4.5.2 Техническое решение по применению конструкции футеровочных бандажей с профилем Рело	111
4.6 Выводы по главе 4.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение	134
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт об использовании результатов диссертации.....	135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Повышение долговечности дробильного оборудования, работающего в конкретных горно-геологических условиях открытой разработки месторождений, является актуальной научно-технической задачей. В качестве объекта исследования рассмотрен разрез «Восточный», характеризующийся сложными горно-геологическими условиями, включая мощную угленосную толщу (до 650 м), наличие 9-11 угольных пластов и неоднородный литологический состав вскрышных пород: песчаники — 40-60%, алевролиты — 22-24%, аргиллиты — 3-16%, углистые породы — 4-6%, углистые сланцы — около 2%. Вскрышные породы обладают переменными физико-механическими свойствами: предел прочности при сжатии достигает 120 МПа, коэффициент крепости по Протодюконову составляет $f=6-12$, объемная масса — 2,4-2,7 т/м³. Породы характеризуются высокой трещиноватостью, склонностью к выветриванию, а также высокой абразивностью, обусловленной кварцсодержащим составом. В условиях разработки месторождения вскрышная порода поступает на переработку в виде крупнокускового несортированного материала с максимальной крупностью куска 1000-2000 мм, что соответствует параметрам питания первичного дробления. С учетом указанных горно-геологических и технологических условий на разрезе «Восточный» реализована полустационарная дробильная установка, включающая двухвалковую дробилку, предназначенную для первичного дробления вскрышных пород с последующим получением продукта крупностью 200-350 мм. Выбор валковой схемы дробления обусловлен необходимостью переработки крупнокускового, неоднородного и абразивного материала непосредственно в карьере, обеспечения стабильного гранулометрического состава продукта и снижения переизмельчения. Однако эксплуатация валковых дробилок в указанных условиях сопровождается интенсивным абразивным износом рабочих поверхностей, в частности, футеровочных бандажей, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Интенсивное изнашивание бандажей приводит к снижению срока службы оборудования и производительности, увеличению частоты ремонтов и, как следствие, росту эксплуатационных затрат. Кроме того, нестабильная работа дробильного оборудования, вызванная изнашиванием, негативно сказывается на качестве измельчённого материала, что имеет критическое значение для технологических процессов горного производства. Современные требования к снижению издержек и повышению эффективности производства усиливают необходимость разработки инновационных подходов к решению проблемы изнашивания. Одной из ключевых проблем также является недостаточная изученность комплексного влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на процесс изнашивания. Действующие подходы, как правило,

ограничиваются только локальными решениями, такими, как применение упрочняющих покрытий или использование отдельных видов износостойких материалов.

Степень разработанности темы исследования: вопросы повышения долговечности рабочих элементов валковых дробилок, в частности, цилиндрических футеровочных бандажей, отражены как в отечественной, так и зарубежной научной литературе. Экспериментально-теоретические исследования, направленные на повышение долговечности дробящих агрегатов, изложены в работах Андреева С.Е., Крагельского И.В., Федотова П.К., Хрущева М.М., Дж. Арчарда, Бонда Ф. С., Минера М.А., Рея Т., Риттингера Л.В., Рундквиста А.К., Хукки Р.Т., Чарльза Р.Д., Daniel M.J., Evertsson C., Kick A. F., Lindqvist M., Morrell S. и др. Большинство научных исследований были направлены на модернизацию конструкций, совершенствование условий эксплуатации, введение новых конструктивных элементов и т.д.

Объект исследования - футеровочные бандажи валковых дробилок в составе карьерных дробильно-сортировочных комплексов.

Предмет исследования - процессы абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок в составе карьерных дробильно-сортировочных комплексов.

Цель исследования - повышение срока службы бандажей валковых дробилок карьерных дробильно-сортировочных комплексов при их абразивном изнашивании в реальных условиях эксплуатации.

Идея исследования состоит в том, что повышение срока службы футеровочных бандажей может обеспечиваться учетом следующих факторов: механизмов формирования и деградации упрочненного поверхностного слоя, нанесением упрочняющих покрытий, модернизацией конструкции.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ современных теоретических подходов, экспериментальных методов и инженерных решений, связанных с абразивным изнашиванием футеровочных бандажей валковых дробилок в составе карьерных дробильно-сортировочных комплексов, и обобщить результаты их эксплуатации в промышленности.

2. Экспериментально установить закономерности формирования, развития и деградации наклепанного упрочнённого слоя на поверхности бандажей при взаимодействии с перерабатываемым материалом с учетом его вариативных физико-механических свойств.

3. Разработать математическую модель, описывающую процесс абразивного изнашивания и эволюцию микрогеометрии поверхности футеровочных бандажей, с учетом распределения

контактных давлений, основных параметров напряжённого состояния и локальных механизмов ее разрушения.

4. Провести комплекс экспериментальных исследований для определения параметров износа, характеристик упрочнения, изменения микротвёрдости и морфологии поверхности футеровочных бандажей на различных стадиях их эксплуатации для верификации разработанной математической модели.

5. Исследовать эффективность технических решений по повышению срока службы футеровочных бандажей, включающих нанесение упрочняющих покрытий и модернизацию конструкции бандажей, и оценить их влияние на процессы изнашивания и энергозатраты процесса дробления в условиях, приближенных к промышленным.

Научная новизна работы:

1. Установлены закономерности изменения состояния поверхностного слоя футеровочных бандажей валковых дробилок карьерных дробильно-сортировочных комплексов в процессе эксплуатации, заключающиеся в последовательной смене режимов деформационного упрочнения и последующего разрушения упрочненного слоя.

2. Установлена эффективность комплексного воздействия на процесс изнашивания бандажей за счет формирования упрочненного поверхностного слоя при напылении покрытий на основе WC-TiN и изменения конструктивных параметров бандажей, приводящих к увеличению срока их работоспособного состояния и снижению затрат на процесс дробления.

Соответствие паспорту научной специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по пункту 15. «Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах».

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Установлены закономерности двухстадийного абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок, включающие стадию наклепа и стадию усталостной деградации упрочнённого поверхностного слоя.

2. Экспериментально подтверждена взаимосвязь между эволюцией микрогеометрии поверхности, параметрами кривых Эбботта-Файрстоуна и изменением несущей способности контактного слоя при дроблении абразивных материалов.

3. Разработана математическая модель локального абразивного изнашивания, учитывающая распределение контактных давлений, путь скольжения и параметры микрогеометрии поверхностного слоя бандаж.

4. Введены количественные показатели, характеризующие вклад наклепа и накопления усталостных повреждений в процесс изнашивания футеровочных бандажей.

5. Обоснованы технические решения по повышению долговечности бандажей, включающие применение плазменно-порошковых упрочняющих покрытий и модернизацию геометрии футеровочных бандажей валков.

6. Показана эффективность применения сегментированных футеровочных бандажей (патент на изобретение № 2831453, Приложение А) и валков с Рело-профилем, обеспечивающих снижение потребляемой мощности привода и уменьшение локальных зон износа.

7. Результаты работы рекомендуется применять при переработке абразивных материалов с пределом прочности до 120 МПа в условиях открытых горных работ, а также при проектировании, модернизации и эксплуатации мобильных и полумобильных дробильно-сортировочных установок на карьерах, для проведения экспериментальной диагностики и применения плазменных покрытий, при оценке износа деталей (акт внедрения ООО «ЗД ПРОЕКТ» от 10 декабря 2025 г., Приложение Б).

Методология и методы исследования. Методология исследования основана на комплексном подходе к изучению процесса абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок карьерных дробильно-сортировочных комплексов, включающем расчетно-аналитические методы и численное моделирование, стендовые и натурные экспериментальные исследования, анализ эксплуатационных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что процесс накопления деградационных повреждений бандажей валковых дробилок носит стадийный характер при первоначальном упрочнении поверхностей бандажей наклепом с последующим изнашиванием упрочнённого слоя, при этом кинетика процесса описывается дифференциальным уравнением с учетом коэффициента накопления усталости.

2. Установлено, что повышение срока службы футеровочных бандажей валковых дробилок на 60-80% достигается за счет формирования упрочненного поверхностного слоя при напылении покрытия WC-TiN, а снижение пиковой мощности привода валковой дробилки на 10 и 16% обеспечивается модернизацией конструкции бандажей применением профиля Рело и сегментированных футеровок по сравнению с круглыми, соответственно.

Степень достоверности исследования подтверждается применением фундаментальных положений теорий трения и изнашивания, разработанных ведущими исследователями, позволившим им создать надёжную теоретическую основу для разработки различных моделей износа. В рамках разработанной математической модели абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок была проведена верификация полученных экспериментальных данных и эксплуатационных характеристик промышленного оборудования.

Апробация результатов диссертации проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных. За последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных: XVII Санкт-Петербургская ассамблея молодых учёных и специалистов (г. Санкт-Петербург, 27 ноября 2024 г.); VII Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов вузов России по естественным, техническим и гуманитарным наукам «Шаг в науку» (г. Томск, 31 марта-4 апреля 2025 г.); XVIII Санкт-Петербургская ассамблея молодых учёных и специалистов (г. Санкт-Петербург, 21 ноября 2025 г.); VIII Международная научно-практическая конференция «Механика и машиностроение. Наука и практика» (г. Санкт-Петербург, 27 ноября 2025 г.); Международная научно-практическая конференция «Новые технологии и инновационные решения в инженерии и прикладных технологиях: тенденции, модели, перспективы развития» (г. Москва, 9-10 декабря 2025 г.)

Личный вклад автора состоит в участии во всех этапах написания диссертационной работы, в том числе в: анализе существующих теоретических и экспериментальных подходов к оценке абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок карьерных дробильно-сортировочных комплексов; в разработке математической модели абразивного изнашивания футеровочных бандажей; в разработке и реализации методики экспериментальных исследований; в обосновании и экспериментальном подтверждении технических решений по повышению долговечности футеровочных бандажей.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы № 10-12, 70), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение, зарегистрирована 1 заявка на изобретение (пункты списка литературы № 18, 33, Приложение А).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 152 наименования, и 2 приложений. Диссертация изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков и 9 таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ФУТЕРОВОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВЫХ ДРОБЯЩИХ АГРЕГАТОВ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Стратегия развития добычи угля

Мировая угольная промышленность в последние десятилетия переживает противоречивые тенденции. С одной стороны, во многих развитых странах реализуются стратегии перехода к низкоуглеродной энергетике, предусматривающие сокращение использования угля ради достижения климатических целей Парижского соглашения [61, 75, 80]. В ЕС и США потребление угля снижается - в 2023 году оно сократилось примерно на 20% в каждом из этих регионов [61, 75]. Многие страны Западной Европы на государственном уровне приняли планы полного отказа от угольной генерации в горизонте 2030-2040 г. г. [54, 72, 74, 138].

С другой стороны, глобальный спрос на уголь остается высоким за счет развивающихся экономик Азии. По данным Международного энергетического агентства (IEA), мировое потребление угля достигло рекордного уровня около 8,5 млрд тонн в 2023 году [61, 75]. Рост обеспечили прежде всего Китай, Индия и страны Юго-Восточной Азии на фоне увеличения спроса на электроэнергию, тогда как в странах ОЭСР (Организация экономического сотрудничества и развития) продолжается спад использования угля [61, 54]. Если в 1990 году на Китай, Индию и ЮВА приходилась лишь четверть мирового потребления угля, то в 2023 году - уже три четверти. Уголь по-прежнему остаётся одним из самых дешёвых и доступных видов энергии, составляя базу энергоснабжения развивающихся стран (прежде всего в Азиатско-Тихоокеанском регионе и Африке) [61, 75].

Другим ключевым трендом являются автоматизация и цифровизация угольной промышленности. В условиях снижения маржинальности добычи угля (из-за конкуренции с газом и регулирования выбросов) повышение эффективности становится стратегической задачей. Крупнейшие мировые компании внедряют системы интеллектуального управления шахтами и разрезами, применяют искусственный интеллект для оптимизации процессов и повышения безопасности [64, 71, 152]. На разрезах Австралии, Канады, США уже эксплуатируются автономные карьерные самосвалы без водителей [64, 71, 78, 94]. Помимо автономного транспорта, на современных предприятиях используются роботизированные буровые установки, дроны для мониторинга состояния бортов карьера, системы дистанционного управления экскаваторами [64, 71, 94].

Россия остаётся одним из мировых лидеров по добыче угля и обладает колоссальной сырьевой базой. По оценкам, на территорию РФ приходится порядка 1/3 мировых запасов угля (в

различных категориях) и около 1/5 разведанных запасов - 193,3 млрд тонн [27]. Этого объёма, при текущих темпах добычи, достаточно более чем на 500 лет [19, 25, 44, 45]. Из указанного потенциала порядка 157 млрд т составляет доказанные балансовые запасы, в том числе ~40 млрд т высококачественных коксующихся марок. Благодаря таким ресурсам, Россия смогла нарастить производство угля в XXI веке: в 2013 г. добыча достигла 352 млн т, что вывело РФ на 6-е место в мире (~4,5% мирового объёма). В последующие годы рост продолжился, и в 2019 году добыча угля обновила рекорд, превысив 439 млн тонн. Даже с учётом кризисных явлений (спад 2020 г. и санкционные ограничения 2022 г.) добыча РФ стабильно держится в диапазоне 400-440 млн т в год, а по некоторым данным 2021-2022 гг. опять приблизилась к историческому максимуму [19, 25]. Таким образом, российская угольная промышленность демонстрирует устойчивое развитие, в противоположность тенденциям снижения, наблюдаемым в Европе.

Страны СНГ также обладают значительными угольными ресурсами, но их стратегия развития имеет свою специфику. В совокупности СНГ (Россия, Казахстан, Узбекистан, Таджикистан и Кыргызстан) добыли 561,6 млн т угля в 2013 г., что на 34% больше уровня 2000 г. Однако их доля в мировом производстве снизилась с 8,9% до 7,2% за тот же период, в основном из-за бурного роста добычи в Китае. Казахстан - вторая после РФ угледобывающая держава региона - ежегодно производит порядка 100-120 млн тонн угля. Казахстанская стратегия делает упор на обеспечение внутренней энергетики (до 70% электроэнергии страны вырабатывается на угле), а избыточные объёмы экспортируются в Россию, Китай и Восточную Европу [84]. Правительство Казахстана поддерживает модернизацию крупнейших разрезов (Богатырь, Шубарколь) с целью повышения эффективности и постепенного снижения экологической нагрузки; рассматриваются пилотные «зелёные» проекты - от улавливания метана на шахтах до внедрения ВИЭ в моногородах угольных регионов (Караганда, Экибастуз) [62].

1.2 Горные машины и оборудование для открытых горных работ

Открытые горные работы характеризуются использованием крупногабаритной высокопроизводительной техники. Комплекс оборудования можно условно разделить на несколько категорий по функциям: выемочно-погрузочные машины, буровое оборудование, транспортные средства, вспомогательная техника и системы для переработки и отгрузки горной массы [38, 40, 41]. Основные типы машин:

- экскаваторы. В открытой добыче применяются экскаваторы двух основных типов: механические (канатные) экскаваторы с жестким подвесом ковша и гидравлические экскаваторы [38, 40, 41]. Канатные карьерные экскаваторы (пример - ЭКГ-12,5) оснащены электрическим

приводом и способны разрабатывать большие объемы породы благодаря ковшам вместимостью 10-70 м³ [51]. Гидравлические экскаваторы (например, Liebherr R 9800, CAT 6090) используют гидроцилиндры для управления стрелой и ковшом; они маневреннее, могут работать на уступах сложной формы, имеют емкость ковша до ~40 м³. Кроме того, в открытых разрезах встречаются шагающие экскаваторы-драглайны -установки с длинной стрелой (до 100 м) и ковшом на канатах [52, 59, 87, 89]. Драглайны (ЭШ 15/90, Висугус 2570 и др.) применяются преимущественно для снятия рыхлых вскрышных пород на больших площадях, обладая выдающейся производительностью (перемещают до 200 тыс. м³ породы в месяц) [25, 44, 45, 52]. Экскаватор любого типа комплектуется сменными ковшами и зубьями, подбираемыми под крепость пород.

- буровые установки. Перед выемкой твёрдых пород в карьерах обычно проводится буровзрывная подготовка, поэтому буровые станки - неотъемлемая часть оборудования [38, 40, 41]. Преобладают шарошечные буровые установки на гусеничном ходу, способные бурить вертикальные скважины диаметром 160-320 мм на глубину 15-50 м под закладку взрывных зарядов. Также применяются буровые установки ударно-вращательного действия (буровые каретки) меньшего диаметра - для вспомогательных работ (разбуривание пачек, геологоразведка) [80, 139, 140, 143]. Современные буровые комплексы оборудуются системами автоматизации: дистанционное или программно-автономное бурение скважин по заданному шаблону, контроль параметров бурения в реальном времени. Это повышает точность взрывных работ и безопасность персонала [139, 143].

- автосамосвалы. Транспортировка горной массы в карьере чаще всего осуществляется карьерными самосвалами особо большой грузоподъёмности [38, 40, 41]. Такие самосвалы (БелАЗ, Caterpillar, Komatsu, Liebherr) способны перевозить от 90-130 тонн (модели начального уровня, напр. CAT 777) до 360-450 тонн груза (тяжеловесные БелАЗ-75710 на 450 т, CAT 797F ~363 т) [75-77]. Для угольных разрезов характерны самосвалы грузоподъёмностью 130-220 т - оптимальные по соотношению производительности и манёвренности на рыхлых породах [93, 98, 99].

- бульдозеры и вспомогательные машины. Бульдозеры выполняют вспомогательные работы: разравнивание площадок, очистка забоев, отвалообразование мелких куч после взрывов [38, 40, 41]. В крупных карьерах используются тяжелые бульдозеры (Komatsu D375-D475, Caterpillar D10/D11) массой 70-110 тонн с двигателями 500-850 кВт, оснащенные широким отвалом [65, 80, 85, 150]. Также в инфраструктуре открытых работ задействованы фронтальные погрузчики (для погрузки угля на складе, уборки разрозненных фрагментов породы), грейдеры (профилирование дорог, поддержание откаточных путей в рабочем состоянии) и водополивочные машины (для пылеподавления на дорогах и отвалах) [65, 97, 148, 150]. Эти вспомогательные механизмы обеспечивают бесперебойную работу основного технологического транспорта и поддержание

требований техники безопасности (например, полив дорог снижает пылеобразование и риск пылевых взрывов) [40, 97].

- отвалообразователи и конвейерное оборудование. В некоторых разрезах, особенно при разработке мощных пластов рыхлых пород, используются конвейерные технологии отвала [40, 97]. Отвалообразователь - специализированная машина для послонной укладки вскрышных пород в отвалы, работающая в связке с ленточными конвейерами. Он представляет собой крупный конвейерный стреловой аппарат на гусеничном или рельсовом ходу, способный принимать породу с конвейера и выбрасывать её на необходимое расстояние, формируя отвал заданной формы. Производительность современных отвалообразователей достигает 2000-10000 т/час, длина поворотной стрелы - 50-100 м. Они незаменимы при реализации циклично-поточной технологии в карьерах, позволяя значительно сократить плечо транспортировки автосамосвалами. В РФ и СНГ отвалообразователи активно применяются на разрезах Кузбасса, Экибастуза, Канско-Ачинского бассейна при работе в комплексе с шагающими экскаваторами и конвейерами, дробильно-сортировочные комплексы в составе циклично-поточной технологии [97, 100, 146, 148].

При открытой добыче полезных ископаемых важную роль играют дробильно-сортировочные комплексы (ДСК), обеспечивающие первичную переработку горной массы прямо на месте добычи. ДСК предназначены для дробления крупнокусовой горной породы до требуемых размеров и последующего разделения (сортировки) на фракции перед транспортировкой или использованием [50, 67].

Один из самых распространённых типов дробильных машин - щековая дробилка, используемая на стадии крупного (первичного) дробления. Она состоит из двух массивных плит (щеки), одна из которых закреплена неподвижно, а другая совершает возвратно-поступательное движение с раздавливанием загружаемых кусков породы. Благодаря мощному усилию сжатия между щеками, такой дробильный агрегат способен измельчать даже твердые породы до требуемой крупности. На угольных предприятиях щековые дробилки обычно устанавливают для дробления больших кусков угля (или породы) сразу после выемки - на вход подаются куски размером до 1-1,5 м, на выходе получается уголь фракции ~200-300 мм, пригодный для дальнейшей переработки. Преимущества щековых дробилок: высокая надежность и производительность, универсальность (эффективны и по мягким, и по твердым материалам), неприхотливость в обслуживании. Недостатками являются неравномерность гранулометрического состава продукта и относительно высокий уровень шума и вибраций при работе.

Для среднего и мелкого дробления применяется конусная дробилка, в которой дробление происходит за счёт сжатия материала между подвижным эксцентриковым конусом и фиксированной

воронкообразной облицовкой. Конусные дробилки характеризуются высокой производительностью и относительной однородностью продукта. В угольных разрезах конусные дробилки могут устанавливаться в составе стационарных дробильных комплексов для измельчения породы вскрыши или дробления угольной массы после щековой дробилки - для получения мелкой фракции энергетического угля перед обогащением [67].

Валковые дробилки - тип дробилок состоит из одного или нескольких параллельных вращающихся валков, которые захватывают куски породы и дробят их. Валковые дробилки наиболее эффективны для измельчения материалов средней прочности, таких как уголь, соли, глинистые породы. Они нашли широкое применение в горно-обогатительной промышленности и при переработке твердых бытовых отходов. Конструктивно валковая дробилка проста: два тяжелых цилиндрических валка диаметром до 1-1,5 м вращаются навстречу друг другу с небольшим зазором, раздавливая попадающую между ними породу. Валки могут иметь гладкую поверхность (для мягких материалов), рифленую или зубчатую (для лучшего захвата кусков твёрдого сырья). Преимущества валковых дробилок: однородность фракции на выходе, простота и надежность устройства, невысокое энергопотребление и способность работать с влажным сырьем [67, 90, 97].

1.3 Геолого-технологическая характеристика Экибастузского угольного бассейна

Экибастузский каменноугольный бассейн представляет собой крупную асимметричную мульдообразную структуру (синклиналь) длиной около 24-25 км и максимальной шириной до 8-9 км, вытянутую с северо-запада на юго-восток. Площадь угленосной впадины составляет порядка 150-160 км². В тектоническом отношении бассейн образует грабен-брахисинклиналь, ограниченную на северо-восточном и юго-западном бортах крупными разломами. Залегание пород на флангах меняется от пологого (2-12°) до крутого (до 66° на участках, прилегающих к разломам), тогда как в центральной части мульды напластование близко к горизонтальному. Общая мощность угленосной свиты достигает 400-650 м; в разных блоках разреза прослеживается от 9 до 11 угольных пластов. Основную промышленную ценность представляют три верхних пласта (№1, №2 и №3), которые образуют единый сложный сверхмощный угольный массив. Эти рабочие пласты залегают относительно близко друг к другу: пласт 2 отделён от пласта 1 только прослойкой пород мощностью 3-7 м. Максимальные глубины залегания угля значительны: кровля верхнего пласта 1 опускается местами до отметки - 555 м, а подошва нижнего рабочего пласта 3 до 760 м [8, 28, 39, 144].

Каждый из трёх рабочих пластов обладает значительной толщиной (мощностью) и сложным внутренним строением. Пласт 1 (верхний) имеет среднюю рабочую мощность порядка 20-25 м (в среднем 22,9 м). Он сложен 30-50 угольными пачками (прослоями угля) толщиной от 0,1 до 1 м,

разделёнными прослоями светлых пород (песчано-глинистых) мощностью около 3 см. Пласт 2, отделённый от пласта 1 небольшой перемычкой, существенно мощнее: его средняя рабочая мощность ~42 м. Угольные прослойки пласта 2 достигают 0,2-2,0 м толщиной и перемежаются частыми тонкими прослоями светлой глинистой породы (преимущественно каолиновые аргиллиты) толщиной 1-5 см. Пласт 3 - самый мощный и глубокий из рабочих пластов, в среднем около 90 м рабочей мощности. Он разбит большим числом тонких прослоев породы: в толще пласта 3 насчитывается порядка 140-160 прослоев светлой породы толщиной 1-6 см (изредка до 10 см), разделяющих угольные пачки мощностью от 0,1 до 1,5 м. Таким образом, пласты характеризуются сложным переслаиванием угля и пород, причём доля породных прослоев («внутренней вскрыши») очень высока - порядка 60-65% от общего объёма пласта. В нижней части пласта 3 угленосность заметно снижается: там присутствуют углистые породы с сильно повышенной зольностью и мощностью отдельных угольных прослоев менее 1 м, которые считаются некондиционными и практически не отрабатываются [8, 9, 26, 28, 39, 144].

Литологический состав вскрышных и угленосных пород. Бортовые породы и межугольные прослои в Экибастузском бассейне представлены преимущественно терригенными отложениями каменноугольного возраста. Основными литотипами пород являются песчаники, алевролиты и аргиллиты, образующие чередующиеся толщи. По данным исследований, в общей массе вскрышных пород преобладают песчаники (~30%) и алевролиты (~20-30%), значительную долю составляют аргиллиты (~17-23%), а остальное приходится на переслаивание этих пород и незначительное количество углистых сланцев. В частности, для разреза «Богатырь» содержание песчаников оценивается около 30%, алевролитов 24%, аргиллитов 23%, прочих переслаивающихся пород ~10%, углистых прослоев порядка 7%. В разрезе «Северный» доля глинистых слоёв несколько выше (переслаивание аргиллитов достигает ~19% при меньшем содержании чистых аргиллитов ~17%). В разрезе «Восточный» литологический состав вскрыши близок к среднебассенному: около четверти объёма составляют алевролиты, порядка 20-22% аргиллиты, остальное - песчаники и смешанные разности с включениями углистых пород [8, 39, 149]. Мощность толщ вскрышных пород над углем увеличивается к центру бассейна и на флангах у разломов, достигая нескольких сотен метров; соотношение вскрыша/уголь в различных частях бассейна изменяется от 4:1 до 6:1 (в среднем около 5 м³ породы на 1 т угля).

На рисунке 1.1 показана схема Экибастузского бассейна и расположение основных участков разработки. В настоящее время эксплуатацию угленосной толщи ведут три крупных открытых разреза, разделивших бассейн на карьерные поля: «Богатырь» (южная часть), «Северный» (северо-западная часть) и «Восточный» (центрально-восточная часть бассейна). Общие геологические

условия в пределах этих полей сходны, различия касаются главным образом глубины залегания и углов падения пластов. Так, на участке «Богатырь» пласты залегают наиболее полого и ближе к поверхности, что обуславливает сравнительно низкую вскрышную норму. На участке «Восточный» и северной части бассейна пласты погружаются глубже, а борта месторождения круче, из-за чего увеличивается объём вскрышных работ для выемки того же количества угля.

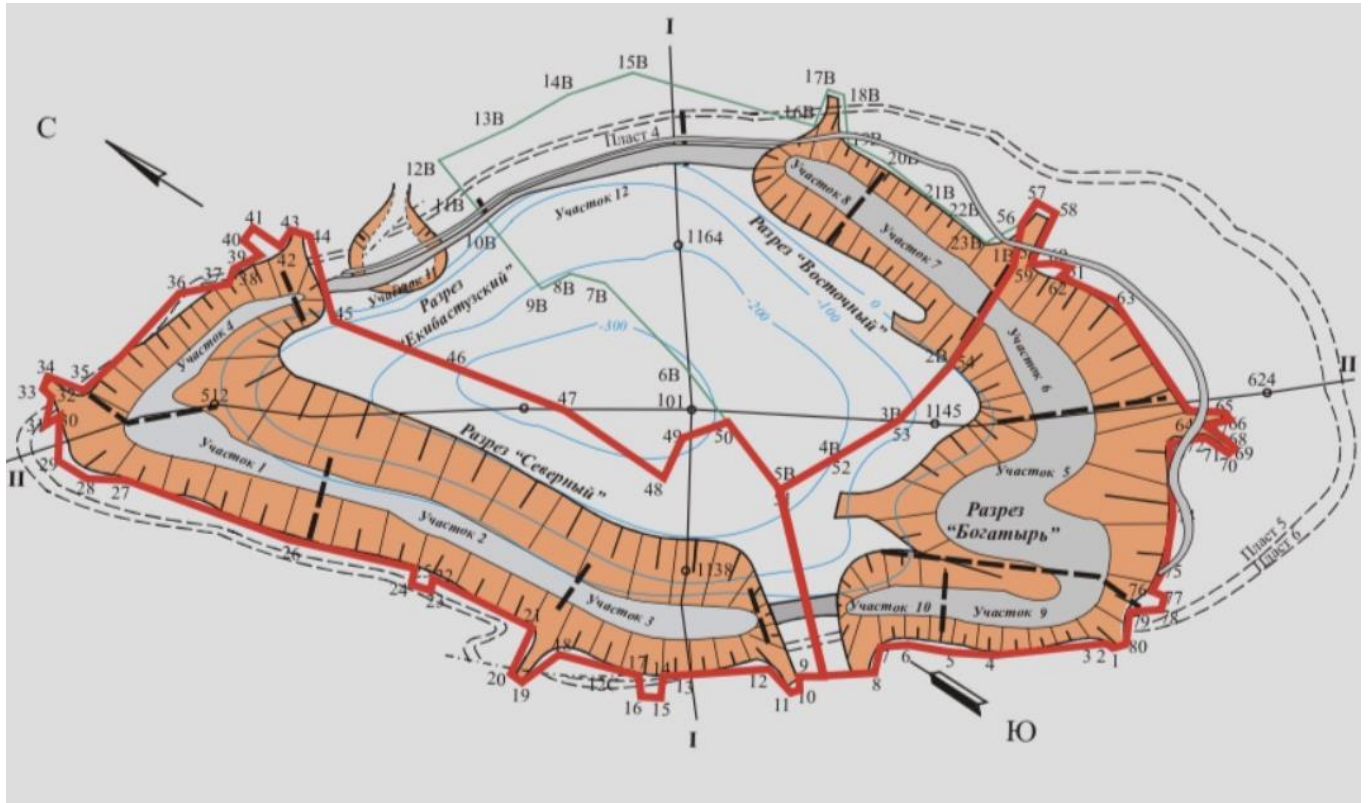


Рисунок 1.1 - Схема Экибастузского угольного бассейна с разделением на карьерные поля («Богатырь», «Северный», «Восточный») [8]

Породы вскрыши отличаются высоким содержанием кварца и силикатов, что важно с точки зрения техники безопасности. По данным химического анализа, минеральная часть вскрышных пород близка по составу к обычным глинисто-песчаным породам: в песчаниках содержится ~54-58% SiO_2 , ~18-19% Al_2O_3 , 5-6% Fe_2O_3 , 1,5-2% $\text{CaO}+\text{MgO}$, 3-4% щелочных оксидов, до 2-3% сульфатной серы, при потере при прокаливании ~12%. Алевролиты и аргиллиты несколько более кремнистые (доля SiO_2 48-52% при ~18% Al_2O_3) и обогащены глинистыми минералами. Среднее содержание кремнезёма в породах превышает 10% мас. % - в песчаниках 32-43%, в алевролитах 26-52% SiO_2 [8].

Угли Экибастузского бассейна по генезису относятся к гумусовым каменным углям, по степени метаморфизма - к маркам Г, Ж и частично слабоспекающимся коксовым. В силу высокой зольности эти угли не находят применения в коксохимии и используются преимущественно как энергетическое топливо. Экибастузский уголь отличается сильной минерализацией - высоким

содержанием минеральных примесей (зола). Зольность рабочего топлива колеблется от ~30% до 50+%, в среднем около 40-42% (на рабочую влажность) [8, 149].

Одной из особенностей экибастузского угля является крайне трудная обогатимость. Из-за тонкой вкрапленности минеральных частиц и высокого содержания породных включений разделение угля и пустой породы обычными технологиями обогащения затруднено. Практически весь добываемый уголь используется без обогащения (в «рядовом» виде) в качестве энергетического топлива на крупных электростанциях. Согласно действующему стандарту, экибастузский уголь для пылевидного сжигания поставляется двух групп по теплоте сгорания, но общее требование - зольность < 45% и крупность частиц $\leq 200-300$ мм. В технологической схеме разрезов отсутствуют обогатительные фабрики; минеральные примеси удаляются только в минимальной степени. В связи с этим значительная доля породной массы поступает в топки котлов вместе с углем. В золе сгоревшего экибастузского угля повышено содержание оксидов кремния и алюминия (в сумме ~85-90%), что позволяет использовать золошлаковые отходы в производстве цемента и стройматериалов.

Газоносность и взрывопожарная безопасность. По газовым параметрам экибастузские пласты считаются благоприятными для открытой разработки. Концентрации метана в угольных пластах незначительные (метаноупорность пласта низкая), а давление газа в массиве малое. Суммарное содержание тяжёлых углеводородов (этан, пропан, бутан) также крайне мало, поэтому газовый фактор не оказывает существенного влияния на безопасность работ [8].

1.4 Геотехнология разработки на примере разреза «Восточный»

Открытая разработка Экибастузского бассейна изначально велась с применением железнодорожного транспорта: вскрышные породы вывозились электровозными откаточными составами к внешним отвальным станциям. На разрезе «Восточный» с момента пуска в 1985 г. была создана разветвлённая инфраструктура электрифицированных железнодорожных путей для транспортировки угля и вскрыши, включая внутрирудничные станционные узлы на нижних горизонтах [40, 97].

Циклично-поточная технология (ЦПТ) в горном деле представляет собой совмещение периодически действующего транспорта (автосамосвалы, шагающие экскаваторы и др.) с непрерывно действующим (ленточные конвейеры) в едином производственном цикле. На разрезе «Восточный» внедрена циклично-поточная схема вскрышных работ, включающая экскаваторы, автосамосвалы, дробильные установки и конвейерные линии. Такая комбинация именуется циклично-поточным вскрышным комплексом (ЦПВК). На практике это реализовано следующим

образом: с нижних горизонтов карьерного забоя горная масса (вскрышные породы) доставляется крупными карьерными самосвалами к приемным дробильным пунктам, расположенным в карьере; далее порода после дробления до кондиционной крупности поступает на стационарный конвейер, который вывозит ее из карьера на отвалы. На разрезе «Восточный» функционируют несколько таких полумобильных дробильно-конвейерных комплексов. Впервые ЦПТК был введен здесь в эксплуатацию в 2009 году, по проекту компании TAKRAF (Терова). Современная конфигурация комплекса включает: два полумобильных крупногабаритных дробильных агрегата (TAKRAF) производительностью по ~4250 т/час, установленных на уступах внутри карьера; наклонный магистральный конвейер длиной около 680 м с углом наклона ~18° для подъема дроблённой породы из забоя; перевалочную тележку для перераспределения потока породы; и отвалообразователь на поверхностном отвале для послойного размещения породы. На рисунке 1.2 показана схема одного из таких комплексов, действующих на «Восточном». Экскаваторы (гидравлические и шагающие драглайны) грузят вскрышный материал в самосвалы грузоподъемностью 130-140 т, которые доставляют его до приемного узла дробления. Дробилка измельчает породу до кусков ~200 мм, после чего ленточный конвейер поднимает материал на поверхность. Достигнув бровки карьера, конвейерный поток перегружается через мобильную тележку на отвальный конвейер, связанный с выдвижным стрелочным отвалообразователем. Последний равномерно распределяет сыпучий материал по поверхности отвала. Таким образом, обеспечивается непрерывный циклично-поточный процесс: пока одна часть цикла (автосамосвалы) действует циклически, другая (конвейеры) работает непрерывно, повышая общую эффективность транспорта [28, 144].



Рисунок 1.2 - Схема циклично-поточного вскрышного комплекса на разрезе «Восточный» (полумобильная дробилка, конвейерный подъём, перевалочный мост и отвалообразователь) [144]

Разрез «Восточный» стал одним из первых угольных предприятий СНГ, где реализована циклично-поточная технология в полном масштабе. В 2018 году на новом участке «Восточный-2» введён в эксплуатацию второй циклично-поточный комплекс (ЦПК №2). Он включает аналогичный набор оборудования для доставки вскрыши с глубоких горизонтов на поверхность. Уже за первые два года работы (2018-2020 гг.) с его помощью было перемещено свыше 16 млн м³ вскрышных пород. В 2019 г. объём транспортировки пород через эту линию превысил 10 млн м³, что даже выше проектной мощности конвейерной линии. В совокупности применение двух ЦПК позволило значительно нарастить темпы вскрышных работ. В начале IV квартала 2024 г. коллектив разреза «Восточный» достиг рекордного суточного объёма вскрышных работ - 56 тыс. м³ породы в сутки, при плановом задании 35 тыс. м³. Этот результат подтвердил высокую производительность новой технологии. На момент достижения рекорда в зоне ЦПК одновременно работали четыре экскаватора (три гидравлических и один электрический шагающий) и парк из самосвалов САТ грузоподъемностью 140 т. Для поддержания непрерывности потока между экскаваторами и дробилками был организован буферный штабель породы. Достигнутый уровень - около 2400 м³ вскрыши в час - принят в качестве нового ориентира для дальнейшей работы комплекса [26, 144, 146].

1.5 Применение валковых дробильных агрегатов в составе мобильных и полумобильных установок на борту карьера

По степени мобильности и способу размещения в карьере дробильные установки подразделяются на стационарные, полумобильные и мобильные. Стационарные дробильные пункты обычно располагаются вне котлована (на борту или возле карьера); горная масса доставляется к ним автотранспортом или железнодорожными составами. Такие пункты характеризуются капитальным исполнением (бетонные фундаменты, эстакады) и не перемещаются в течение всего срока отработки карьера. Полумобильные дробильные установки устанавливаются внутри контура карьера (на рабочем борту или уступе) и могут несколько раз перемещаться по мере углубления горных работ. Конструктивно полумобильная дробилка монтируется на раме или порталах, которые можно разобрать или перевезти целиком в новый забой при изменении схемы работ. Питание такой дробилки чаще всего осуществляют автосамосвалы, подъезжающие по временной эстакаде. Мобильные (полностью мобильные) установки отличаются способностью часто перемещаться по забою - вплоть до следования за экскаватором практически непрерывно. Как правило, это самоходные дробилки на гусеничном ходу или шаговом механизме, которые принимают горную массу непосредственно из ковша экскаватора и сразу перегружают на конвейер. Мобильные

комплексы устраняют потребность в автосамосвалах полностью, что позволяет реализовать принцип непрерывного транспорта от забоя до отвала [97].

С развитием горного машиностроения появились новые технические решения, позволившие создать эффективные мобильные и полумобильные дробильные станции в карьерах. Главными факторами стали появление высокопроизводительных типовых дробилок (в том числе валковых и зубчатых) и модульных конструкций эстакад. В результате на крупных месторождениях мира внедрены циклично-поточные комплексы с различными схемами [40].

Полумобильные дробильные агрегаты на борту карьера обычно включают следующие основные узлы: приемный бункер для самосвалов, дозирующий питатель, собственно дробилку, перегружатель на конвейер и систему конвейерных линий на отвалы или склад. Компания TAKRAF, являющаяся пионером в этой области, разработала типовые решения полумобильных установок, обозначаемых как BSM (БСМ) - блоки самостоятельного монтажа. Пример - установка BSM-KS-4250 на Восточном разрезе (Казахстан). Данная полумобильная станция смонтирована на порталной раме с мостиками для заезда автосамосвалов. Самосвал разгружает горную массу (вскрышу) в приёмный бункер, откуда тяжелый пластинчатый питатель (Apron Feeder TAKRAF) дозировано подаёт её в двухвалковую дробилку. Дробилка, разработанная TAKRAF, выполняет первичное дробление скальных пород вскрыши - крупнокусковой материал привозной породы (песчаники, алевролиты) разрушается между валками до кусков ~300 мм, пригодных для транспортирования [100]. Из дробилки продукт через перегрузочную точку передается на ленточные конвейеры: сначала наклонный конвейер по уклону борта, затем магистральные горизонтальные конвейеры, доставляющие дробленую вскрышу в отвалы. В описанной установке BSM-KS-4250 предусмотрены мосты-эстакады для самосвалов, что позволяет по мере отработки горизонта перемещать всю дробильную станцию глубже в карьер (переставлять порталную раму и заново отсыпать эстакаду) [28, 67, 100].

1.6 Актуальность повышения долговечности цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов

Одним из наиболее простых, эффективных и универсальных видов оборудования предприятий химической, горнорудной, металлургической, строительной, пищевой и электродной отраслей промышленности, предназначенного для разрушения кусковых и сыпучих материалов, являются валковые дробящие агрегаты - дробилки и мельницы. Основной функцией валковых дробилок является дробление материала до требуемых фракций, оказывающих существенное влияние на дальнейшие этапы переработки и качество конечного продукта [63, 66, 92].

Преимущества этого вида дробильного оборудования очевидны: простота и компактность, широкий диапазон регулировки степени дробления, легкость контроля состояния зоны дробления, а также удобство при эксплуатации. Они пригодны для разрушения как хрупких, так и эластичных материалов, в частности, полимеров и резин [14, 66, 68, 142].

Одной из отраслей промышленности, в которой широко применяются валковые дробящие агрегаты на различных этапах технологического процесса, является рудная промышленность, продукция которой широко применяется в энерго и материалоемких отраслях промышленности, как химическая технология и металлургия [63, 92].

В частности, в рудной промышленности валковые дробящие агрегаты используют для крупного и среднего дробления природного антрацита, сырого кокса, выжженной возвратной продукции (выжженного боя), прессованных поворотных электродных заготовок и некондиционной электродной массы («зеленый» бой), а также других углеродных материалов [63, 68, 92]. Одним из основных факторов, ограничивающих эффективность работы валковых дробилок, является интенсивное абразивное изнашивание рабочих органов, в частности цилиндрических футеровочных бандажей, приводящее к значительным эксплуатационным затратам и снижению производительности оборудования [12, 54, 138].

Изнашивание цилиндрических футеровок валковых дробящих агрегатов обусловлено воздействием абразивных частиц, действующих на рабочие поверхности с высоким давлением и трением. При переработке высокоабразивных материалов интенсивность изнашивания футеровок значительно увеличивается, что приводит к быстрому их разрушению и увеличению частоты их замены. Такой процесс является одним из главных факторов, повышающих эксплуатационные затраты: снижает эффективность эксплуатации дробильного оборудования и увеличивает расходы на техническое обслуживание и замену рабочих элементов.

Изнашивание цилиндрических футеровочных бандажей обусловлено совокупным воздействием факторов: механических воздействий абразивных частиц, высоких контактных напряжений, динамических нагрузок и др. Экономические потери, связанные с износом футеровок, включают не только расходы на замену и демонтаж изношенных деталей, но и значительные простои оборудования. Изнашивание рабочих поверхностей ведёт к снижению стабильности работы дробилок и ухудшению качества переработанного материала, что непосредственно влияет на производственные показатели предприятия; простои требуют дополнительных затрат на рабочую силу, ремонтное оборудование и логистику, что снижает общую эффективность производственного процесса. Поэтому прогнозирование износа и своевременная замена футеровок позволяют

значительно уменьшить время простоя и повысить общую экономическую эффективность работы валковых дробилок [11, 12, 56, 73].

Несмотря на высокие характеристики традиционных валковых дробящих агрегатов, их конструкции постоянно совершенствовались как в направлении универсализации, так и специализации. Применение валковых измельчителей способствовало созданию их многочисленных типоразмеров. Поэтому обоснованный выбор валковых дробящих агрегатов для эффективного разрушения определенного кускового или сыпучего материала с целью получения продукта прогнозируемой формы и размера частиц, является весьма актуальной задачей многих отраслей промышленности. Следует отметить, что такая задача в какой-то степени была рассмотрена авторами в работе, и приведен более обстоятельный анализ разработанных конструкций валковых измельчителей [5, 10, 63, 68, 70, 92]. Наряду с конструктивной модернизацией валковых измельчителей важным направлением повышения ресурса рабочих органов является модификация поверхностного слоя, включая формирование регулярной микротекстуры и диффузионное упрочнение сталей. Эффективность таких подходов подтверждается исследованиями, в которых показано снижение трения и износа при лазерном текстурировании, а также повышение износостойкости сталей после газового азотирования [57, 58].

Согласно ГОСТ 18266-72 Дробилки валковые с гладкими и рифлеными валками валковые дробящие агрегаты — это дробилки, в которых материал дробят, сжимая его между вращающимися валками или между валком и неподвижной плитой. При этом в зависимости от количества валков дробилка называется одновалковой, двухвалковой, трехвалковой. В то же время в различных источниках научно-технической, и прежде всего патентной информации, часто нет разницы между валковыми и роторными измельчителями, бегунами, а также шредерами [14]. Поэтому в диссертационной работе под валковыми дробящими агрегатами рассматривается только оборудование, подпадающее под определение ГОСТ 18266-72 Дробилки валковые с гладкими и рифлеными валками, в котором разрушение обрабатываемого материала происходит методами раздавливания, раскалывания, излома и стирания (при этом разрушение методами удара и среза для валковых измельчителей нехарактерно). Также рассматриваются измельчители с валками, имеющими наружную рабочую поверхность.

1.7 Анализ конструкционных решений валковых дробилок и их рабочих элементов

Среди валковых дробящих агрегатов наибольшее распространение получили двухвалковые дробилки с гладкими валками (максимальный средний размер комков исходного материала, который захватывают валки, составляет примерно 5% от диаметра валка), рифлеными валками

(8...10%) и зубчатыми (25...50%). При этом степень дробления дробилок с гладкими валками составляет \div 2-4; с рифлеными валками \div 2-6 и с зубчатыми \div 3-10 (рисунок 1.3). Объемная производительность дробилок с гладкими валками достигает 65 м³/ч (дробилка ДГ 1500×600), с рифлеными - 54 м³/час (дробилка ДГР 600×400) и с зубчатыми - 500 м³/ч (дробилка ДДЗ 16). Размеры валков дробилок (диаметр и ширина) - от 400×250 у дробилки ДГ 400×250 до 1600×2000 мм у дробилки ДДЗ 16 [5, 142].



а)



б)

Рисунок 1.3 - Схемы валков валковой дробилки

а - зубчатый валок; б - рифленый валок (фото автора)

Анализ конструкций валковых дробящих агрегатов позволяет предложить их классификацию. По количеству валков различают одно-, двух-, трех- и многовалковые измельчители. При этом наибольшее распространение получили двухвалковые измельчители.

Одновалковые измельчители с плоской плитой описаны в патенте №GB2341121A [111], CN99336A [125], DE102005047516A1 [103], с вогнутой плитой – в патенте №GB2042366A [107], CN100927A [101], CN105928A [104], FR441647A [117], а измельчитель с одной плоской и второй криволинейной плитой предложен в заявке №WO90/09241A1 [135]. При этом в патенте №GB2341121A валки, выполненные в виде призм, соответственно, обеспечивают непрерывное ступенчатое изменение угла захвата измельчаемого материала. Неподвижная криволинейная плита одновалкового измельчителя может быть состоящей из шарнирно скрепленных между собой плоских секций. При относительном повороте соседних секций такая плита может работать в паре с валками разного диаметра, что расширяет ее технологические возможности.

Трехвалковые дробилки предложены в патенте №DE9419235U1 [124], CN206762979U [108]. При этом средний валок измельчителя трехвалкового может быть расположен сверху, сбоку или снизу.

Дробилка с четырьмя валками, средние из которых расположены ниже выносных, предложена в заявке № WO2012/151641A1 [132]. Такое расположение валков обеспечивает

образование нескольких рабочих зон, что повышает эффективность дробления. Оригинальный многовалковый измельчитель-транспортер предложен в заявке №WO2017/148513A1 [134]. Регулировкой направления и скорости вращения валков достигают требуемой степени дробления и производительности устройства (рисунок 1.4).

Валковые дробилки и мельницы с типом поверхности валков (валка): с шероховатыми валками, с рифлеными валками, с зубчатыми валками, с комбинированными валками; двухвалковые: многовалковая форма валков (валка), фигурный валок, бочкообразный валок, прямая правильная призма одинакового диаметра, разного диаметра, с непрерывными зубцами, с дискретными зубцами, которые не зацепляются с гладкими валками, круговой прямой цилиндр, четырехвалковые, пятивалковые, с шестью и более валками; возможность изменения формы рабочей поверхности валка и/или ее дробильных элементов; возможность регулировки температуры валков: нерегулируемые, регулируемые; относительная линейная скорость рабочих поверхностей валков: с одинаковой скоростью, с разными скоростями, с регулируемой скоростью одноступенчатые и многоступенчатые с наличием дополнительных рабочих органов, кроме валков с наличием дополнительных органов, с отсутствием дополнительных органов; материал поверхности валков (валка): износостойкий сплав, керамика, бетон, природные камни композиционный материал, сталь, с помощью воздуха, с помощью жидкости проточные герметичные в виде тепловых труб, круговой срезанный прямой конус, идентично ориентированные зеркально.

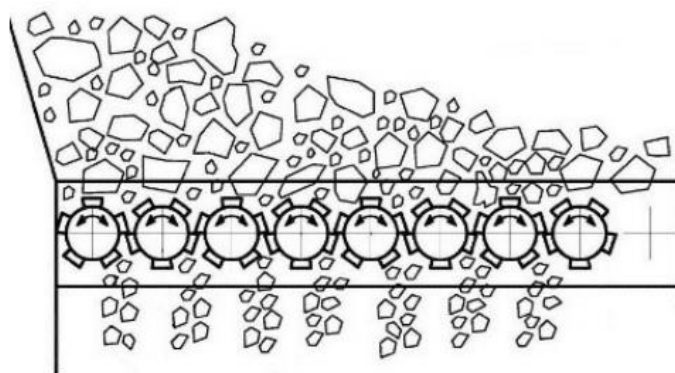


Рисунок 1.4 - Схема дробилки (заявка № WO2017/148513A1) [134]

По типу поверхности валков (валка) традиционно различаются измельчители с гладкими, шероховатыми, рифлеными и зубчатыми валками. Валок с гладкой цилиндрической рабочей поверхностью состоит из цилиндрического сердечника и соосно закрепленной на нем с помощью упругих элементов износостойкой оболочки (заявка № WO95/33932A1 [136]). Упругие элементы способствуют прохождению крепких комков через межвалковый промежуток без раздвижения сердечников валков. Двухвалковый измельчитель с непрерывными продольными зубьями, вогнутыми в направлении вращения валков, предложен в патенте № СН108014А [105]. Такая форма

зубов способствует перераспределению измельчаемого материала в центр межвалкового промежутка и снижает сыпь неполностью измельченного материала за пределы торцов валков. Также разработаны конструкции комбинированных валков, по длине рабочей части имеющих по меньшей мере два участка с разной формой поверхности. Измельчители с такими валками обеспечивают двух- и многоступенчатое дробление.

Двухвалковые дробилки с подобными зубчатыми валками описаны в патенте № GB239723A [112], № RU3698U1 [21]. Дискретные зубья валка согласно заявкам № WO2006/133870A1 [127] и DE102005027729A1 [102] располагаются равномерно по всей его рабочей поверхности и могут быть выполнены как точечными, так и вытянутыми вдоль образующей валка (рисунок 1.5). Дискретные зубья каждого из валков измельчителя по заявке № WO2007/034038A1 [128] расположены по винтовой линии (рисунок 1.6).

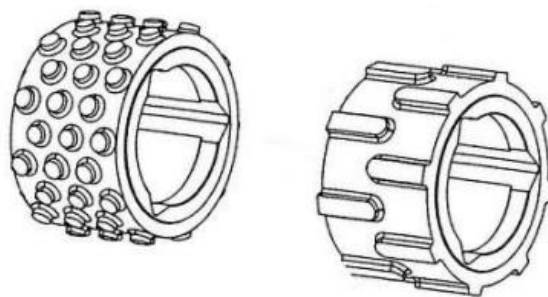


Рисунок 1.5 - Схема съемной оболочки валка по заявкам № WO2006/133870A1 и № DE102005027729A1 [127, 102]

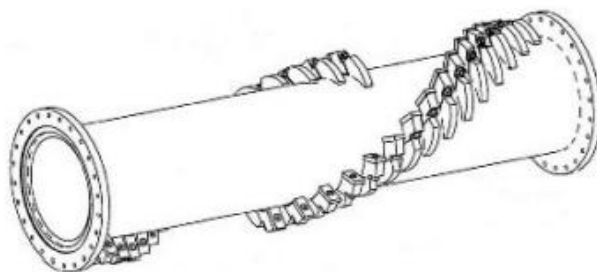


Рисунок 1.6 - Схема съемной оболочки валка по заявке № WO2007/034038A1 [128]

В патенте № DE84040C [121] валки выполнены в виде зубчатых колес с шестью круглыми зубьями. Рабочая поверхность валка в поперечном направлении согласно а. с. № SU368876A1 [34] образована в виде аркады пологих арок с рифлями в форме трапеции на вершине каждой арки и треугольников по ее краям, при этом арки расположены с промежутками между собой. Недостаток этого валка - склонность к забиванию рифлений измельчаемым материалом. По форме валков (валка) различают измельчители с валками, рабочая поверхность каждого из которых выполнена в виде кругового прямого цилиндра, кругового срезанного прямого конуса, прямой правильной призмы, правильной срезанной пирамиды, а также с фигурными валками. Наиболее распространены

измельчители с двумя цилиндрическими валками одного диаметра. При этом для стабилизации величины рабочего промежутка во время длительной эксплуатации измельчителя один его валок предложено выполнять с концевыми коническими фасками, а другой - с аналогичными выступами (заявка № WO2008/106998A1 [129]). В патентах №, № WO2009/013276A1 [130], RU2624290C2 [32] крайние участки одного из валков предложено выполнять с кольцевыми выступами, которые охватывают бочку соответствующего валка и образуют вместе с рабочими поверхностями валков замкнутую рабочую зону. Аналогичное решение предложено и в патенте № DE241239C [113], при этом оба валка двухвалковой дробилки снабжены одним кольцевым выступом, выполненным на разных концах валков. Обечайку валка с цилиндрической рабочей поверхностью согласно патенту № GB738027A [119] выполнено из толщиной стенки, увеличивающейся от периферии к центру, что повышает жесткость валка в поперечном направлении. Валок с моментом сопротивления поперечного сечения, увеличивающийся от торцов его бочки к центру, описан в патенте № CH280460A [115]. Кроме измельчителей с традиционными валками в виде круговых прямых цилиндров одинакового диаметра, разработаны конструкции с аналогичными валками разного диаметра. Такие измельчители при одинаковой угловой скорости валков обеспечивают разрушение обрабатываемого материала не только раздавливанием, но и стиранием. Недостаток таких дробилок - повышенное пылеобразование. В патентах №, № DE574037C [118], DE885189C [122], RU2454279C2 [30] предложены измельчители с валками, каждый из которых по его длине имеет по меньшей мере два цилиндрических участка разного диаметра (двух- и многоступенчатые валки). Такое конструктивное решение обеспечивает многоступенчатое дробление. Двухвалковая дробилка с валками в виде круговых срезанных прямых конусов, обращенных друг к другу противоположными основаниями, предложена в патенте № DE218291C [110]. Дробилки с валками в виде правильных призм сочетают преимущества как валковых, так и щековых дробилок. При этом значительно облегчается восстановление поврежденных участков рабочих поверхностей валков, состоящих из плоских, а не криволинейных участков. При этом для повышения эффективности дробления валки в виде квадратных призм снаряжают зубами (патент № GB772107A [120] (рисунок 1.7).

Кроме двухвалкового измельчителя с призматическими валками разработана конструкция одновалковой дробилки с валком в виде правильной шестигранной призмы (патент №GB2341121A [111]) (рисунок 1.8).

Общий недостаток измельчителей с фигурными валками - сложность их изготовления и ремонта. Двухвалковая дробилка с фигурными валками различной формы описана в заявке

№ WO99/47263A1 [137] (рисунок 1.9). При работе дробилки измельчаемый материал подвергается изменяющимся условиям разрушения.

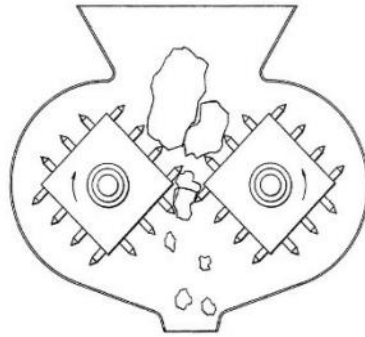


Рисунок 1.7 - Схема одновалковой дробилки (патент № GB772107A [120])

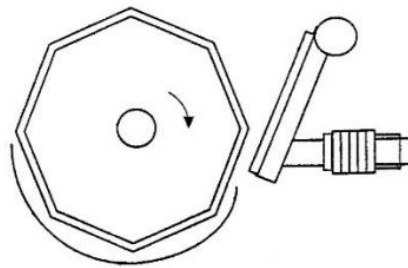


Рисунок 1.8 - Схема одновалковой дробилки (патент №GB2341121A [111])

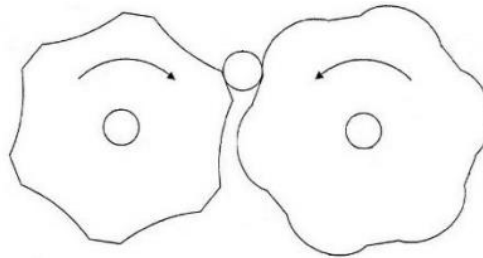


Рисунок 1.9 - Валки дробилки по заявке № WO99/47263A1 [137]

Двухвалковая дробилка с фигурными валками одинакового поперечного сечения, образующих своеобразное шевронное зацепление (при этом выступы и впадины каждого валка расположены под небольшим углом к его продольной оси), рассмотрено в заявке № WO2009/154585A2 [131] (рисунок 1.10).

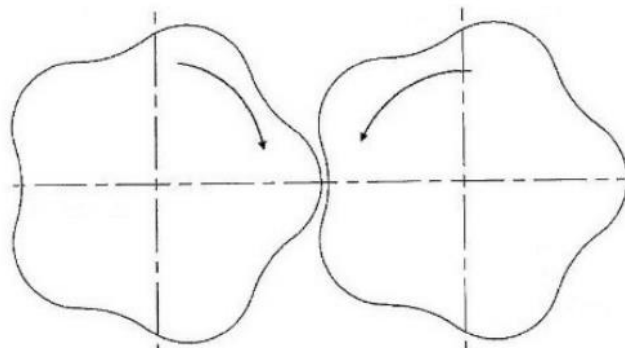


Рисунок 1.10 - Поперечное сечение валков дробилки по заявке № WO2009/154585A2 [131]

Дробилку с валками X-образного (крестообразного) поперечного сечения описано в патенте № FR2690359A1 [114]. При измельчении материал разрушается преимущественно раздавливанием в промежутках между зубьями соседних валков. В заявке № WO2013/006920A1 [133] валки дробилки выполнены разного диаметра для реализации в межвалковом промежутке не только сжимающих, но и сдвиговых усилий. При выполнении фигурных валков одинакового поперечного сечения (в виде эллипса) их предварительно возвращают друг относительно друга для повышения в межвалковом промежутке сдвиговых усилий (патент № CN208661352U [109]). К измельчителям с фигурными валками можно отнести и дробилку по заявке № WO02/05963A1 [126], в которой каждый из валков выполнен в виде смонтированных на валу абразивных дисков с диаметральной сечением в виде ромбов, при этом вершины дисков одного валка расположены между вершинами дисков другого валка, это измельчаемый материал интенсивно перетирается между соседними дисками валков. Диски выполнены с периферийным рифлением, интенсифицирующим процесс измельчения. В измельчителе согласно авторскому свидетельству № SU1704818A1 [31] каждый из валков выполнен в виде трехлепестковых круглых колес, в патенте № DE4332782A1 [116] и № DE8903718U1 [123] - в виде многолепестковых круглых колес, а в измельчителях согласно авторскому свидетельству № SU1445776A1 [1] - в виде многогранника с повернутыми друг относительно друга на 45° квадратными основаниями (рисунок 1.11).

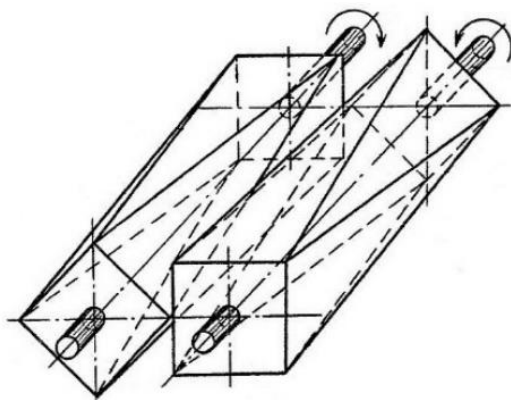


Рисунок 1.11 - Схема рабочей зоны дробилки (авторское свидетельство № SU1445776A1) [1]

В патенте № DE160801C [106] рассмотрена двухвалковая дробилка, каждый валок которой выполнен в виде ступенчатой спирали с витками, диаметр которых уменьшается по длине валка. Валки ориентированы таким образом, что против участка большего диаметра одного валка расположен участок меньшего диаметра другого валка, при максимальном приближении валков они плотно прижимаются друг к другу по всей их рабочей длине (рисунок 1.12).

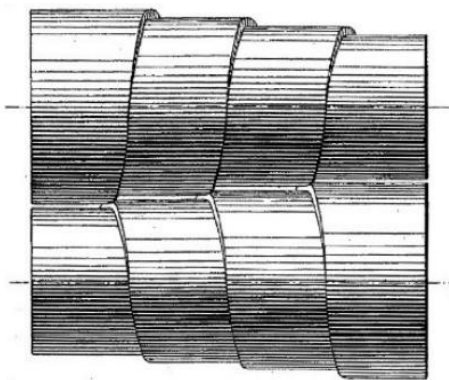


Рисунок 1.12 - Схема валков дробилки (патент № DE160801C) [106]

В известной валковой дробилке (авторское свидетельство SU № 1726017 [2]) в качестве основного рабочего органа используются многогранные валки (рисунок 1.13), установленные с возможностью их вращения на эксцентрик-водиле. Внешний контур валков сконструирован таким образом, что совпадает с внутренней огибающей семейства кривых - эпитрохоид, описывающих траектории движения вершин этого контура.

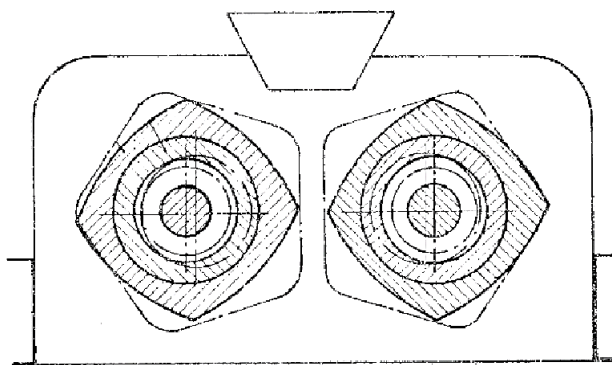


Рисунок 1.13 - Схема валкой дробилки (авторское свидетельство SU № 1726017) [2]

Недостаток данного устройства - внешний контур поперечного сечения валков имеет форму равностороннего многоугольника, совпадающего с внутренней огибающей семейства эпитрохоид, что приводит к неравномерному износу рабочих поверхностей валков и снижению их долговечности.

Валковая дробилка (патент № 2288036 [29]) для дробления хрупких материалов. В дробилке используются вращающиеся валки с цельными футеровочными бандажами, которые имеют режущие элементы. Режущие элементы установлены таким образом, что они образуют различные зазоры для прохода дробленого материала. Ширина режущих элементов на валках различается, что позволяет создавать разные зазоры. Кроме того, можно изменять расстояние между валками для оптимальной работы дробилки.

1.8 Факторы, влияющие на износ футеровочных бандажей

Изнашивание рабочих поверхностей валковых дробящих агрегатов является основным фактором, ограничивающим их эксплуатационный ресурс и эффективность работы оборудования. Интенсивный абразивный износ, вызванный воздействием абразивных частиц, значительно увеличивает эксплуатационные затраты и снижает производительность оборудования.

Абразивное изнашивание цилиндрических футеровочных бандажей валковых дробилок представляет собой сложный процесс, тесно связанный с удалением материала с рабочих поверхностей в результате их взаимодействия с абразивными частицами. Интенсивность износа определяется комплексом факторов, включая физико-механические свойства перерабатываемого материала, параметры контактного взаимодействия, геометрию и микрогеометрию рабочих поверхностей, а также режимы эксплуатации оборудования [11, 12].

Абразивное изнашивание рабочих поверхностей валковых дробящих агрегатов может происходить за счёт нескольких механических процессов, включающих режущий износ, пластическую деформацию, механическое разрушение и эрозию. Каждый из этих механизмов имеет свою специфику и степень воздействия на материал футеровок и зависит от типа перерабатываемого материала и эксплуатационных условий [10, 12].

Режущий износ возникает, когда абразивные частицы, взаимодействующие с рабочей поверхностью, "врезаются" в неё, создавая микротрещины и удаляя частицы материала. Этот механизм обычно имеет место в условиях, когда абразивные частицы обладают высокой твёрдостью и остротой. Для материалов с низкой твёрдостью, таких как мягкие металлы или пластики, режущий износ может быть основным механизмом разрушения [12, 56, 73]. В процессе такого износа наблюдаются характерные вмятины и выемки (рисунок 1.14) на поверхности, снижающие её рабочие характеристики. Пластическая деформация происходит при воздействии абразивных частиц с высокой нагрузкой, что приводит к локальной деформации материала. Этот механизм износа наиболее характерен для материалов, обладающих высокой пластичностью, например, для материалов с аустенитной структурой. При длительном воздействии высоких контактных напряжений на рабочую поверхность происходит накопление пластических дефектов, таких как выемки и подтёки материала (рисунок 1.14), что ускоряет износ.

Механическое разрушение происходит, когда возникающие контактные напряжения превышают прочность материала, вызывая образование микротрещин, которые со временем расширяются и приводят к разрушению материала. Этот механизм износа характерен для материалов, которые подвержены усталостным повреждениям и не могут выдерживать

многократные циклы нагрузки. Разрушение в этом случае происходит в виде отрыва частиц материала, что приводит к образованию сколов и выкрашиванию поверхности [12, 73].



Рисунок 1.14 - Микротрещины, вмятины и выемки на поверхности (фото автора)

Эрозия является процессом, при котором частицы, находящиеся в зоне контакта с рабочей поверхностью, воздействуют на неё с высокой скоростью, вызывая истирание материала. Эрозионный износ часто наблюдается в условиях, когда абразивные частицы подвергаются высокоскоростному воздействию. Эрозия вызывает возникновение мелких ямок, потертостей и вмятин на поверхности, что значительно снижает её прочностные характеристики и увеличивает пористость материала.

Интенсивность изнашивания цилиндрических футеровочных бандажей определяется совокупностью свойств перерабатываемого материала, состоянием рабочей поверхности валка и режимами взаимодействия в зоне дробления. Для валковых дробящих агрегатов важно учитывать, что контакт абразивных частиц с поверхностью бандажки имеет неравномерный характер. В этих условиях твёрдость, форма и размер абразивных частиц определяют характер повреждения поверхности: при преобладании твёрдых кварцсодержащих включений возрастает доля царапания и микрорезания, а при поступлении крупнокускового материала усиливается ударно-контактное воздействие на рабочую поверхность валка.

Сопротивление футеровочного бандажки абразивному изнашиванию, в свою очередь, определяется твёрдостью, структурным состоянием и способностью материала к деформационному упрочнению. Для сталей и износостойких сплавов существенное значение имеют наличие карбидных и нитридных фаз, характер их распределения в металлической матрице, а также исходное состояние поверхностного слоя. При эксплуатации бандажки первоначальное наклёпывание может временно повышать сопротивление износу, однако при дальнейшем нагружении в поверхностном слое накапливаются повреждения, развиваются микротрещины и начинается разрушение упрочнённой зоны. Поэтому высокая твёрдость материала сама по себе не является достаточным

условием долговечности: важны сочетание твёрдости, вязкости, структуры и устойчивости поверхностного слоя к повторному контактному нагружению.

К эксплуатационным факторам относятся частота вращения валков, величина межвалкового зазора, распределение контактного давления, характер подачи материала и степень неравномерности загрузки по ширине валка. При повышенных контактных напряжениях возрастает интенсивность пластической деформации, ускоряется образование микротрещин и увеличивается вероятность локального выкрашивания материала. Наиболее опасными являются участки, в которых нагрузка концентрируется вследствие неравномерного поступления горной массы, изменения профиля рабочей поверхности или нарушения соосности элементов дробящего узла. Именно в таких зонах формируются очаги ускоренного износа, определяющие дальнейшую потерю геометрической точности бандажа и снижение стабильности процесса дробления [10-12, 70].

Максимальная интенсивность изнашивания наблюдается в областях пиковых контактных напряжений, что подтверждается расчётной схемой распределения нагрузки на рабочей поверхности валков (рисунок 1.15). Снижение износа в этих зонах целесообразно обеспечивать не только подбором более износостойкого материала, но и конструктивной коррекцией рабочей поверхности: применением профилированных валков, сегментированных футеровочных бандажей и решений, направленных на более равномерное распределение контактного давления по ширине и окружности валка.

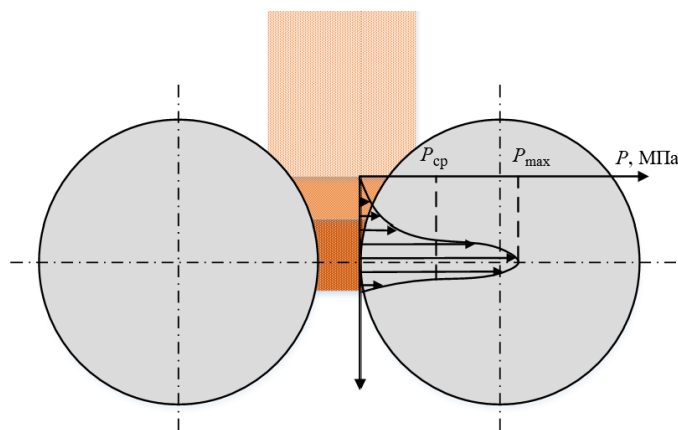


Рисунок 1.15 - Эпюра давления в вертикальном разрезе рабочей зоны валкового дробящего агрегата (составлено автором)

Применение профилированных валков и текстурированных поверхностей позволяет снизить локальные напряжения и равномерно распределить нагрузки по всей рабочей поверхности, что способствует увеличению срока службы футеровочных бандажей. Кроме того, значительное влияние на производительность оказывает тип рабочей поверхности футеровочного бандажа (рисунок 1.16).

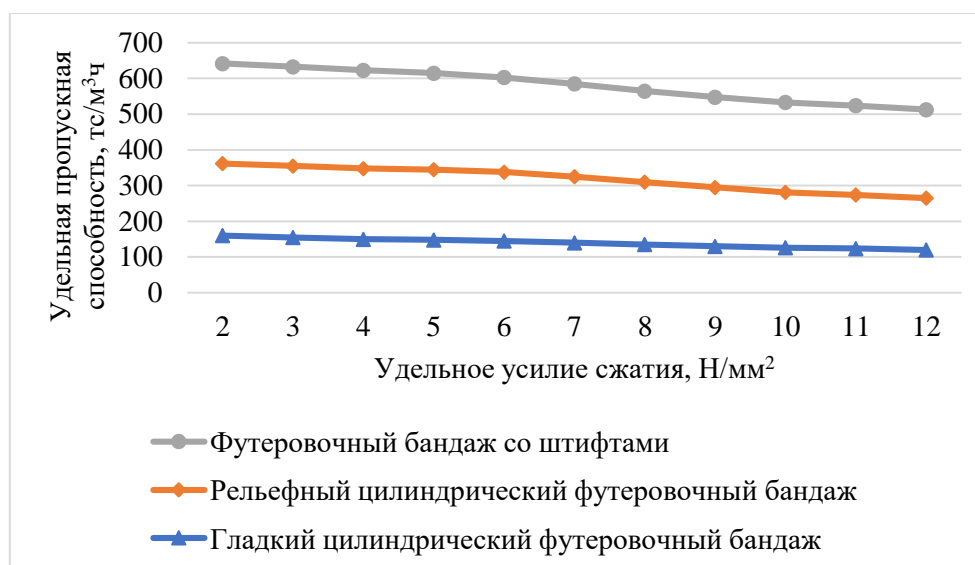


Рисунок 1.16 - Влияние типа поверхности футеровочного бандажа на удельную пропускную способность (составлено автором)

Влияние шероховатости поверхности на процесс износа также является значительным. Более гладкие поверхности валков снижают интенсивность износа за счёт уменьшения трения и сокращения зон локального контакта. Использование поверхностей с микротекстурой, созданной методами лазерной обработки, позволяет дополнительно снизить коэффициент трения и увеличить срок службы рабочих элементов [40, 63, 92].

При проектировании и эксплуатации футеровочных бандажей валковых дробилок перечисленные факторы должны рассматриваться совместно, поскольку интенсивность изнашивания определяется не только свойствами материала, но и характером контактного взаимодействия в зоне дробления. Прогнозирование износа целесообразно выполнять на основе сочетания расчетно-аналитических методов, численного моделирования и экспериментальной оценки состояния поверхностного слоя. В качестве основных направлений снижения износа могут быть использованы выбор материалов с повышенной абразивной стойкостью, применение композиционных структур с карбидными включениями, а также технологии поверхностного упрочнения, включая лазерную обработку и плазменное напыление [10].

1.9 Анализ конструктивно-технологических методов повышения долговечности рабочих органов валковых дробящих агрегатов

Изнашивание футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов непосредственно отражается на основных эксплуатационных характеристиках оборудования: производительности, энергоёмкости процесса дробления, стабильности гранулометрического состава продукта и

надёжности работы машины. Поэтому повышение долговечности рабочих поверхностей валков следует рассматривать не только как задачу увеличения ресурса отдельной детали, но и как условие сохранения устойчивого режима работы дробилки в течение длительного периода эксплуатации.

По мере изнашивания футеровок изменяется геометрия рабочей зоны: увеличивается межвалковый зазор, нарушается исходный профиль контактирующих поверхностей, а распределение нагрузки по ширине и окружности валков становится менее равномерным. В результате снижается эффективность захвата и разрушения материала, возрастает доля частиц, проходящих через зону дробления без достаточного измельчения, ухудшается стабильность гранулометрического состава продукта. Одновременно возрастает сопротивление движению материала в отдельных локальных зонах, что может сопровождаться увеличением потребляемой мощности и снижением энергетической эффективности дробилки.

Состояние футеровочных бандажей оказывает влияние и на производительность оборудования. При увеличении рабочего зазора и изменении профиля валков ухудшается контакт материала с дробящими поверхностями, что снижает эффективность переработки заданного объёма горной массы. Неравномерное изнашивание дополнительно усиливает нестабильность процесса.

Изнашивание футеровок также связано с надёжностью валкового дробящего агрегата в целом. Локальное уменьшение толщины банджа, появление зон повышенного давления и рост вибраций могут приводить к дополнительному нагружению валов, подшипниковых узлов и элементов привода. В таких условиях износ рабочей поверхности перестаёт быть только поверхностным дефектом и становится фактором, способным ускорять деградацию сопряжённых узлов машины. Это повышает вероятность внеплановых остановок, увеличивает трудоёмкость ремонтных операций и снижает коэффициент технической готовности оборудования [10, 11].

В связи с этим прогнозирование износа должно использоваться как инструмент обоснования эксплуатационных режимов и выбора технических решений по повышению ресурса бандажей. Корректировка скорости вращения валков, режима подачи материала, величины межвалкового зазора и распределения нагрузки позволяет уменьшить локальные зоны перегрузки и стабилизировать процесс дробления. Дополнительный эффект может быть достигнут за счёт применения износостойких материалов, плазменного напыления, лазерной обработки и других способов упрочнения, направленных на повышение сопротивления поверхностного слоя контактно-абразивному воздействию.

Одним из основных направлений повышения долговечности цилиндрических футеровочных бандажей является совершенствование их конструктивного исполнения. В данном случае речь идет не только о выборе более износостойкого материала, но и о такой геометрии рабочей поверхности,

при которой контактные нагрузки распределяются более равномерно, а зоны локального перенапряжения и ускоренного изнашивания уменьшаются. Поэтому конструктивная модернизация футеровок должна рассматриваться как способ одновременного повышения ресурса рабочих органов, стабильности процесса дробления и ремонтпригодности валкового агрегата.

Одним из таких решений является применение сегментированных футеровочных бандажей. В отличие цельного футеровочного бандаж, сегментированная конструкция позволяет заменять не весь бандаж целиком, а только наиболее изношенные элементы [10].

Профилирование рабочей поверхности валков также является эффективным способом повышения ресурса футеровочных бандажей. Рационально выбранная форма профиля способствует более устойчивому захвату материала, снижает вероятность его проскальзывания и обеспечивает более равномерное распределение контактного давления в зоне дробления. При этом уменьшается концентрация напряжений на отдельных участках рабочей поверхности, что снижает вероятность локального выкрашивания, пластической деформации и ускоренного абразивного изнашивания. Дополнительным преимуществом профилированных валков является возможность стабилизации гранулометрического состава продукта за счет более управляемого характера разрушения материала [63, 66, 68, 92].

Наряду с конструктивной модернизацией важное значение имеют технологические методы повышения износостойкости поверхностного слоя. Их применение направлено на формирование на рабочей поверхности бандаж упрочненной зоны. В отличие от простой замены материала футеровки, поверхностное упрочнение позволяет локально изменить свойства наиболее нагруженного слоя при сохранении требуемой прочности и вязкости основной детали.

К числу таких методов относится плазменное напыление износостойких покрытий. При его применении на поверхность футеровочного бандаж наносят слой материала с повышенной твердостью и сопротивлением абразивному воздействию. В качестве упрочняющих компонентов могут использоваться карбиды и нитриды тугоплавких элементов, в том числе соединения вольфрама, хрома, титана. Преимущество плазменного напыления заключается в возможности формирования покрытия заданного состава и толщины на значительной площади рабочей поверхности, а также в возможности локального усиления зон, наиболее подверженных изнашиванию. Для футеровочных бандажей валковых дробилок это особенно важно, поскольку износ часто имеет выраженный неравномерный характер [10, 56].

Лазерная обработка также может рассматриваться как способ направленной модификации поверхностного слоя. За счет локального нагрева и последующего быстрого охлаждения изменяется структурное состояние материала, повышается твердость и возрастает сопротивление

поверхностного слоя механическому повреждению. Преимуществом лазерной обработки является высокая локальность воздействия: упрочнению могут подвергаться не все поверхности детали, а только участки, где по результатам диагностики или расчета ожидается максимальная интенсивность изнашивания. Такой подход позволяет сочетать повышение твердости рабочей зоны с сохранением требуемых свойств основного материала банджа [56, 57].

Термохимическая обработка, включая цементацию и азотирование, применяется для повышения твердости и износостойкости наружного слоя стальных деталей. При цементации поверхность насыщается углеродом, при азотировании — азотом, что приводит к формированию упрочненного слоя с повышенным сопротивлением контактному и абразивному воздействию. Для футеровочных банджей такие методы представляют интерес в тех случаях, когда требуется повысить стойкость наружной рабочей поверхности без существенного изменения свойств сердцевины детали. Наиболее рационально их рассматривать применительно к сталям и сплавам, работающим в условиях повторного контактного нагружения [56, 57, 88].

Перспективным направлением является также применение композиционных материалов и композиционных покрытий. Их износостойкость определяется сочетанием пластичной или вязкой матрицы с твердыми армирующими фазами — карбидами, нитридами, оксидами и другими высокотвердыми включениями. Такая структура позволяет одновременно воспринимать ударно-контактные нагрузки и сопротивляться микрорезанию со стороны абразивных частиц. Для условий работы валковых дробилок это особенно важно, поскольку футеровочный бандж испытывает не только истирающее, но и повторное сжимающее, ударное и контактно-усталостное воздействие [10, 56].

Наноразмерные и тонкопленочные покрытия также рассматриваются как направление повышения износостойкости, однако применительно к крупногабаритным футеровочным банджам их использование требует отдельного технико-экономического обоснования. Такие покрытия могут снижать коэффициент трения, повышать твердость поверхностного слоя и уменьшать интенсивность микроповреждений, но их эффективность в условиях крупнокускового абразивного материала зависит от адгезии покрытия, его толщины, сопротивления ударным нагрузкам и возможности восстановления покрытия при ремонте.

1.10 Постановка цели и задач исследования

Цель исследования - повышение срока службы банджей валковых дробилок карьерных дробильно-сортировочных комплексов при их абразивном изнашивании в реальных условиях эксплуатации.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ современных теоретических подходов, экспериментальных методов и инженерных решений, связанных с абразивным изнашиванием футеровочных бандажей валковых дробилок в составе карьерных дробильно-сортировочных комплексов, и обобщить результаты их эксплуатации в промышленности.
2. Экспериментально установить закономерности формирования, развития и деградации наклепанного упрочнённого слоя на поверхности бандажей при взаимодействии с перерабатываемым материалом с учетом его вариативных физико-механических свойств.
3. Разработать математическую модель, описывающую процесс абразивного изнашивания и эволюцию микрогеометрии поверхности футеровочных бандажей, с учетом распределения контактных давлений, основных параметров напряжённого состояния и локальных механизмов ее разрушения.
4. Провести комплекс экспериментальных исследований для определения параметров износа, характеристик упрочнения, изменения микротвёрдости и морфологии поверхности футеровочных бандажей на различных стадиях их эксплуатации для верификации разработанной математической модели.
5. Исследовать эффективность технических решений по повышению срока службы футеровочных бандажей, включающих нанесение упрочняющих покрытий и модернизацию конструкции бандажей, и оценить их влияние на процессы изнашивания и энергозатраты процесса дробления в условиях, приближенных к промышленным

1.11 Выводы по главе 1

1. Проведённый анализ показал, что основной проблемой эксплуатации валковых дробящих агрегатов является интенсивное абразивное изнашивание цилиндрических футеровочных бандажей, что приводит к значительным эксплуатационным затратам, снижению производительности и КПД оборудования и ухудшению качества перерабатываемого материала.
2. Существующие конструктивные решения валковых дробилок включают использование профилированных валков, сегментированных футеровок.
3. Механизмы абразивного износа, такие как режущий износ, пластическая деформация и трещинообразование, обусловлены взаимодействием эксплуатационных факторов, включая свойства перерабатываемых материалов, параметры работы оборудования и условия нагружения.
4. Конструктивно-технологические методы повышения долговечности валковых дробилок включают использование современных износостойких материалов, технологий упрочнения

(плазменное напыление, лазерная обработка) и оптимизацию эксплуатационных параметров. Эти решения доказали свою эффективность, но требующие адаптации для конкретных условий переработки сырья.

5. Анализ степени разработанности проблемы показал, что, несмотря на значительные успехи в области трибологии и механики износа, требуется разработка комплексной методики повышения долговечности футеровочных бандажей, учитывающей как конструктивные, так и технологические аспекты.

6. На основании проведённого анализа сформулированы цель и задачи исследования, направленные на разработку научно обоснованных подходов к увеличению ресурса футеровочных бандажей валковых дробилок в условиях их интенсивного абразивного изнашивания.

ГЛАВА 2 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВАЛКОВЫХ ДРОБЯЩИХ АГРЕГАТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗНАШИВАНИЯ ФУТЕРОВОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ

Исследование эксплуатационных характеристик и механизмов изнашивания рабочих поверхностей валков позволяет определить основные факторы, влияющие на эффективность процесса дробления, уровень энергозатрат, надёжность работы оборудования и ресурс футеровочных бандажей. Именно такие факторы и формируют в дальнейшем исходные предпосылки для корректного математического описания процессов дробления и изнашивания.

Известно, что без предварительного анализа таких эксплуатационных показателей, как производительность, степень дробления, энергоёмкость, а также без изучения закономерностей процесса изнашивания футеровки невозможно построить математическую модель, отражающую реальное состояние дробильного агрегата в процессе эксплуатации. Понимание взаимосвязи между режимами работы машины и эволюцией состояния рабочих поверхностей футеровочных бандажей валков является необходимым условием для последующего моделирования процесса дробления и прогнозирования изнашивания футеровочных бандажей [3, 13 21, 36].

2.1 Эксплуатационные показатели валковых дробилок и факторы, определяющие эффективность их работы

Для оценки эффективности работы валковых дробилок используются следующие ключевые показатели:

- производительность (Q), т/ч - количество материала, перерабатываемого дробилкой в единицу времени. Производительность зависит от размеров и скорости вращения валков, ширины валков (длины линий контакта), зазора между валками и свойств дробимого материала. Например, измельчающие валки высокого давления (HPGR) диаметром $\sim 1,7$ м и шириной $\sim 1,2$ м имеет номинальную производительность порядка 1200-1300 т/ч. У гладких и зубчатых дробилок производительность обычно ниже и может составлять от единиц до сотен т/ч в зависимости от габаритов машины. Важной характеристикой является также эффективность захвата материала валками: при данном диаметре валков максимально допустимый размер куска определяется углом захвата, и если куски слишком крупные или валки изношены (снижено сцепление), часть материала будет проскальзывать нераздробленной, что фактически снижает полезную производительность;
- степень дробления (i), безразмерная величина - показатель, характеризующий во сколько раз средний размер куска на выходе меньше, чем на входе. Для двухвалковых дробилок степень дробления за один проход обычно находится в диапазоне от 3:1 до 6:1 (типично $\sim 4:1$), то есть они

относятся к дробилкам среднего дробления. При необходимости более высокой степени измельчения материал пропускают через несколько последовательно установленных пар валков или возвращают в дробилку циркуляционным контуром (для HPGR часто реализуется замкнутый цикл с грохотом). Достоинством двухвалковых дробилок является получение сравнительно тонкого гранулометрического состава продукта, а недостатком - ограниченная степень дробления за один цикл, требующая дополнительных стадий для сильного измельчения материала [66, 68, 142];

- энергоёмкость дробления, кВт·ч/т - удельный расход энергии на дробление единицы массы материала. Этот показатель является ключевым с точки зрения экономичности процесса. У валковых дробилок энергоёмкость дробления зависит от типа машины: гладкие и зубчатые дробилки при работе на мягких материалах имеют относительно низкое удельное энергопотребление (например, порядка 0,5-3,0 кВт·ч/т, в зависимости от крупности исходного и конечного материала). Пресс-валки HPGR, хотя и требуют значительных суммарных мощностей привода, за счёт высокого эффекта измельчения на единицу энергии показывают меньший удельный расход по сравнению с шаровыми мельницами. Следует отметить, что как экономия энергии достигает 15-30% при замене традиционной схемы на HPGR. Конкретные цифры зависят от твёрдости и прочности руды; для HPGR производительность незначительно уменьшается с ростом твёрдости руды (просто продукт выходит более крупным при той же мощности), а для мельниц полусамоизмельчения (SAG)/шаровых мельниц твёрдые руды приводят к резкому падению производительности. Таким образом, валковые дробящие агрегаты позволяют стабилизировать производительность на рудах с вариативными физико-механическими показателями. При оценке энергоёмкости дробления также учитывается износостойкость процесса - расход энергии на преодоление трения и разрушение не только материала, но и на износ рабочего инструмента (валков). Чем сильнее изношена детали дробилки, тем больше доля энергии расходуется впустую (на вибрации, нагревание, истирание), и тем выше становится удельный расход на тонну продукта [3, 13, 21, 36];

- надёжность и готовность оборудования. Важными эксплуатационными показателями являются наработка на отказ, коэффициент технического использования и простой на ремонт.

Одним из основных параметров работы валковых дробящих агрегатов — это угол захвата дробимого материала, определяемый касательными, проведенными через точки соприкосновения куска материала с поверхностями валков. Для расчета угла захвата принимают схему, изображенную на рисунке 2.1. При расчете принимаются следующие допущения: кусок материала имеет шарообразную форму, массой куска пренебрегают, ввиду незначительности по сравнению с разрушающими усилиями.

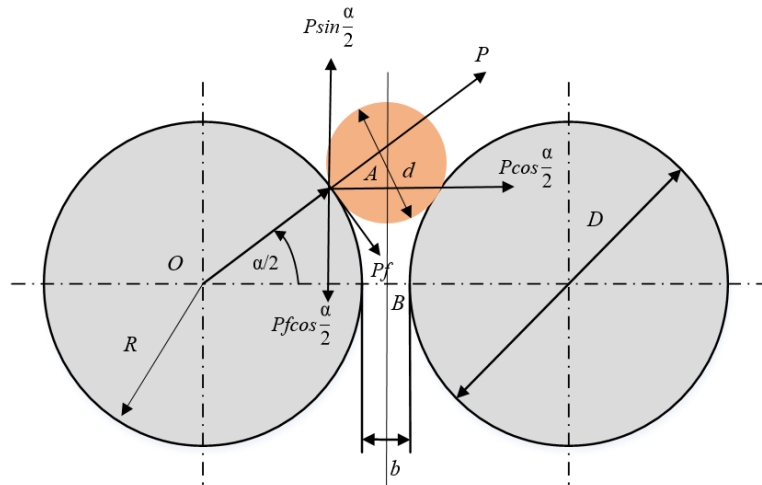


Рисунок 2.1 - Схема 1 расчета угла захвата валковой дробилки [3]

В момент захвата кусков материала диаметром d в точках соприкосновения его с валком возникают силы нормального давления P , действующего на материал под углом $\alpha/2$. Проецируя силу P на горизонтальную и вертикальную оси получим составляющие силы: затягивающую $P \cos \frac{\alpha}{2}$ и выталкивающую $P \sin \frac{\alpha}{2}$. С другой стороны, под прямым углом к силе P действует сила трения $F = Pf$, которая раскладывается на силу $Pf \sin \frac{\alpha}{2}$ и втягивающую материал $Pf \cos \frac{\alpha}{2}$.

Очевидно, что для нормальной работы валковой дробилки необходимо, чтобы выполнялось условие (2.1):

$$2P \sin \frac{\alpha}{2} \leq 2P f \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (2.1)$$

Разделив обе части неравенства на $2P \cos \frac{\alpha}{2}$, получим (2.2):

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \leq f. \quad (2.2)$$

Следует отметить, что $f = \operatorname{tg} \varphi$, где φ - угол трения; тогда имеет место $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \leq \operatorname{tg} \varphi$ или $\frac{\alpha}{2} \leq \varphi$.

Окончательно получим (2.3):

$$\alpha \leq 2\varphi. \quad (2.3)$$

Таким образом, нормальная работа дробилки обеспечивается при условии, что угол захвата должен быть меньше двойного угла трения [3, 58, 76, 77, 147, 151].

Далее рассмотрим более детально угол захвата при дроблении «в слое», имеем две зоны - зона преддробления и зона сжатия, характеризующаяся экстремальными значениями давления (рисунок 2.2). Тогда для каждой из зон существует угол захвата, определяемый по формулам (2.4).

$$\begin{cases} \alpha_{ip} = \arccos \left(1 - \left(\frac{\delta_c}{\gamma_f} - 1 \right) \frac{s}{D} \right); \\ \alpha_{sp} = \arccos \left(1 - \left(\frac{x_{max}}{s} - 1 \right) \frac{s}{D} \right), \end{cases} \quad (2.4)$$

где α_{ip} - угол захвата для частиц, размер которых меньше рабочей ширины щели; α_{sp} - угол захвата для частиц, размер которых больше рабочей ширины щели; s - рабочая ширина щели, мм; D - диаметр валка, мм; δ_c - насыпная плотность уплотненного материала в зоне сжатия, т/м³; γ_f - насыпная плотность уплотненного материала в зоне предробления, т/м³ [58, 147, 151].

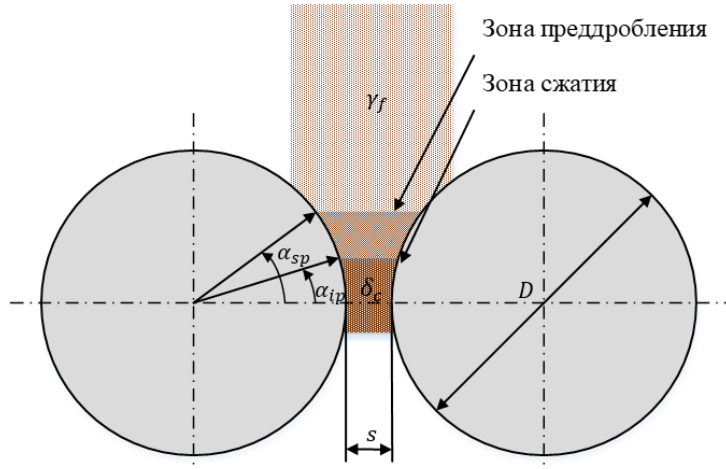


Рисунок 2.2 - Угол захвата валковыми дробящими агрегатами с круглым профилем валков
(составлено автором)

Боковые границы рабочей зоны дробящего агрегата представляют собой округлый профиль футеровочного банджа, поэтому уплотнение материала в зоне сжатия приводит к постепенному росту давления, максимум которого достигается при минимальной ширине щели, расположенной на горизонтальной оси валков. По мере прохождения материала через эту щель давление падает, насыпная плотность незначительно уменьшается (рисунок 2.3).

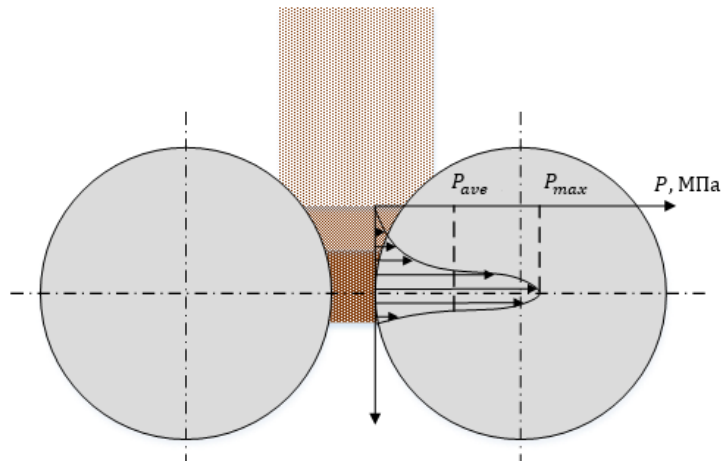


Рисунок 2.3 - Эпюра распределения давления по круглому профилю валка (составлено автором)

Среднее давление в слое материала в зоне сжатия, определяется как отношение измельчающего усилия к площади валка (2.5):

$$p_{\text{ave}} = \frac{F}{1000(D/2)L\alpha_{\text{ip}}} = \frac{2\varphi}{\alpha_{\text{ip}}}, \quad (2.5)$$

где p_{ave} - среднее давление в зоне сжатия, МПа; F - измельчающее усилие, кН; α_{ip} - угол захвата для частиц, размер которых меньше рабочей ширины щели; D - диаметр валка, м; L - ширина валка, м; φ - удельное усилие сжатия, Н/мм².

Максимальное давление в зоне сжатия равно (2.6):

$$p_{\text{max}} = \frac{F}{1000kDL\alpha_{\text{ip}}} = \frac{\varphi}{k\alpha_{\text{ip}}}, \quad (2.6)$$

где p_{max} - максимальное давление в зоне сжатия, МПа; F - измельчающее усилие, кН; α_{ip} - угол захвата для частиц, размер которых меньше рабочей ширины щели; D - диаметр валка, м; L - ширина валка, м; φ - удельное усилие сжатия, Н/мм²; k - константа, характеризующая материал (значения константы k варьируется от 0,18 до 0,23).

Давление неравномерно распределяется по ширине валка. Ширина условно подразделяются на центральную и краевую зоны (рисунок 2.4). Материал, находящийся в центральной зоне, подвергается наибольшему давлению, в результате чего максимально уплотняется и разрушается более эффективно. Давление падает к краевым зонам валка, материал в которых может как разрушаться (в этом случае его называют фактическим краевым продуктом), так и проходить сквозь машину на большей скорости, не подвергаясь какому-либо существенному воздействию. Это явление называют внутренним байпасом. При сильном износе или отсутствии щековых плит, устанавливаемых с торцевых сторон рабочей зоны валкового дробящего агрегата, возникает и внешний байпас, резко снижающий эффективность разрушения материала на краях валков. Распределение давления в наибольшей степени зависит от ширины валков и «герметичности» посадки щековых плит. Более узким валкам соответствует его более пиковое распределение [46, 47, 58, 92, 96, 147, 151].

Высокое давление, передающееся слою руды от валков, способствует появлению локальных напряжений внутри минеральных зерен и между рудными минералами и пустой породой. За один цикл при проходе через валки ослабляется структура сжимаемой руды возникновением микротрещин, которые значительно снижают потребление энергии при последующем измельчении.

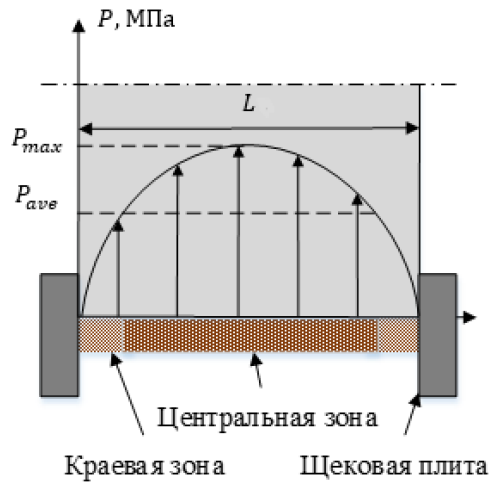


Рисунок 2.4 - Эпюра распределения давления по длине вала круглого профиля
(составлено автором)

Гранулометрический состав продукта разрушения контролируется измельчающим усилием, создающим давление в слое материала, находящемся в зоне сжатия. Очевидно, что это усилие не может быть измерено непосредственно. Однако существуют параметры, позволяющих оценить его количественно. Одним из этих параметров является удельное усилие сжатия (измельчения), определяемое как отношение измельчающего усилия к проекционной площади вала (2.7):

$$\varphi = \frac{F}{1000DL} \quad (2.7)$$

где φ - удельное усилие сжатия, Н/мм^2 ; F - измельчающее усилие, кН ; D - диаметр вала, м ; L - ширина вала, м .

Удельное усилие сжатия количественно характеризует зависимость между измельчающим усилием и гранулометрическим составом продукта разрушения, что позволяет использовать эту величину при сравнении измельчающего усилия валковых дробящих агрегатов различных типоразмеров.

Удельная пропускная способность определяется как производительность с валами диаметром и шириной в 1 м, вращающимися со скоростью в 1 м/с, и может быть определена по результатам тестовых (2.8):

$$\dot{m}_f = \frac{M}{DLu}, \quad (2.8)$$

где \dot{m}_f - удельная пропускная способность по результатам тестирования, $\text{тс/м}^3\text{ч}$; M - производительность, т/ч ; D - диаметр вала, м ; L - ширина вала, м ; u - окружная скорость на поверхности вала, м/с .

В установившемся режиме работы производительность может быть определена (2.9):

$$M=3,6Lsu_m\delta, \quad (2.9)$$

где M - производительность, т/ч; L - ширина валка, м; s - рабочая ширина щели, мм; u_m - скорость материала при прохождении через щель, м/с; δ - насыпная плотность материала при прохождении через щель, т/м³.

Здесь под насыпной плотностью материала при прохождении через щель понимается средняя насыпная плотность разгрузки центральной, краевой зон и байпасов. Скорость материала при прохождении через щель обычно принимается равной окружной скорости на поверхности валков, хотя в действительности она может отклоняться. Частицы могут падать между валками, ускоряться за счет воздействия валков (внутренний байпас) и падать через машину, не попадая на валки (внешний байпас). В этих случаях скорость материала выше скорости валков. Замедление материала в основном обусловлено его налипанием на футеровочные бандажки и проскальзыванием валков. Влияние этих эффектов на удельную пропускную способность машины определяется в ходе тестовых испытаний [20, 58, 76, 77, 96, 151].

При практических расчетах принимается, что для заданного материала при постоянном режиме работы рабочая ширина щели, принимаемой в виде линейной функции диаметра валков. Данное допущение подтверждается практикой эксплуатации машин различных типоразмеров, что позволяет теоретически определить удельную пропускную способность по разгрузке зоны сжатия (2.10):

$$\dot{m}_c=3,6\delta_c\frac{s}{D}, \quad (2.10)$$

где \dot{m}_c - удельная пропускная способность по разгрузке зоны сжатия, тс/м³ч; δ_c - насыпная плотность уплотненного материала в зоне сжатия, т/м³; s - рабочая ширина щели, мм; D - диаметр валка, м.

Удельная пропускная способность, рассчитанная по разгрузке зоны сжатия, в большинстве случаев расходится с рассчитанной по результатам тестирования. Соотношение \dot{m}_c/\dot{m}_f характеризует поведение материала в зоне сжатия. При $\dot{m}_c/\dot{m}_f < 1$ материал движется быстрее валков, что соответствует проявлению байпасов. При $\dot{m}_c/\dot{m}_f > 1$ либо материал движется медленнее валков, либо валок используется не на всю ширину [63, 92, 147].

Мощность привода, требуемая для вращения валков, определяется значением измельчающего усилия, которое, действуя на валок, препятствующего его вращению. Точка приложения к валку определяется относительно оси углом β его радиус-вектора. Измельчающее усилие может быть разложено на тангенциальную \vec{F}_T и радиальную \vec{F}_R составляющие. Тангенциальная составляющая \vec{F}_T и создает момент на валке, который необходимо уравновесить воздействием привода (рисунок 2.5).

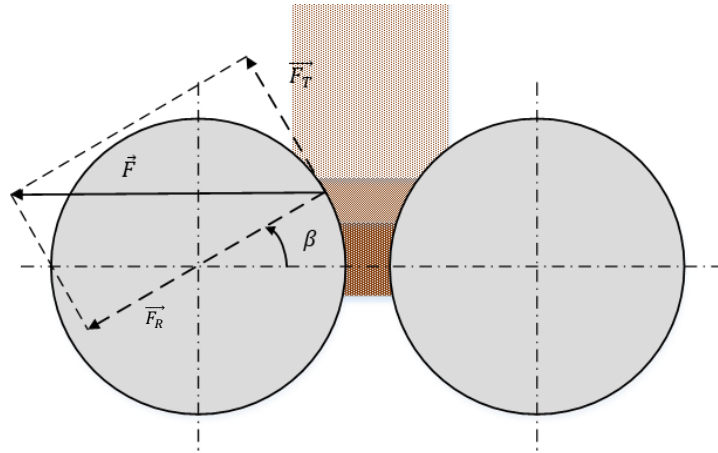


Рисунок 2.5 - Схема расчета мощности привода (составлено автором)

Мощность привода в зависимости от скорости вращения валка определяется по формуле (2.11):

$$P_R = \omega T = 2\pi \frac{n}{60} \frac{D}{2} F \sin \beta, \quad (2.11)$$

где P_R - мощность привода на один валок, кВт; ω - угловая скорость валка, 1/с; n - скорость вращения валка, об/мин; D - диаметр валка, м; F - измельчающее усилие, кН; β - угол радиус вектора точки приложения измельчающего усилия.

Общая мощность двух приводов равна (2.12):

$$P = 2P_R = \pi \frac{n}{30} DF \sin \beta. \quad (2.12)$$

Удельный расход энергии может быть рассчитан по формуле (2.13):

$$w_{sp} = \frac{P}{M} = \frac{\pi \frac{n}{30} DF \sin \beta}{\dot{m}_f D L u} = \frac{2u(1000DL\varphi) \sin \beta}{\dot{m}_f D L u} = \frac{2000 \sin \beta}{\dot{m}_f} \varphi. \quad (2.13)$$

В соответствии с полученной формулой удельный расход энергии является линейной функцией удельного усилия сжатия. На практике возможны некоторые отклонения от этой зависимости. Более высокая удельная пропускная способность материала приводит к меньшим потребным энергозатратам при постоянном удельном усилии сжатия [46, 47, 63, 92, 147].

2.2 Процессы и механизмы изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок

Рабочие поверхности валков валковых дробилок (футеровочные бандажки) в процессе эксплуатации находятся в условиях интенсивного механического воздействия со стороны дробимого материала. Контакт «валок - кусок породы» характеризуется высокими контактными давлениями, многократным циклическим нагружением, относительным скольжением и наличием абразивных частиц различной формы и твёрдости. В совокупности это определяет сложный,

многофакторный характер изнашивания, который не может быть отнесён к одному элементарному механизму.

В отечественной трибологии понятия «изнашивание» и «износ» чётко разграничены нормативными документами. Согласно ГОСТ 27674-88, изнашивание определяется как процесс отделения материала с поверхности твёрдого тела и (или) накопления остаточной деформации в его поверхностном слое при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и формы детали [16, 22, 55]. Иначе говоря, изнашивание — это процесс разрушения поверхности в результате трения. В то же время износ трактуется как конечный результат этого процесса, количественно выражаемый в установленных единицах длины, массы или объёма снятого материала. Например, снижение толщины футеровки на определённое число миллиметров или потеря определённой массы металла - величина износа как результата. Свойство материала сопротивляться изнашиванию в данных условиях трения называется износостойкостью, количественно оцениваемой скоростью или интенсивностью изнашивания (величина, обратная износу)

Процесс изнашивания деталей машин приводит к постепенному ухудшению их рабочих характеристик и потере работоспособности. На начальных стадиях изнашивание проявляется в небольших изменениях геометрии поверхности, однако со временем накопленный износ выходит за допустимые пределы, что может вызвать отказ узла или всей машины. В валковых дробилках футеровочные бандажи испытывают основную нагрузку при дроблении материала, поэтому их износ определяет ресурс работы дробилки. Контроль за изнашиванием футеровок имеют важное практическое значение: своевременная замена чрезмерно изношенных бандажей необходима для предотвращения аварий и простоев оборудования [10].

2.2.1 Классификация видов изнашивания

Среди основных механизмов разрушения поверхностей деталей особое место занимает абразивное изнашивание. Абразивным называется механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего воздействия твёрдых частиц или выступов. При этом более твёрдые включения (например, зёрна горной породы или твёрдые фрагменты руды) внедряются в контактирующую поверхность и, перемещаясь, снимают микроскопические частицы металла. Абразивное изнашивание характеризуется образованием борозд (рисок) и отрывом частиц материала, то есть реализуется механизм микрорезания или микроцарапания поверхности [16, 22]. Интенсивность абразивного изнашивания в первом приближении прямо пропорциональна нагрузке на контактную зону и пути трения, а также зависит от твёрдости материала. М.М. Хрущовым [49, 50]. установлена обратная пропорциональность износа и твёрдости металла при абразивном

царапаний: чем твёрже материал детали, тем большему сопротивлению он оказывает режущему действию абразива, и тем меньше объём снимаемого при прочих равных условиях материала. В классических работах отмечается влияние размера и формы абразивных частиц: увеличение размера абразива сначала увеличивает износ линейно, а после достижения некоторой критической величины зерна рост износа замедляется (крупные частицы уже не полностью врезаются в поверхность). Абразивный износ - один из наиболее интенсивных видов изнашивания, особенно актуальный для узлов, контактирующих с минеральным сырьём. В контексте футеровок валковых дробилок абразивное изнашивание занимает главную роль, так как рабочие валки непосредственно контактируют с твёрдыми дробимыми частицами породы, вызывающими истирание поверхности бандажей [10-12].

Другим важным видом механического износа является усталостное изнашивание, связанное с накоплением повреждений от повторных циклических нагрузок. Усталостным называют такое изнашивание, которое происходит в результате усталостного разрушения при многократном деформировании микрообъёмов материала поверхностного слоя. При циклическом контактном нагружении вблизи поверхности возникают переменные напряжения, ведущие к зарождению микротрещин. Постепенное развитие этих трещин и их объединение приводит к выбиванию мелких частиц материала с поверхности - тем самым реализуется износ по усталостному механизму. Признаками усталостного износа могут быть питтинги, шелушение, выкрашивание поверхностного слоя после определённого периода нагружения. В отличие от абразивного, усталостный износ не требует наличия твёрдых посторонних частиц - он может происходить даже при чистом качении или повторном давлении гладких тел, когда материал испытывает циклические напряжения. Однако, в реальных условиях часто сочетается действие абразива и циклической нагрузки. Для футеровочных бандажей валковых дробилок усталостный механизм проявляется как выкрашивание наклепанного (упрочнённого) слоя металла: после многократного прохождения твёрдых кусков через валки на поверхности образуются трещинки и отдельные чешуйки наклепанного металла отламываются. Этот процесс соответствует усталостному разрушению поверхностного слоя вследствие многократных деформаций от контактных нагрузок. Усталостное изнашивание особенно заметно при ударно-абразивном режиме работы [22, 55, 56, 73, 79].

В большинстве реальных случаев изнашивание имеет комплексный характер, представляя собой комбинацию нескольких механизмов одновременно. Для условий работы валковых дробящих агрегатов наиболее актуально сочетание абразивно-усталостного износа, которое можно обозначить как ударно-абразивный износ. При ударно-абразивном изнашивании твёрдые частицы не только истирают поверхность, но и наносят повторные ударные нагрузки, вызывающие усталостные

повреждения. В результате многократных ударов об абразивную среду на поверхности детали возникают наклеп и трещины, что ускоряет выкрашивание материала. Абразивный и усталостный механизмы действуют совместно: абразив снимает металл с поверхностного слоя, а циклические нагрузки ослабляют этот слой изнутри. Помимо комбинации механических факторов, в ряде случаев возможны и коррозионно-механические эффекты (например, при наличии влаги и реагентов происходит одновременная коррозия и истирание поверхности). Однако, для футеровок валковых дробилок химические факторы обычно не доминируют, поскольку основной вклад вносит именно чисто механическое изнашивание от контакта с рудой [10].

2.2.2 Условия работы футеровочных бандажей в валковых дробилках

Футеровочные бандажи валковых дробилок (в том числе HPGR) работают в экстремальных условиях, определяющих интенсивность их изнашивания. Во-первых, рабочая поверхность вала в процессе эксплуатации подвергается воздействию комплекса силовых и контактных факторов, обусловленных взаимодействием с дробимым материалом. В зоне дробления двух встречных валков частицы руды испытывают давление, достигающее десятков-сотен МПа, и передают это давление поверхностному слою бандажей. Нагрузки носят циклический характер - каждый участок поверхности вала многократно вступает в контакт с твёрдыми частицами по мере вращения. Футеровка подвергается повторному контактному нагружению с высокой удельной силой. Во-вторых, между поверхностью вала и рудными частицами присутствует относительное скольжение (особенно в прессах высокого давления), что приводит к абразивному трению.

Частицы породы, часто обладающие высокой твёрдостью (кварц, оксиды и пр.), царапают и режут металл футеровки при захвате и прокалывании материала. Исследования показывают, что износ валков HPGR в основном обусловлен механической деформацией от скольжения частиц по поверхности при высоком давлении. Реализуется совмещённое действие абразивного изнашивания (истирание поверхности частицами) и усталостного накопления повреждений (от пульсирующих нагрузок).

Дополнительным фактором является неоднородность абразивного материала. Куски руды различаются по твёрдости и размеру: мелкие твёрдые зёрна могут вызвать более сильное локальное истирание, особенно если они заклиниваются между валком и дробимым материалом. Крупные фрагменты породы, напротив, вызывают более мощные ударные импульсы, способствуя наклепу и выкрашиванию поверхности. Наблюдения за работой промышленных HPGR показывают, что наибольший износ обычно приходится на среднюю часть вала (где давление максимально), тогда как по краям износ несколько меньше. Также подвижный (плавающий) валок может изнашиваться

интенсивнее неподвижного из-за разницы в условиях нагружения. Неравномерность распределения давления и абразива по ширине вала приводит к неравномерному износу, что необходимо учитывать при оценке ресурса футеровки [46, 47, 92].

Материал футеровочных бандажей подбирается с учётом указанных факторов. Обычно применяются высокомарганцовистые стали или специальные износостойкие сплавы, способные наклепываться (упрочняться) под ударной нагрузкой. Например, сталь 110Г13Л (сталь Гадфильда) в исходном состоянии сравнительно мягкая (~200 НВ), но при ударных нагрузках её поверхностный слой упрочняется до ~ 500 НВ за счёт мартенситных превращений. Такой наклеп повышает сопротивление абразивному изнашиванию.

2.3 Теоретические модели и законы изнашивания, применяемые к узлам горных машин

2.3.1 Закон Арчарда и гипотеза Рэя (энергетический подход)

Гипотеза, выдвинутая в 1860 г. австрийским инженером А. Рэем, об энергетической природе износа является одной из первых попыток связать количественно параметры трения и износа [141]. Согласно гипотезе Рэя, объём изношенного материала пропорционален работе трения, совершаемой при относительном перемещении поверхностей. Энергия, рассеиваемая в процессе трения, расходуется на срезание микрочастиц с поверхности (2.14):

$$V \sim W_{\text{тр}}, \quad (2.14)$$

где $W_{\text{тр}}$ - работа сил трения.

Гипотеза Рэя обосновывала износ через энергетические затраты, однако не учитывала свойства материалов.

В 1953 г. Дж. Ф. Арчард, развивая идеи своих предшественников (в частности, работ Боудена и Тэбора по реальной площади контакта, и моделей Холма о механизме среза адгезионных соединений), предложил закон износа, названный впоследствии законом Арчарда. В базовой форме закон Арчарда утверждает, что объём износа пропорционален произведению нормальной нагрузки N на путь трения S и обратно пропорционален твердости материала H (2.15):

$$V = k \frac{NS}{H}, \quad (2.15)$$

где: V - общий объём образующегося износа (мм³); k - безразмерная постоянная (эмпирическая константа порядка 10^{-2} - 10^{-8} для различных условий); N - общая нормальная нагрузка, Н; L - расстояние скольжения, м; H - твердость самых мягких контактирующих поверхностей, НВ.

Закон Арчарда связывает энергетический подход Рэя с характеристиками материала: твёрдость H отражает способность материала сопротивляться пластическому проникновению другого тела, и чем выше она, тем меньше объём износа при данном нормальном усилии.

Коэффициент износа k обобщает влияние прочих факторов - относительной геометрии шероховатостей, химического взаимодействия, формы изнашиваемых частиц и т.д., и подбирается по экспериментальным данным.

Формула Арчарда - одна из самых широко используемых моделей для расчёта износа за цикл или за единицу пути трения. Следует отметить, что закон Арчарда - феноменологический и в каждом конкретном случае требует экспериментальной калибровки коэффициента k . Значения коэффициента k находятся опытным путём, например, для мягких металлов при сухом трении k порядка 10^{-2} - 10^{-3} , что означает снятие ~1% объёма взаимодействующего слоя за акт трения, а для износостойких материалов (сталей со смазкой, оксидной керамики и т.п.) k может быть 10^{-6} и менее. Коэффициент k часто интерпретируют как вероятность образования частицы износа при одном акте контакта двух микронеровностей. Причина в том, что при трении происходят изменения в поверхностном слое и процесс переходит в стадию, контролируемую уже не первоначальной твёрдостью, а другими факторами (например, хрупкостью наклепанного слоя и скоростью его выкрашивания). Тем не менее, расчёт по модели Хрущова М.М. на этапе приработки вполне соответствует модели Арчарда: в отсутствие наклепа интенсивность изнашивания прямо пропорциональна нагрузке и обратно пропорциональна твёрдости материала [49, 50, 55].

2.3.2 Методика И.В. Крагельского

Игорь Васильевич Крагельский - один из основоположников советской трибологии - разработал комплексный подход к расчету трения и износа [22, 73]. Методика Крагельского отличается тем, что она учитывает реальную картину контактирования поверхностей и режим деформации микроасперитов (упругий или пластический). Им введён важный параметр - удельный износ i , под которым понимается объём изношенного материала, отнесённый к единице пути трения и единице номинальной площади контакта. Удельный износ имеет размерность длины (мкм/м или мм/км и т.п.), либо безразмерную единицу (если задано в долях объёма на единицу пути), и удобен для обобщения экспериментальных данных.

Крагельский Н.В. предположил, что механизмы изнашивания можно описать едиными зависимостями, если правильно учесть характер деформации контакта. Им введена обобщённая кривая зависимости удельного износа i от относительного параметра внедрения ε (характеризующего соотношение номинального давления и пределом текучести, а также геометрию микронеровностей). Эта кривая охватывает три области:

(1) - область упругого деформирования контактов ($10^{-3} \leq \varepsilon \leq 10^{-2}$, $10^{-9} \leq I \leq 10^{-5}$): износ минимальный, преобладает упругая деформация, повреждения обратимы;

(2) - область пластического деформирования ($10^{-2} \leq \varepsilon \leq 10^{-1}$, $10^{-5} \leq I \leq 10^{-2}$): интенсивный рост износа, наклеп поверхности, накопление усталостных повреждений;

(3) - область микрорезания ($\varepsilon \geq 10^{-1}$, $10^{-2} \leq I \leq 10^{-1}$): доминирует режущий износ, разрушение поверхностного слоя, резкий рост интенсивности изнашивания (рисунок 2.6).

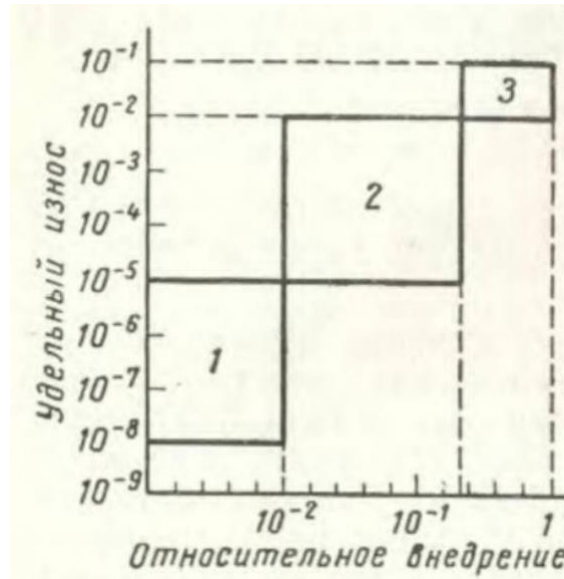


Рисунок 2.6 - Зависимость удельного износа от относительного внедрения [22]

При малых нагрузках (область (1)) износ минимален - поверхностные выступы пружинят без существенного разрушения, происходит лишь упругая деформация. В области (2) начинается пластическое смятие выступов - износ возрастает. В области (3) реализуется полное прорезание материала - износ резко возрастает на много порядков. По оценке Крагельского Н.В., при переходе от упругого режима к режущему интенсивность изнашивания может возрасти в десятки миллионов раз. Такие колоссальные изменения объясняют, почему износостойкость материала сильно зависит от условий нагружения: один и тот же материал в разных трибологических режимах может показывать совсем разные скорости износа.

Крагельским Н.В. были получены расчетные формулы для прогноза удельного износа в упругом и пластическом режимах контакта. Для случая упругого контакта им получено выражение (2.16):

$$I_h = \frac{0,6(1 - \mu^2)v^{1/2}q_a}{n\nu(v^2 - 1)K_2E}, \quad (2.16)$$

где μ — коэффициент трения; ν — параметр опорной рабочей поверхности; q_a — номинальное давление, Па; K_2 — коэффициент жесткости, Н/м; E — модуль упругости, Па; n — число циклов контакта.

Из формулы (2.16) следует, что износ при упругом трении накапливается медленно и растёт с квадратом давления и числом циклов, но обратно пропорционален упругости материала.

Для пластического контакта Крагельский Н. В. предложил другую формулу (2.17):

$$I_h = \frac{\left(\frac{\sigma_s + 2\tau}{\sigma_s - 2\tau} \right)^{\frac{t}{2}}}{\delta^t (HB)^{1 + \frac{t+1}{2\nu}}}, \quad (2.17)$$

где σ_s — предел текучести, Па; τ — удельная сила трения, Па; δ — разрывное удлинение, Па; t — коэффициент усталости; ν — параметр опорной рабочей поверхности; HB — твердость по Бринеллю.

Таким образом, формула (2.17) учитывает прочностные свойства материала: при пластическом деформировании износ зависит от отношения напряжения трения к прочности материала и пластичности (δ). Чем выше прочность и вязкость материала, тем меньше изнашивание при пластическом смятии.

Расчетные формулы (2.16) и (2.17) показывают, что режим контакта (упругий или пластический) кардинально влияет на интенсивность изнашивания. В случае валковых дробилок контакт поверхности вала с куском руды, как правило, находится на грани пластического деформирования: металлическая футеровка значительно мягче твёрдого минерала, и выступы породы внедряются пластически. Следовательно, более актуальна модель пластического износа. Из формулы (2.17) также следует, что повышенная прочность (предел текучести) и вязкость футеровочного материала снижают износ, а поэтому применяются стали с высокой прочностью и способностью к деформационному упрочнению [22, 73].

Методика Крагельского Н. В. включает учет и усталостного компонента износа. Изнашивание рассматривается как процесс накопления повреждений, схожий с усталостью материала. В частности, для адгезионно-усталостного изнашивания предложена модель, где количество циклов до возникновения износа аналогично числу циклов до усталостной трещины. Эти идеи создали основу для применения правил накопления повреждений (правило Пальмгрена-Минера) к расчёту износа при переменных нагрузках.

Практическая значимость метода И.В. Крагельского определяется тем, что интенсивность изнашивания используется как ключевой показатель, на основе которого устанавливаются оптимальные режимы трения при минимальном износе. Например, для смазанных пар трения показано, что износ минимален в области упругого контакта при малых величинах относительного внедрения. Для конструкционных материалов эта область достигается либо снижением нагрузки,

либо применением твёрдых покрытий. В случае валков снижение нагрузки невозможно (она задана технологией дробления), поэтому повышение износостойкости возможно либо за счёт увеличения твёрдости (чтобы сдвинуть контакт к упругому режиму), либо за счёт внешних факторов - смазки, уменьшения трения и температуры, что уменьшит величину τ в уравнении пластического износа.

2.3.3 Правило Минера для накопления повреждений при изнашивании

Правило линейного накопления повреждений, предложенное в 1940-х годах М.А. Минером для задач усталостного разрушения, состоит в том, что при вариативных режимах нагружения, повреждения от каждого режима накапливаются линейно. В формулировке Минера сумма отношений фактического числа циклов n_i при данном режиме к числу циклов до разрушения N_i для этого режима равна 1, то есть в момент разрушения имеет место равенство (2.18):

$$\sum_{i=0}^n \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (2.18)$$

Изначально правило (2.18) применялось к усталости металлов, а в последствии и на процессы изнашивания, рассматривая износ как результирующее накопление микроповреждений от каждого режима трения.

В трибологии применение правила Минера интерпретируется следующим образом: если деталь в течение времени эксплуатации функционирует в различных режимах трения, отличающихся уровнем нагрузки, скоростью и другими параметрами, то суммарный износ определяется как сумма вкладов износа, возникающих в каждом из этих режимов и приведённых к единому предельному критерию [91].

Использование правила Минера для описания процессов изнашивания возможно лишь с существенными ограничениями. В отличие от классических задач усталости, где накопленные повреждения, как правило, не взаимодействуют между собой, в условиях трения состояние поверхности, сформированное на предыдущем режиме нагружения, может оказывать влияние на интенсивность износа при последующем режиме эксплуатации.

Закон Арчарда не способен учесть эффект последовательного накопления повреждений: он предсказывает одинаковый износ для одинаковых NS , что противоречит наблюдениям. Причина - изменяющееся состояние поверхности (наклеп, возникшие трещины, изменение шероховатости) после первой фазы нагружения, что изменяет сам характер износа во второй фазе.

Для валковых дробилок, где режим нагружения может меняться (например, разная крупность и твёрдость руды по ходу эксплуатации, разные настройки давления), строгого применения правила Минера не отмечено в литературе. Однако, при расчёте ресурса футеровки выделяют этапы

приработки (малая скорость износа) и ускоренного износа, а суммарный ресурс оценивают как сумму периодов этих этапов. Предполагается, что износ на первом этапе потребляет небольшую долю ресурса, а износ на втором - основную долю. Если же условия эксплуатации меняются более сложным образом, целесообразно в расчётах пользоваться удельными показателями изнашивания (например, мм/1000 часов при данном значении давления и вида руды) и интегрировать их по времени. Такой подход также можно считать вариантом правила суммирования повреждений, где вместо циклов интегрируется текущая скорость износа во времени.

2.3.4 Энергетические и контактно-механические подходы в теории износа

Все рассмотренные модели можно условно разделить на две группы: энергетические подходы и контактно-механические подходы. Энергетический подход фокусируется на балансе энергии в процессе трения: сколько энергии расходуется на образование новых поверхностей (частиц износа), на пластическую деформацию, на тепло и т.д. К этой группе относится гипотеза Рэя (износ пропорционален работе трения), а также более современные теории, связывающие интенсивность износа с мощностью, рассеиваемой при контакте. Энергетические подходы удобны тем, что объединяют разные механизмы в единый критерий и хорошо работают в макроскопическом плане, например, в условиях абразивного изнашивания без смазки доля энергии, расходуемой на снятие материала, считается постоянной, откуда напрямую следует закон Арчарда (с поправкой на твёрдость, отражающую затраченную энергию на пластическую деформацию) [55]. В то же время чисто энергетические модели не детализируют, как именно происходит отделение частиц материала - через срез адгезионных мостиков, усталостное растрескивание или выкрашивание [145].

Контактно-механические подходы рассматривают изнашивание на уровне взаимодействия отдельных микронеровностей контактных зон. Так, модель Арчарда исходно базируется на представлении о контакте и пластическом деформировании, модель Хрущёва М.М. - на экспериментальных данных о характере царапания поверхности твёрдыми частицами, то есть на механике резания; методика Н.В. Крагельского - на анализе напряжённо-деформированного состояния в контактном микрообъёме (упругого или пластического) [22, 50, 55, 138].

Современные теории изнашивания стремятся объединить оба подхода. Классическим примером служит модель Фрэнка-Арчарда: она сочетает энергетический подход Рэя с контактной механикой через параметр твёрдости - фактически вводится величина энергии на единицу объёма изнашиваемого материала $\sim H$. Последние достижения в этой области рассматривают изнашивание как результат роста микротрещин на разных масштабах шероховатости и тоже оперируют понятием энергии деформации, расходуемой на образование трещин [10].

Для инженерных расчётов изнашивания футеровок валковых дробилок: энергетический подход может дать оценку общего износа по энергозатратам на дробление (например, какая доля энергии дробления уходит на износ оборудования), а контактно-механический - распределение износа по поверхности вала и влияние свойств материалов. Энергетический метод удобен для масштабных оценок, например, известно эмпирическое правило, что 3-5% энергии, расходуемой в дробилке, уходит на изнашивание ее рабочих органов (остальное на разрушение руды и тепло), то исходя из мощности машины и времени ее работы, можно оценить объём износа.

2.3.5 Ограничения существующих моделей применительно к валковым дробилкам

Модели износа (2.14) - (2.18) успешно применяются в трибологии, однако при попытке прямого использования их для футеровок валковых дробилок возникают существенные ограничения. Причины связаны со сложностью условий работы дробилок.

1. Большинство классических моделей рассчитано либо на чисто абразивный, либо на чисто адгезионный износ, тогда как в валках присутствует сочетание абразивного и усталостного механизмов. Закон Арчарда описывает в основном абразивно-адгезионное снятие материала при скольжении и не учитывает усталостное выкрашивание. В рамках модели Арчарда последнее трудно отразить, поскольку она линейна.

2. Переменные условия нагрузки и трения. При эксплуатации дробилки параметры процесса меняются: состав и твёрдость руды, скорость подачи и др. Классические формулы предполагают постоянные условия за весь рассматриваемый период. В правиле Минера грубо учитываются переменные условия эксплуатации (последовательность режимов тоже влияет на изнашивание). Так, если валки эксплуатировались на относительно мягкой руде (наклеп без сильного износа), а затем на твёрдой руде, то последняя может вызвать сильное выкрашивание (т.к. наклепанный слой станет хрупким под новой экстремальной нагрузкой). Обратная ситуация - после износа на твёрдой руде переход на мягкую - может приводить к самополировке поверхности и замедлению износа. Ни одна из рассмотренных моделей не учитывает непосредственно состояние поверхности при нагружении. Для учёта этого требуются более сложные модели изнашивания с внутренними переменными состояниями (например, доля наклепанного слоя, плотность дислокаций, длина трещин и пр.), либо прямое численное моделирование структуры материала [22].

3. Влияние температуры и среды. При работе валковых дробилок, особенно в зоне контакта выделяется тепло от трения и деформации. Температура может кратковременно повышаться, влияя на свойства материала поверхности (отпуск наклепанного слоя, снижение твёрдости, окисление). Классические модели, как правило, температуру не учитывают. Известно, что уравнение Арчарда не

учитывает влияние температуры и скорости скольжения в условиях интенсивного изнашивания. При повышении температуры износ может возрастать лавинообразно, что выходит за рамки линейной модели.

4. Геометрическая сложность контакта. Футеровка вала может представлять сложную поверхность, а частицы руды имеют произвольную форму. Контакт происходит не по схеме «плоскость по плоскости», а по множественным локальным зонам. Модели типа Арчарда оперируют понятием номинальной площади и средней нагрузки, что является значительным упрощением. Контактно-механические модели Н.В. Крагельского, учитывающие статистику микроконтактов, предполагают знание параметров шероховатости и деформаций, которые трудно определить для поверхности с постоянно обновляющимися повреждениями. Современные подходы - численные методы (DEM, FEM) позволяют отслеживать эволюцию контактов и локального износа без явного использования упрощённых формул. Однако они весьма ресурсозатратны вычислительно и требуют верификации.

5. Эмпирические коэффициенты. Важное практическое ограничение моделей - необходимость калибровки на основе экспериментов. Коэффициент износа k в законе Арчарда, коэффициенты в формулах Хрущёва, Крагельского выводятся из опытных данных для конкретных материалов и условий. Перенос их на другие условия (например, с лабораторного теста на промышленную дробилку) не гарантирует точности. При моделировании изнашивания футеровок валков методом Арчарда разброс возможных значений k очень велик - от 10^{-4} до 10^{-7} [47]. Это снижает прогностическую ценность модели, превращая её фактически в способ экстраполяции экспериментальных результатов. В фундаментальных моделях требуются параметры поверхности и материала, которые не всегда можно измерить (например, реальная площадь контакта внутри слоя дробимого материала неизвестна).

Учитывая перечисленные ограничения, при анализе изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок целесообразно применять комплексный подход. Он может включать:

- (а) - использование закона Арчарда для оценки среднего объёма износа за определённый тоннаж переработанной руды (с подбором коэффициента по калибровочным замерам износа валков);
- (б) - применение критериев Хрущёва М.М. для оценки влияния твёрдости материала вала и абразива (например, обосновывая выбор более твёрдого сплава для футеровки);
- (с) - учёт усталостного выкрашивания через установление граничного состояния наклепанного слоя, то есть определение, при какой глубине трещин валок следует переворачивать или менять;

(d) - численные методы для анализа распределения напряжений и износа по ширине валка, особенно, если на валке есть структурные элементы.

2.4 Взаимосвязь процессов изнашивания с эксплуатационными показателями валковой дробилки

Изнашивание футеровки валков валковой дробилки приводит к ухудшению её технологических и надёжных характеристик. При интенсивной эксплуатации поверхности валков истираются, снижаются размеры эффективной поверхности и коэффициент трения, что отражается на производительности, степени измельчения и энергоэффективности дробилки. При сильном изнашивании футеровки валка ухудшается захват кусков, что приводит к снижению производительности. Износ увеличивает контактное сопротивление дроблению и потери энергии, снижает КПД дробилки и ухудшает качество выпускаемой продукции - материал становится менее однородным, вариативным по гранулометрическому составу. Помимо этого, изношенные детали оборудования требуют более частых ремонтов и простоев, снижая коэффициент технической готовности агрегата [10-12, 16].

Производительность (пропускная способность): при износе диаметры валков и геометрия захвата изменяются. Производительность снижается пропорционально отношению изношенного диаметра к его исходному значению. Кроме того, из-за износа ухудшается захват (коэффициент трения материала f на футеровке изменяется).

Степень дробления: при износе поверхности валков фактическая ширина разгрузочной щели изменяется - зазор между валками увеличивается. Увеличение зазора понижает степень дробления (увеличивает крупность продукта) и снижает давление на куски материала. Так, предельный угол захвата α материала связан с коэффициентом трения f и определяется как $\alpha \leq \arctg f$ (формула 2.3) при ухудшении трения угол захвата уменьшается, что ведёт к образованию более грубого помола. Неравномерный износ по длине валка (кольцевые канавки) дополнительно приводит к неравномерной фракции на выходе [3, 36].

Удельная энергоёмкость: износ увеличивает сопротивление дроблению и трение между деталями. В результате дробилке необходимо больше энергии на дробление единицы массы материала. Удельная энергоёмкость определяется как (2.19):

$$H = \frac{N}{Q}, \quad (2.19)$$

где N - потребляемая мощность, кВт; Q - производительность т/ч.

Потери энергии на трение и деформацию увеличиваются, а часть энергии расходуется на преодоление износа и ударные нагрузки. Последнее снижает общую эффективность агрегата и

приводит к росту удельного энергопотребления дробильного процесса. В предельном случае снижается КПД устройства.

Надёжность и техническая готовность: износ валков сокращает ресурсы оборудования и увеличивает частоту отказов. Коэффициент технической готовности $K_{\text{тех}}$ (согласно ГОСТ Р 56111-2014), характеризующий долю времени агрегата в работоспособном состоянии, снижается. По определению (2.20):

$$K_{\text{тех}} = \frac{T_1}{T_1 + T_2}, \quad (2.20)$$

где T_1 - наработка без отказов, ч; T_2 - время простоев (ремонтов, наладки), ч.

При изнашивании T_2 растёт (необходимость ремонтов, замены валков), а T_1 сокращается, поэтому $K_{\text{тех}}$ ухудшается. Аналогично надёжность агрегата (вероятность безотказной работы) снижается из-за увеличения числа внештатных ситуаций [15].

Частота внеплановых простоев и затраты на обслуживание: изношенные валки требуют регулярной замены или ремонта, что увеличивает число внеплановых простоев. Ремонтные циклы укорачиваются, возрастают трудозатраты и материальные расходы на замену футеровки. Это приводит к росту эксплуатационных затрат и снижению показателя эксплуатационно-экономической эффективности дробильно-конвейерной секции.

2.5 Выводы по главе 2

Выполнен комплексный анализ эксплуатационных характеристик двухвалковых промышленных дробилок, механизмов изнашивания футеровочных бандажей, а также существующих теоретических и инженерных подходов к описанию и повышению ресурса рабочих поверхностей валков. По результатам проведённого анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Установлено, что двухвалковые дробилки (в том числе с гладкими валками и валки высокого давления — HPGR) широко применяются в стационарных, полумобильных и мобильных дробильных установках горнодобывающей и перерабатывающей промышленности. Основными эксплуатационными показателями, определяющими эффективность их работы, являются производительность, степень дробления, удельная энергоёмкость и ресурс футеровочных бандажей валков. При этом ресурс футеровки является одним из ключевых факторов, напрямую влияющих на технико-экономические показатели эксплуатации дробильных агрегатов. Показано, что процесс изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок носит многофакторный и комбинированный характер.

2. Установлено, что существующие модели изнашивания, как правило:

- предполагают постоянство физико-механических свойств материала футеровки;
- не учитывают изменение микротвёрдости и шероховатости поверхности в процессе эксплуатации;
- не описывают переход от стадии упрочнения к стадии деградации;
- не связывают накопление усталостных повреждений с геометрическим изменением вала.

В результате их применение для прогнозирования ресурса футеровочных бандажей валковых дробилок носит ограниченный характер.

3. В рамках стандартного инженерного расчёта валковых дробилок рассмотрены условия захвата материала валками и получены зависимости, связывающие угол захвата, коэффициент трения, диаметр валков, ширину разгрузочной щели и максимальный размер захватываемого куска. Показано, что для дробилок с гладкими валками условия захвата существенно ограничивают допустимую крупность питания и область их применения.

На основании выполненного анализа обоснована необходимость разработки комплексной математической модели изнашивания футеровочных бандажей валковых дробилок, учитывающей:

- эволюцию микротвёрдости поверхностного слоя;
- изменение параметров поверхности футеровочного банджа;
- накопление усталостных повреждений;
- геометрическое отклонение рабочей поверхности валков;
- влияние эксплуатационных параметров и режимов работы.

Решение данной задачи положено в основу дальнейших исследований, представленных в последующих главах диссертационной работы.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Валковые дробилки широко применяются для дробления различных руд и материалов в горной промышленности. Существенный недостаток валковых дробилок - это интенсивный и неравномерный износ рабочих поверхностей валков (футеровочных бандажей) при переработке твёрдых и абразивных материалов. Цилиндрические футеровочные бандажи являются ключевыми деталями валковой дробилки, непосредственно контактирующей с дробимым сырьём, и подвержены абразивному изнашиванию, который определяется рядом факторов. Наиболее значимым из этих факторов выступает природа перерабатываемого материала - его прочностные и абразивные свойства (твёрдость породы, минералогический состав и др.). Традиционно повышение ресурса футеровки достигается за счёт применения материалов повышенной твёрдости и износостойкости. Например, установлено, что абразивный износ футеровок с интегрированными штифтами из карбида вольфрама может быть до 30 раз менее интенсивным, чем у гладких стальных бандажей, что отражает непосредственную связь их износостойкости с твёрдостью материала. Тем не менее, даже использование сверхтвёрдых элементов не устраняет полностью проблему изнашивания - со временем футеровочные бандажи неизбежно требуют замены по мере накопления повреждений. Таким образом, задача повышения долговечности бандажей валковых дробилок остаётся актуальной и требует комплексного научно-технического подхода [10].

В главах 1-2 настоящей диссертационной работы выдвинуто предположение о локально-детерминированной природе процесса изнашивания. Для проверки выдвинутого предположения и прогнозирования состояния поверхности футеровочного бандажа необходимо уточнить существующие модели исследований. В настоящей главе диссертационного исследования уделяется внимание экспериментальному подтверждению предполагаемых механизмов изнашивания, разработке математической модели и ее верификации, а также получению дополнительных данных, необходимых для разработки метода повышения долговечности бандажей.

3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований

Программа экспериментальных исследований формируется в соответствии с поставленными задачами и отражает комплекс намеченных теоретических и экспериментальных мероприятий, необходимые технические средства для их реализации, а также ожидаемые результаты и возможности их практического использования.

Лабораторные испытания абразивного износа материала бандажей. На первом этапе проводятся лабораторные опыты по износу образцов материала футеровочного бандажа в контролируемых условиях. Для этого используются специализированные испытательные установки

- машины трения, позволяющие воспроизводить основные факторы процесса изнашивания: нормальную нагрузку, относительное движение (трение) и присутствие абразивных частиц. Параметры испытаний (нагрузка прижатия образца, скорость скольжения, характеристики абразива) выбираются для условий реальной работы валков, принятых в модели главы 2. В ходе лабораторных испытаний фиксируются количественные показатели изнашивания - потеря массы образца, глубина (линейный) износа и скорость износа материала. Данный этап позволяет получить исходные экспериментальные данные о стойкости материала бандаж и проверить основные положения разработанной математической модели в упрощённых условиях.

Стендовые испытания узла дробилки в приближённых условиях. На втором этапе выполняются эксперименты на опытном стенде, воспроизводящем условия работы валкового дробящего агрегата (рисунок 3.1). В качестве стенда используется лабораторная установка дробилки с комплектом сменных валков. В процессе стендовых испытаний валок подвергается износу при нагрузках и режимах, характерных для промышленной эксплуатации агрегата. Данный этап позволяет проверить механизм изнашивания в условиях, близких к реальным, и провести валидацию разработанной математической модели на уровне узла машины. Полученные данные сопоставляются с результатами лабораторного этапа, что даёт возможность оценить её адекватность при учёте сложного взаимодействия в системе «бандаж-материал».



Рисунок 3.1 - Испытательный стенд (фото автора)

3.2 Методики проведения экспериментальных исследований

Объектами исследования явились футеровочные бандаж валков дробилок, изготовленные из износостойкой стали 45Х (масштабный коэффициент подобия 1:20 по отношению к промышленным валкам) (рисунок 3.2), применяемой в дробильном оборудовании. Эксплуатация первой пары валков составила период времени 10-50 ч., второй - 80-180 ч., третьей - 250-450 ч.,

четвертой - 600-900 ч., пятой - 1100-1600 ч. В качестве абразивной среды использовался материал, имитирующий реальные абразивные частицы руды: применялись образцы промышленного абразива (брусок оксида алюминия определённой зернистости), фракции вскрышной породы Экибастузского месторождения, отобранные на предприятии.



Рисунок 3.2 - Набор валков (фото автора)

На рабочую поверхность части образцов наносилось упрочняющее покрытие на основе композиции WC-TiN, предназначенное для повышения сопротивления абразивному износу. Данная композиция содержит карбид вольфрама и нитрид титана, обладающие высокой твёрдостью и износостойкостью [10].

3.2.1 Подготовка образцов к испытаниям

Подготовка образцов (резка, шлифовка, маркировка). Заготовки образцов вырезались из цельного бандажа. Резка образцов проводилась на прецизионном станке абразивной резки АТМ Brillant 220 (рисунок 3.3) с использованием алмазных отрезных кругов в среде СОЖ (среда охлаждающей жидкости), обеспечивающей отсутствие температурного влияния в процессе резки.



Рисунок 3.3 - Установка точной резки ATM Brillant 220 (фото автора)

В итоге оба валка были разделены на 6 частей (на рисунке 3.4 и рисунке 3.5 указано, какая часть для какого исследования была подготовлена). Аналогичные исследования производились для других пар образцов.

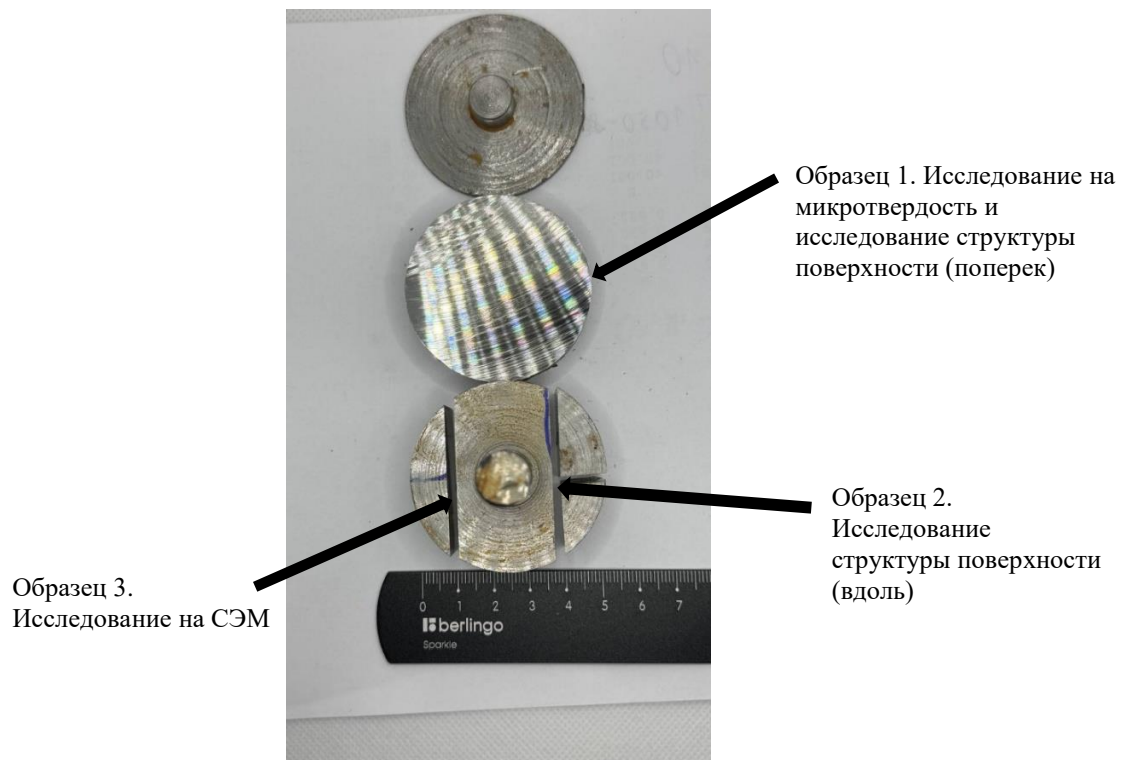


Рисунок 3.4 - Изношенный вал в разрезанном виде, время эксплуатации 10-50 ч (фото автора)

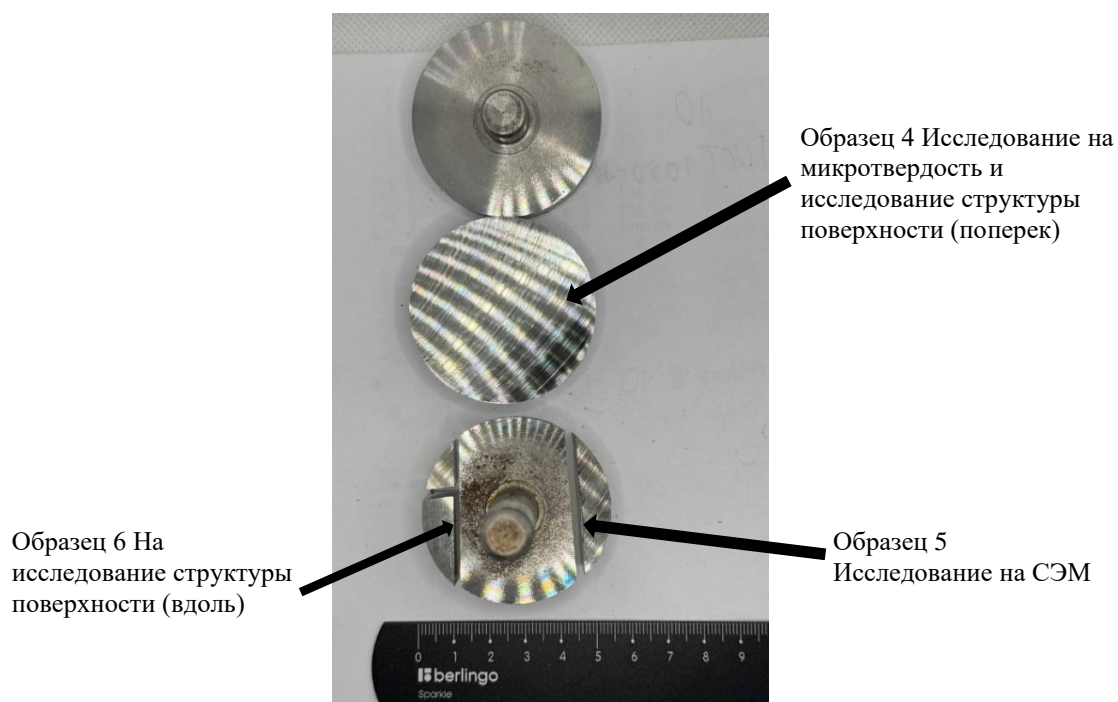


Рисунок 3.5 - Исходный валок в разрезанном виде (фото автора)

После резки образцы подвергались шлифовке: механическая обработка плоскошлифовальным станком. Шлифование проводилось до получения требуемой шероховатости базовой поверхности перед нанесением покрытия ($R_a=1,6-3,2$ мкм) [17].

Для дальнейшей шлифовки и полировки образцов № 2 и № 6 (рисунок 3.4 и рисунок 3.5.) была проведена запрессовка в фенольную смолу на установке ATM Opal 460 (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 - Установка для запрессовки ATM Opal 460 (фото автора)

После резки и запрессовки следует этап шлифовки и полировки (для исследования структуры необходима полированная поверхность) на установке ATM Saphir 560 (рисунок 3.7). При шлифовке использовались шкурки разной дисперсности (от P80 до P1200). Полировка осуществлялась на

специальном сукне для полировки с использованием алмазных суспензий с дисперсностью 9 и 6 мкм.



Рисунок 3.7 - Установка для шлифподготовки и полировки *ATM Saphir 560* (фото автора)

В результате были получены следующие образцы для исследования (рисунок 3.8).

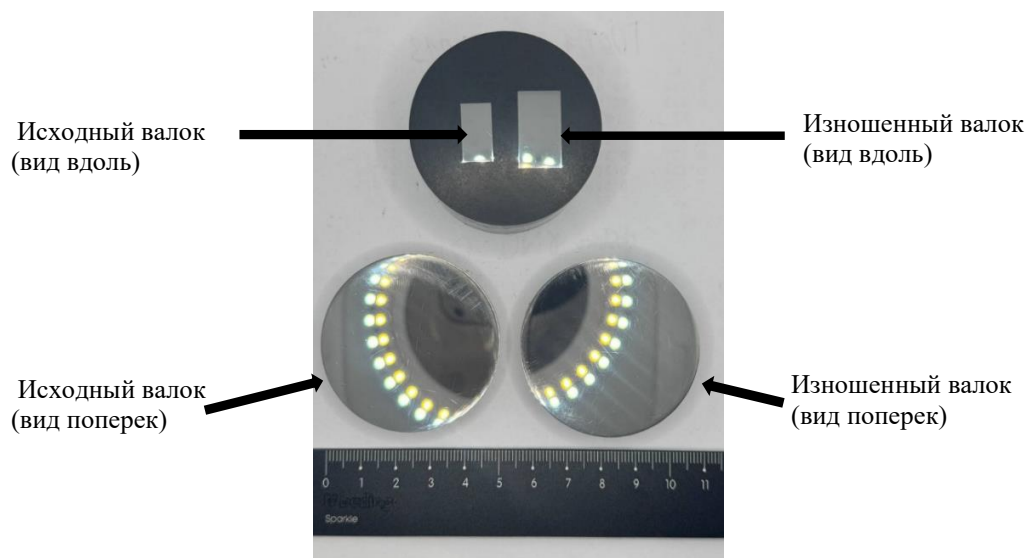


Рисунок 3.8 - Образцы после шлифовки и полировки (фото автора)

Дополнительно для проведения атомно-силовой микроскопии (АСМ) были подготовлены продольные спилы валков (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 - Спилы валков для АСМ (фото автора)

3.2.2 Методика нанесения упрочняющих покрытий

Процесс нанесения упрочняющих покрытий на основе WC-TiN осуществляется методом плазменного напыления и включает в себя несколько последовательных этапов, обеспечивающих высокую адгезию, равномерность и целостность покрытия, а также требуемые характеристики прочности и износостойкости (рисунок 3.10):

Технология нанесения упрочняющего покрытия на основе композиции WC-TiN включает несколько последовательно выполняемых этапов. На первом этапе выбирают состав порошковой композиции и способ её нанесения. В настоящей работе в качестве упрочняющего материала рассматривается композиция WC-TiN, а в качестве метода формирования покрытия — плазменное напыление, позволяющее получать равномерный слой на рабочей поверхности банджа при высокой скорости осаждения частиц.

Для обеспечения стабильности процесса используют порошок с фракцией частиц 14–45 мкм. Такой диапазон крупности обеспечивает устойчивую подачу порошка в плазменную струю и способствует формированию плотного покрытия с равномерным распределением упрочняющих фаз. Перед напылением порошковый материал подвергают сушке в течение 1–2 ч при температуре 100–120 °С, что необходимо для удаления влаги и снижения вероятности нестабильной подачи порошка, образования пор и локальных дефектов в покрытии.

Подготовка поверхности банджа включает механическую обработку и очистку. На первом этапе выполняется шлифовка поверхности образца для удаления дефектного поверхностного слоя, следов окисления и загрязнений, а также для формирования геометрии поверхности, обеспечивающей надежное сцепление покрытия с основным металлом. После механической обработки поверхность обезжиривается ацетоном (необходимо для удаления масляных и технологических загрязнений, способных ухудшить адгезию напыляемого слоя). Участки изделия, не подлежащие обработке, включая резьбовые зоны, посадочные поверхности и сопрягаемые элементы, защищаются термостойкими лентами и экранами.

Перед началом напыления упрочняющего покрытия выполняется предварительный подогрев поверхности до 80–150 °С. Подогрев помогает снизить температурный градиент между основным металлом и напыляемыми частицами, тем самым уменьшается риск термического шока. Кроме того, подогрев поверхности способствует более стабильному формированию покрытия. Затем наносится промежуточный подслоя толщиной 50–100 мкм, выполняющий функцию буферной зоны между основным металлом банджа и упрочняющим покрытием. Наличие подслоя позволяет снизить различие в термомеханических свойствах сопрягаемых материалов и повысить устойчивость покрытия к отслаиванию при последующем контактно-абразивном нагружении.

Основной упрочняющий слой WC–TiN наносят до толщины 0,5–2,0 мм в зависимости от условий эксплуатации, требуемого ресурса и предполагаемой интенсивности изнашивания. После напыления выполняют контроль качества покрытия (методами 3D-сканирования, микроскопией). На данном этапе оценивают равномерность слоя, отсутствие видимых дефектов, трещин, отслаиваний и локальных зон пористости; при необходимости дополнительно применяют ультразвуковой контроль. Завершающей операцией является механическая дообработка покрытия, включающая шлифование рабочей поверхности до шероховатости $R_a = 1,6–3,2$ мкм. Такая обработка позволяет обеспечить требуемую геометрию поверхности, снизить концентрацию неровностей и подготовить бандаж к работе в условиях абразивного контакта.

Окончательный контроль качества включает металлографическое исследование структуры покрытия, оценку его плотности, характера распределения упрочняющих фаз, наличия пор, микротрещин и состояния зоны сцепления покрытия с основным металлом. Полученные данные позволяют оценить пригодность сформированного слоя к эксплуатации в условиях повторного контактно-абразивного воздействия [57, 88].

На рисунок 3.10 приведена принципиальная схема принятой технологии напыления.

Выбор состава порошка и метода нанесения покрытия	WC-TiN – плазменное напыление
Подготовка необходимого состава порошка	Фракция 14-45 мкм
Сушка порошка	Сушка 1-2 ч при температуре 100-120 °С
Механическая обработка изделия	Шлифование, удаление дефектного слоя
Обезжиривания	Ацетон, изопропанол
Изоляция поверхностей, не подлежащих обработке	Термостойкие ленты, экраны
Предварительный подогрев	80-150 °С
Напыление подслоя	Толщина 50-100 мкм
Напыление покрытия	Толщина 0,5-2,0 мм
Контроль толщины и качества покрытия	УЗК, визуальный контроль
Механическая обработка	Шлифование, $R_a=1,6-3,2$ мкм
Окончательный контроль качества изделия	Металлография

Рисунок 3.10 - Методика нанесения упрочняющих покрытий (составлено автором)

Для нанесения упрочняющего покрытия WC-TiN использовалась промышленная установка BP-5000 производства Shanghai Biapu Technology Co (рисунки 3.11-3.13), предназначенная для автоматизированного плазменного напыления тугоплавких материалов.



Рисунок 3.11 - Установка плазменного напыления Shanghai Biapu Technology Co, BP-5000
(фото автора)

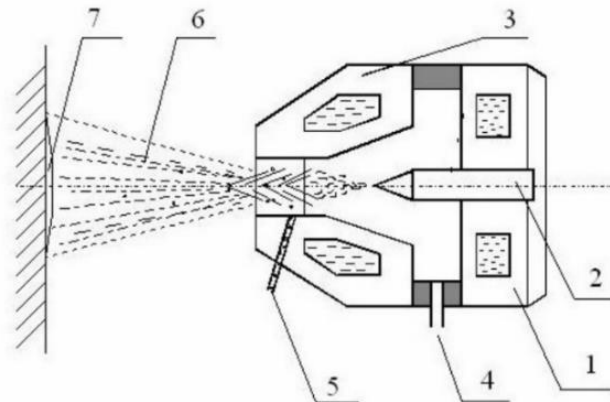


Рисунок 3.12 - Схема плазменно-порошкового напыления: 1 - корпус плазмотрона; 2 - катод (вольфрамовый электрод); 2 - катод (охлаждаемое сопло); 4 - канал подачи плазмообразующего газа; 5 - инжектор для подачи порошка; 7 - подложка (напыляемая поверхность)
(составлено автором)

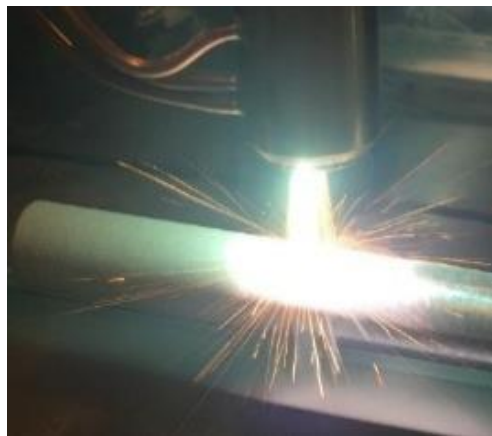


Рисунок 3.13 - Процесс нанесения упрочняющего покрытия (фото автора)

В таблице 3.1 представлены образцы: Э-1,2,3 - эталонные образцы, Изн.-1,2 - изношенные образцы, отличающиеся по условиям нанесения покрытия и его толщине. Во всех случаях использовалась двухслойная система покрытия WC-TiN, где первый слой служит буфером для улучшения адгезии, а второй — основным упрочняющим элементом.

Толщина сформированного покрытия колебалась от 1,3 до 2,3 мкм, что соответствует заданным параметрам прочности и ресурса.

Таблица 3.1 - Характеристика упрочняющих покрытия для различных образцов (по данным автора)

Маркировка образца	Напыление	Толщина слоя напыленного, мкм	Маркировка стали вала
Э-1	-	-	Сталь 45Х
Э-2	Двухслойная WC-TiN	1,3-1,4	Сталь 45Х
Э-3	Двухслойная WC-TiN	2,1-2,3	Сталь 45Х
Изн.-1	Двухслойная WC-TiN	1,3-1,4	Сталь 45Х
Изн.-2	Двухслойная WC-TiN	2,1-2,3	Сталь 45Х

3.2.3 Методика абразивных испытаний

Установка МТВП (рисунок 3.14) - машина возвратно-поступательного трения с подвижным столом. Машина оснащена различными захватами для удержания образцов плоской и цилиндрической форм, системой нагружения образца (созданием прижимающей силы до 650 Н) с помощью гирь, а также подвижным столом для закрепления контртела с регулировкой скорости (0-50 см/мин) и амплитуды перемещения (5-150 мм). На столе может быть установлена емкость, заполненная жидкостью для смазки и охлаждения зоны трения [42]. В процессе испытаний встроенным датчиком регистрируется сила трения с периодичностью: примерно 1 измерение в секунду.



Рисунок 3.14 - Установка МТВП [42]

Схема лабораторных испытаний возвратно-поступательная, с цилиндрическим образцом, прижатым к абразивной поверхности торцевой частью. Схема приведена на рисунок 3.15.

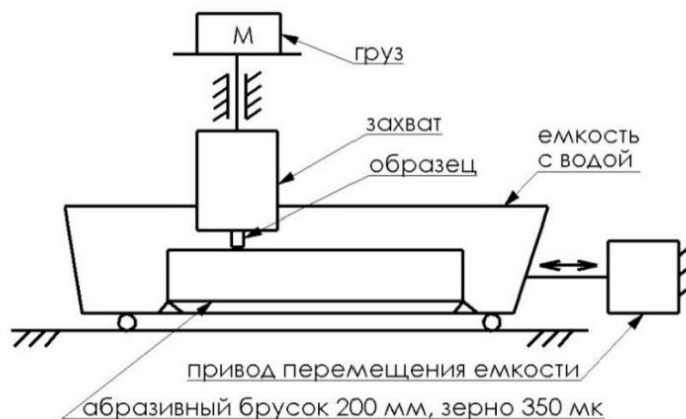
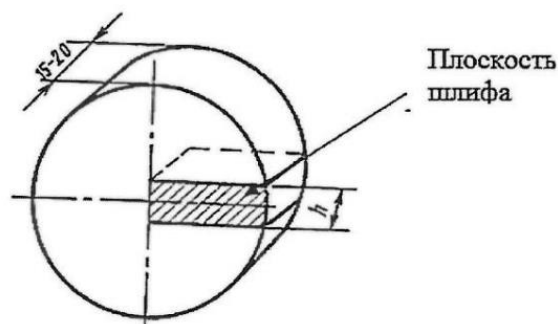


Рисунок 3.15 - Схема лабораторных испытаний на установке МТВП [42]

Сила прижатия образца 5 кгс, при площади торцевой поверхности $0,785 \text{ см}^2$ давление в зоне контакта при испытаниях составило $6,366 \text{ кг/см}^2$. Скорость в контакте образца с абразивным бруском 8 мм/с, амплитуда возвратно-поступательного движения 120 мм, частота возвратно-поступательного движения 0,067 Гц (4 цикла в минуту). Средняя скорость при испытании составила 0,48 м/мин. Температура воды при испытании контролировалась с периодичностью 10 мин. Образцы и контртело для абразивных испытаний Цилиндрические образцы $d7$ испытывались в течение 1 часа с замерами линейного износа каждые 15 минут трения. Замер износа осуществлялся вручную штангенциркулем с точностью 0,05 мм. В качестве контртела использованы абразивные бруски из оксида алюминия размером $200 \times 50 \times 20$ мм, зернистость 200 мкм. Трение происходит под слоем воды для охлаждения и вымывания продуктов износа металла и абразива. Брусок смещается раз в 15 минут таким образом, что область трения переносится на неработавшую поверхность бруска [18, 42, 53].

Из представленных образцов изготовлены образцы для металлографических исследований в соответствии с рисунком 3.16. Металлографические образцы располагались далее 30 мм от края напыленного слоя. Из образцов вырезано по одному металлографическому образцу. Выкраивание производится по схеме, приведённой на рисунке 3.17. Из каждого из образцов выкраивается по 2 образца.



h – ширина образца

Рисунок 3.16 - Схема вырезки образца для металлографических испытаний [42]

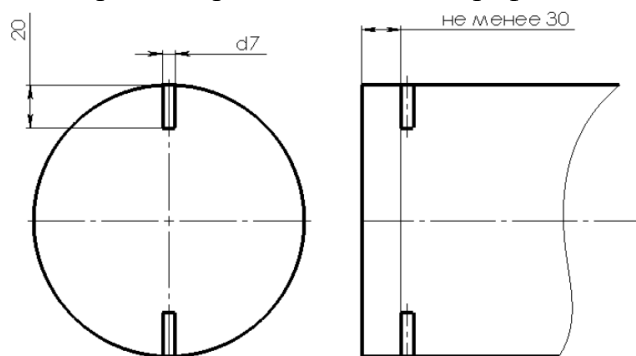


Рисунок 3.17 - Вырезка образцов для трибологических испытаний [42]

Результаты испытаний образцов на установке МТВП приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Изменение линейного размера образцов в процессе испытаний на износ (по данным автора)

Маркировка образца	Линейный размер образца до начала испытаний, мм	Линейный размер образца (мм) после испытаний (мин)			
		15	30	45	60
Э-1	62,19	62,15	62,08	61,98	61,87
Э-2	61,37	61,32	61,27	61,21	61,16
Э-3	62,83	62,8	62,77	62,71	62,68
Изн.-1	63,18	63,16	63,11	63,06	62,99
Изн.-2	62,33	62,29	62,25	62,19	62,17

3.2.4 Измерение микротвёрдости и твёрдости

Дальнейшее комплексное исследование износостойкости валков сводилось к определению твердости основного металла и микротвердости упрочнённого слоя вблизи поверхности. Эти характеристики критически важны для оценки прочности поверхностной зоны, устойчивости к абразивному воздействию и верификации эффективности покрытия WC-TiN.

Для проведения измерений использовалась методика HV₁₀ и HV_{0,1} согласно международным стандартам (ISO 6507-1) [8], обеспечивающая высокую точность и воспроизводимость результатов.

Измерения проводились в сечениях, перпендикулярных к поверхности образцов, с шагом 10-20 мкм для построения профилей твердости по глубине.

Испытания осуществлялись на приборах: универсальный твердомер Zwick/Roell тип 8187,5 LKV (рисунок 3.18) и Микротвердомер Buehler Micromet 5103 (рисунок 3.19)



Рисунок 3.18 - Универсальный твердомер Zwick/Roell тип 8187,5 LKV (фото автора)



Рисунок 3.19 - Микротвердомер Buehler Micromet 5103 (фото автора)

Данные по измерению твердости и микротвердости для футеровочных бандажей на различных стадиях эксплуатации приведены в таблицах 3.3-3.4.

Таблица 3.3 - Изменение твердости/микротвердости образцов в зависимости от времени эксплуатации (по данным автора)

Пара	Диапазон времени наработки, ч	HV10	HV0,1
1	10-50	207	218
		217	223
		203	230
2	80-180	244	250
		238	243
		251	257
3	250-450	277	284
		283	263
		274	284
4	600-900	242	247
		234	241
		250	254
5	1100-1600	209	224
		203	215
		211	229

Таблица 3.4 - Изменение твердости/микротвердости образцов с упрочняющим покрытием и без в зависимости от времени эксплуатации (по данным автора)

Маркировка образца	Напыление	Толщина слоя напыления, мм	Маркировка стали вала	Микротвердость, HV0,1
Э-1	-	-	Сталь 45X	207
Э-2	Двухслойная WC-TiN	1,3-1,4	Сталь 45X	587
Э-3	Двухслойная WC-TiN	2,1-2,3	Сталь 45X	605
Изн.-1	Двухслойная WC-TiN	1,3-1,4	Сталь 45X	623
Изн.-2	Двухслойная WC-TiN	2,1-2,3	Сталь 45X	637

3.2.5 Микроскопические исследования

Исследование структуры поверхности бандажей проводилось на образцах с помощью светового оптического микроскопа Leica DMI 5000 (рисунок 3.20) в диапазоне увеличений от 50 до 1000 кратности.



Рисунок 3.20 - Leica DMI 5000 (фото автора)

Исследование структуры на микроуровне проведено методом атомно-сканирующей микроскопии (АСИ) при помощи атомно-силовой микроскопии Nanosurf Flex AFM (рисунок 3.21). Исследования структуры поверхности бандажей валков представлены на рисунке 3.22 а).

АСМ исследование выполнено на образцах с использованием кремниевого зонда (Dyn 190 AI) с номинальной резонансной частотой 190 кГц и радиусом кривизны 10^{-6} мм. Сканирование участков проводилось в динамическом режиме с разрешением 1024x1024 пикселей. Силовая константа кантилевера 48 Н/м.



Рисунок 3.21 - Nanosurf Flex AFM (фото автора)

Исследования структуры поверхности бандажей валков методом АСМ представлены на рисунке 3.22 б).

По данным оптической микроскопии поверхность эталонного (исходного) вала характеризуется структурной однородностью и чётко выраженной технологической направленностью микрогеометрии. Наблюдаются параллельные следы механической обработки без признаков раскрытых трещин, сколов и локальных зон разрушения. Граница поверхностного слоя ровная, без выраженной дефектной зоны, что свидетельствует о сохранности структуры материала до начала эксплуатационных нагрузок.

На поверхности футеровки изношенного вала фиксируются выраженные морфологические изменения. В оптическом диапазоне отчётливо видны дефектные участки, локальные углубления и зоны неравномерного разрушения. Формируется дефектный поверхностный слой переменной толщины, отличающийся по контрасту и текстуре от основного металла. Наблюдаются также очаги выкрашивания, микроотслоения и протяжённые борозды, ориентированные вдоль направления относительного перемещения абразивных частиц. Характер дефектов указывает на сочетание режущего механизма износа с усталостным разрушением при циклическом нагружении [10].

Результаты атомно-силовой микроскопии (АСМ) детализируют выявленные закономерности на нано- и микромасштабе. Для исходного вала 3D-топография демонстрирует регулярный рельеф с умеренной амплитудой микронеровностей, вытянутых вдоль направления обработки. Профиль поверхности имеет преимущественно гребенчатый характер, без резких перепадов высот и кратерообразных дефектов, что соответствует малым значениям параметров и стабильной несущей способности поверхностного слоя.

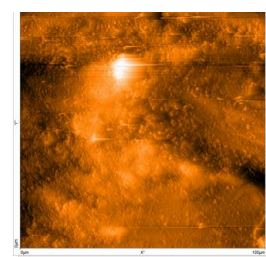
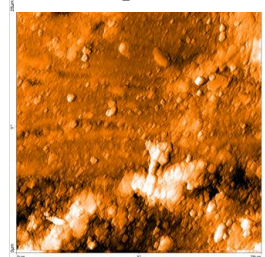
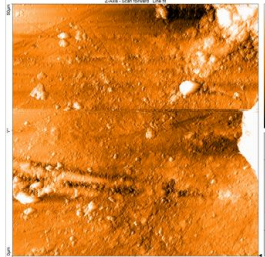
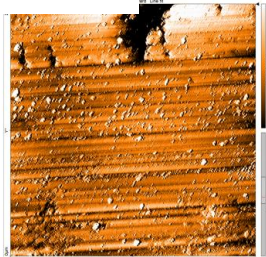
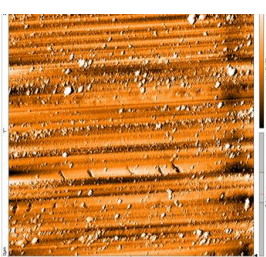
С увеличением времени эксплуатации на АСМ-изображениях прослеживается постепенная потеря исходной технологической текстуры поверхности. Рельеф становится менее упорядоченным: возрастает разброс высот, появляются глубокие впадины, локальные выступы и участки с признаками пластического смещения материала. Такие изменения могут быть связаны с последовательным наклёпом поверхностного слоя, развитием микроповреждений и последующим отделением упрочнённых фрагментов.

Сопоставление результатов оптической и атомно-силовой микроскопии подтверждает стадийный характер изменения поверхности футеровочного бандажа: от сравнительно упорядоченного технологического рельефа исходного состояния - к дефектному слою с выраженными признаками пластической деформации, микрорезания и усталостного выкрашивания. Полученные морфологические данные согласуются с представлением о комбинированном абразивно-усталостном механизме изнашивания и могут быть использованы как экспериментальное основание для последующего математического описания деградации поверхностного слоя [10].

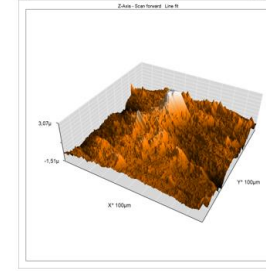
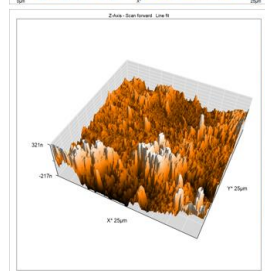
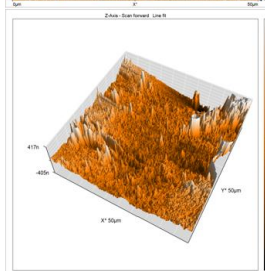
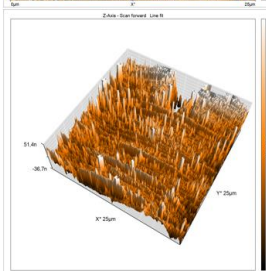
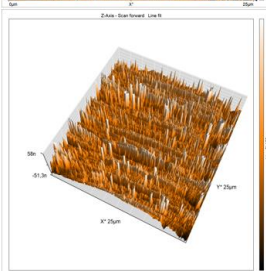
а)



Поверхность исходного валка



Дефектный слой изношенного валка



б)

Рисунок 3.22 – Исследование структуры поверхности бандажа: а) методом оптической микроскопии; б) методом атомно-силовой микроскопии (составлено автором)

Для более детальной оценки механизмов абразивного изнашивания, локального выкрашивания и развития пластических деформаций в поверхностном слое образцов с различной наработкой дополнительно выполнены исследования методом сканирующей электронной микроскопии. Микроструктурный анализ проводился на сканирующем электронном микроскопе Supra 40VP Carl Zeiss, оснащённом полевой эмиссией (рисунок 3.23). Использование данного оборудования обеспечило высокое пространственное разрешение и позволило зафиксировать тонкие морфологические признаки повреждения изношенной поверхности.

Исследования выполнялись при ускоряющем напряжении 5-20 кВ в зависимости от масштаба наблюдения. Для анализа рельефа применялся режим регистрации вторичных электронов, позволяющий выявить характер борозд, микрогребней, зон микропластического течения и очагов выкрашивания. В режиме обратноотражённых электронов проводилась оценка фазовой неоднородности и контрастирование участков с различной плотностью и степенью деформационного упрочнения.



Рисунок 3.23 - Supra 40VP Carl Zeiss (фото автора)

Исследования структуры поверхности бандажей валков методом СЭМ представлены на рисунке 3.24.

Экспериментальные исследования напыленного слоя на бандажи показали, что плазменно-порошковое напыление покрытий на основе WC-TiN приводит к формированию упрочнённого поверхностного слоя толщиной до 2,3 мм. Микроструктурным анализом сканирующей электронной микроскопией и сканирующей зондовой микроскопией установлено отсутствие адгезионных дефектов и расслоений на поверхности образцов. (рисунок 3.25). На рисунке 3.26 приведено микроскопическое исследование образца после износа, на рисунке 3.27 - после нанесения упрочняющего покрытия [19, 98, 99, 45-48].

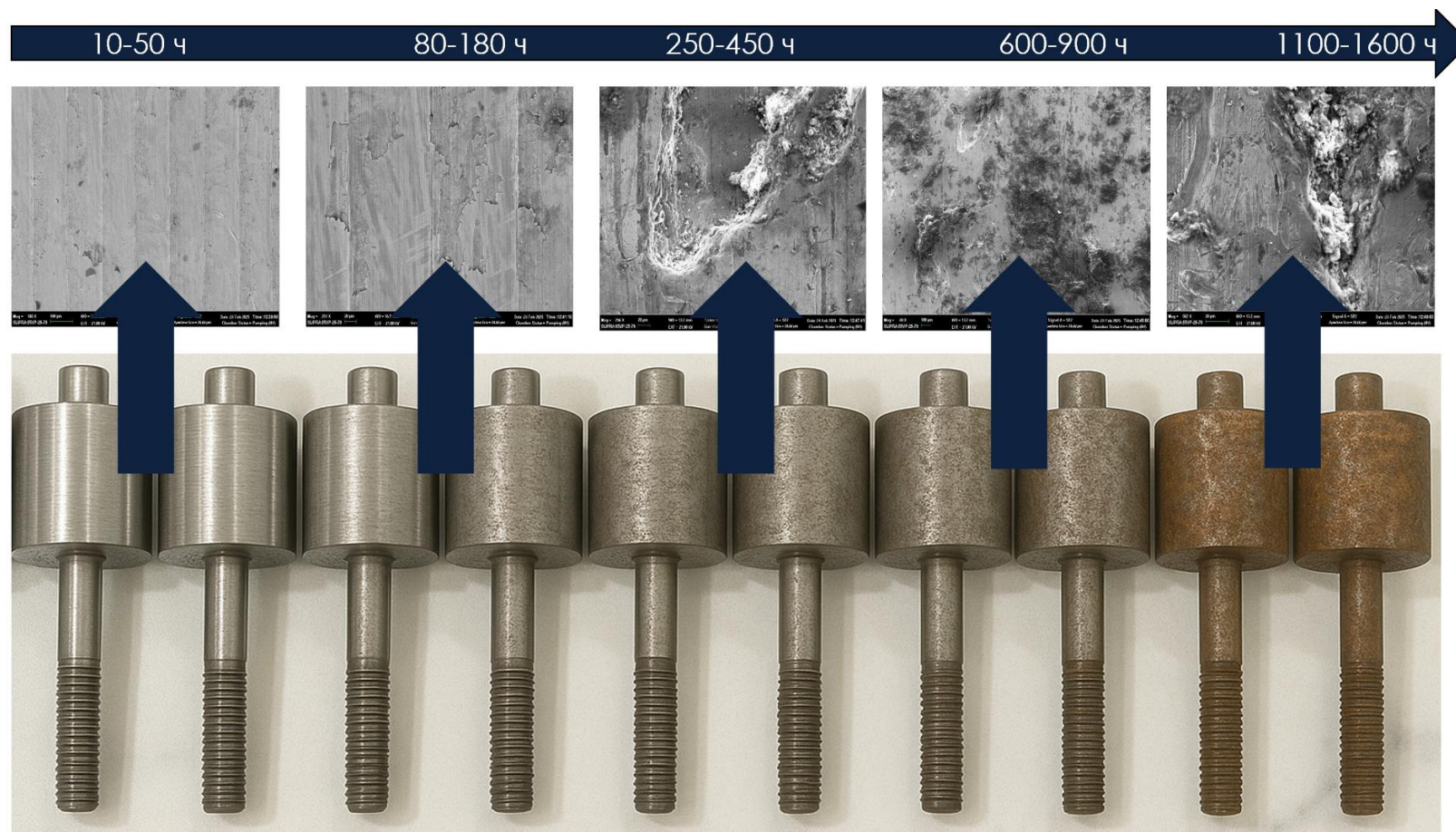


Рисунок 3.24 - Исследование структуры поверхности бандажей методом СЭМ (фото автора)

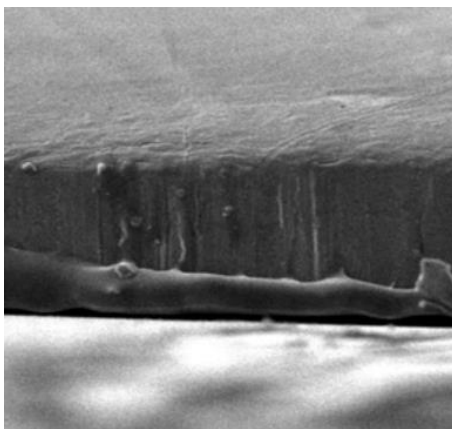


Рисунок 3.25 - Напыление WC-TiN (фото автора)

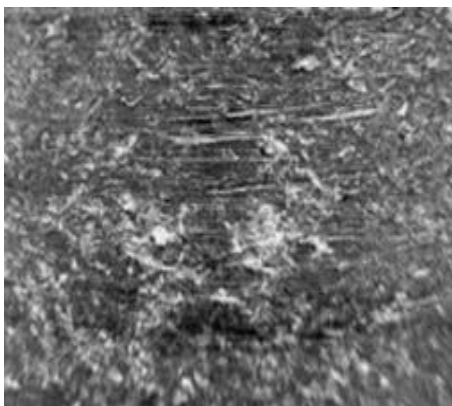


Рисунок 3.26 - Образец после износа (фото автора)



Рисунок 3.27 - Образец после нанесения упрочняющего покрытия (фото автора)

По данным микроструктурного анализа (сканирующая электронная и зондовая микроскопия) на границе раздела «покрытие-основа» не выявлено пор, трещин, расслоений и других адгезионных дефектов, что свидетельствует о металлургической связке и целостности переходной зоны.

На изображении напыленного слоя (см. рисунок 3.25) прослеживается плотная, однородная структура покрытия с чёткой, непрерывной линией сопряжения с подложкой. Отсутствуют признаки межслойного отделения, каверн или несплошностей. Поверхностный слой имеет компактное

строение без выраженных дефектных включений, что указывает на корректно подобранные режимы плазменно-порошкового напыления и стабильность технологического процесса.

Для сравнения, поверхность образца после износа (см. рисунок 3.26) характеризуется развитым микрогеометрии, выраженными бороздами, локальными выкрашиваниями и участками пластической деформации, что отражает действие абразивно-усталостного механизма разрушения. Наблюдаются повышение шероховатости, формирование кратерообразных углублений и неоднородность структуры поверхностного слоя.

После нанесения упрочняющего покрытия (см. рисунок 3.27) структура поверхности становится существенно более ровной и однородной. Микрогеометрия характеризуется равномерным распределением неровностей без выраженных трещин, сколов и зон локального разрушения. Отсутствуют очаги выкрашивания и раскрытые дефекты, поверхность имеет сглаженный характер с пониженной амплитудой высотных перепадов. Наблюдаются структурная сплошность покрытия и равномерность текстуры по всей исследуемой площади.

Нанесение покрытия WC-TiN приводит к формированию плотного, дефектно-свободного поверхностного слоя с высокой структурной однородностью, что обеспечивает повышение сопротивления абразивному воздействию и создаёт предпосылки для стабилизации параметров шероховатости и снижения интенсивности изнашивания в процессе эксплуатации [4, 6, 24, 37, 64].

3.2.6 Исследование параметров опорной поверхности

Исследование шероховатости поверхности проводилось с использованием специализированного программного обеспечения Gwyddion для обработки результатов микроскопии и пакета Origin для последующего их статистического анализа и аппроксимации (для получения необходимых зависимостей). Обработка включала выравнивание базовой линии, удаление наклона (plane correction), фильтрацию шумов и расчёт параметров опорной поверхности в соответствии с методикой построения кривой материального распределения профиля (кривая Эбботта-Файрстоуна) (рисунок 3.28).

В качестве основных характеристик анализировались параметры опорной поверхности:

- R_k — глубина ядра профиля характеризует высоту основной несущей части профиля между уровнями $Mr1$ и $Mr2$ (чем больше R_k — тем выше амплитуда «рабочего» рельефа; влияет на распределение контактных напряжений и стабильность контакта);

- R_{pk} — приведённая высота пиков, средняя высота выступов, которые срезаются в первую очередь при приработке (большие значения → острые пики → высокая начальная интенсивность износа; снижение R_{pk} → сглаживание поверхности, формирование плато);

- R_{vk} — приведённая глубина впадин. Средняя глубина впадин ниже ядра профиля, отражает наличие каверн, пор, выкрашиваний; рост R_{vk} приводит к развитию усталостных разрушений;
- $Mr1$ — доля материала на границе пиков (процентная координата начала ядра профиля: чем меньше $Mr1$, тем быстрее контакт переходит к несущему ядру);
- $Mr2$ — доля материала на границе впадин (процентная координата конца ядра профиля: чем больше $Mr2$, тем выше опорная площадь поверхности);
- V_{mp} - объём материала пиков (объём выступов, которые удаляются при приработке: чем больше V_{mp} , тем больше материала будет быстро срезано), характеризует интенсивность начального износа;
- V_{mc} - объём материала в ядре профиля (объём несущего материала в рабочей зоне контакта), характеризует несущую способность поверхности;
- V_{vc} - объём пустот в ядре профиля (объём полостей внутри несущей зоны), отражает микропористость и трещиноватость; может быть связан с усталостными повреждениями;
- V_{vv} - объём впадин (каверн) (объём глубоких впадин ниже ядра профиля), характеризует кавернообразование и выкрашивание [82, 83].

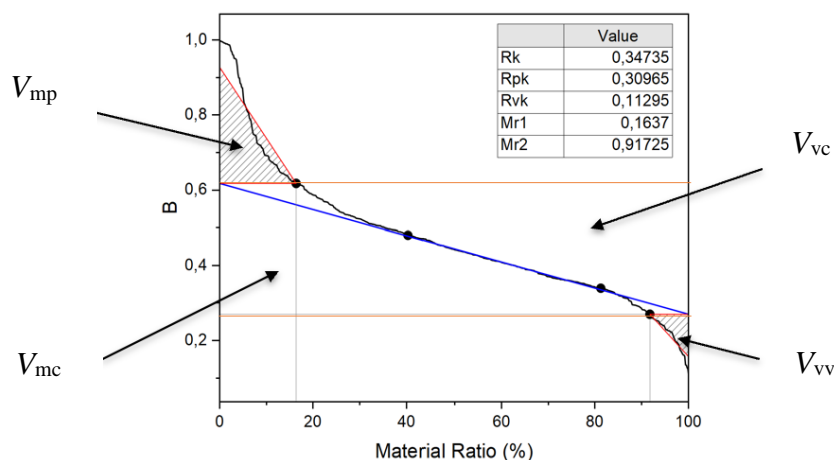


Рисунок 3.28 - Кривая материального распределения профиля (кривая Эбботта-Файрстоуна)
(составлено автором)

Полученные кривые (рисунок 3.29) позволили количественно оценить изменение несущей способности поверхностного слоя в процессе эксплуатации. Для исходного состояния характерна более пологая начальная часть кривой, соответствующая умеренной высоте выступов и стабильной опорной площади. По мере износа наблюдается увеличение доли впадинного объема и изменение наклона кривой в средней части, что свидетельствует о перераспределении материала и формировании дефектного слоя. После нанесения упрочняющего покрытия форма кривой

приобретает более выраженный платообразный участок, указывающий на рост эффективной опорной площади и снижение доли нестабильных пиковых элементов.

Анализ показал закономерную эволюцию параметров R_k , R_{pk} и R_{vk} в зависимости от состояния поверхности. Для исходного валка характерны умеренные значения R_k , отражающие стабильную глубину ядра профиля, и сравнительно небольшие значения R_{pk} , что указывает на отсутствие выраженных пиковых выступов. Параметр R_{vk} невелик, поскольку впадины носят преимущественно технологический характер и не связаны с разрушением материала. Кривая Эбботта-Файрстоуна имеет плавный наклон и достаточно протяжённый платообразный участок, свидетельствующий о равномерной несущей способности поверхности.

После эксплуатации наблюдается увеличение параметра R_k , что связано с ростом глубины структурного ядра профиля вследствие пластической деформации и частичного разрушения поверхностного слоя. Параметр R_{pk} на начальной стадии износа может возрасти из-за формирования заусенцев и локальных вытянутых гребней, однако на стадии интенсивного изнашивания он снижается вследствие их срезания и выкрашивания. Наиболее существенно увеличивается R_{vk} , отражающий формирование глубоких впадин и кратерообразных дефектов, возникающих при абразивном и усталостном механизмах разрушения. Рост R_{vk} указывает на снижение опорной площади и ухудшение распределения контактных напряжений.

После нанесения упрочняющего покрытия на основе WC-TiN параметры шероховатости стабилизируются. Значение R_k уменьшается по сравнению с изношенным состоянием и становится более однородным по площади, что свидетельствует о формировании плотного и равномерного поверхностного слоя. Параметр R_{pk} снижается вследствие сглаживания нестабильных пиковых элементов, а R_{vk} уменьшается за счёт отсутствия глубоких дефектных впадин и выкрашиваний. Кривая Эбботта-Файрстоуна приобретает более выраженный горизонтальный участок в зоне ядра профиля, что отражает увеличение эффективной опорной площади и повышение несущей способности покрытия.

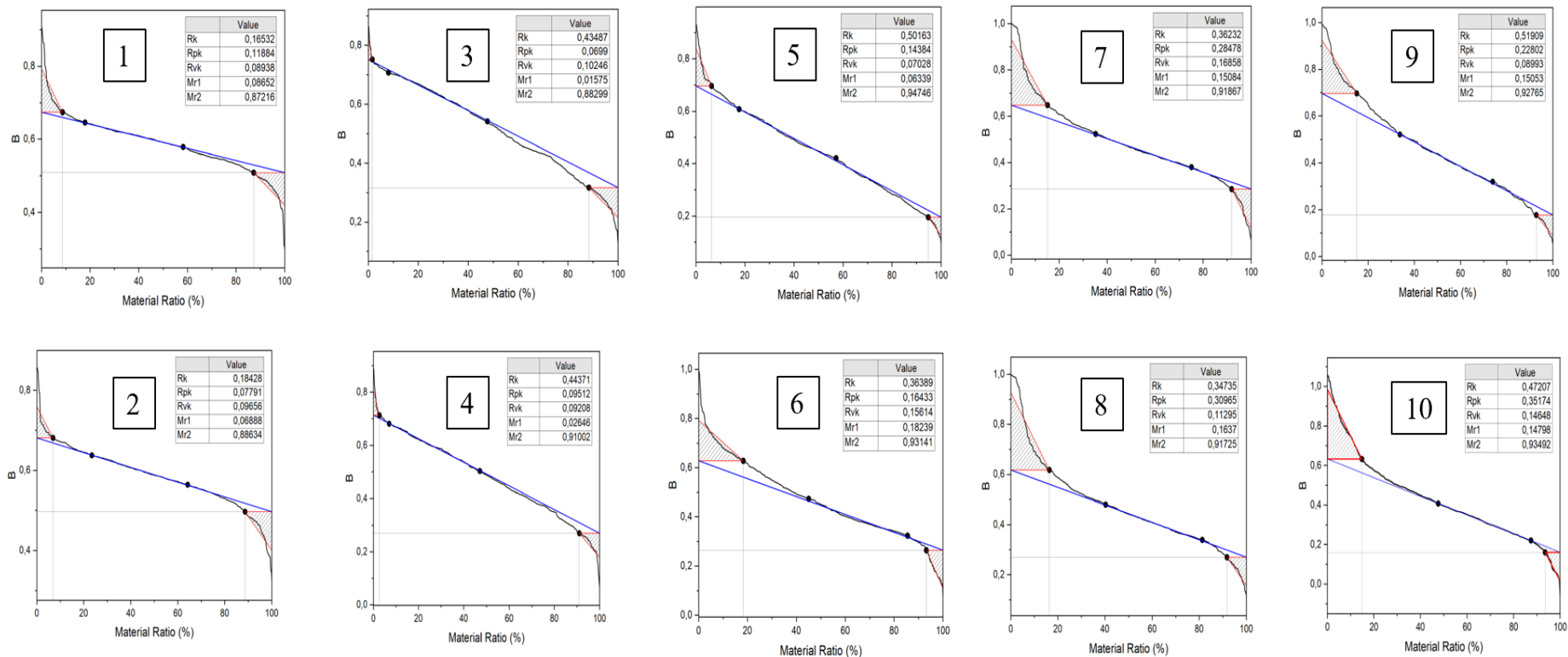


Рисунок 3.29 - Кривые Эббота-Файрстоуна для каждого валка из исследуемых пар (Material Ratio (%) – относительная опорная длина профиля (%)) (составлено автором)

3.2.7 Методика 3D-сканирования

Трёхмерное сканирование футеровочных бандажей и последующий анализ карт отклонений использовались для оценки изменения геометрии рабочих поверхностей валков в процессе их эксплуатации. Данный подход позволяет определить уровень износа и выявить локальные зоны интенсивного абразивного износа.

Метод трёхмерного сканирования основан на получении массива координат точек поверхности объекта с последующим построением его цифровой модели. В зависимости от используемой аппаратуры пространственные данные могут быть получены с применением лазерных, оптических или фотограмметрических методов [10, 81].

Лазерное сканирование является одним из самых точных методов для измерения трёхмерных координат точек поверхностного слоя. В процессе лазерного сканирования лазерный луч направляется на поверхность валков, и с помощью датчиков измеряются координаты точек, которые отражают лазерный луч. В результате этих измерений создаётся облако точек, представляющее собой трёхмерное изображение поверхности. В исследованиях использованы 3D сканеры AlfaScan, ATOS Q12M, ATOS ScanBox 4105 с сенсором ATOS Core 5M (рисунок 3.30). Сканер данного вида используется для контроля качества, обратного проектирования, анализа износа и др.



Рисунок 3.30 - 3D сканер ATOS Q12M, ATOS ScanBox 4105 с сенсором ATOS Core 5M [81]

Каждая точка облака характеризуется тремя координатами (X , Y , Z), что позволяет воссоздавать точную модель поверхности. На основе облака точек строится 3D-модель, которая может быть использована для анализа изменений геометрии и оценки степени износа.

На этапе сканирования производится непосредственно процесс сканирования. С помощью 3D-сканера получают облако точек, представляющее поверхность валка (рисунок 3.31). Важно, чтобы сканирование охватывало всю рабочую поверхность валка, включая участки, которые могут быть подвержены наибольшему износу.



Рисунок 3.31 - Процесс сканирования валка 3D сканером AltaScan (фото автора)

После завершения сканирования полученное облако точек подвергается предварительной обработке, включающей фильтрацию данных, удаление шумов, единичных выбросов и артефактов измерения. Далее выполняется совмещение фрагментов поверхности, полученных с различных положений сканера, и их приведение к единой системе координат. На основании обработанного массива данных формируется цифровая трёхмерная модель рабочей поверхности валка, используемая для последующего анализа геометрических отклонений и локальных зон износа (рисунок 3.32).

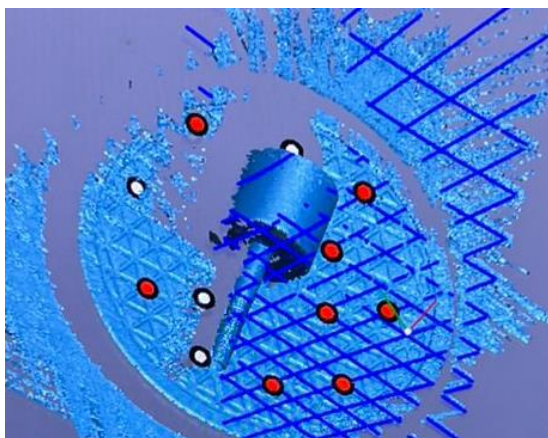


Рисунок 3.32 - Процесс обработки облака точек (фото автора)

На основе 3D-моделей рабочей поверхности валка, полученных до и после эксплуатации, выполняется сравнительный анализ изменения геометрии футеровочного бандажа. Для этого используется метод построения карт отклонений, позволяющий определить отклонения между эталонной геометрией (исходным образцом) и текущим состоянием поверхности после наработки. Данный подход обеспечивает наглядное выявление участков с максимальными отклонениями, которые соответствуют зонам наиболее интенсивного изнашивания, локальной деформации или нарушения исходного профиля рабочей поверхности.

После совмещения цифровых моделей в единой системе координат отклонение в каждой точке поверхности определено как разность координат соответствующих точек эталонной и текущей моделей. В общем виде величина отклонения рассчитывается по (3.1):

$$\begin{cases} \Delta x = x_{\text{эталон}} - x_{\text{текущий}} \\ \Delta y = y_{\text{эталон}} - y_{\text{текущий}}, \\ \Delta z = z_{\text{эталон}} - z_{\text{текущий}} \end{cases} \quad (3.1)$$

где Δx , Δy , Δz — отклонения по координатам; $x_{\text{эталон}}$, $y_{\text{эталон}}$, $z_{\text{эталон}}$ — координаты эталонной модели; $x_{\text{текущий}}$, $y_{\text{текущий}}$, $z_{\text{текущий}}$ — координаты текущей модели.

На основе вычисленных отклонений можно построить карту отклонений. Это может быть цветное изображение, где каждый цвет соответствует величине отклонения в данной точке (3.2):

$$h = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}, \quad (3.2)$$

где h — абсолютное отклонение; Δx , Δy , Δz — отклонения по трём координатным осям (X , Y , Z).

Карта отклонений позволяет выявить участки футеровки с наибольшими изменениями в геометрии, что может указывать на высокие скорости износа или концентрацию механических напряжений.

Методика картирования отклонений включает следующие шаги:

1. Создание эталонной модели: на основе исходных данных создаётся эталонная модель футеровки валков, которая служит эталоном для сравнения с моделью после эксплуатации.

2. Анализ отклонений: проводится анализ изменений геометрии футеровки, включая как малые, так и крупные отклонения. Такие изменения могут быть связаны с абразивным износом, пластической деформацией или другими механическими воздействиями (рисунок 3.33).

Для пространственной оценки изменения геометрии и контроля эффективности упрочняющего покрытия WC-TiN применялось 3D-сканирование поверхности образцов до и после износа. Результаты сканирования (рисунок 3.34) показали однородность напыленного слоя упрочняющего покрытия и отсутствии технологических дефектов.

3. Генерация карты отклонений: карта отклонений может быть представлена в виде цветного изображения, где различные оттенки цвета отображают величину отклонений. Например, красный цвет может обозначать большие отклонения, а синий — меньшие (рисунок 3.35).

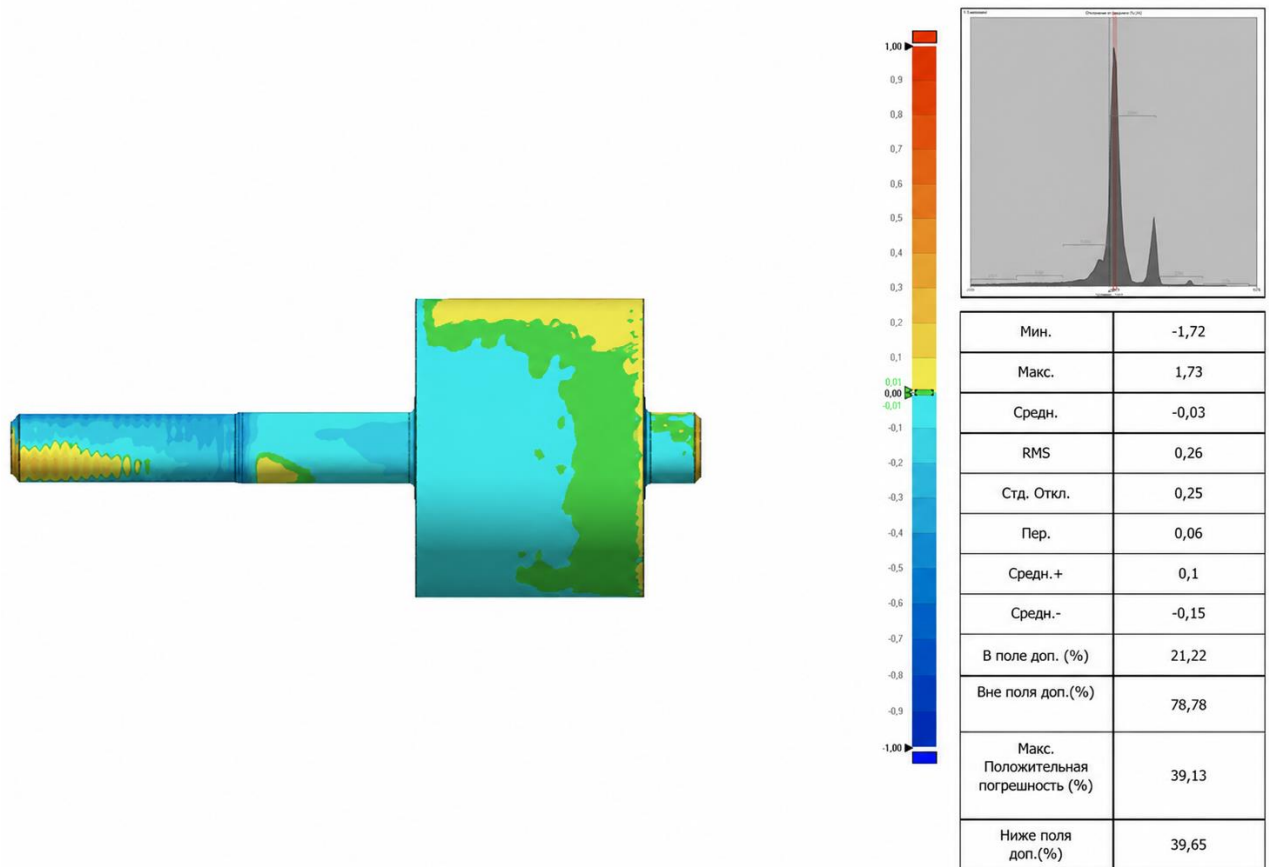


Рисунок 3.33 - Сравнение изношенной футеровки валка с эталонной (составлено автором)

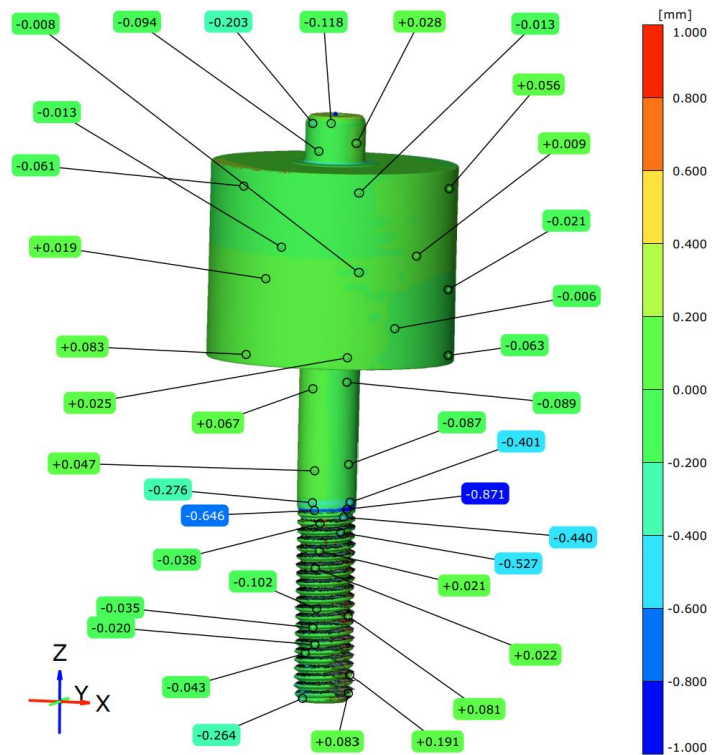


Рисунок 3.34 - Карта контроля отклонений по поверхности футеровочного бандаж (сопоставление эталонного валка с валком после плазменного напыления WC-TiN) (составлено автором)

Имя	Мин.	Макс.	Средн.	RMS	Стд. Откл.	Пер.	Средн. +	Средн. -
3D Сравнение1	-1,72	1,73	-0,03	0,26	0,25	0,06	0,1	-0,15

Имя	Название результатов	Допуск	Откл.	Эталонная поз.			Изм. Поз.		
				X	Y	Z	X	Y	Z
3D Сравнение1: 1	Данные результата - 1	±0,01	-0,04	-24,22	6	6	-24,18	5,99	6
3D Сравнение1: 2	Данные результата - 1	±0,01	-0,02	-14,92	-20	4	-14,91	-19,98	4
3D Сравнение1: 3	Данные результата - 1	±0,01	-0,03	-23,64	-8	4	-23,61	-7,99	4
3D Сравнение1: 4	Данные результата - 1	±0,01	0	-24,95	0	32	-24,95	0	32
3D Сравнение1: 5	Данные результата - 1	±0,01	0,03	-6,84	24	32	-6,85	24,03	32
3D Сравнение1: 6	Данные результата - 1	±0,01	0,02	-6,84	24	6	-6,84	24,02	6
3D Сравнение1: 7	Данные результата - 1	±0,01	-0,04	-21,88	12	2	-21,85	11,98	2

Рисунок 3.35 - Карта контроля отклонений (составлено автором)

На основании полученных карт отклонений можно интерпретировать данные и сделать выводы о состоянии футеровок валков. Например, если на поверхности обнаружены участки с резким изменением формы или значительными отклонениями, это может указывать на высокую степень износа, требующую замены или ремонта футеровки. Доля точек, выходящих за пределы допуска, составила 78,78%, что свидетельствует о локализации зон интенсивной деградации и необходимости учёта геометрической неравномерности в расчётных моделях ресурса [10].

3.3 Методика обработки результатов

Результаты экспериментальных измерений обрабатывались при помощи методов статистической обработки данных. Для каждой серии испытаний (три параллельных опыта для образцов с покрытием и три - для без покрытия) вычислялись средние значения основных показателей износа, твёрдости и параметров Эббота-Файрстоуна. Оценивалось среднеквадратическое отклонение и доверительный интервал для заданной вероятности (как правило, 95%), позволяющий судить о разбросе данных. Если в сериях наблюдалась значительная вариация результатов, проводился дополнительный анализ причин (неоднородность материала, отличие условий контакта и пр.). В случае необходимости применялись различные критерии согласия и однородности выборок - например, критерий Стьюдента, для оценки значимости различий между средними значениями групп образцов. Все расчёты выполнялись с использованием специализированного программного обеспечения статистической обработки, что минимизировало вероятность вычислительной ошибки. Применение методов математической статистики обеспечило обоснованность сравнения эффективности упрочняющих покрытий и достоверность установленных закономерностей износа.

Оценка потерь массы, линейного и объёмного износа. Для количественной характеристики износа применялись несколько взаимодополняющих параметров. Во-первых, определялась потеря

массы Δm каждого образца в ходе испытания - разность массы до и после износа, измеренная на аналитических весах с точностью 0,001 г. Перед взвешиванием образцы очищались от налипших частиц и продуктов износа спиртовым раствором и высушивались. Во-вторых, параллельно измерялся линейный износ - уменьшение характерного линейного размера образца. В лабораторных условиях линейный износ оценивали по снижению высоты цилиндрического образца, прилегающей к абразиву, с помощью индикаторной головки (как упомянуто выше, замеры через каждые 15 мин). Максимальная глубина износа за время испытания также определялась профилометрически - по разности между исходным и изношенным профилем поверхности. По полученным данным рассчитывалась скорость износа: например, мм/час для линейного износа или мм³/(Н·м) для удельного объёмного износа с учётом пути трения и нагрузки. Все результаты представляются как средние по сериям с указанием погрешностей. Использование сразу трех критериев - потери массы, объёмного и линейного износа - позволяло комплексно оценить износостойкость, такая согласованность этих показателей свидетельствовала о достоверности измерений. В случаях расхождения (например, если потеря массы обнаруживалась незначительной, а линейный износ заметен из-за наклепа материала) анализировались возможные причины, и в обработке данных предпочтение отдавалось наиболее репрезентативному параметру.

Анализ микротвёрдости по стадиям работы. В процессе экспериментов проводились измерения микротвёрдости материала на разных стадиях износа. У образцов в процессе исследований был зафиксирован эффект наклепа: верхний слой металла упрочняется под действием пластической деформации и ударов твёрдых частиц, что проявляется в росте микротвёрдости поверхности после определённого времени работы. Для проверки этого эффекта измерения микротвёрдости выполнялись не только на исходных и полностью изношенных образцах, но и на промежуточных стадиях.

Для анализа топографии изношенных поверхностей применялись кривые Эбботта-Файрстоуна (кривые распределения опорной поверхности). Кривые строились на основе профилометрических данных, полученных при измерении шероховатости до и после износа. С помощью специального программного обеспечения Gwyddion и OriginPro из исходных профилограмм вычислялось распределение высот неровностей: по оси ординат откладывался процент длины профиля (или площади поверхности), а по оси абсцисс - высота неровностей, превышающих данный уровень. Кривая Эбботта-Файрстоуна для новой (неизношенной) поверхности банджа характеризуется определённым соотношением опорной площадки: присутствуют как выступающие пики, так и впадины заданной глубины. После износа форма кривой изменяется, как правило, крутизна начального участка уменьшается из-за срезания самых высоких

вершин микронеровностей, и увеличивается плато опорной поверхности. Построив кривые для поверхностей с покрытием и без, удалось количественно сравнить степень сглаживания рельефа в процессе изнашивания. Кроме того, по кривой определялись параметры несущей способности поверхности.

Оценка качества аппроксимации производилась с использованием коэффициента детерминации R^2 по формуле (3.3):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.3)$$

где y_i - экспериментальные значения исследуемого параметра; \bar{y} - среднее значение экспериментальных данных; \hat{y}_i - значения, полученные по аппроксимирующей функции; n - число наблюдений [69, 95].

3.4 Выводы по главе 3

1. Разработана программа экспериментальных исследований износа футерованных валков, включающая планирование триботехнических испытаний, измерения твердости и шероховатости поверхностей, а также 3D-сканирование изношенных образцов.

2. Установлено, что процесс абразивного изнашивания футеровки описывается зависимостью нелинейного характера; выявлены ключевые факторы, влияющие на интенсивность изнашивания (нагрузка, твердость материала, характер абразива и др.).

3. Исследована структура и состояние поверхности изношенных футеровок валков до и после эксплуатационных и лабораторных испытаний. Проведен металлографический анализ, показавший развитие пластической деформации в поверхностном слое; выявлено неравномерное снятие материала (локальные зоны интенсивного износа), что указывает на сочетание абразивно-усталостного механизма разрушения поверхности.

4. Проведены измерения твердости (HV_{10}) и микротвердости ($HV_{0,1}$) поверхностного слоя футерованных валков до и после износа. Установлено, что стадийность процесса изнашивания обоснована изменениями твердости HV_{10} и микротвердости $HV_{0,1}$ поверхностного слоя. Экспериментальные значения показали рост HV_{10} от уровня 203-217 на стадии исходного состояния и приработки (10-50 ч) до 274-283 на стадии максимального наклепа (250-450 ч), после чего на стадиях деградации наблюдается снижение до 234-250 (600-900 ч) и далее до 203-211 (1100-1600 ч). Аналогично микротвердость $HV_{0,1}$ изменяется от 218-230 (10-50 ч) до 263-284 (250-450 ч) с последующим снижением до 241-254 (600-900 ч) и 215-229 (1100-1600 ч)

5. Установлено, что для повышения износостойкости и долговечности футеровочных бандажей валков необходим комплекс технических решений. Предложено наносить износостойкие покрытия на основе WC-TiN на рабочие поверхности валков. Такой подход обеспечивает снижение интенсивности изнашивания за счет увеличения поверхностной твердости и снижения коэффициента трения.

6. Экспериментальные исследования показали, что плазменно-порошковое напыление покрытий на основе WC-TiN приводит к формированию упрочнённого поверхностного слоя толщиной до 2,3 мм. Микроструктурным анализом сканирующей электронной микроскопией и сканирующей зондовой микроскопией) установлено отсутствие адгезионных дефектов и расслоений на поверхности образцов. Методом 3D сканирование подтверждена однородность напыленного слоя. Серии испытаний образцов показали, что после напыления WC-TiN значения обоих показателей значительно увеличились, чем у футеровочных бандажей без покрытия. Физический эксперимент показал, что среднее значение HV_{10} для образцов с напыленным покрытием сохранялся около 280-290 кгс/мм², при пиковых значениях $HV_{0,1}$ до 330-350 кгс/мм², тогда как у образцов без покрытия - 210-220 и 250-270 кгс/мм², соответственно.

В рамках методики исследований внедрено применение оптического 3D-сканирования (система GOM ATOS, AlfaScan) для количественной оценки износа поверхностей и контроля однородности напыленного слоя.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФУТЕРОВОЧНЫХ БАНДАЖЕЙ

4.1 Исследование упрочнения и деградации поверхностного слоя футеровочных бандажей

В начальный период работы новой или восстановленной футеровки наблюдается стадия приработки, связанная с наклепом поверхностного слоя. В контексте изнашивания наклеп проявляется в том, что микронеровности поверхности сглаживаются, материал уплотняется, а локальная твёрдость увеличивается. При вращении валков первые контакты с крупными кусками руды деформируются верхним слоем бандажей. В этот период интенсивность изнашивания относительно невелика и износ протекает медленно. Фактически, наклепанный слой служит своего рода защитным барьером, принимающим на себя абразивные и ударные воздействия.

Стадия деградации (разрушение наклепанного слоя). Упрочнение поверхности не может продолжаться бесконечно - по мере накопления в материале дефектов наступает насыщение наклепа, и начинается вторая стадия изнашивания, связанная с деградацией поверхностного слоя. При продолжительной работе в наклепанном слое накапливаются внутрикристаллические дефекты (дислокации, микротрещины), что постепенно приводит материал к пределу выносливости. Накопленные повреждения приводят к зарождению и росту трещин: сначала микротрещины распространяются в пределах упрочнённого слоя, затем соединяются между собой. Когда плотность трещин достигает критического уровня, поверхностный слой теряет сплошность - наступает его разрушение в виде выкрашивания (питтингообразование). Иными словами, завершается стадия наклепа, и начинается стадия интенсивного отделения частиц наклепанного металла. Отдельные фрагменты упрочнённого слоя откалываются и удаляются из зоны трения, обнажая лежащий под ними более мягкий металл основы. Этот вновь открытый металл, не имея наклепа, сначала изнашивается медленно, но под воздействием ударов он опять подвергается наклепу. Таким образом, процесс приобретает циклический характер: повторяются чередующиеся этапы упрочнения и разрушения поверхности. Каждый такой цикл обычно протекает быстрее и с меньшим эффектом упрочнения, так как глубина повреждений постепенно растёт.

Для футеровочных бандажей валковых дробилок двухстадийная природа износа особенно характерна: первоначально, после установки новых бандажей, наблюдается период приработки с наклепом, когда износ идёт умеренно. Затем поверхность покрывается сетью микротрещин и начинается выкрашивание - износ резко интенсифицируется. Практическое следствие этого - необходимость плановой замены футеровки до наступления катастрофического износа второй стадии.

Стадийность процесса изнашивания обоснована изменениями твёрдости HV_{10} и микротвёрдости $HV_{0,1}$ поверхностного слоя. Экспериментальные значения показали рост HV_{10} от уровня 203-217 на стадии исходного состояния и приработки (10-50 ч) до 274-283 на стадии максимального наклепа (250-450 ч), после чего на стадиях деградации наблюдается снижение до 234-250 (600-900 ч) и далее до 203-211 (1100-1600 ч). Аналогично микротвёрдость $HV_{0,1}$ изменяется от 218-230 (10-50 ч) до 263-284 (250-450 ч) с последующим снижением до 241-254 (600-900 ч) и 215-229 (1100-1600 ч) (таблица 4.1, рисунок 4.1) [10].

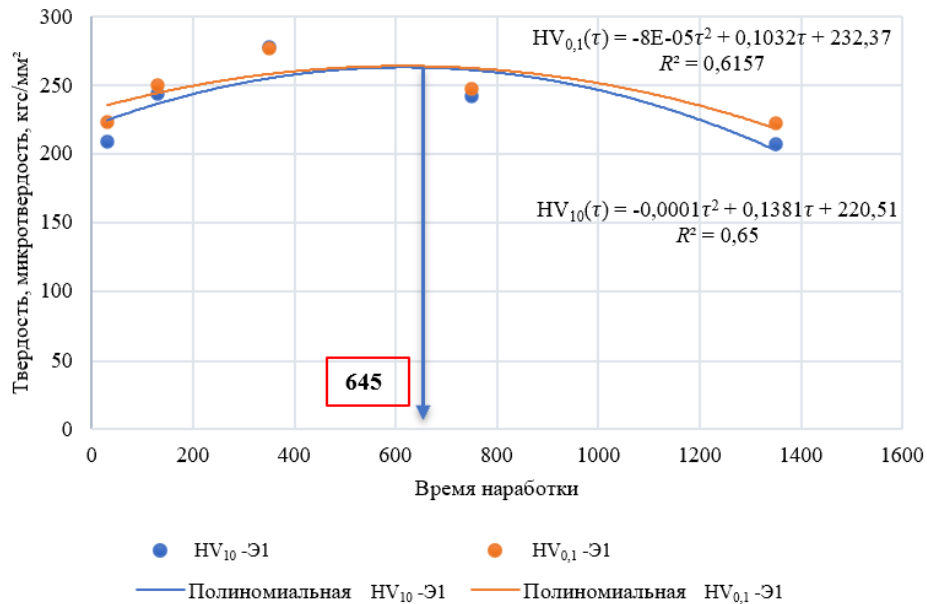


Рисунок 4.1 - Зависимость твердости (микротвердости) образца от времени наработки (составлено автором)

Таблица 4.1 - Стадийность процесса изнашивания от времени наработки (по данным автора)

Пара	Диапазон времени наработки, ч	Стадия	HV_{10}	$HV_{0,1}$
1	10-50	Исходное состояние, приработка	207	218
			217	223
			203	230
2	80-180	Активный наклеп	244	250
			238	243
			251	257
3	250-450	Максимальный наклеп	277	284
			283	263
			274	284
4	600-900	Начало деградации	242	247
			234	241
			250	254
5	1100-1600	Развитие деградации	209	224
			203	215
			211	229

Аппроксимация трендов твёрдости по нормированной стадии имеет вид (4.1, 4.2):

$$HV_{10}(\tau) = -0,0001\tau^2 + 0,1381\tau + 220,51, \quad R^2 = 0,95; \quad (4.1)$$

$$HV_{0,1}(\tau) = -8 \cdot 10^{-5}\tau^2 + 0,1032\tau + 232,37, \quad R^2 = 0,9157. \quad (4.2)$$

На графиках (рисунок 4.1) твёрдости выделен максимум наклепа, соответствующий наработке порядка 645 ч, после которого фиксируется начало снижения твёрдости и рост доли усталостного разрушения упрочнённого слоя.

Для количественной оценки наклепа введены коэффициенты (4.3):

$$K_n(\tau) = \frac{HV_{10}(\tau)}{H_0}, \quad K_{n,\mu}(\tau) = \frac{HV_{0,1}(\tau)}{H_{\mu 0}}, \quad (4.3)$$

где нормированная стадия эксплуатации задана по формуле (4.4):

$$\tau = \frac{n-1}{2}, \quad n = 1, \dots, 5; \quad 0 \leq \tau \leq 2. \quad (4.4)$$

Численные значения коэффициентов наклепа составили: по твёрдости $K_n = \{1,00; 1,17; 1,33; 1,17; 1,00\}$ по микротвёрдости $K_{n,\mu} = \{1,00; 1,12; 1,24; 1,12; 1,00\}$, что соответствует увеличению сопротивления пластической деформации поверхности на 24-33 % по сравнению с исходным состоянием.

Экспериментально подтверждена эффективность плазменно-порошкового напыления покрытия WC-TiN. Формируется упрочнённый слой толщиной до 2,3 мм без адгезионных дефектов. Средние значения твёрдости для покрытых образцов составляют 280-290 кгс/мм² HV₁₀ и 330-350 кгс/мм² HV_{0,1} против 210-220 кгс/мм² и 250-270 кгс/мм², соответственно, для бандажей без покрытия. Кроме того, нанесение покрытия смещает момент перехода к стадии усталостной деградации с ~645 до ~760 ч, увеличивая продолжительность устойчивой стадии эксплуатации.

На рисунке 4.2 приведены зависимости изменения твёрдости (HV₁₀) и микротвёрдости (HV_{0,1}) поверхности бандажей от наработки. Серии испытаний образцов показали, что после напыления WC-TiN значения обоих показателей значительно увеличилось, чем у футеровочных бандажей без покрытия. Физический эксперимент показал, что среднее значение HV₁₀ для образцов с напыленным покрытием сохранялся около 280-290 кгс/мм², при пиковых значениях HV_{0,1} до 330-350 кгс/мм², тогда как у образцов без покрытия - 210-220 и 250-270 кгс/мм², соответственно. Это подтверждает устойчивое упрочнение наклепанного слоя: прирост твердости составляет около 24-33 % (HV₁₀) и 20-25 % (HV_{0,1}) по сравнению с футеровочными бандажами без упрочненного слоя, что согласуется с полученными значениями коэффициента износа и подтверждает корректность принятой математической модели.

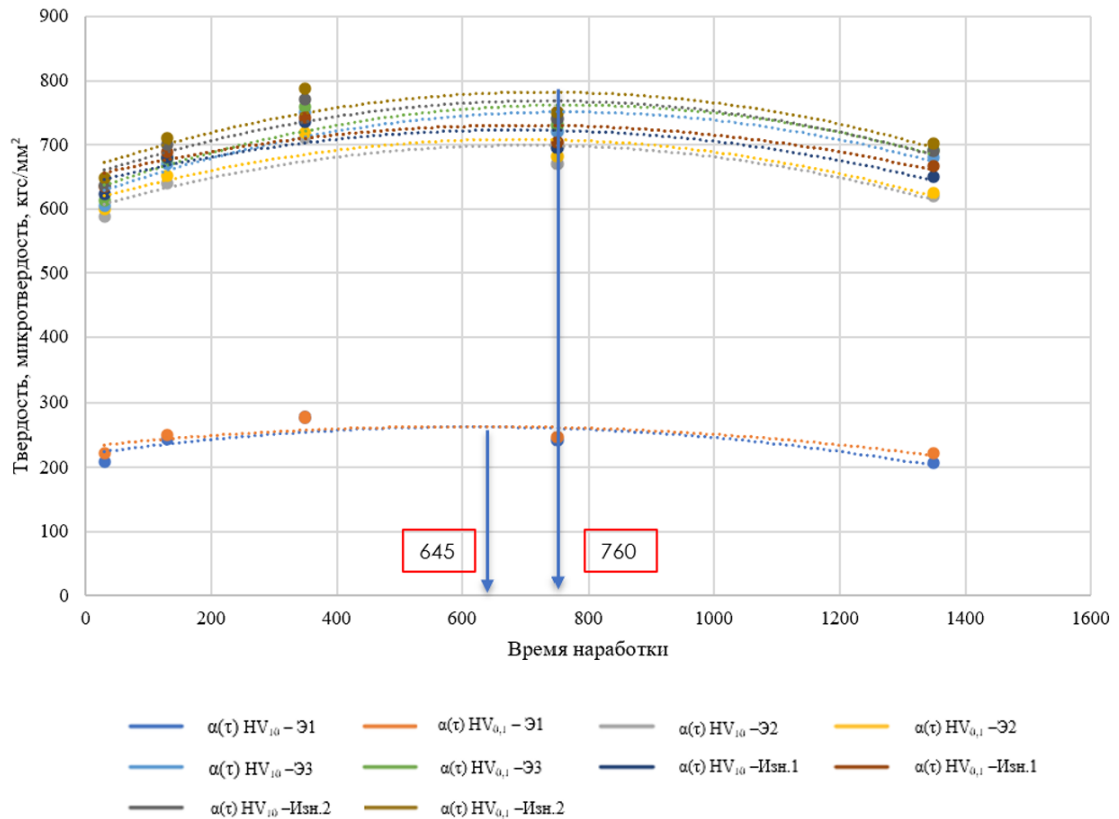


Рисунок 4.2 - Зависимость твердости (микротвердости) образцов от времени наработки
(составлено автором)

Для описания перехода от стадии приработки и наклепа к стадии деградации упрочнённого слоя введён коэффициент $\alpha(\tau)$ с использованием функции Хевисайда $u(\tau - 1)$ (4.6):

$$\alpha(\tau) = (\tau - 1) u(\tau - 1) \quad (4.6)$$

и эквивалентной нормированной формы, определяемой по данным твёрдости (4.7):

$$\alpha(\tau) = \frac{H_{\max} - HV_{10}(\tau)}{H_{\max} - H_0} u(\tau - 1) = \frac{H_{\mu\max} - HV_{0,1}(\tau)}{H_{\mu\max} - H_{\mu 0}} u(\tau - 1). \quad (4.7)$$

Здесь H_{\max} и $H_{\mu\max}$ — максимальные значения твёрдости и микротвёрдости при максимальном наклепе, H_0 и $H_{\mu 0}$ — их исходные значения. Введённый коэффициент $\alpha(\tau)$ определен как *нормированная мера деградации упрочнённого слоя* после достижения максимума наклепа: до критического момента эксплуатации усталостный механизм не доминирует, что учитывается функцией Хевисайда и приводит к $\alpha(\tau) = 0$; после начала снижения твёрдости $\alpha(\tau)$ возрастает от 0 до 1, отражая рост доли усталостного выкрашивания и разрушение наклепанного слоя. Расчёт $\alpha(\tau)$ по данным HV_{10} и $HV_{0,1}$ показал близкие значения $\alpha(\tau) \approx 0,49-0,50$ на стадии начала деградации и $\alpha(\tau) = 1$ на стадии развития деградации, что подтверждает устойчивость критерия и его пригодность для инженерной диагностики (рисунок 4.3).

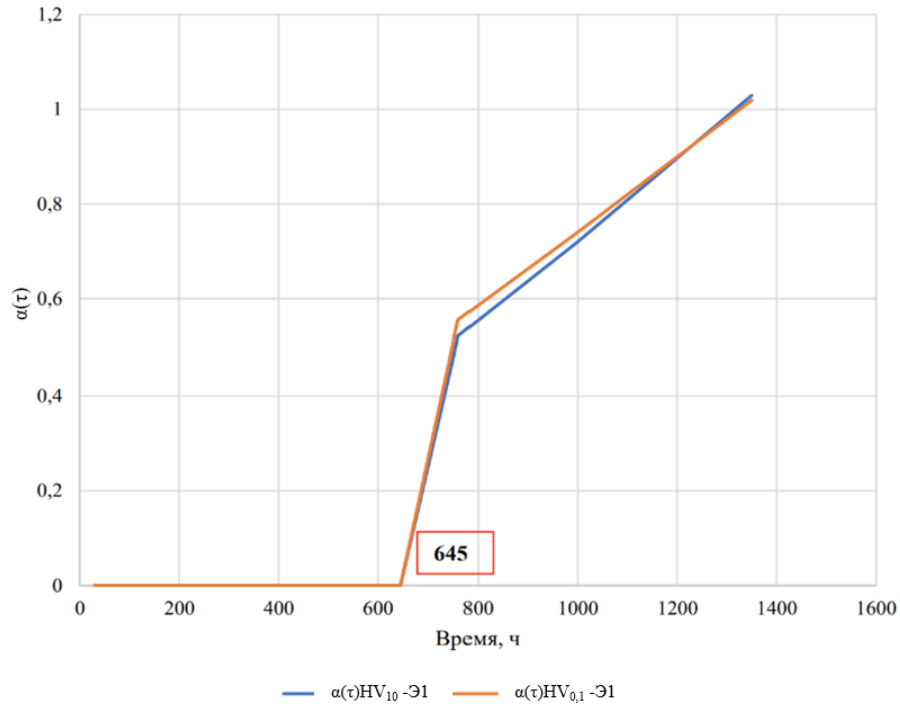


Рисунок 4.3 – Значение коэффициент $\alpha(\tau)$ в зависимости от времени наработки
(составлено автором)

Анализ изменения твёрдости в процессе эксплуатации позволил установить, что нанесение WC-TiN покрытия смещает момент перехода от стадии деформационного упрочнения к стадии усталостной деградации поверхностного слоя. Для эталонных бандажей без покрытия максимальное значение коэффициента наклепа и начало интенсивного роста коэффициента накопления усталости $\alpha(\tau)$ фиксируются при наработке около 645 ч, тогда как для покрытых образцов аналогичный переход наблюдается при наработке порядка 760 ч (рисунок 4.4). При этом для бандажей без покрытия характерен более крутой рост $\alpha(\tau)$, соответствующий ускоренному развитию усталостного выкрашивания, в то время как у покрытых образцов наклон функции $\alpha(\tau)$ существенно ниже, что свидетельствует о замедлении деградации и увеличении продолжительности устойчивой стадии изнашивания. У футеровочных бандажей без упрочняющего покрытия коэффициент $\alpha(\tau)$ растёт более круто, что соответствует быстрому переходу к усталостному разрушению, тогда как у напыленных WC-TiN наклон $\alpha(\tau)$ значительно меньше, что указывает на замедление износа. Покрытие обеспечивает формирование упрочнённого слоя с микротвёрдостью до 637 HV_{0,1}, что соотносится с результатами стендовых испытаний подтверждает снижение скорости абразивного изнашивания.

Технико-экономическая оценка показала, что восстановление футеровочных бандажей методом плазменно-порошкового напыления покрытия на основе WC-TiN является более целесообразным по сравнению с их полной заменой. Экономический эффект достигается за счет сокращения затрат на изготовление нового бандажа, уменьшения объема ремонтных операций и снижения продолжительности простоев оборудования. С учетом затрат на подготовку поверхности, нанесение покрытия, последующую обработку и контроль качества установлено, что применение технологии напыления позволяет снизить совокупные эксплуатационные затраты в среднем на 20% по сравнению с полной заменой футеровочного бандажа.

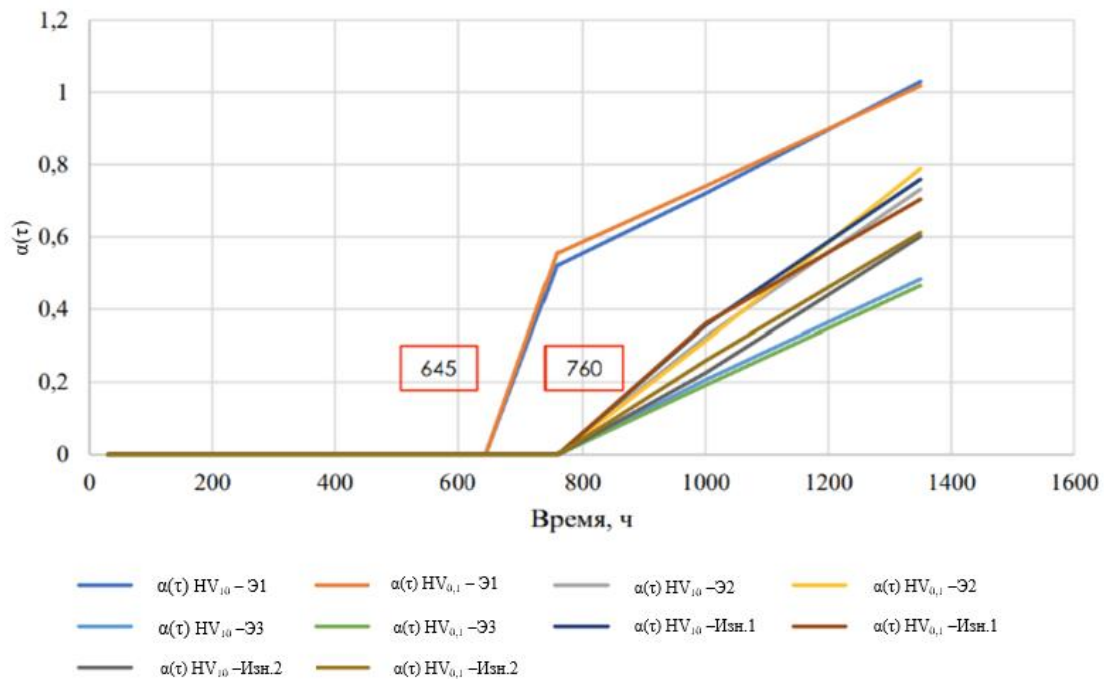


Рисунок 4.4 – Значение коэффициента накопления усталости $\beta(\tau)$ для эталонных образцов и образцов с покрытием в зависимости от времени наработки (составлено автором)

4.2 Анализ параметров кривых Эбботта-Файрстоуна

По результатам экспериментальных исследований, выполненных в третьей главе, на основе анализа кривых Эбботта-Файрстоуна определены основные параметры опорной поверхности футеровочных бандажей. Полученные значения систематизированы в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Параметры кривых Эбботта-Файрстоуна (по данным автора)

$t_{\min}, \text{ч}$	$t_{\max}, \text{ч}$	$t_{\text{mean}}, \text{ч}$	R_k	R_{pk}	R_{vk}	R_{pk}/R_k	R_{vk}/R_k	$Mr2$	$\Phi(t)$
0	50	25	0,17	0,12	0,09	0,72	0,54	0,87	0,31
50	150	100	0,18	0,08	0,09	0,42	0,52	0,88	0,36
150	350	250	0,43	0,09	0,10	0,21	0,24	0,88	0,19
350	650	500	0,44	0,09	0,09	0,21	0,21	0,91	0,17

Продолжение таблицы 4.2

$t_{\min}, \text{Ч}$	$t_{\max}, \text{Ч}$	$t_{\text{mean}}, \text{Ч}$	R_k	R_{pk}	R_{vk}	R_{pk}/R_k	R_{vk}/R_k	$Mr2$	$\Phi(t)$
650	900	775	0,50	0,10	0,07	0,21	0,14	0,95	0,11
900	1100	1000	0,36	0,16	0,15	0,45	0,40	0,93	0,28
1100	1250	1175	0,36	0,25	0,15	0,69	0,40	0,92	0,23
1250	1400	1325	0,34	0,24	0,14	0,69	0,40	0,92	0,23
1400	1550	1475	0,52	0,36	0,21	0,69	0,40	0,93	0,24
1550	1600	1575	0,47	0,35	0,19	0,75	0,40	0,94	0,23

Экспериментально установлены и аппроксимированы зависимости параметров кривых Эбботта-Файрстоуна от времени эксплуатации, показывающие закономерные изменения структуры поверхности бандажа при переходе от стадии приработки к стадии деградации наклепанного слоя. Полученные зависимости подтверждают, что на начальном этапе эксплуатации происходит снижение R_{pk} при относительной стабилизации R_k , тогда как на последующих этапах наблюдается рост R_{vk} , свидетельствующий об интенсификации усталостных процессов и разрушении упрочнённого поверхностного слоя.

Для приведённой высоты пиков получена аппроксимирующая зависимость (4.8), позволяющая использовать параметр R_{pk} в качестве количественного индикатора стадии изнашивания и критерия перехода к ускоренной деградации поверхности (рисунок 4.5):

$$R_{pk}(t) = -6 \cdot 10^{-11} t^3 + 3 \cdot 10^{-7} t^2 - 2 \cdot 10^{-4} t + 0,1151, \quad R^2 = 0,9622; \quad (4.8)$$

для приведённой глубины впадин (4.9) (рисунок 4.6):

$$R_{vk}(t) = 8 \cdot 10^{-8} t^2 - 6 \cdot 10^{-5} t + 0,0986, \quad R^2 = 0,8344. \quad (4.9)$$

Рост R_{pk} на поздних стадиях вызван формированием вторичных микровыступов вследствие разрушения упрочнённого слоя, что является признаком перехода к усталостно-абразивному механизму изнашивания. Рост R_{vk} после достижения определённой наработки отражает развитие каверн и углубление впадин профиля вследствие усталостного выкрашивания поверхностного слоя. Для безразмерных отношений, используемых как индикаторы стадийности изнашивания, получены зависимости (4.10, 4.11):

$$\frac{R_{pk}}{R_k} = -10^{-9} t^3 + 4 \cdot 10^{-6} t^2 - 2,8 \cdot 10^{-3} t + 0,7311, \quad R^2 = 0,9427. \quad (4.10)$$

$$\frac{R_{vk}}{R_k} = -9 \cdot 10^{-10} t^3 + 3 \cdot 10^{-6} t^2 - 2 \cdot 10^{-3} t + 0,6271, \quad R^2 = 0,8429. \quad (4.11)$$

Минимум зависимости R_{pk}/R_k (рисунок 4.7) соответствует стадии формирования плато-поверхности и максимальной несущей способности; последующий рост отражает разрушение упрочнённого слоя и формирование вторичных микровыступов. Итак, зависимость R_{vk}/R_k

(рисунок 4.8) имеет выраженный минимум, соответствующий зоне сформированного плато-профиля, а последующий рост обусловлен развитием каверн и углублением впадин вследствие усталостного выкрашивания. Доля материала на границе впадин Mr_2 (рисунок 4.9) аппроксимирована логарифмической зависимостью (4.12):

$$Mr_2(t) = 0,0157 \ln(t) + 0,8155, \quad R^2 = 0,7477, \quad (4.12)$$

что показывает увеличение опорной площади в начальный период эксплуатации вследствие пластического сглаживания микронеровностей и выход кривой на плато при формировании устойчивой несущей поверхности. Интегральный показатель деградации микрогеометрии $\Phi(t)$ аппроксимирован (4.13):

$$\Phi(t) = -4 \cdot 10^{-10} t^3 + 10^{-6} t^2 - 9 \cdot 10^{-4} t + 0,382, \quad R^2 = 0,668. \quad (4.13)$$

При этом минимум $\Phi(t)$ (рисунок 4.10) соответствует устойчивому режиму, а увеличение $\Phi(t)$ — развитию деградации и приближению к предельному состоянию футеровки.

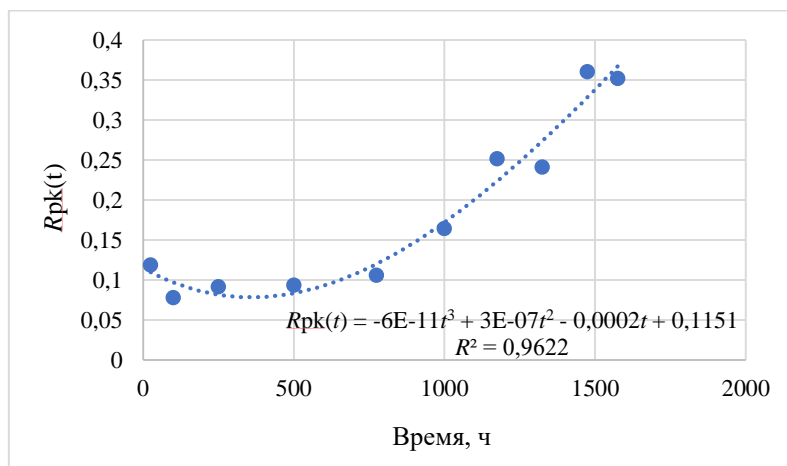


Рисунок 4.5 - Зависимость параметра R_{pk} от времени наработки (составлено автором)

Рост параметра R_{pk} (приведенная высота пиков) на поздних стадиях эксплуатации связан с формированием вторичных микровыступов в результате разрушения упрочнённого слоя и является признаком перехода к усталостно-абразивному механизму изнашивания. Рост параметра R_{vk} (приведенная глубина впадин) после достижения определённой наработки свидетельствует о развитии каверн и углублении впадин профиля вследствие усталостного выкрашивания поверхностного слоя.

Безразмерное отношение R_{pk}/R_k характеризует *относительную долю активных пиков в профиле поверхности*. Минимум данной зависимости соответствует стадии формирования плато-поверхности и максимальной несущей способности, тогда как последующий рост отражает разрушение упрочнённого слоя и формирование вторичных микровыступов.

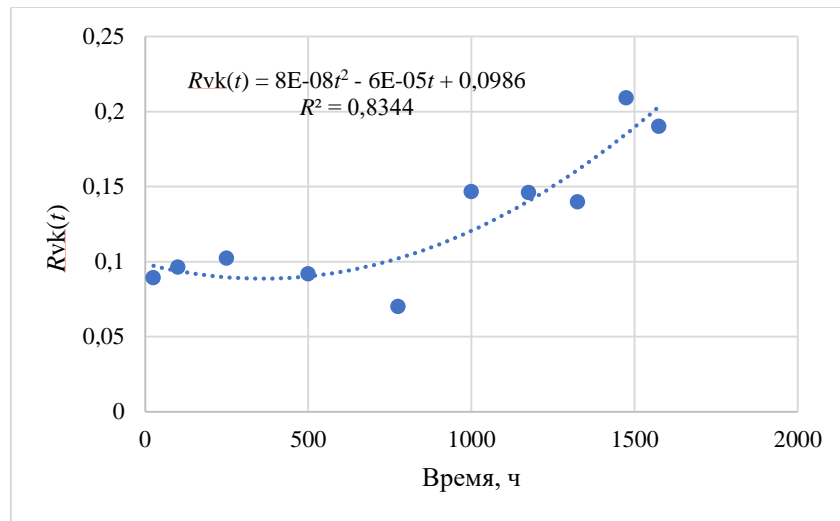


Рисунок 4.6 - Зависимость параметра R_{vk} от времени наработки (составлено автором)

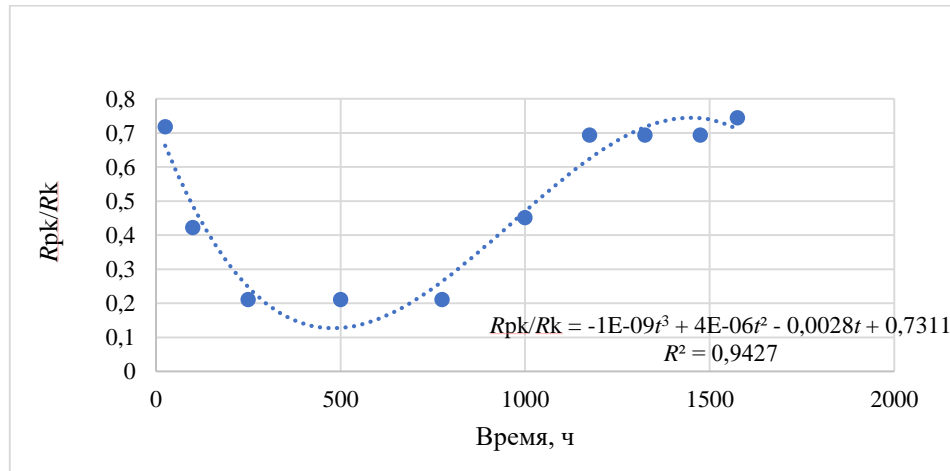


Рисунок 4.7 - Зависимость параметра R_{pk}/R_k от времени наработки (составлено автором)

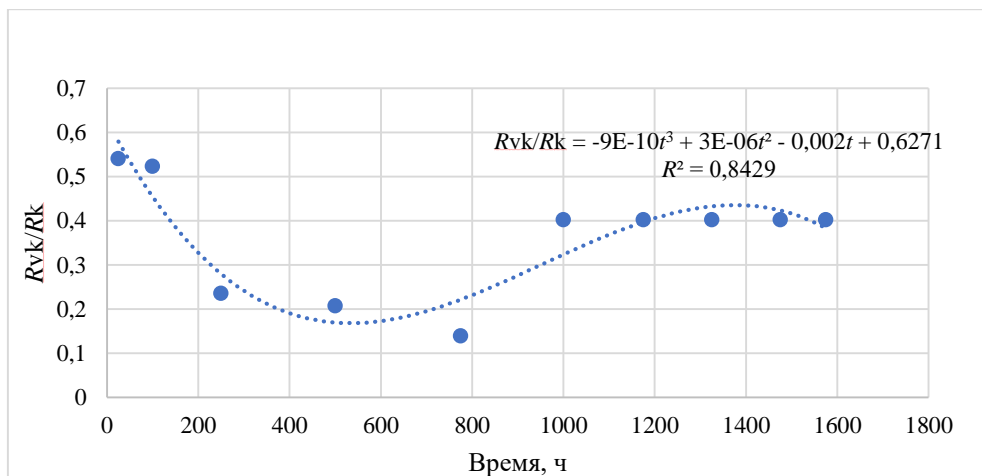


Рисунок 4.8 - Зависимость параметра R_{vk}/R_k от времени наработки (составлено автором)

Зависимость R_{vk}/R_k имеет выраженный минимум, соответствующий зоне сформированного плато-профиля. Рост данного параметра на поздних стадиях эксплуатации обусловлен развитием каверн и углублением впадин вследствие усталостного выкрашивания.

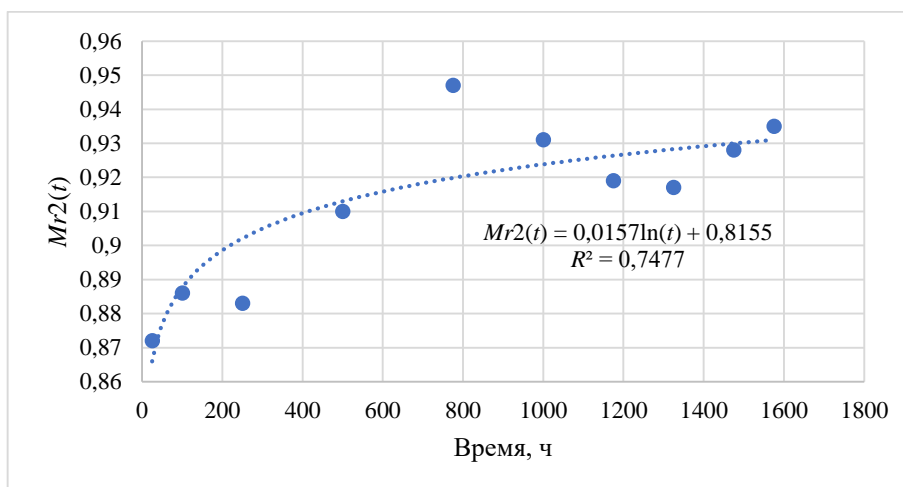


Рисунок 4.9 - Зависимость параметра $Mr2$ от времени наработки (составлено автором)

Рост параметра $Mr2$ на начальной стадии эксплуатации свидетельствует об увеличении опорной площади поверхности вследствие пластического сглаживания микронеровностей. Выход зависимости на плато указывает на формирование устойчивой несущей поверхности.

Параметр $\Phi(t)$ характеризует *относительную долю каверн по отношению к несущей части профиля*. Минимум $\Phi(t)$ соответствует устойчивому режиму эксплуатации, тогда как рост параметра отражает деградацию поверхностного слоя и может быть использован в качестве диагностического критерия предельного состояния.

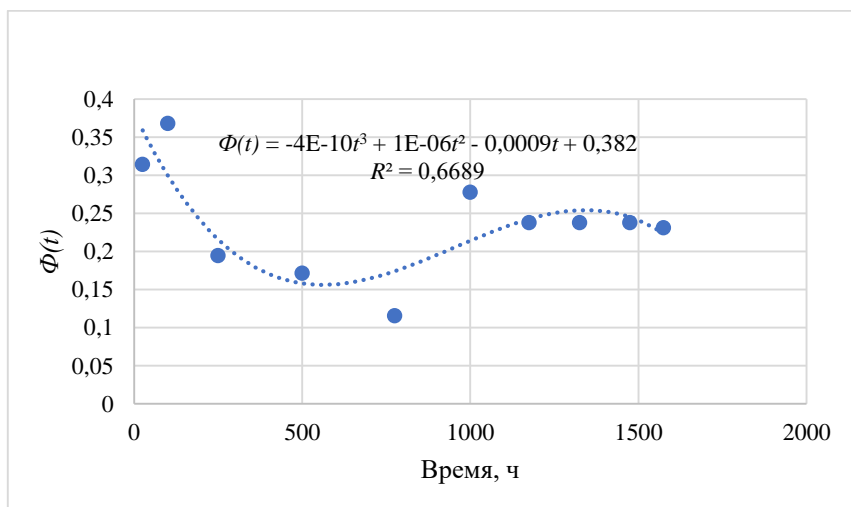


Рисунок 4.10 - Зависимость параметра $\Phi(t)$ от времени наработки (составлено автором)

4.3 Результаты натуральных измерений износа футеровочных бандажей

На основе экспериментальных данных, представленных в таблице 3.2, построены зависимости (рисунок 4.11), отражающие изменение линейного размера образцов во времени при абразивном изнашивании.

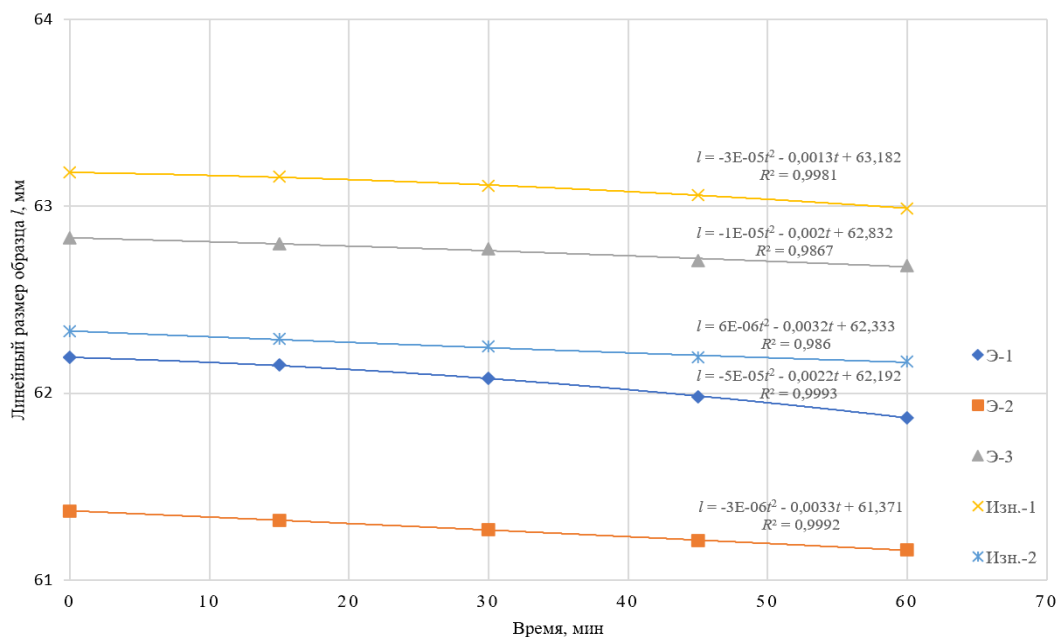


Рисунок 4.11 - Изменение линейного размера образцов в ходе эксперимента на машине МТВП (составлено автором)

На основе полученных экспериментальных данных рассчитана средняя скорость износа образцов, значения которой приведены в таблице 4.3 и графически представлены на рисунке 4.12 [10].

Таблица 4.3 - Средняя скорость износа, мм/мин (по данным автора)

Образец	Средняя скорость износа, мм/мин
Э-1	0,005333
Э-2	0,003500
Э-3	0,002500
Изн.-1	0,003167
Изн.-2	0,002667

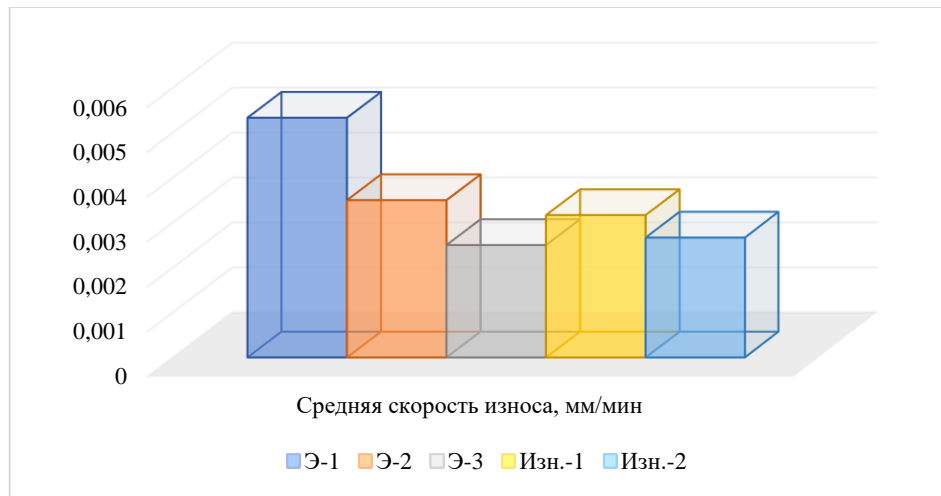


Рисунок 4.12 - Средняя скорость износа образцов, $i=1, \dots, 5$ (составлено автором)

Зависимости потерь линейного размера образцов $\Delta l_i(t)$ от времени испытаний (таблица 4.4; рисунок 4.12) при абразивном изнашивании для образцов с упрочнённым покрытием WC-TiN поверхностей и без с высокой точностью аппроксимируются линейными функциями вида (4.14):

$$\Delta l_i(t) \approx k_i t; \quad i - \text{номер образца}, \quad (4.14)$$

что подтверждается значениями коэффициента детерминации $R^2 > 0,97$. Это свидетельствует о стабильном режиме изнашивания и корректности использования линейной модели для оценки средней скорости абразивного износа.

Таблица 4.4 - Потеря линейного размера образцов $\Delta l_i(t)$ от времени испытаний (по данным автора)

Время, мин.	Э-1	Э-2	Э-3	Изн.-1	Изн.-2
0	0	0	0	0	0
15	0,04	0,05	0,03	0,02	0,04
30	0,11	0,1	0,06	0,07	0,08
45	0,21	0,16	0,12	0,12	0,14
60	0,32	0,21	0,15	0,19	0,16

Сравнительный анализ угловых коэффициентов аппроксимирующих прямых (рисунок 4.13) показывает, что для образцов с покрытием характерны меньшие значения коэффициента k_i , что соответствует снижению средней скорости изнашивания. Средняя скорость изнашивания упрочнённых образцов на 28-30 % ниже, чем у образцов без напыления WC-TiN. Полученные результаты наглядно демонстрируют положительный эффект упрочняющего покрытия WC-TiN, выражающийся в замедлении абразивного изнашивания при прочих равных условиях испытаний.

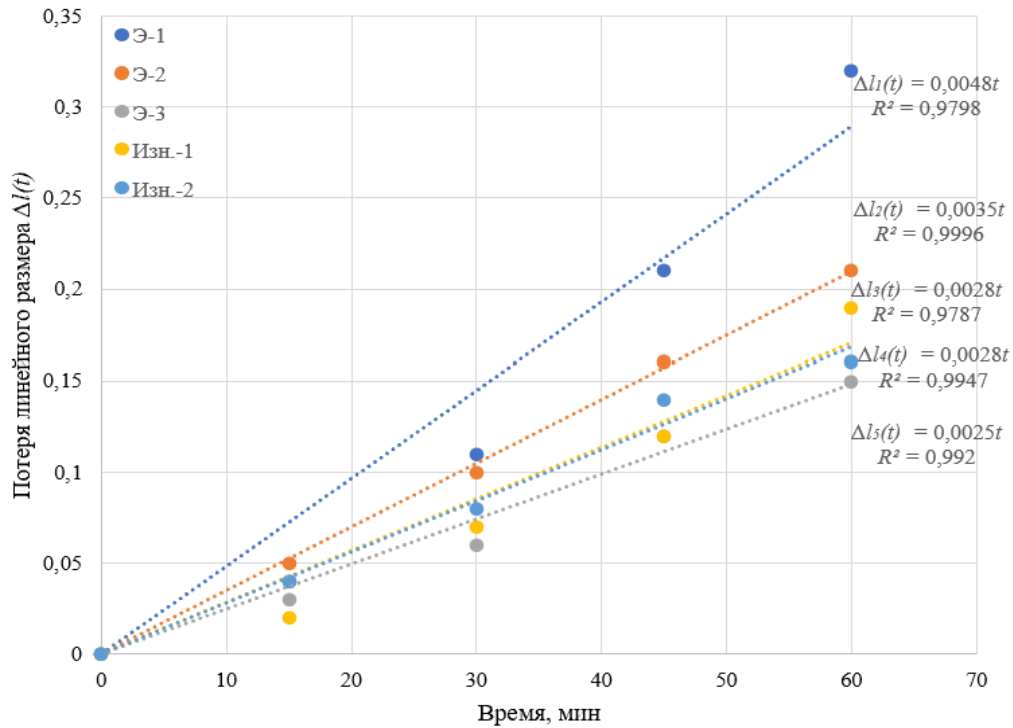


Рисунок 4.13 - Потеря линейного размера i -го образца $\Delta l_i(t)$, $i=1, \dots, 5$ от времени испытаний (составлено автором)

4.4 Построение математической модели процесса изнашивания бандажей валковых дробящих агрегатов

В работе разработана и экспериментально обоснована математическая модель локального абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов в составе карьерных дробильно-сортировочных комплексов. В качестве базового соотношения принята контактно-энергетическая теория Арчарда-Рэя-Хрущёва для локальной величины износа $W(x,y,t)$ (формула 4.15):

$$dW(x,y,t) = k \frac{p(x,y,t)}{H(x,y,t)} \vartheta(x,y,t) dt, \quad (4.15)$$

где $p(x,y,t)$ — локальное контактное давление; $\vartheta(x,y,t) dt$ — локальный путь скольжения за время dt ; $H(x,y,t)$ — твёрдость материала (характеризуемая шкалами HV_{10}); k — эмпирический коэффициент изнашивания, зависящий от типа перерабатываемого материала. Экспериментальная кинетика износа от времени эксплуатации в рамках кратковременной серии испытаний в программном пакете Rocky DEM аппроксимирована также линейной функцией (4.16; рисунок 4.14):

$$W(t) = 11,538t, \quad R^2 = 0,9992, \quad (4.16)$$

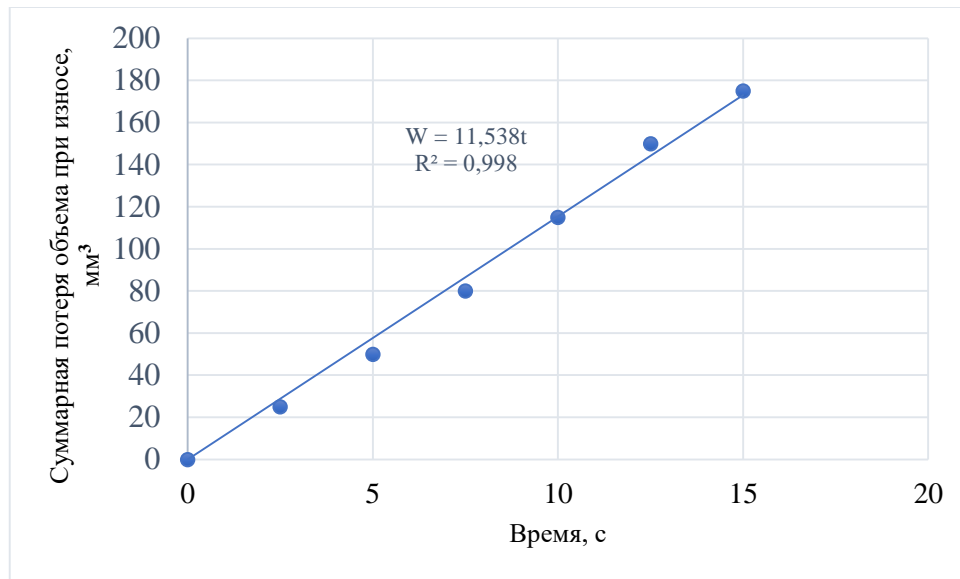


Рисунок 4.14 – Суммарная потеря объема материала при износе от времени эксплуатации
(составлено автором)

Такая зависимость (линейная) подтверждает согласованность экспериментальных данных с выбранным видом базовой зависимости и обосновывающей возможность идентификации параметров модели по измеренной кривой $W(t)$ при заданных контактных условиях. Одновременно установлено, что деградация состояния поверхности футеровочных бандажей сопровождается увеличением энергетических затрат: потребляемая мощность приводом валкового дробящего агрегата возрастает с 502 Вт в начале срока эксплуатации до 970 Вт к концу срока эксплуатации, что может рассматриваться как эксплуатационный фактор ухудшения условий контакта и увеличения потерь энергии на трение и деформационное разрушение поверхностного слоя.

Исходя из вышеизложенного, процесс абразивного изнашивания футеровочных бандажей не является строго линейным во времени и явно зависит от эволюции микрогеометрии поверхности в процессе эксплуатации. Рост глубины впадин и разрушение несущей части профиля приводят к повышению концентрации контактных напряжений и интенсификации микровыкрашивания, а также к возникновению пластических деформаций поверхностного слоя. Для учёта данного эффекта в модель был введён коэффициент ускорения изнашивания $\beta(t)$ (4.17), определяемый на основе параметров опорной кривой Эбботта-Файрстоуна:

$$\beta(t) = 1 + \gamma \Phi(t); \quad \Phi(t) = \frac{R_{vk}(t)}{R_{pk}(t) + R_k(t)}, \quad (4.17)$$

где $R_{pk}(t)$ — приведённая высота выступов профиля; $R_k(t)$ — высота несущего ядра профиля; $R_{vk}(t)$ — приведённая глубина впадин; γ — эмпирический коэффициент чувствительности модели к деградации микрогеометрии поверхности.

Параметр $\Phi(t)$ определяется как относительная доля каверн (впадин) по отношению к несущей части профиля: минимум $\Phi(t)$ соответствует устойчивому режиму эксплуатации с формированием плато-поверхности; увеличение $\Phi(t)$ отражает деградацию поверхностного слоя и может использоваться в качестве диагностического критерия предельного состояния. Тогда уточнённое уравнение локального износа (4.15) принимает вид (4.18):

$$dW(x,y,t)=k \frac{p(x,y,t)}{H(x,y,t)} \vartheta(x,y,t) \beta(t) dt. \quad (4.18)$$

Для обеспечения практической применимости разработанной модели предложена дискретная процедура численного интегрирования, введением вспомогательной величины (4.19):

$$A(t)=k \frac{p(x,y,t)}{H(x,y,t)} \vartheta(x,y,t), \quad (4.19)$$

для которой временной интервал разбивается на шаги $[t_i, t_{i+1}]$ с допущением постоянства усреднённых значений $A(t) \approx A_i$ и $\Phi(t) \approx \Phi_i$ на каждом шаге интегрирования. Тогда получим (4.20-4.22):

$$\frac{dW}{dt} \approx \frac{\Delta W_i}{\Delta t_i} = A_i (1 + \gamma \Phi_i), \quad (4.20)$$

$$W_{i+1} = W_i + A_i (1 + \gamma \Phi_i) \Delta t_i, \quad (4.21)$$

$$\Delta W_i = W_{i+1} - W_i; \Delta t_i = t_{i+1} - t_i. \quad (4.22)$$

В таблице 4.5 приведен расчет локальной величины износа $W(t)$ этим методом.

Таблица 4.5 - Значения $W(t)$ (по данным автора)

$t, \text{ч}$	$\Phi(t)$	$A(t)$	dt	dW	$W(t)$
25	0,31	0,0048	0	0	0
100	0,36	0,0035	75	0,4716	0,4716
250	0,19	0,0028	150	0,714	1,1856
500	0,17	0,0028	250	0,833	2,0186
775	0,12	0,0025	275	0,9009	2,5195
1000	0,28	0,0027	225	0,63	3,2495
1175	0,24	0,0030	175	0,6048	4,1543
1325	0,24	0,0032	150	0,558	4,7123
1475	0,24	0,0033	150	0,5952	5,5075
1575	0,23	0,0035	100	0,4092	5,9167

Полученная экспериментальная зависимость интенсивности износа от времени эксплуатации аппроксимирована полиномом третьей степени (4.23):

$$W(t)=2 \cdot 10^{-9} t^3 - 3 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0052t - 0,0416; \quad R^2=0,9966, \quad (4.23)$$

которая подтверждает согласованность экспериментальных точек с расчётным трендом и отражает ускоряющийся характер изнашивания на поздних стадиях эксплуатации (рисунок 4.15).

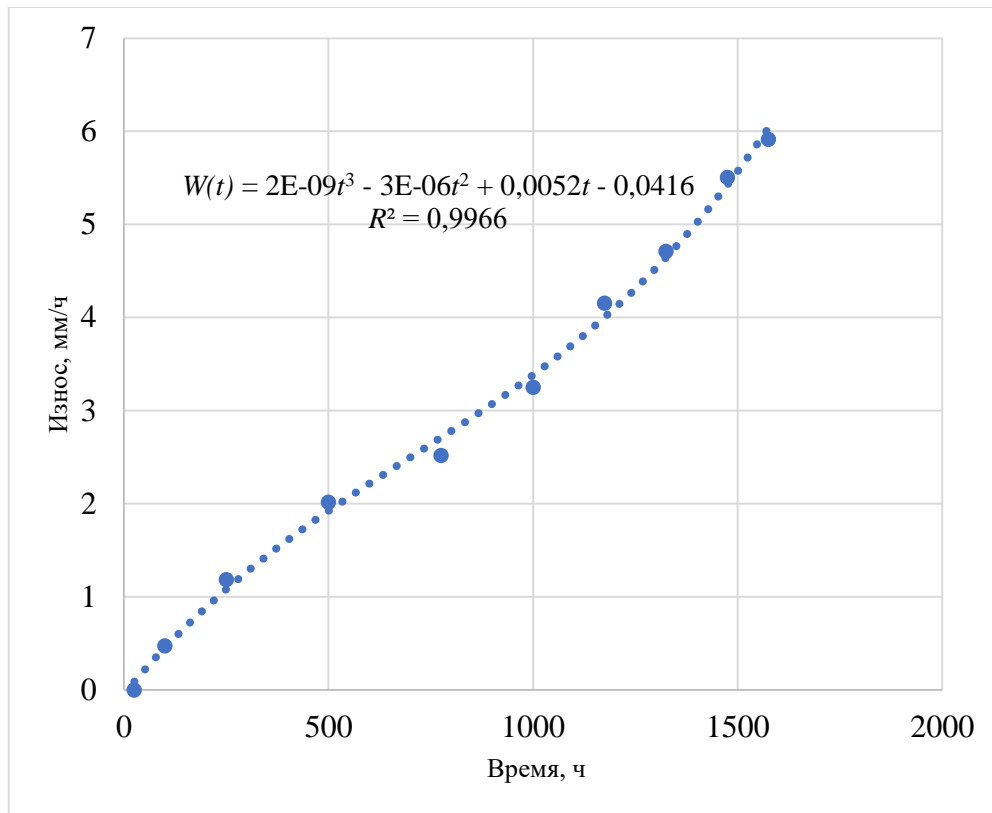


Рисунок 4.15 – Износ бандажа в зависимости от времени эксплуатации (составлено автором)

4.5 Разработка технических решений по модернизации конструкции футеровочных бандажей

4.5.1 Техническое решение по применению сегментированной конструкции футеровочных бандажей

Дополнительный эффект повышения эксплуатационной эффективности достигается за счёт модернизации конструкции футеровочных бандажей.

Техническое решение по применению сегментированной конструкции футеровочных бандажей (рисунки 4.16, 4.17) позволяет оптимизировать распределение нагрузки: два диаметрально противоположных бандажа большей толщины обеспечивают повышенную прочность в зонах максимального контактного давления. Бандажи меньшей толщины снижают общий вес конструкции и минимизируют локальные напряжения в менее нагруженных областях.

Применение сегментированной конструкции способствует повышению ремонтпригодности: сегментированная конструкция упрощает замену изношенных элементов без демонтажа всего вала, сокращая время простоя оборудования. Кроме того, данное техническое решение способствует снижению абразивного изнашивания: равномерное распределение нагрузки между сегментами уменьшает риск локальных деформаций: так, если сегменты с большей толщиной изготовлены из износостойких материалов, то увеличивается ресурс в зонах интенсивного трения

[33]. К тому же конструкция бандажа позволяет варьировать толщину и количество сегментов в зависимости от типа перерабатываемого материала и режима работы

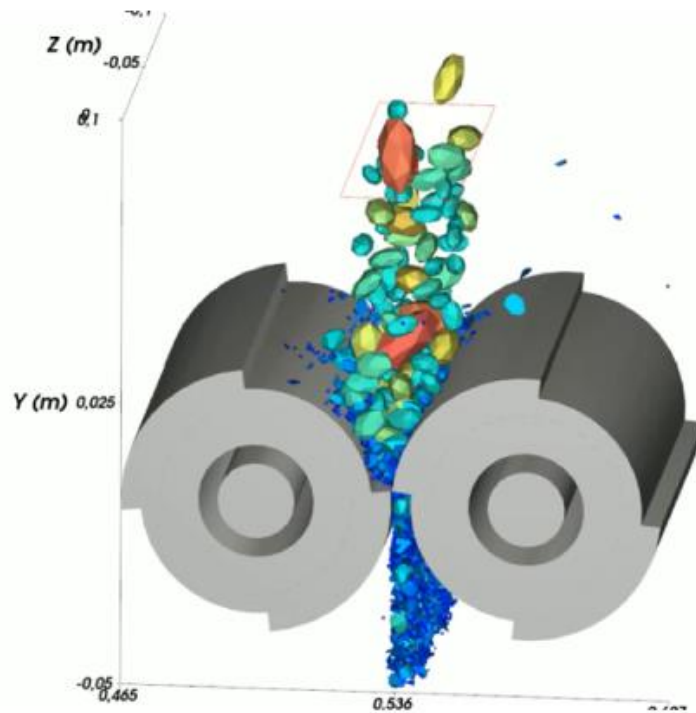


Рисунок 4.16 - Моделирование работы дробилки с сегментированными футеровочными бандажами в программном пакете Rocky DEM (составлено автором)



Рисунок 4.17 - Валок с сегментированными футеровочными бандажами (фото автора)

Численным моделированием в программном пакете ROCKY DEM при задании условий эксплуатации валковых дробящих агрегатов карьерных дробильно-сортировочных комплексов получены значения пиковой мощности привода валков с круглыми бандажами: 502 Вт для футеровочных бандажей в начале срока эксплуатации и 970 Вт — к концу срока эксплуатации (при развитии износа и деградации поверхностного слоя). Рост пиковой мощности привода валкового

дробящего агрегата может рассматриваться как интегральный диагностический критерий состояния футеровочных бандажей, поскольку мощность напрямую связана с условиями контакта, характером разрушения материала и энергетическими потерями в зоне дробления. При неизменной частоте вращения увеличение мощности обусловлено ростом крутящего момента, что, в свою очередь, связано с увеличением сопротивления разрушению материала и ростом сил трения в зоне контакта.

По мере изнашивания футеровочных бандажей происходят следующие процессы: деградация микрогеометрии поверхности, увеличение доли каверн и зон выкрашивания, рост неравномерности распределения контактных напряжений, нарушение угла захвата дробимого материала.

Эти изменения приводят к росту механических потерь и увеличению требуемого крутящего момента. В результате пиковая мощность возрастает (в расчётной модели — с 502 Вт в начале эксплуатации до 970 Вт к концу срока службы), что отражает ухудшение условий контакта и повышение энергетической нагруженности агрегата. В тоже время по результатам моделирования снижение пиковой мощности привода валкового дробящего агрегата с сегментированными футеровочными бандажами достигает до 16 % по сравнению с традиционными круглыми бандажами (рисунок 4.18). При этом производительность агрегата не уменьшается, что свидетельствует о повышении энергетической эффективности процесса дробления.

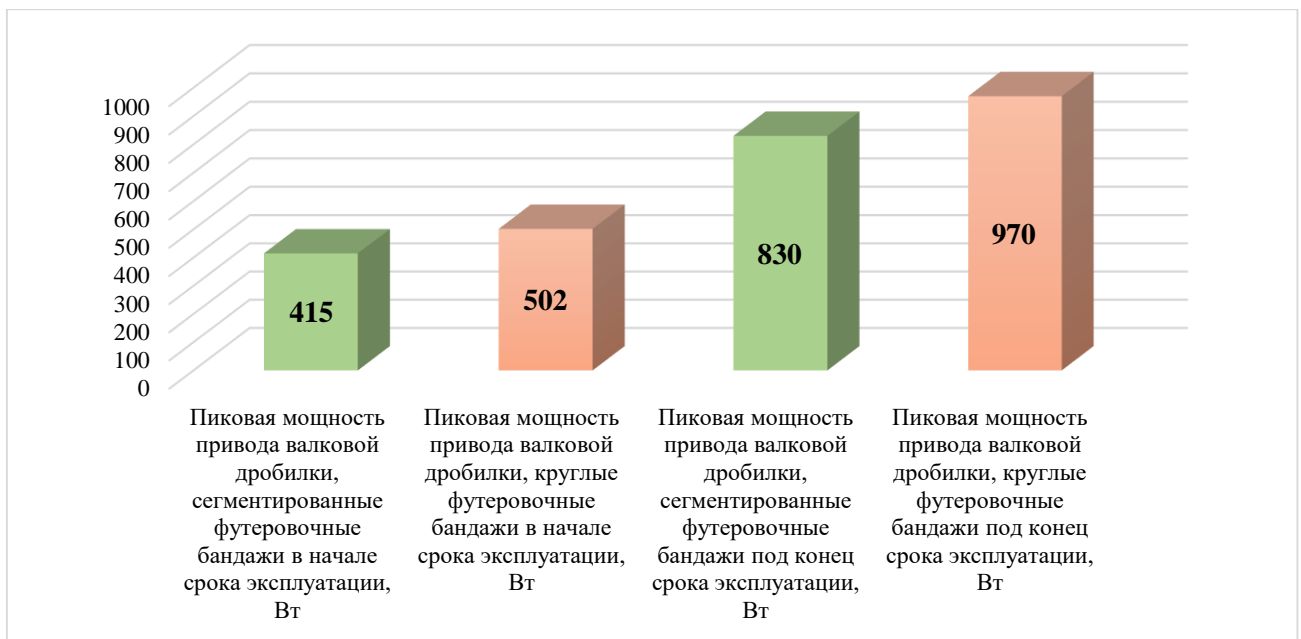


Рисунок 4.18 - Сравнение пиковых мощностей привода валкового дробящего агрегата с круглыми бандажами и с сегментированными бандажами (составлено автором)

4.5.2 Техническое решение по применению конструкции футеровочных бандажей с профилем Рело

Техническое решение по применению футеровочных бандажей с профилем Рело (рисунок 4.19): в дробящем агрегате с футеровочными бандажами данного вида реализуется вертикальное возвратно-поступательное перемещение рудной массы, поэтому перемещение происходит в двух направлениях. В результате повышается эффективность дезинтеграции, и кроме деформации сжатия, происходят истирание, растяжение, ударная деформация, позволяющие повысить эффективность дезинтеграции. Такие виды деформаций наблюдаются из-за возникающей в рабочей зоне дробилки системы циклических (знакопеременных) сил. Использование бандажей с профилем в форме треугольника Рело предупреждает заклинивание негабаритных кусков рудной массы в щели между валками, что обусловлено отбрасыванием негабаритов разнонаправленными силами, возникающими в рабочей зоне дробилки [11, 70].

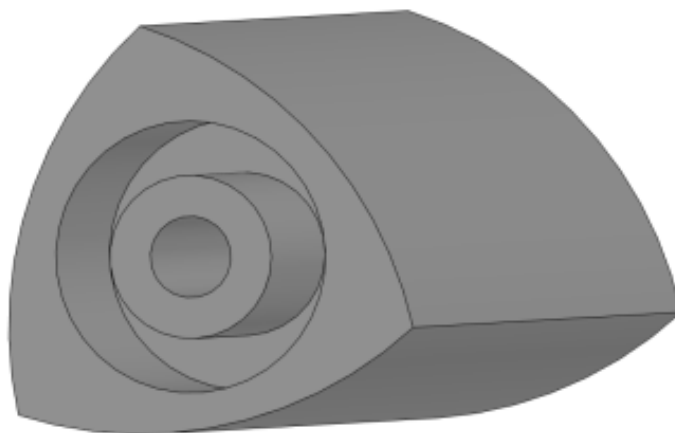


Рисунок 4.19 - Валок с футеровочным бандажом профиля Рело (составлено автором)

Численное моделирование в программном пакете ROCKY DEM показало, что применение валков с футеровками с профилем Рело приводит к перераспределению контактных напряжений, реализации многокомпонентного механизма разрушения и снижению динамических перегрузок, что обеспечивает уменьшение пиковой мощности на 10 % при сохранении или повышении эффективности дробления по сравнению с традиционными круглыми бандажами (рисунок 4.20).

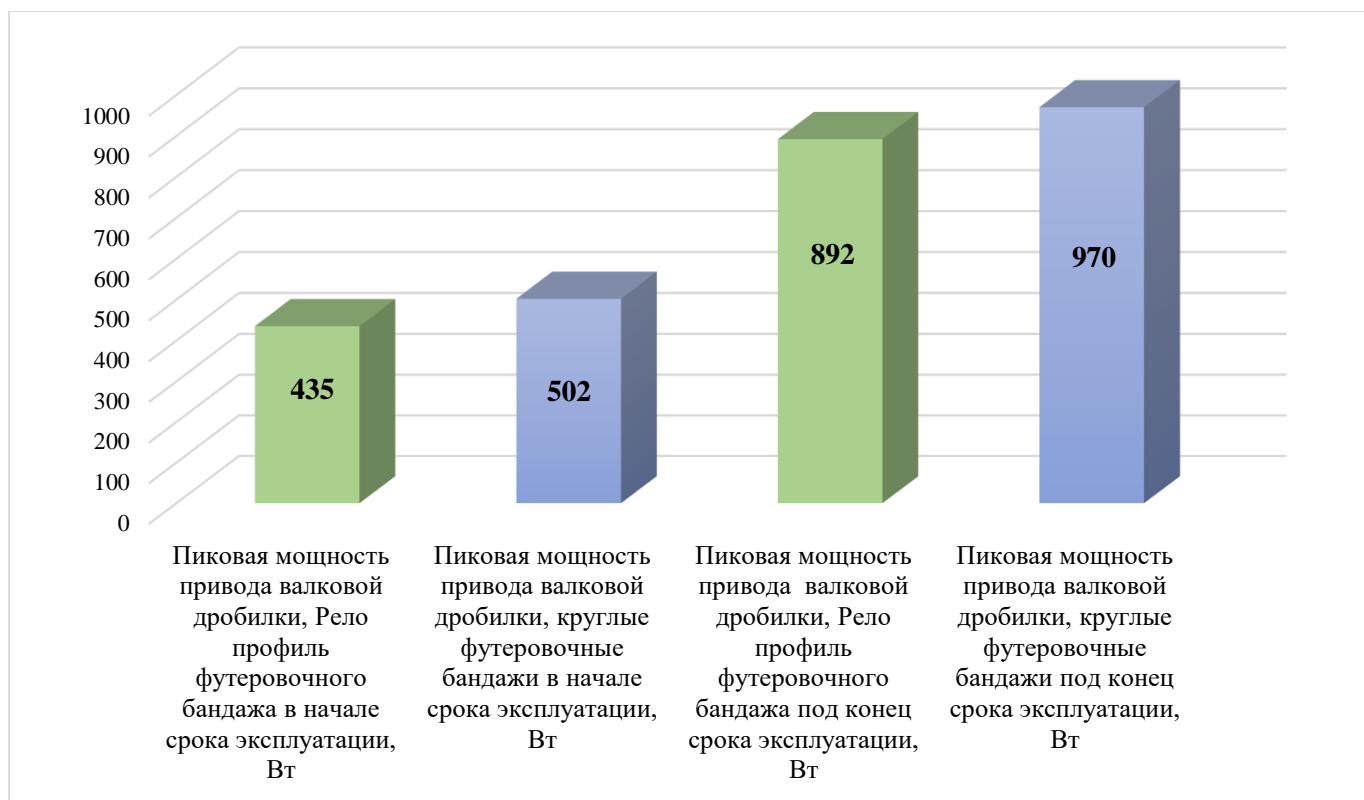


Рисунок 4.20 - Сравнение пиковых мощностей привода валкового дробящего агрегата с круглыми бандажами и бандажами с профилем Рело (составлено автором)

4.6 Выводы по главе 4

1. Экспериментально подтверждена двухстадийная природа абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов, включающая стадию деформационного упрочнения (наклепа) и стадию усталостной деградации поверхностного слоя. Установлено, что на стадии приработки и активного наклепа происходит рост твёрдости HV_{10} с 203-217 кгс/мм² до 274-283 кгс/мм² и микротвёрдости $HV_{0,1}$ с 218-230 кгс/мм² до 263-284 кгс/мм², что соответствует увеличению сопротивления пластической деформации на 24-33 %. Максимум наклепа достигается при наработке порядка 645 ч, после чего фиксируется снижение твёрдости до 203-211 кгс/мм² и развитие усталостного механизма разрушения.

2. Разработан и внедрён количественный критерий перехода к стадии деградации поверхностного слоя, основанный на введении коэффициента накопления усталости $\alpha(\tau)$ с использованием функции Хевисайда. Показано, что до критической наработки ($t \leq 350$ ч) $\alpha(\tau)=0$, а после достижения максимума наклепа коэффициент возрастает до 1, показывая развитие усталостного выкрашивания. Близость расчётных значений $\alpha(\tau)$, полученных по HV_{10} и $HV_{0,1}$, подтверждает устойчивость предложенного диагностического критерия и его инженерную применимость.

3. Установлены закономерности эволюции микрогеометрии поверхности по параметрам кривых Эбботта-Файрстоуна. Минимум безразмерных отношений R_{pk}/R_k и R_{vk}/R_k соответствует формированию плато-поверхности и максимальной несущей способности профиля. Рост R_{pk} на поздних стадиях эксплуатации связан с формированием вторичных микровыступов вследствие разрушения упрочнённого слоя, тогда как увеличение R_{vk} свидетельствует о развитии каверн и углублении впадин профиля. Интегральный параметр $\Phi(t)$ имеет минимум на стадии устойчивого изнашивания и возрастает при деградации, что позволяет использовать его как дополнительный критерий предельного состояния футеровки.

4. Разработана уточнённая математическая модель локального абразивного изнашивания, основанная на контактно-энергетической теории Арчарда-Рэя-Хрущёва с учётом эволюции микрогеометрии поверхности через коэффициент ускорения изнашивания. Введённый параметр, $\beta(t)$ зависящий от R_{pk} , R_k и R_{vk} , позволяет учитывать переход от стадии равномерного износа к стадии ускоренной деградации. Экспериментальные данные аппроксимируются линейной и полиномиальной зависимостями с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,97$, что подтверждает адекватность модели реальному процессу эксплуатации.

5. Показано, что деградация поверхности сопровождается ростом энергетических затрат дробления. Пиковая мощность привода возрастает с 502 Вт в начале эксплуатации до 970 Вт к концу срока службы, что свидетельствует об увеличении контактных потерь и снижении эффективности работы агрегата при развитии усталостного разрушения поверхностного слоя.

6. Экспериментально подтверждена эффективность плазменно-порошкового напыления покрытия WC-TiN. Формируется упрочнённый слой толщиной до 2,3 мм без адгезионных дефектов. Средние значения твёрдости для покрытых образцов составляют 280-290 кгс/мм² HV₁₀ и 330-350 кгс/мм² HV_{0,1} против 210-220 кгс/мм² и 250-270 кгс/мм² соответственно для бандажей без покрытия. Средняя скорость абразивного изнашивания упрочнённых образцов снижается на 28-30 %. Кроме того, нанесение покрытия смещает момент перехода к стадии усталостной деградации с ~645 до ~760 ч, увеличивая продолжительность устойчивой стадии эксплуатации.

7. Трёхмерное сканирование подтвердило выраженную пространственную неравномерность износа. Доля точек, выходящих за пределы допуска, составила 78,78%, что свидетельствует о локализации зон интенсивной деградации и необходимости учёта геометрической неравномерности в расчётных моделях ресурса.

8. Разработаны технические решения, направленные на повышение долговечности футеровочных бандажей. Предложены технические решения по модернизации конструкции футеровок: сегментированная конструкция и профиль Рело, обеспечивающие перераспределение

контактных напряжений, снижение локальных зон износа и снижение потребляемой мощности на 16 и 10% по сравнению с круглыми соответственно.

9. Комплекс экспериментальных и аналитических исследований подтвердил практическую реализуемость разработанных рекомендаций. Полученные зависимости позволяют прогнозировать переход к стадии ускоренной деградации, корректировать межремонтные интервалы и обосновывать применение упрочняющих покрытий и модернизированных конструкций валков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выполненный анализ отечественных и зарубежных научных работ показал, что существующие исследования процессов абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов, в основном, рассматривают отдельные факторы износа и не учитывают комплексное влияние микрогеометрии поверхности, распределения контактных напряжений и эволюции упрочнённого поверхностного слоя в процессе эксплуатации.

2. Установлено, что абразивное изнашивание футеровочных бандажей валковых дробилок в условиях карьерных дробильно-сортировочных комплексов носит стадийный характер и включает стадию наклепа с ростом твёрдости поверхностного слоя до 645 кгс/мм² и стадию усталостной деградации упрочнённого слоя при воздействии переменных физико-механических свойств перерабатываемых материалов.

3. Экспериментально получены количественные зависимости изменения твёрдости HV₁₀ и микротвёрдости HV_{0,1} поверхностного слоя бандажей на различных стадиях эксплуатации, что позволило ввести параметры, характеризующие интенсивность наклепа и коэффициент нормированной меры деградации упрочнённого слоя $\alpha(\tau)$ показывающий, что после достижения максимума наклепа: до критического момента эксплуатации усталостный механизм не доминирует, что учитывается функцией Хевисайда и приводит к $\alpha(\tau) = 0$, а после начала снижения твёрдости $\alpha(\tau)$ возрастает от 0 до 1, отражая рост доли усталостного выкрашивания и разрушение наклепанного слоя.

4. Разработана математическая модель локального абразивного изнашивания футеровочных бандажей, которая учитывает коэффициент изнашивания $\beta(t)$, распределение контактных давлений, путь скольжения, параметры микрогеометрии поверхности и накопление усталостных повреждений. Математическая модель позволяет выполнять инженерную оценку интенсивности износа без применения трудоёмких CFD/FEM-расчётов

5. Проведён комплекс экспериментальных исследований структуры поверхности и микрогеометрии бандажей методами оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, 3D-сканирования и анализа кривых Эбботта-Файрстоуна, что позволило выявить характерные признаки перехода от стадии наклепа к стадии деградации упрочнённого слоя.

6. Установлено, что применение плазменно-порошкового напыления покрытий WC-TiN обеспечивает формирование упрочнённого поверхностного слоя с микротвёрдостью до 637 кгс/мм²

и снижает скорость абразивного изнашивания, что подтверждено результатами стендовых испытаний.

7. Обоснована практическая эффективность применения восстановительных технологий футеровочных бандажей с использованием плазменного напыления, разработана технологическая схема нанесения покрытий, обеспечивающая многократное восстановление изношенных футеровок (экономическая выгода достигает 20% по сравнению с традиционными методами).

8. Предложены технические решения по модернизации конструкции футеровок: сегментированная конструкция (патент № 2831453) и профиль Рело, обеспечивающие перераспределение контактных напряжений, снижение локальных зон износа и снижение пиковой мощности на 16 и 10% по сравнению с круглыми, соответственно.

9. Разработан комплексный метод повышения долговечности футеровочных бандажей валковых дробилок, включающий математическое моделирование, экспериментальную диагностику, применение плазменных покрытий (акт внедрения ООО «3D ПРОЕКТ» от 10 декабря 2025 г.) и рационализацию геометрии валков, позволяющие снизить интенсивность абразивного износа на 60-80 % и увеличить межремонтный срок службы примерно в 1,5 раза.

10. Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией разработанной математической модели к конкретным условиям эксплуатации валковых дробилок на различных карьерах, развитием методов цифрового мониторинга износа и прогнозирования остаточного ресурса футеровочных бандажей, а также оптимизацией конструктивных решений и упрочняющих покрытий для различных типов перерабатываемых пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1445776А1 СССР, МПК В02С 4/02, В02С 4/30. Валковая дробилка : № 4248451 : заявл. 22.05.1987 : опубл. 23.12.1988 // Казаков В. А., Маниев В. П., Чижиков И. П. ; заявитель Пушкинское высшее военное инженерное строительное училище. – 3 с. – URL: <https://patents.google.com/patent/SU1445776A1> (дата обращения: 14.04.2026). – Текст : электронный.
2. Авторское свидетельство № 1726017А1 СССР, МПК В02С 4/28. Валковая дробилка : № 4791871 : заявл. 13.02.1990 : опубл. 15.04.1992 / Колонтаев Б. П., Бочаров В. С., Шихов С. Г., Ли С. В. ; заявитель Алма-Атинский институт инженеров железнодорожного транспорта. – 9 с. – URL: <https://patents.google.com/patent/SU1726017> (дата обращения: 14.04.2026). – Текст : электронный.
3. Андреев, Е. Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Обогащение полезных ископаемых» направления подготовки «Горное дело» / Е. Е. Андреев, О. Н. Тихонов. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петерб. гос. горного ин-та им. Г. В. Плеханова, 2007. – 439 с.
4. Афанасьева, Л. Е. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия / Л. Е. Афанасьева, К. А. Сахаров // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2024. – № 1 (21). – С. 21–26. DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-21-26.
5. Богданов, В. С. Процессы и аппараты для дробления и измельчения : учебное пособие / В. С. Богданов, Н. Д. Воробьёв. – Москва : Стройиздат, 1986. – 256 с.
6. Восстановление и повышение стойкости элементов оборудования сортопрокатных станов / С. П. Нефедьев, М. В. Харченко, А. В. Грубник [и др.] // Черные металлы. – 2026. – № 3. – С. 30–37. DOI: 10.17580/chm.2026.03.05.
7. Гаврилов, Д. И. Влияние лазерной модификации поверхности на физико-механические и трибологические свойства штамповой стали / Д. И. Гаврилов, А. В. Жданов, И. В. Беляев // Ползуновский вестник. – 2022. – Т. 2, № 4. – С. 14–18.
8. Геология СССР / М-во геологии СССР ; гл. ред. Е. А. Козловский. – Москва : Недра, 1989. – Т. XX : Центральный Казахстан. Полезные ископаемые : в 2-х кн. Кн. 1. – 541 с.
9. Гордеева, Е. Разрез, устремлённый в будущее / Е. Гордеева. – Текст : электронный // Журнал «Горно-металлургическая промышленность». – 2020. – № 7-8 (139). – С. 12–15. – URL: https://www.gmprom.kz/wp-content/uploads/2021/03/gmp-7-8_2020.pdf (дата обращения: 05.04.2026).
10. Господариков, А. П. Исследование процессов абразивного изнашивания футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов и методов повышения их износостойкости / А. П. Господариков, Д. А. Ефимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. –

№ 2. – С. 5–27. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_5.

11. Господариков, А. П. К вопросу влияния абразивного износа футеровочных бандажей валковых дробилок на технологические показатели процесса рудоподготовки / А. П. Господариков, **Д. А. Ефимов** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 23. – С. 214–221. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-23-214-221.

12. Господариков, А. П. О некоторых аспектах повышения эффективности дробильного оборудования на рудоподготовительном переделе / А. П. Господариков, **Д. А. Ефимов** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 18. – С. 128–133. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-128-133.

13. ГОСТ 14916–82. Дробилки. Термины и определения : Государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 16 ноября 1982 г. № 4305 : введен 01.01.1984. – Москва : Изд-во стандартов, 1983.

14. ГОСТ 18266-72. Дробилки валковые с гладкими и рифлёными валками : с изменением № 1 : Государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР, Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР от 02 декабря 1972 г. – Москва : Изд-во стандартов, 1974. – URL: <https://www.normacs.ru/Doclist/doc/3DGN.html> (дата обращения: 05.04.2026). – Текст : электронный.

15. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения = Dependability in technics. Terms and definitions : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июня 2016 г. № 654-ст : взамен ГОСТ 27.002-89 : дата введения 2017–03–01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Институт надежности машин и технологий» (ООО «ИНМиТ»). – Москва : Стандартинформ, 2016. – 23 с.

16. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения = Friction, wear and lubrication. Terms and definitions : государственный стандарт СССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 31 марта 1988 г. : взамен ГОСТ 23.002-78 : дата введения 1989–01–01 / разработчики: И. И. Карасик, Ф. В. Саввин, З. М. Померанцева. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 21 с.

17. ГОСТ Р ИСО 4287 2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности = Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное :

утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2014 г. № 2078-ст. : введен впервые : дата введения 2016–01–01 / подготовлен Обществом с ограниченной ответственностью «ЦИТОпроект» (ООО «ЦИТОпроект»). – Москва : Стандартиформ, 2015. – 20 с.

18. Заявка на патент на изобретение № 2025138234 Российская Федерация. Стенд для испытаний на локальный абразивный износ : заявл. 25.12.2025 / Д. А. Ефимов, Ю. В. Старцева; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 8 с.: ил.

19. Итоговый отчет о результатах и основных направлениях деятельности / Министерство энергетики Российской Федерации. – Москва, 2021. – 244 с. – URL: <https://web.archive.org/web/20211204045444/https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/20322/154188> (дата обращения: 05.04.2026). – Текст : электронный.

20. Клушанцев, Б. В. Дробилки : конструкция, расчет, особенности эксплуатации / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. – Москва : Машиностроение, 1990. – 320 с. – ISBN 5-217-00870-9.

21. Клушанцев, Б. В. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций [Учебник для вузов по спец. "Мех. оборуд. предприятий строит. материалов, изделий и конструкций"] / Б. В. Клушанцев, В. А. Бауман, В. Д. Мартынов. — 2-е изд., перераб. — Москва : Машиностроение, 1981. — 326 с.

22. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1968. – 480 с.

23. Макаров, А. В. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой / А. В. Макаров, Н. Н. Соболева, И. Ю. Малыгина // Трение и износ. – 2017. – Т. 38, № 4. – С. 311–318.

24. Нефедьев, С. П. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10P6M5 / С. П. Нефедьев, А. Н. Емелюшин // Вестник Югорского государственного университета. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 33–45. DOI: 10.17816/byusu20210333-45.

25. Новак, А. Российский ТЭК 2022: вызовы, итоги и перспективы / А. Новак // Энергетическая политика. – 2023. – № 2 (180). – С. 4–11. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_2180_4.

26. Новый рекорд по вскрышным работам установил коллектив разреза «Восточный» АО «ЕЭК». – Текст : электронный // ERG : сайт. – 2024. – 07 октября. – URL: <https://www.erg.kz/ru/news/show/3429> (дата обращения: 05.04.2026).

27. Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 года № 1582-р. – Москва, 2020. – 226 с. – URL: https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/ee4/ngpuwtmbm0h7iz66p6mzig3h2iinntai/Programa_razvitiya_ugolnoy_promyshlennosti_Rossii_na_period_do_2035_goda_novaya_redakciya.pdf (дата обращения: 05.04.2026). – Текст : электронный.

28. Паникаровская, Е. Новые высоты «Восточного» / Е. Паникаровская. – Текст : электронный // Журнал «Горно-металлургическая промышленность». – 2018. – № 8 (121). – С. 19–21. – URL: https://agmp.kz/wp-content/uploads/2019/01/zhurnal-_GMP-8_2018.pdf (дата обращения: 05.04.2026).

29. Патент 2288036С1 Российская Федерация, МПК В02С 4/02 (2006.01). Валковая дробилка : № 2005120963 : заявл. 04.07.2005 : опубл. 27.11.2006 / Байбородин Б. А., Федотов К. В., Федотов П. К. ; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный технический университет» (ГОУ ИрГТУ). – 5 с. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2288036> (дата обращения: 14.04.2026). – Текст : электронный.

30. Патент 2454279С2 Российская Федерация, МПК В02С 4/30 (2006.01). Валковая дробилка : № 2009123472/13 : заявл. 16.11.2007 : опубл. 27.12.2010 / Патцельт Н. ; патентообладатель Полизиус АГ. – 12 с. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2454279C2> (дата обращения: 14.04.2026). – Текст : электронный.

31. Патент № 1704818А1 СССР, МПК В02С 4/30. Устройство для дезагрегации спрессованных материалов : № 4794681 : заявл. 21.01. 1990 : опубл. 15.01.1992 / Севостьянов В. С., Романович А. А., Богданов В. С., Ханин С. И. ; патентообладатель Белгородский технологический институт строительных материалов им. И. А. Гришманова. – URL: <https://patents.google.com/patent/SU1704818A1> (дата обращения: 14.04.2026). – Текст : электронный.

32. Патент № 2624290С2 Российская Федерация, МПК В02С 4/30 (2006.01). Измельчающий валок с защитой краев : № 2014146630 : заявл. 27.03.2013 : опубл. 10.06.2016 / Харболд К., Резниченко В. ; заявитель и патентообладатель Метсо Минералз Индастриз, ИНК. – 21 с. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2624290C2> (дата обращения: 14.04.2026). – Текст : электронный.

33. Патент № 2831453 Российская Федерация, МПК В02С 4/00 (2006.01). Валковый дробящий агрегат. Заявка № 2024129884 : заявл. 04.10.2024 : опубл. 09.12.2024 / А. П. Господариков, Д. А. Ефимов, В. Б. Кусков; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 10 с.: ил.

34. Патент № 368876A1 СССР, МПК В02С 4/30. Дробилка для измельчения горных пород : № 1483742 : заявл. 13.10.1970 ; опубл. 08.02.1973 / Крисанов С. А. ; заявитель Выксуиский ордена Трудового Красного Знамени завод дробильно-размольного оборудования. – URL: <https://patents.google.com/patent/SU368876A1> (дата обращения: 14.04.2026).

35. Патент № 3698U1 Российская Федерация, МПК В02С 4/28 (1995.01), В02С 4/42 (1995.01). Валковая дробилка : № 95113802/20 : заявл. 01.08.1995 : опубл. 16.03.1997 / Осадчий А. М., Ермолин В. Н. ; заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа "Уральский завод тяжелого машиностроения". – 6 с. – URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000003698_19970316_U1_RU/ (дата обращения: 14.04.2026). – Текст : электронный.

36. Перов, В. А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых : учебное пособие по специальности "Обогащение полезных ископаемых" / В. А. Перов, Е. Е. Андреев, Л. Ф. Биленко. – 4 е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1990. – 300 с.

37. Повышение износостойкости композиционного покрытия на основе железа при восстановлении специального оборудования / С. Ю. Жачкин, Г. И. Трифонов, А. В. Пустоветов, П. В. Стрункин // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. – 2024. – № 2 (93). – С. 92–99. DOI: 10.53980/24131997_2024_2_92.

38. Подэрни, Р. Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению "Горное дело" специальности "Горные машины и оборудование" : в 2 т. Т. 1 / Р. Ю. Подэрни. – 4-е изд. – Москва : Изд-во МГГУ, 1999. – 332 с.

39. Показатели качества отгружаемого угля разрезом «Богатырь». – URL: https://www.bogatyr.kz/media/filebrowser/pokazately_k_uglya_kom-byt.pdf (дата обращения: 05.04.2026). – Текст : электронный.

40. Ракишев, Б. Р. Технологические комплексы открытых горных работ : Учебник / Б. Р. Ракишев ; Ассоциация вузов Республики Казахстан. – Алматы, 2015. – 285 с.

41. Ржевский, В. В. Открытые горные работы : [Учебник для вузов по специальности "Технология и комплексная механизация открытой разработки месторождений полезных ископаемых] : в 2 ч. / В. В. Ржевский. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1985. – Ч. 1 : Производственные процессы. – 508 с.

42. Трибологические исследования покрытий, нанесенных посредством роботизированной технологической установки лазерной наплавки на образцы-имитаторы валов

роторов-нагнетателей / Д. В. Ляшенко, М. В. Ляшенко, Я. Нагхави, А. Д. Бреки // Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2024 : сборник статей Международной науч.-практ. конференции (Санкт-Петербург, 21–22 июня 2024 г.) / Санкт-Петерб. политехн. ун-т Петра Великого, Ин-т машиностроения, материалов и транспорта, Международный науч.-образоват. центр "BaltTribology-Polytechnic" ; ред.: М. А. Скотникова, А. А. Попович. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 199–208. DOI: 10.18720/SPVPU/2/id24-247.

43. Уголь : Ежемесячный научно-технический и производственно-экономический журнал / учредитель Министерство энергетики Российской Федерации, Редакция журнала Уголь. – 2011. – № 1 (1019). – URL: <https://www.ugolinfo.ru/Free/012011.pdf> (дата обращения: 05.04.2026). – Текст : электронный.

44. Уголь : Ежемесячный научно-технический и производственно-экономический журнал / учредитель Министерство энергетики Российской Федерации, Редакция журнала Уголь. – 2010. – № 9 (1015). – URL: <https://www.ugolinfo.ru/Free/092010.pdf> (дата обращения: 05.04.2026). – Текст : электронный.

45. Фазовый состав и трибологические характеристики поверхностных слоев углеродистых инструментальных сталей после лазерной обработки на воздухе / А. В. Сидашов, А. Т. Козаков, С. И. Ярьско [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 4. – С. 47–58. DOI: 10.31857/S1028096021020138.

46. Федотов, П. К. Межчастичное разрушение руды / П. К. Федотов. – Москва : Геоинформмарк, 2011. – 136 с.

47. Федотов, П. К. Разрушение руды в роллер-прессе / П. К. Федотов. – Москва : Геоинформмарк, 2006. – 128 с.

48. Формирование композиционного покрытия NiCrBSi–TiC с повышенной абразивной износостойкостью методом газопорошковой лазерной наплавки / А. В. Макаров, Н. Н. Соболева, И. Ю. Малыгина, А. Л. Осинцева // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 11 (107). – С. 38–44.

49. Хрущов, М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев ; Академия наук СССР, Гос. научно-исслед. ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова. – Москва : Наука, 1970. – 252 с.

50. Хрущов, М. М. Исследования изнашивания металлов / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев ; Академия наук СССР, Ин-т машиноведения. – Москва : Изд-во АН СССР, 1960. – 352 с.

51. Экскаватор ЭКГ 12,5 : карьерный гусеничный экскаватор : технические характеристики. – Текст : электронный // Горные машины : сайт. – URL:

<https://aogm.ru/catalog/karernoe-oborudovanie/karrerneye/486-ekg-12-5/> (дата обращения: 05.04.2026).

52. ЭШ 15/90 : одноковшовый шагающий экскаватор – драглайн : основные технические параметры. – Текст : электронный // Доминанта Майнинг : сайт. – URL: <https://www.d-mining.ru/ru/catalogue/050/0020/0030?qs=0> (дата обращения: 05.04.2026).

53. Яхимович, В. А. Зависимость интенсивности изнашивания от микротвёрдости покрытий на основе карбида вольфрама для алюминиевых бурильных труб / В. А. Яхимович, А. Д. Бреки, Н. Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 481–487. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-481-482.

54. Agnolucci, P. Coal market developments: Falling prices amid record-high output / P. Agnolucci, K. Temaj // World Bank Blogs : website. – 2024. – 21 June. – Available at: <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/coal-market-developments--falling-prices-amid-record-high-output> (accessed: 05.04.2026).

55. Archard, J. F. Contact and rubbing of flat surfaces / J. F. Archard // Journal of Applied Physics. – 1953. – Vol. 24, № 8. – P. 981–988. DOI: 10.1063/1.1721448.

56. ASM Handbook. Volume 18 : Friction, lubrication, and wear technology / ASM International. – Materials Park, OH : ASM International, 2017. – Available at: https://www.asminternational.org/handbooks/-/journal_content/56/10192/30043342/PUBLICATION (accessed: 05.04.2026).

57. Baharin, A. F. S. Laser surface texturing and its contribution to friction and wear reduction: a brief review / A. F. S. Baharin, M. J. Ghazali, J. A. Wahab // Industrial Lubrication and Tribology. – 2016. – Vol. 68, № 1. – P. 57–66. DOI: 10.1108/ILT 05 2015 0067.

58. Barrios, G. K. P. A preliminary model of high pressure roll grinding using the discrete element method and multi-body dynamics coupling / G. K. P. Barrios, L. M. Tavares // International Journal of Mineral Processing. – 2016. – Vol. 156. – P. 32–42. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.06.009.

59. Caterpillar 6090 FS : горный гидравлический экскаватор : технические характеристики. – URL: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10306111> (дата обращения: 05.04.2026). – Текст : электронный.

60. Climate action: Paris Agreement (Paris, 12 December 2015) / United Nations. – Paris : United Nations, 2015. – 27 p. – Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (accessed: 05.04.2026).

61. Coal 2023: Analysis and forecast to 2026 / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2023. – 130 p. – Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72a7ffa-c5f2-4ed8-a2bf-eb035931d95c/Coal_2023.pdf (accessed: 05.04.2026).

62. Coal sector of Kazakhstan: challenges and opportunities for decarbonizing the economy : Project Paper № 26 / UNCTAD. – Geneva : UNCTAD, 2025. – 84 p. – Available at: https://unctad.org/system/files/information-document/unda2030d26-kazakhstan-coal_en.pdf (accessed: 05.04.2026).
63. Comminution handbook / ed.: A. Lynch. – Melbourne : The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), 2015. – 324 p. – (Spectrum series).
64. Corrigan, C. C. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization / C. C. Corrigan, S. A. Ikonnikova // The Extractive Industries and Society. – 2024. – Vol. 17, Art. 101440. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101440. – Available at: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440> (accessed: 05.04.2026).
65. Crawler dozer brochure : D475A-8 : horsepower and operating weight / Komatsu. – 20 p. – Available at: <https://www.komatsu.com/content/dam/komatsu/sales-and-marketing-documents/brochures/dozers/d475a/dozer-d475a-8-brochure-english-en-d475a-8br01-0322-v1.pdf> (accessed: 05.04.2026).
66. Crushing and screening handbook / ed.: I. Nieminen ; Metso. – 7th ed. – Tampere : Metso, 2023. – 216 p. – Available at: <https://www.metso.com/globalassets/insights/ebooks/metso-crushing-and-screening-handbook-edition7-en-web.pdf> (accessed: 05.04.2026).
67. Crushing and screening handbook / ed.: K. Viilo ; Metso. – 5th ed. – Tampere : Metso, 2011. – 322 p. – Available at: https://www.ausimm.com/globalassets/insights-and-resources/minerals-processing-toolbox/metso_handbook_fifth_ed.pdf (accessed: 05.04.2026).
68. Double Roll Crushers for new and existing crushing plants // TAKRAF : website. – Available at: <https://www.takraf.com/portfolio/detail/double-roll-crushers/> (accessed: 05.04.2026).
69. Draper, N. R. Applied regression analysis / N. R. Draper, H. Smith. – 3rd ed. – New York : John Wiley & Sons, 1998. – 706 p.
70. **Efimov, D. A.** Technical and technological aspects of the use of Reuleaux triangular profile rolls in crushing units in the ore processing plant / **D. A. Efimov**, A. P. Gospodarikov // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2022. – No. 10-2. – P. 117–126. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_117.
71. Equipment and operations automation in mining: A review / M. Long, S. Schafrik, P. Kolapo [et al.] // Machines. – 2024. – Vol. 12, № 10. – Art. 713. DOI: 10.3390/machines12100713. – Available at: <https://www.mdpi.com/2075-1702/12/10/713> (accessed: 05.04.2026).
72. EU coal production and consumption reach historical low // Eurostat : website. – 2025. – 03 July. – Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250703-1>

(accessed: 05.04.2026).

73. Friction, wear, lubrication: Tribology handbook / eds.: I. V. Kragelsky, V. V. Alisin. – Oxford : Pergamon, 1982. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/book/9781483284224/friction-wear-lubrication> (accessed: 05.04.2026).

74. Global and regional coal phase-out requirements of the Paris Agreement: insights from the IPCC Special Report on 1.5°C : Report / P. A. Yanguas Parra, G. Ganti, R. Brecha [et al.] // Climate Analytics : website. – 2019. – 23 September. – 34 p. – Available at: https://cal-clm.edcdn.com/assets/report_coal_phase_out_2019.pdf (accessed: 05.04.2026).

75. Global coal demand expected to decline in coming years / International Energy Agency. – 2023. – 15 December. – Available at: <https://www.iea.org/news/global-coal-demand-expected-to-decline-in-coming-years> (accessed: 05.04.2026).

76. Gupta, A. Mineral Processing Design and Operations : An Introduction / A. Gupta, D. S. Yan. – 2nd ed. – Amsterdam : Elsevier, 2016. – 882 p. – ISBN 978-0-444-63589-1.

77. HRC™. High pressure grinding rolls (HPGR) : Datasheet no: 4142 01 20 EN MNG / Metso. – Tampere : Metso, 2020. – 1 p. – Available at: https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents--episerver/2020_02_hrc_high_pressure_grinding_rolls_hpgr_datasheet.pdf (accessed: 09.04.2026).

78. Human aspects of automation and new technology in mining: Integrating people and technology through human-centred design : A white paper prepared for ACARP project C3402 / R. Burgess-Limerick, T. Horberry, D. Lynas [et al.] ; The University of Queensland, University of Pittsburgh. – 2024. – March. – 33 p. – Available at: https://smi.uq.edu.au/files/105132/Human-Aspects-of-Automation-and-New-Technology-in-Mining-Integrating-People-and-Technology-Through-Human-Centred-Design_May-2024_white-paper.pdf (accessed: 05.04.2026).

79. Hutchings, I. Tribology: friction and wear of engineering materials / I. Hutchings, P. Shipway. – 2nd ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. – 412 p.

80. IAMGOLD's autonomous Pit Viper fleet with Epiroc's RCS. – Available at: <https://www.epiroc.com/en-na/newsroom/2019/iamgolds-autonomous-pit-viper-fleet-with-epirocs-rs> (accessed: 05.04.2026).

81. Industrial 3D scanning. ATOS // ZEISS : website. – Available at: <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/optical-3d/3d-scanning.html> (accessed: 15.04.2026).

82. ISO 13565-2:1996. Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties. Part 2 : Height characterization using the linear material ratio curve : Publication date 1996-12 / Technical committee : ISO/TC 213 ; ICS 17.040.20. – Geneva : International Organization for Standardization, 1996. – 6 p. – Available at:

<https://www.iso.org/standard/22280.html> (accessed: 05.04.2026).

83. ISO 6507-1:2018. Metallic materials – Vickers hardness test. Part 1 : Test method : Publication date 2018-01 / Technical Committee : ISO/TC 164/SC 3 ; ICS 77.040.10. – Geneva : International Organization for Standardization, 2018. – 30 p.

84. Kazakhstan 2022: Executive summary / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2022. – 148 p. – Available at: <https://www.iea.org/reports/kazakhstan-2022/executive-summary> (accessed: 05.04.2026).

85. Large Dozer D10: operating weight and engine power // Caterpillar : website. – Available at: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/dozers/large-dozers/115080.html (accessed: 05.04.2026).

86. Large Dozer D11: operating weight and engine power // Caterpillar : website. – Available at: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/dozers/large-dozers/15969853.html (accessed: 05.04.2026).

87. Largest operating dragline excavator – Bucyrus 2570WS // Guinness World Records : website. – Available at: <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/79257-largest-operating-dragline-excavator> (accessed: 05.04.2026).

88. Li, J. A review of the corrosion and wear resistance mechanisms of gas nitriding on steel / J. Li, H. Shao, K. Lu // iScience. – 2026. – Vol. 29, № 3. – Art. 115048. DOI: 10.1016/j.isci.2026.115048.

89. Liebherr R9800 : карьерный экскаватор : технические характеристики. – Текст : электронный // inoPRESSworld.ru: Спецтехника, коммерческий транспорт и оборудование : сайт. – URL: <https://www.inopressworld.ru/shovels/liebherr-shovels/liebherr-r9800-shovel/> (дата обращения: 05.04.2026).

90. McEwing, S. Finding the right fit - risks and opportunities of open pit crushing and conveying / S. McEwing. – 2019. – July // SRK Consulting : website. – Available at: <https://www.srk.com/en/publications/finding-the-right-fit-risks-and-opportunities-of-open-pit-crushing-and-conveying> (accessed: 05.04.2026).

91. Miner, M. A. Cumulative damage in fatigue / M. A. Miner // Journal of Applied Mechanics. – 1945. – Vol. 12, № 3. – P. A159–A164. DOI: 10.1115/1.4009458.

92. Mineral processing plant design, practice, and control : 2 volume set / eds.: A. L. Mular, D. N. Halbe, D. J. Barratt. – Littleton, CO : Society for Mining : Metallurgy & Exploration, 2002. – 2450 p.

93. Mining dump truck BELAZ 75710 : with payload capacity of 450 tonnes : technical specifications. – 2 p. – Available at: <https://akk.ee/wp-content/uploads/2020/03/BELAZ-75710-specs.pdf> (accessed: 05.04.2026).

94. Monitoring slope stability: A comprehensive review of UAV applications in open-pit mining / S. Tsachouridis, F. Pavloudakis, C. Sachpazis, V. Tsioukas // *Land*. – 2025. – Vol. 14, № 6. – Art. 1193. DOI: 10.3390/land14061193. – Available at: <https://www.mdpi.com/2073-445X/14/6/1193> (accessed: 05.04.2026).
95. Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments / D. C. Montgomery. – 8th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2012. – 730 p.
96. Nghipulile, T. The effect of HPGR and conventional crushing on the extent of micro-cracks, milling energy requirements and the degree of liberation: A case study of UG2 platinum ore / T. Nghipulile, S. Nkwanyana, N. Lameck // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13, № 10. – Art. 1309. DOI: 10.3390/min13101309.
97. Oberrauner, A. Essentials on In Pit Crushing and Conveying (IPCC) / A. Oberrauner, D. Turnbull. – 2013. – 13 p. – Available at: https://www.icm-consult.at/_files/ugd/b6c457_7d5a19932abe4a06b65a16c7d9f17260.pdf (accessed: 05.04.2026).
98. Off Highway Truck 777: product specifications // Caterpillar : website. – Available at: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/off-highway-trucks/115560.html (accessed: 05.04.2026).
99. Off Highway Truck 797F: product specifications // Caterpillar : website. – Available at: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/mining-trucks/18093014.html (accessed: 05.04.2026).
100. Overburden, rocks and sand: mining, removal and handling // TAKRAF : website. – Available at: <https://www.takraf.com/overburden-and-rocks/> (accessed: 05.04.2026).
101. Patent № 100927A Switzerland, Int. Cl. B02 C4/00. Zylindermühle : № CH100927D : anmeldetag 08.09.1922 : offenlegungstag 01.10.1923 / Soder O. – Available at: <https://patents.google.com/patent/CH100927A> (accessed: 14.04.2026).
102. Patent № 102005027729A1 Germany, Int. Cl. B02C 4/30 (2006.01). Walzenbrecher zum brechen von heißem zementklinker : № 102005027729.2 : anmeldetag 16.06.2005 : offenlegungstag 28.12.2006 / Sommer E., Schinke K. ; anmelder KHD Humboldt Wedag GmbH. – 5 s. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE102005027729A1> (accessed: 14.04.2026).
103. Patent № 102005047516A1 Germany, Int. Cl. B02C 4/30 (2006.01), B02C 4/28 (2006.01). Walzenbrecher zur herstellung hochreiner polykristalliner siliciumchips : № 102005047516.7 : anmeldetag 04.10.2005 : offenlegungstag 13.04.2006 / Horstman T. L., Spencer R. D. Jr., Dubay T., Andrejewski D., Sternagel F. ; anmelder Dow Corning Corp. – 10 s. – Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/75/dd/01/62525cc046bbe4/DE102005047516A1.pdf> (accessed: 14.04.2026).

104. Patent № 105928A Switzerland, Int. Cl. B02 C 4/00. Zylindermühle : № CH105928D : anmeldetag 03.09.1923 : offenlegungstag 16.07.1924 / Soder O. – Available at: <https://patents.google.com/patent/CH105928A> (accessed: 14.04.2026).

105. Patent № 108014A Switzerland, Int. Cl. B02 C4/30. Fouloir à fruits : № CH108014D : date of filing 07.01.1924 : date of a publ. 01.12.1924 / Badan A. – Available at: <https://patents.google.com/patent/CH108014A> (accessed: 14.04.2026).

106. Patent № 160801C Germany, Int. Cl. B02C 4/30. Roller mill for processing clay and similar materials with stepped spiral rollers : № DENDAT160801D. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE160801C> (accessed: 14.04.2026).

107. Patent № 2042366A United Kingdom. Int. Cl. B02C 4/12, B02C 4/30. Roller and breast mill : № 8002727 : date of filing 28.01.1980 : date of a publ. 24.09.1980 / Trickett S., Quentin R. ; applicant Simon Barron Ltd. – 3 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/GB2042366A> (accessed: 14.04.2026).

108. Patent № 206762979U China, Int. Cl. B02C 4/02 (2006.01), B02C 4/30 (2006.01), B02C 4/42 (2006.01). A kind of flour mill : № 201720540372.2 : date of filing 16.05.2017 : date of a publ. 19.12.2017 / Wu F., Lin M., Wu F. ; assignee Ningxia Yixing Industry Co Ltd. – 6 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/CN206762979U> (accessed: 14.04.2026).

109. Patent № 208661352U China, Int. Cl. B02C 21/00(2006.01), B02C 4/08(2006.01), B02C 23/08(2006.01), B02C 4/02(2006.01), B02C 4/42(2006.01), B02C 4/30(2006.01). A kind of efficient grinding equipment of rare earth processing building stones : № 201820139226.3 : date of filing 27.01.2018 : date of a publ. 29.03.2019 / Jiang P. – 9 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/CN208661352U> (accessed: 14.04.2026).

110. Patent № 218291C Germany, Int. Cl. B02C 4/30. Crushing and stone-separating roller mill for processing clay and loam : № DENDAT218291D. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE218291C> (accessed: 14.04.2026).

111. Patent № 2341121A United Kingdom, Int. Cl. B02C 4/30. Rotary crusher with polygonal drum : № 9920458.8 : date of filing 31.08.1999 : date of a publ. 08.03.2000 / Harris M. ; applicant MGH Recycling Limited. – 23 p. – Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/14/d5/25/964c4bdaab076a/GB2341121A.pdf> (accessed: 14.04.2026).

112. Patent № 239723A United Kingdom, Int. Cl. B02C4/30. Improvements in and relating to crushing rollers : № GB2380524A : date of filing 08.10.1924 : date of a publ. 17.09.1925 / Millar G. W., Blair D. A. – Available at: URL: <https://patents.google.com/patent/GB239723A> (accessed: 14.04.2026).

113. Patent № 241239C Germany, Int. Cl. B02C 4/30. Device for sealing rollers by means of flanges for chocolate manufacture : № DENDAT241239D. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE241239C> (accessed: 14.04.2026).

114. Patent № 2690359A1 France, Int. Cl. B02 C 15/04. Dispositif permettant le broyage et calibrage des pierres et roches de tous types, pouvant s'installer sur des broyeurs mobiles type agricole, et fixes pour carrières et travaux publics : № FR9205436A : date de dépôt 27.04.1992 : date de la mise à disposition du public de la demande 29.10.1993 / Carmen M. – 6 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/FR2690359A1> (accessed: 14.04.2026).

115. Patent № 280460A Switzerland, Int. Cl. B02 C4/44. Cylindre pour moulin à cylindres : № CH280460D : date of filing 15.09.1949 : date of a publ. 31.01.1952 / Ltd Bramigk Co. – Available at: <https://patents.google.com/patent/CH280460A> (accessed: 14.04.2026).

116. Patent № 4332782A1 Germany, Int. Cl. B02C 4/40. Walzenmühle zum mahlen von feststoffen : № DE19934332782 : anmeldetag 27.09.1993 : offenlegungstag 30.05.1995 / Dahlhaus U. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE4332782A1> (accessed: 14.04.2026).

117. Patent № 441647A France, Int. Cl. B02 C 4/30. Moulin à cylinder : № FR441647D : date de dépôt 22.03.1912 : date de la mise à disposition du public de la demande 12.08.1912 / Baumann A. – Available at: <https://patents.google.com/patent/FR441647A> (accessed: 14.04.2026).

118. Patent № 574037C Germany, Int. Cl. B02C 4/30. Kammwalzenpaare fuer die getreidemuellerei : № DEN34341D : anmeldetag 07.07.1932 : offenlegungstag 08.04.1933. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE574037C> (accessed: 14.04.2026).

119. Patent № 738027A United Kingdom, Int. Cl. B02C 4/44. Improvements in or relating to roller refiners : № GB59953A : date of filing 08.01.1953 : date of a publ. 05.10.1955 / Tunley A. A. ; assignee Baker Perkins Ltd. – Available at: <https://patents.google.com/patent/GB738027A> (accessed: 14.04.2026).

120. Patent № 772107A United Kingdom, Int. Cl. B02C 4/30. A coal breaker or the like : № GB28263/55A : date of filing 04.10.1955 : date of a publ. 10.04.1957 / Teesink G., Teesink W. – Available at: <https://patents.google.com/patent/GB772107A> (accessed: 14.04.2026).

121. Patent № 84040C Germany, Int. Cl. B02C 4/30. Crushing machine with toothed rollers : № ENDAT84040D. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE84040C> (accessed: 14.04.2026).

122. Patent № 885189C Germany, Int. Cl. B02C 4/30. Walze fuer mahlmaschinen getreidemuellerei : № DEF7027A : anmeldetag 24.08.1951 : offenlegungstag 03.08.1953 / Falk H. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE885189C> (accessed: 14.04.2026).

123. Patent № 8903718U1 Germany, Int. Cl. B02C 4/08. Walzenbrecher zum vermahlen von

anorganischem, hartem und/oder sprödem material : № DE8903718U : anmeldetag 23.03.1989 : offenlegungstag 20.07.1989 / anmelder Noricum Maschinenbau und Handel Gesmbh Linz At. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE8903718U1> (accessed: 14.04.2026).

124. Patent № 9419235U1 Germany, Int. Cl. B02 C 4/06. Vorrichtung zum verarbeiten von körnigen nahrungsmitteln : № DE9419235U : anmeldetag 01.12.1994 : offenlegungstag 26.01.1995. – Available at: <https://patents.google.com/patent/DE9419235U1> (accessed: 14.04.2026).

125. Patent № 99336A Switzerland, Int. Cl. B02C 4/30. Mühle zum vermahlen von weichem oder hartem, aber auch zähem und schmierigem gut, wie knochen, vegetabilien, getreide und dergleichen : № CH99336D : anmeldetag 21.03.1921 : offenlegungstag 16.05.1923 / anmelder Deutsche Werke Aktiengesellschaft. – Available at: <https://patents.google.com/patent/CH99336A> (accessed: 14.04.2026).

126. Patent № WO 02/05963A1 Germany, Int. Cl. B02C 7/10, B29B 17/00. Granulatzerkleinerung : № PCT/EPO01/08091 : anmeldetag 12.07.2001 : offenlegungstag 24.01.2002 / Balabekov M., Balabekov S., Jovanovic D. ; anmelder New Activation Technology (NAT) AG. – 23 s. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2002005963A1> (accessed: 14.04.2026).

127. Patent № WO 2006/133870A1 Germany, Int. Cl. B02C 4/30 (2006.01), B02C 4/08 (2006.01). Walzenbrecher zum brechen von heissem zementklinker : № PCT/EP2006/005583 : anmeldetag 10.06.2006 : offenlegungstag 21.12.2006 / Sommer E., Schinke K. ; anmelder KHD Humboldt Wedag GmbH. – 17 s. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2006133870A1> (accessed: 14.04.2026).

128. Patent № WO 2007/034038A1 Finland, Int. Cl. B02C 4/30 (2006.01), B02C 18/14 (2006.01). Crushing device and a rotor for a crushing device : № PCT/FI2006/050399 : date of filing 18.09.2006 : date of a publ. 29.03.2007 / Kinnunen K. ; applicant Tana Oy. – 24 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2007034038A1> (accessed: 14.04.2026).

129. Patent № WO 2008/106998A1 Germany, Int. Cl. B02C 4/30 (2006.01). Walzen-paar für hochdruck-walzenpressen zur druckzerkleinerung körnigen gutes : № PCT/EP2007/001990 : anmeldetag 08.03.2007 : offenlegungstag 12.09.2008 / Splinter C. ; anmelder KHD Humboldt Wedag GmbH. – 16 s. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2008106998A1> (accessed: 14.04.2026).

130. Patent № WO 2009/013276A1 Denmark, Int. Cl. B02C 4/28 (2006.01). Roller press with annular disc : № PCT/EP2008/059544 : date of filing 21.07.2008 : date of a publ. 29.01.2009 / Demuth L., Moller N. S. B. ; applicant FLSmidth A/S. – 9 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2009013276A1> (accessed: 05.04.2026).

131. Patent № WO 2009/154585A2 Turkey, Int. Cl. B02C 4/30 (2006.01), B02C 4/42 (2006.01), B02C 4/08 (2006.01). Screw effective mill and crusher : № PCT/TR2009/000077 : date of filing 22.06.2009

: date of a publ. 23.12.2009 / Oz B., Tac O. – 41 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2009154585A2> (accessed: 14.04.2026).

132. Patent № WO 2012/151641A1 Australia, Int. Cl. B02C 4/02 (2006.01), B02C 4/30 (2006.01). Crushing apparatus and method : № PCT/AU2012/000535 : date of filing 14.05.2012 : date of a publ. 15.11.2012 / De Swardt A. V., Sidney G. L. ; applicant Mclanahan Corporation PTY Ltd. – 25 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2012151641A1> (accessed: 14.04.2026).

133. Patent № WO 2013/006920A1 Australia, Int. Cl. B02C 4/02 (2006.01), B02C 4/30 (2006.01), B02C 4/08 (2006.01), B02C 4/32 (2006.01), B02C 4/28 (2006.01), B02C 4/00 (2006.01), B30B 9/20 (2006.01). Improvements in comminution and/or removal of liquid from a material : № 201820139226.3 : date of filing 13.07.2012 : date of a publ. 17.01.2013 / Scales P. J., Tordesillas A., Stickland A. D., Batterham R. J. ; applicant University of Melbourne. – 32 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2013006920A1> (accessed: 14.04.2026).

134. Patent № WO 2017/148513A1 Sweden, Int. Cl. B02C 4/08 (2006.01), B02C 4/30 (2006.01), B02C 4/42 (2006.01). Multi-roll material processing apparatus : № PCT/EP2016/054414 : date of filing 02.03.2016 : date of a publ. 08.09.2017 / Fischer U. ; applicant Sandvik Intellectual Property AB. – 27 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2017148513A1> (accessed: 14.04.2026).

135. Patent № WO 90/09241A1 Great Britain, Int. Cl. B02 C 4/00. Device for crushing pills and the like : № PCT/GB90/00209 : date of filing 09.02.1990 : date of a publ. 23.08.1990 / Green F. A. – 21 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO1990009241A1> (accessed: 14.04.2026).

136. Patent № WO 95/33932A1 Switzerland, Int. Cl. F16C 13/00. Walze : № PCT/CH95/00115 : anmeldedatum 23.05.1995 : veröffentlichungsdatum 14.12.1995 / Hirschberg S., Geiger A. ; anmelder Bühler. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO1995033932A1> (accessed: 14.04.2026).

137. Patent № WO 99/47263A1 Australia, Int. Cl. B02C 4/30, B02C 4/08, B02C 4/28. Improvements in roll crushers : № PCT/AU99/00148 : date of filing 12.03.1999 : date of a publ. 23.09.1999 / Velletri M., Velletri P. ; applicant CVR Holdings PTY Ltd. – 27 p. – Available at: <https://patents.google.com/patent/WO1999047263A1> (accessed: 14.04.2026).

138. Phasing out unabated coal: Current status and three case studies / International Energy Agency // OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development : website. – Paris, 2021. – 16 November. – 39 p. – Available at: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/11/phasing-out-unabated-coal_63255883/d6c4a08d-en.pdf (accessed: 05.04.2026).

139. Pit Viper 311 : Blasthole drills brochure : technical specifications. – 5 p. – Available at: <https://www.epiroc.com/content/dam/atlas-copco/mining-and-rock-excavation-technique/drilling->

solutions/documents/5849%201279%20PV-311%20US_Low%20res.pdf (accessed: 05.04.2026).

140. Pit Viper 351 : Single-pass blasthole drill rigs : technical specifications. – 11 p. – Available at: <https://www.epiroc.com/content/dam/epiroc/rotary-blasthole-drill-rigs/brochures/9863%200007%2001%20Pit%20Viper%20351%20Brochure%20English%20Web.pdf> (accessed: 05.04.2026).

141. Reye, T. Zur theorie der zapfenreibung / T. Reye // Der Civilingenieur. – 1860. – Bd. 4. – S. 235–255.

142. Roll Crusher : an overview / Science Direct (Elsevier). – Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/roll-crusher> (accessed: 05.04.2026).

143. Sandvik DR412i : machine specifications. – 10 p. – Available at: https://img.minexpodirectory.com/files/base/ascend/minex/document/2021/07/Sandvik_Booth_6212_DR412i_Brochure.60fb9fdc8bb5d.pdf (accessed: 05.04.2026).

144. Semi mobile crushing plant in Vostochny Kazakhstan (Commissioning 2009, Crushing capacity 4 250 t/h, Double roll crusher, Apron feeder) // TAKRAF : website. – Available at: <https://www.takraf.com/expertise/references/detail/semi-mobile-crushing-plant-in-kazakhstan/> (accessed: 05.04.2026).

145. Shakhvorostov, D. An energetic approach to friction, wear and temperature / D. Shakhvorostov, K. Pöhlmann, M. Scherge // Wear. – 2004. – Vol. 257, № 1-2. – P. 124–130. DOI: 10.1016/j.wear.2003.10.010.

146. Shifting head for shiftable dump conveyor, Kazakhstan // TAKRAF : website. – Available at: <https://www.takraf.com/expertise/references/detail/shifting-head-for-shiftable-dump-conveyor-in-kazakhstan/> (accessed: 05.04.2026).

147. SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook : 2 volume set / managing ed. R. C. Dunne ; eds.: S. K. Kawatra, C. A. Young. – Englewood : Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2019. – 2312 p. – ISBN 978-0-87335-385-4.

148. Spreaders // TAKRAF : website. – Available at: <https://www.takraf.com/portfolio/detail/spreaders/> (accessed: 05.04.2026).

149. Study of the properties of overburdened rocks from coal mining: overburden – as a raw material in the production of ceramic bricks / O. Vyshar, A. Stolboushkin, G. Rakhimova [et al.] // Metal Science and Heat Treatment. – 2023. – Vol. 25, № 107. – P. 86–94. DOI: 10.21660/2023.107.3771.

150. Surface mining dozers : D475A-8 : horsepower and operating weight // Komatsu : website. – Available at: <https://www.komatsu.com/en-us/products/equipment/dozers/surface-mining-dozers/d475a-8> (accessed: 05.04.2026).

151. Torres, M. A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls / M. Torres, A. Casali // *Minerals Engineering*. – 2009. – Vol. 22, № 13. – P. 1137–1146. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.04.011.

152. Zhironkina, O. Technological and intellectual transition to Mining 4.0 : A review / O. Zhironkina, S. Zhironkin // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, № 3. – Art. 1427. DOI: 10.3390/en16031427. – Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1427> (accessed: 05.04.2026).

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2831453

ВАЛКОВЫЙ ДРОБЯЩИЙ АГРЕГАТ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Господариков Александр Петрович (RU), Ефимов Денис Александрович (RU), Кусков Вадим Борисович (RU)*

Заявка № 2024129884

Приоритет изобретения **04 октября 2024 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **09 декабря 2024 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **04 октября 2044 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Акт об использовании результатов диссертации****ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ****«ЗД ПРОЕКТ»****ОГРН 1197847187691 / ИНН 7842174900 / КПП 784201001**

191036, г. Санкт-Петербург, ул. 7-я Советская, д. 30, лит. А, пом. 1Н, 4Н, пом. 2-4

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «ЗД ПРОЕКТ»

Сивко С.А.

Дата «10» декабря 2025 г.

**АКТ**

об использовании результатов

кандидатской диссертации

Ефимова Дениса Александровича

по научной специальности 2.8.8.– «Геотехнология, горные машины»

Комиссия в составе:

Председатель:

Заместитель генерального директора по СМК ООО «ЗД ПРОЕКТ» Горишняя А.А.;

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора по качеству ООО «ЗД ПРОЕКТ» Загорский С.В.;

Руководитель коммерческого отдела ООО «ЗД ПРОЕКТ» Бондарева Н.П.;

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации Ефимова Дениса Александровича на тему: «Повышение долговечности бандажей валковой дробилки карьерного дробильно-сортировочного комплекса с учетом процессов их абразивного изнашивания», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.8.8. – «Геотехнология, горные машины», использованы в производственной деятельности ООО «ЗД ПРОЕКТ» при разработке мероприятий для анализа абразивного изнашивания деталей машин и механизмов, а также повышению износостойкости последних.

Использование результатов работы:

- применение технологии трехмерного сканирования (система Atos) с целью построения цифровой профилометрии и получения высокоточной геометрической модели поверхности детали (на примере эталонных и отработанных образцов);
- интеграция 3D-сканирования, профилометрического анализа и капиллярной дефектоскопии в единую диагностическую процедуру для комплексной качественной и количественной (анализ изображений в программной среде Gwyddion) оценки степени износа и визуализации дефектных зон;
- применение разработанной расчетной формулы для оценки износа деталей машин и механизмов, основанной на гипотезе Арчарда-Рея-Хрущева, с учетом данных 3D-сканирования и параметров микрорельефа поверхности.

Использование результатов диссертации позволяет

- осуществлять регулярный высокоточный контроль степени износа рабочих поверхностей с применением цифровой 3D-профилометрии и оптической диагностики, что повышает точность оценки технического состояния не менее чем, на порядок 15 % по сравнению с традиционными методами визуального осмотра;
- сформировать достоверную базу данных по динамике изнашивания деталей, способствующую принятию обоснованных решений о сроках ремонта и замены оборудования;
- прогнозировать остаточный ресурс деталей машин и механизмов на основе принятых моделей, совмещающих экспериментальные данные и инженерные расчеты, что позволяет продлить срок службы деталей в среднем не менее, чем на 20 %;
- оптимизировать конструкцию и технологию изготовления изнашиваемых элементов за счёт выявления зон максимального износа и анализа причин их возникновения, что также способствует снижению неравномерности изнашивания до 50 %;


Внедрение указанных результатов обеспечивает комплексное повышение надёжности оборудования, увеличение межремонтных интервалов и снижение затрат на ремонтно-восстановительные мероприятия.


Внедрение указанных результатов осуществлялось в период 2025 г.

Председатель комиссии

Должность Зам. генерального директора по СМК  / Горишняя А.А. /

Члены комиссии:

Должность Зам. генерального директора по качеству  / Загорский С.В. /

Должность Руководитель коммерческого отдела  / Бондарева Н.П. /

